

ГОДИШНИК
НА
МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ
“СВ. ИВАН РИЛСКИ” – СОФИЯ

Том 56
СВИТЪК III: МЕХАНИЗАЦИЯ,
ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА МИНИТЕ

ANNUAL
OF
UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY
“ST. IVAN RILSKI” – SOFIA

Volume 56
PART III: MECHANIZATION, ELECTRIFICATION AND
AUTOMATIZATION IN MINE



Издателска къща “Св. Иван Рилски”
Publishing House “St. Ivan Rilski”
София, 2013
Sofia, 2013

ISSN 1312-1820

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

доц. д-р Павел Павлов – главен редактор
доц. д-р Диана Дечева – зам. главен редактор
доц. д-р Вяра Пожидаева – председател на редакционен съвет
доц. д-р Руслан И. Костов – председател на редакционен съвет
проф. д-р Венцислав Иванов – председател на редакционен съвет
доц. д-р Десислава Костова – председател на редакционен съвет
Александрина Пачалова – секретар

РЕДАКЦИОНЕН СЪВЕТ

на Свитък III – Механизация, електрификация и автоматизация на мините

доц. д-р Вяра Пожидаева – председател
проф. д-р Васил Ангелов
доц. д-р Ангел Зъбчев
доц. д-р Здравко Илиев
проф. д-р Иван Стоилов
гл.ас. д-р Николай Янев

СЪДЪРЖАНИЕ

Венелин Тасев Любен Тасев	Напрежения в ротора на центробежните сачмени съединители с водещ шестлопатен ротор	7
Иван Минин	Определяне на мощността на барабанна полуавтогенна мелница тип SAG 8,5 x 5,3 чрез методите на математическата статистика	12
Иван Минин	Методика за определяне коефициентът на устойчивост на хидравличните еднокорфови багери по време на работа	16
Христо Шейретов	Методика за изчисляване на самосвали за открити рудници с хидромеханична предавка	21
Христо Шейретов	Методика за изчисляване на самосвали за открити рудници с електромеханична предавка	27
Кристиян Цветков Юлиян Димитров Живко Илиев	Върху производителността на вибрационните челюстни трошачки	33
Юлиян Димитров Кристиян Цветков Живко Илиев	Математическо моделиране на процесите при ударно – вибрационните машини	38
Любен Тасев	Възстановяване на механичната част на единичното задвижване на електролокомотив K10	42
Кристина Илиева- Стойчева	Абразивно износване на елементи от минната механизация	48
Кристина Илиева- Стойчева	Подобряване на износоустойчивостта на елементи от минната механизация чрез нанасяне на покрития върху контактните им повърхнини	52
Малина Вацкичева Михаил Вълков	Съществуващи конструкции на многоцелеви шредери и насоки за усъвършенстването им	55
Антони Николае Боркози Илие Козма Василе	Система за мониторинг на температурата и контрол в шест измервателни пункта, осъществена с микроконтролер PIC16F877A	59
Здравко Илиев Диана Ташева	Повишаване на бързодействието на системите за програмно управление на насипообразуватели чрез използване на математични модели	63
Владимир Перпелицев Иван Стоилов	Анализ на рудничните електрически мрежи средно напрежение с резистивно заземена неутрала	67
Красимир Велинов	Пускови характеристики на светлинни източници	73
Стефан Стефанов Иван Проданов	Сигналните графи и използването им за решаване на въпроси от електробезопасността в трифазни електрически вериги	78
Стефан Стефанов Иван Проданов	Разпределение на токовете с нулева последователност по дължината на кабелна линия при еднофазно земно съединение	82
Милен Дренков Стефан Чобанов Драголюб Костов Менто Ментешев	Синтез на апарат за контрол на заземителния контур в IT мрежи НН, съдържащи висши хармоници	86

Румен Исталиянов Георги Костов Димо Чолаков	Експериментално изследване на висшите хармоници в електрическата мрежа на МЕМФ при МГУ „Св. Ив. Рилски“	90
Ради Пипев	Оценка на допустимите капиталови вложения за внедряване на система за управление на улични осветителни уредби при предварително определен срок на нейното откупуване	93
Ангел Зъбчев Ради Тенев	Контрол на изолацията в руднични комбинирани мрежи	97
Мила Илиева-Обретенова	Транзистор с един електрон: приложения и проблеми	100
Мила Илиева-Обретенова	Аналитична дискусия върху транзистор с един електрон	104
Стефан Чобанов Менто Ментешев	Фактори, характеризиращи енергийната ефективност на електрически пещи	109
Стефан Чобанов Милен Дренков Менто Ментешев	Експериментално изследване и анализ на висшите хармоници в руднична мрежа НН с честотно управляеми двигатели	113
Петър Петров Георги Велев Красимир Иванов Ангел Зъбчев Ромео Александров	Дългосрочно изследване на устойчивостта на параметрите на заземители с електропроводима бетонна обмазка	120
Петър Петров	Изследване степента на корозия на заземителни електроди с помощта на трансформаторен датчик	125
Теодора Христова	Предимства и недостатъци на известните изолации. Критерии и класификация за избор на изолация според риска за възникване на корозия	128
Станко Нешев	Събиране и преобразуване на енергия чрез автономни миниатюрни електрозахранвания	133
Владимир Петков	Определяне на енергийната характеристика на промишлена система Обогастителна фабрика на “ГОРУБСО-КЪРДЖАЛИ” АД на база статистически данни и използването ѝ при прогнозиране на специфичния разход	138
Миряна Христова	Минимална комутативност на композиции от оператори от смесен тип	143
Тодор Върбев	Определяне на положението и стъпката на придвижване на подвижни руднични подстанции	148
Николай Переновски Антоанета Янева Кристиан Цветков Любен Тасев	Математически модел на аеродинамичните процеси в изправящ апарат на диагонален вентилатор	151
Николай Переновски	Теоретични основи на методика за оразмеряване на работно колело на диагонален вентилатор за местно проветряване	154
Катарина Д. Живкович	Архимед и Архимедовата константа	157
Oleg B. Shonin Vladimir S. Pronko	Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive	163

CONTENTS

Venelin Tasev Lyuben Tasev	Stresses in the rotor of a centrifugal ball joint with leading sixpath rotor	7
Ivan Minin	Determination of the power of tumbling sag mill type SAG 8,5 x 5,3 by methods of mathematical statistics	12
Ivan Minin	Methodology for determination the coefficient of resistance of hydraulic shovel dredgers while in use	16
Hristo Sheiretov	Methodology for the calculation of mining dump trucks with hydromechanical transmission	21
Hristo Sheiretov	Methodology for the calculation of mining dump trucks with hydromechanical transmission	27
Kristian Tsvetkov Julian Dimitrov Zhivko Iliev	On the capacity of the vibrational jaw crusher	33
Julian Dimitrov Kristian Tsvetkov Zhivko Iliev	Matemathical modeling of processes in shock – vibration machines	38
Lyuben Tasev	Restoration of the mechanical parts of the single drive of the electric locomotives K10	42
Kristina Ilieva- Stoycheva	Abrasion wear of elements from mining equipment	48
Kristina Ilieva- Stoycheva	Enhance wear resistance of elements of mining equipment through coating of their contact surfaces	52
Malina Vatskicheva Mihail Valkov	Existing structures of multipurpose crushers and guidelines for processing	55
Antonie Nicolae Borcosi Ilie Cozma Vasile	Acquisition system for temperature monitoring and control in six measurement points made using PIC16F877A microcontroller	59
Zdravko Iliev Diana Tasheva	Mathematical models for increase the fast response of program control systems of spreaders	63
Vladimir Perpelitsev Ivan Stoilov	Analysis of middle voltage electrical grids with resistance earthed neutral in mines	67
Krasimir Velinov	Starting characteristics of the light sources	73
Stefan Stefanov Ivan Prodanov	Signal graphs and their implementation for resolving issues regarding electrical safety in three-phase electrical circuits	78
Stefan Stefanov Ivan Prodanov	Allocation of the currents with zero sequence along the cable line in single-phase ground faults	82
Milen Drenkov Stefan Chobanov Dragolub Kostov Mento Monteshev	Synthesis of the devices for control of the grounding contour in LV IT networks, which contains high harmonics	86

Rumen Istalianov Georgi Kostov Dimo Tsholakov	Experimental study on harmonics in the electricity networks in Faculty of mining electromechanics to University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"	90
Radi Pipev	Assessment of the allowable capital investments for the implementation of a management system for street lighting systems in a predefined period of its redemption	93
Angel Zabchev Radi Tenev	Control of isolation of mining combined networks	97
Mila Ilieva-Obretenova	Single electron transistor: applications and problems	100
Mila Ilieva-Obretenova	Analytical discussion of single electron transistor	104
Stefan Chobanov Mento Monteshev	Factors which characterize the energy efficiency of the electric ovens	109
Stefan Chobanov Milen Drenkov Mento Monteshev	Experimental study and analysis of high harmonics in the LV mine network with frequency-controlled motors	113
Petar Petrov Georgi Velev Krasimir Ivanov Angel Zabchev Romeo Aleksandrov	Long term research on the stability of parameters of conductive concrete encased grounding electrodes	120
Petar Petrov	Corrosionong rate study of grounding electrodes by means of a transformer sensor	125
Teodora Hristova	Advantages and disadvantages of known insulations. Criteria and classification for selection of the insulation in accordance to risk assessment for occurrence of corrosion title	128
Stanko Neshev	Collection and energy conversion through autonomous miniature power supplies	133
Vladimir Petkov	Defining the power characteristic of the industrial system enrichment plant "GORUBSO-KARDZHALI" PLC based on statistical data and its use in predicting the specific cost	138
Miryana Hristova	Minimal commutativity of compositions of operators of mixed type - i	143
Todor Varbev	Determination of location and shifting phase of mobile substation	148
Nikolay Perenovski Antoaneta Yaneva Kristian Tzvetkov Luben Tasev	Mathematical model of flow processes in outlet vanes of mixed flow fan	151
Nikolay Perenovski	Theoretical method for sizing a diagonal fan's impeller for local ventilation	154
Katarina D. Zivkovic	Archimedes and Archimedes' constant	157
Oleg B. Shonin Vladimir S. Pronko	Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive	163

НАПРЕЖЕНИЯ В РОТОРА НА ЦЕНТРОБЕЖНИТЕ САЧМЕНИ СЪЕДИНИТЕЛИ С ВОДЕЩ ШЕСТЛОПАТЕН РОТОР

Венелин Тасев, Любен Тасев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", катедра „Механизация на мините“ 1700 София

РЕЗЮМЕ. Статията разглежда силите, които се пораждат във въртящите се части на ротора. Определят се динамичните и статични натоварвания върху отделните елементи – лопатки, главина, опорни дискове. Въз основа на направения анализ е предложена методика за оптималното им оразмеряване.

STRESSES IN THE ROTOR OF A CENTRIFUGAL BALL JOINT WITH LEADING SIXPATH ROTOR

Venelin Tasev, Lyuben Tasev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The article discusses the forces that are generated in the rotating parts of the rotor. The dynamic and static loads on individual components - paddles, hub, bearing discs are displayed. Method for optimal sizing is proposed based on the analysis.

Центробежните сачмени съединители (ЦСС) са фрикционни механизми, чийто изходен въртящ момент се формира от силите на триене между сачмения пълнеж и активните повърхности. Свободно насипаните сачми се намират в камерите образувани от междуплатковото пространство на ротора и стените на вътрешните повърхности на съединителя. При разглежданите ЦСС роторът е водещ, т.е. той е свързан непосредствено с двигателя. С неговото включване роторът се привежда в движение. Той тласка сачмите, които под действието на центробежните сили се подреждат в плътен цилиндричен слой, трият се в активните повърхности и предават на водимата част определен въртящ момент. При това върху лопатките на ротора действат определени сили, които създават напрежения в него. Тяхното определяне е обект на настоящата статия.

Изложение

Силата, която действа на една лопатка в установен режим се определя от момента, който развива ЦСС, броя на лопатките и тяхната дължина. В тази статия се разглежда ЦСС с шестлопатен ротор, така че силата действаща на една лопатка N_L е:

$$N_L = \frac{M_c}{6} \cdot \frac{1}{\ell_L} = \frac{M_c}{6} \cdot \frac{1}{R_a - R_{гЛ}}, N; \quad (1)$$

където M_c е моментът развиван от ЦСС, Nm;

ℓ_L - дължината на лопатката, m;

$R_{гЛ}$ - радиусът на главината, m;

R_a - активният радиус на ЦСС, m;

Така приетото условие (1) съответства на предаване на целия въртящ момент чрез цилиндричната част от ЦСС. В някои по-стари конструкции ЦСС, част от въртящия момент се предава и чрез капците. Това променя до известна степен силовата картина, като води до известно намаляване на напрежението в лопатката. Тук то се пренебрегне по следните съображения:

1. Моментът предаван чрез страничните капаци не надхвърля 14%;
2. Моментът предаван чрез капците намалява с трета степен на радиуса, така че основното усилие се явява при най-големия радиус.
3. Приемането на зависимост (1) води до незначително увеличаване на напреженията в лопатките, но значително опростява тяхното определяне.

В процеса на ускоряване на двигателя, респективно на ротора, върху лопатките действа и динамичният момент:

$$M_{дин} = \frac{d\omega_1}{dt} (J_c + J_1), Nm. \quad (2)$$

При пускане на двигателя, върху ротора въздействат два момента - този създаден от съединителя и моментът предизвикан от инерционните сили. За да добием представа за размера на последния, ще направим следните приемливи допускания:

1. Динамичният момент в процеса на ускоряване на двигателя е постоянен и равен на пусковия на двигателя.
2. Пусковият момент на асинхронния двигател е два пъти по-голям от номиналния.

3. Инерционният момент на АД е равен на този със сачмите на ЦСС.

При тези условия може да запишем:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{дв} - M_c}{J_c + J_{дв}} = \frac{2M_H}{2J_c} = \text{const} \quad (3)$$

$$M_{сач} = \frac{d\omega}{dt} J_c = \frac{M_H}{J_c} J_c = M_H \quad (4)$$

Вижда се, че при приетите условия динамичният момент върху лопатките е равен на номиналния момент на двигателя, т.е. стойността му не е за пренебрегване.

Точната стойност на ускорението $\frac{d\omega}{dt}$ може да се определи по зависимостта:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\sum J} [M_{дв}(\omega) - K\omega^2], \text{rad/s}^2. \quad (5)$$

То зависи както от параметрите на двигателя така и от натоварването на ЦСС и инерционния момент на системата. Сумарният момент, които действа върху лопатката, се определя от сумата на $M_{дин}$ и $M_{ст}$. Докато първият остава почти постоянен в пусковия процес, то вторият нараства с квадрата на входната ъглова скорост. Когато двигателят достигне критичната си скорост ускорението му рязко спада и динамичния момент е равен на нула (виж фиг 1).

Максимална стойност на сумата от двата момента се получава при критична скорост на двигателя:

$$\sum M_{max} = M_{дин}(\omega_{кр}) + M_c(\omega_{кр}), \text{Nm}; \quad (6)$$

Инерционният момент на сачмите J_c в една камера се определя съгласно фиг. 2 и известната зависимост:

$$J_c = \int_{R_a}^{R_1} r^2 dm, \text{kgm}^2; \quad (7)$$

Елементарната маса dm съгласно фигура 2 е:

$$dm = r \ell \rho \psi \left(\frac{\pi}{3} - \frac{b}{r} \right) dr, \text{kg},$$

където r е текущият радиус;

ℓ - ширината на лопатката, m;

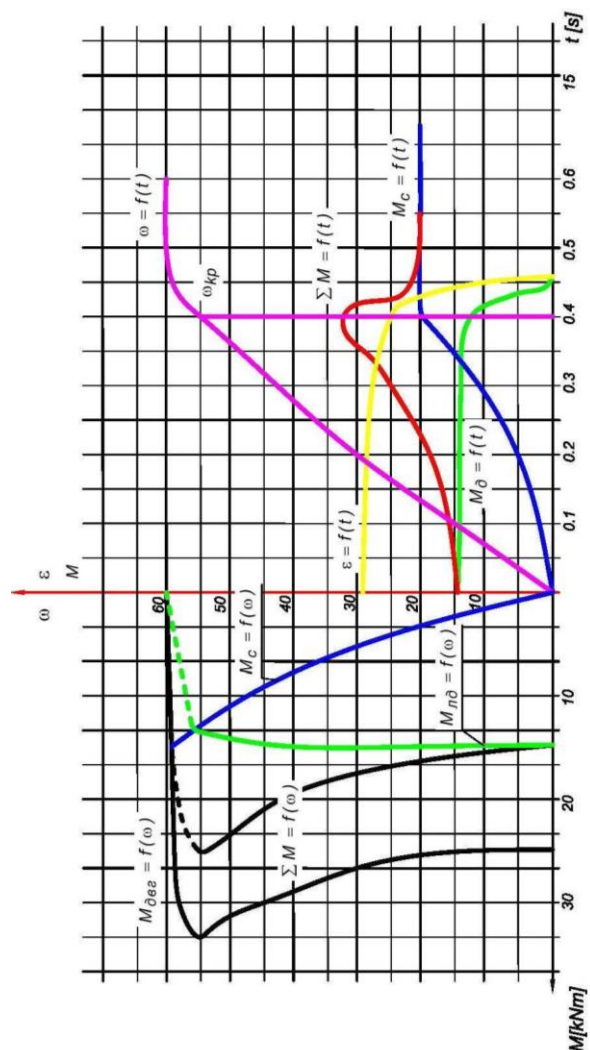
ρ - плътността на стоманата, kg/m^3 ;

ψ - коефициентът на запълване на сачмения пълнеж 0.5-0.55;

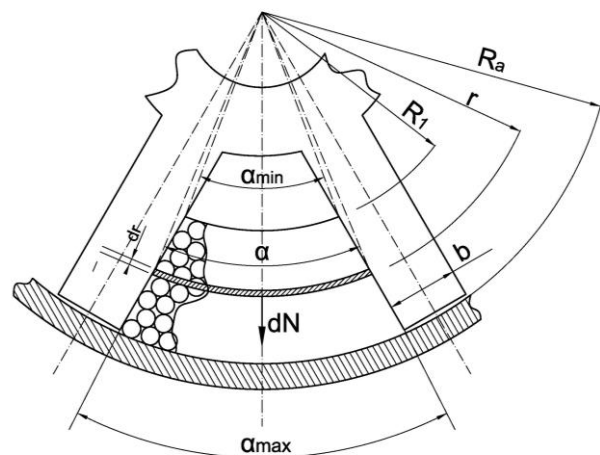
b - дебелината на лопатката, m.

След заместване и интегриране за инерционния момент на сачмите получаваме

$$J_c = \frac{\pi}{12} R \rho \psi (R_a^4 - R_1^4) - \frac{1}{3} \rho \ell b (R_a^3 - R_1^3), \text{kgm}^2. \quad (8)$$



Фиг. 1. Изменение на моментите в пусковия процес



Фиг. 2. Сили действащи сачмения пълнеж

Като въведем коефициентите

$$K_1 = \frac{b}{R_a} \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{R_1}{R_2},$$

съответно получаваме:

$$J_c = \frac{\pi}{12} \rho \psi \ell R_a^4 \left[(1 - K_2^4) - 4K_1(1 - K_2^3) \right], \text{kgm}^2; \quad (9)$$

Инерционният момент на лопатките J_L се определя съгласно формата на Шнайдер:

$$J_L = J'_L + m_1 a^2, \text{kgm}^2, \quad (10)$$

където J'_L е собственият инерционен момент на лопатката;

m_1 - масата на лопатката, kg;

a - разстоянието от масовия център на лопатката до оста на въртене.

$$J_L = \rho b \ell h \left[\frac{b^2 + h^2}{12} + \left(\frac{R_a + R_{гп}}{2} \right)^2 \right], \text{kgm}^2; \quad (11)$$

Моментът, който се предава на лопатката, в процес на ускоряване на двигателя се определя от зависимости:

$$M_1 = J_c \varepsilon, \text{kgm}^2 \quad \text{и} \quad M_2 = J_L \varepsilon, \text{kgm}^2$$

Момент върху лопатката получен от натоварването на сачмите се получава от допускането, че сачменият пълнеж е напълно втвърден и равномерно разпределен.

$$M_{or_1} = \frac{2M_1}{R_a - R_1} \left(R_a - R_{гп} + \frac{R_a - R_1}{2} \right), \text{Nm}; \quad (12)$$

След известни преобразования се получава:

$$M_{or_1} = M_1 \left(1 - \frac{2R_{гп}}{R_a} \frac{1}{1 + K_2} \right), \text{Nm}; \quad (13)$$

Огъващият момент върху лопатките, получен при ускорение на двигателя е равен на момента създаден от собствения и инерционен момент.

Ускорението ε , което получава двигателя, заедно с ротора на ЦСС, се определя от зависимостта:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{M_{дв}(\omega) - M_c(\omega)}{J_1}, \text{rad} / \text{s}^2; \quad (14)$$

където $M_{дв}(\omega)$ е моментът, който развива двигателя при определена ъглова скорост, Nm;

$M_c(\omega)$ - моментът на ЦСС при определена ъглова скорост;

J_1 - сумарният инерционен момент на всички присъединени директно към вала въртящи части, kgm^2 ;

$$J_1 = J_{дв} + J_{сач} + J_L + J_{гп}, \text{kgm}^2; \quad (15)$$

където

$J_{дв}$ е инерционният момент на двигателя, kgm^2 ;

$J_{гп}$ - инерционният момент на главината на ротора, kgm^2

$$J_{гп} \approx \frac{\rho \pi \ell_{гп}}{2} (R_{гп}^4 - R_{вал}^4), \text{kgm}^2, \quad (16)$$

където $R_{гп}$ е радиусът на главината, m;

$R_{вал}$ - радиусът на вала на двигателя, m;

$\ell_{гп}$ - дължината на главината, m;

Моментът, който развива съединителя се определя по зависимостта

$$M_c(\omega) = k \omega^2, \text{Nm}; \quad (17)$$

където k е конструктивният коефициент на ЦСС и се определя от неговите размери и напълването на камерите със сачми Nm / s^2 .

Моментът на съвременните асинхронни двигатели се апроксимира от две криви. Едната от нулевата му скорост до критичната, а втората от критичната до синхронната. Подробно това е описано в (Тасев, 1990).

За първия участък ($0 \leq \omega \leq \omega_{кр}$) най често се използва формулата:

$$M_{дв} = a^2 \omega^2 + b \omega + M_n, \text{Nm};$$

където M_n е пусковият момент на двигателя, Nm.

Коефициентите a и b се определят по зависимости:

$$a = \frac{\sqrt{M_{кр} - M_m} + \sqrt{M_n - M_m}}{\omega_{кр}} \quad (18)$$

$$b = -2a \sqrt{M_n - M_m}$$

където: M_m е минималният момент на двигателя, Nm;

$M_{кр}$ - критичният (максималният) момент на двигателя.

За втория участък $\omega_{кр} \leq \omega \leq \omega_c$, се използват зависимости [1]:

$$M_{дв} = M_{кр} - P(\omega - \omega_{кр})^2, \text{Nm};$$

$$P = \frac{M_{кр} - M_n}{(\omega_n - \omega_{кр})^2}, \text{nm} / \text{s}^2; \quad (19)$$

Изменението на ъгловата скорост $\omega(t)$, ускорението $\varepsilon(t)$ и моментът развиван от ЦСС- $M(t)$, във времето се изразяват със зависимости:

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \frac{D}{2H} \operatorname{th} \left(\operatorname{arth} \frac{B}{D} - \frac{Dt}{2J} \right) - \frac{B}{2A}, 1/s; \\ \varepsilon(t) &= D^2 \left[4AJ \operatorname{ch}^2 \left(\operatorname{arth} \frac{B}{D} - \frac{Dt}{2J} \right) \right], 1/s^2; \\ M_c(t) &= k \left[\frac{D}{2A} \operatorname{th} \left(\operatorname{arth} \frac{B}{D} - \frac{Dt}{2J} \right) - \frac{B}{2A} \right]^2, \text{Nm};\end{aligned}\quad (20)$$

Изменението на горните величини е показано на фиг. 1. На същата фигура са показани и стойностите на сумарните величини, когато действат върху лопатката, а те са моментът M_c развиван от ЦСС и моментът създаден от инерционните сили M_{Π} и M_e :

$$\begin{aligned}\Sigma M &= M_c + M_{\Pi} + M_e = k\omega_1 + \frac{d}{\omega} J_{\Pi} + \frac{d}{d\omega} J_c = \\ &= (J_{\Pi} + J)(M_{\text{дв}}(\omega - M_c\omega)) = \\ &= (J_{\Pi} + J_c) \left[(a^2 - k)\omega^2 + b\omega + M_{\Pi} \right]\end{aligned}\quad (21)$$

Вижда се, че сумарният моментът ΣM расте с нарастване на ъглова скорост и достига своя максимум при скорост на близка до критичната. Математичният анализ показва, че точните стойности на скоростта ω при, която определя по зависимостта:

$$\omega_{m=\max} = \frac{P\omega_{\text{кр}}}{P + k - k \frac{J_{\Pi} + J_c}{J}}, \text{rad/s}; \quad (22)$$

където J е сумарният инерционен момент на вала на двигателя, kgm^2 ;
 P – константа на параболата, която апроксимира кривата на

$$P = \frac{M_{\text{кр}}}{(\omega_{\text{кр}} - \omega_H)^2}, \text{Nms}^2 \quad (23)$$

Тъй като $P \rightarrow k$, то с достатъчна точност може да се приеме, че:

$$\omega_{m=\max} = \omega_{\text{кр}} \quad (24)$$

Напряженията на огъване на лопатката при $\omega = \omega_{\text{кр}}$, ще бъдат:

$$M_{\text{ог}} = k\omega_{\text{кр}}^2 \left(1 - \frac{R_{\text{гп}}}{R_a} \right) \quad (25)$$

$$\sigma_c = \frac{M_{\text{ог}}}{6W_1} = \frac{k\omega_{\text{кр}}^2}{b^2\ell} \left(1 - \frac{R_{\text{гп}}}{R_a} \right), \text{Pa} \quad (26)$$

2. От инерционните сили на сачмите. Огъващият момент се определя от ускорението на двигателя при $\omega = \omega_{\text{кр}}$ и инерционният момент J_c на сачмения сегмент:

$$\begin{aligned}M_{\text{ог}\Pi} &= \varepsilon_{\text{кр}} J = \frac{M_{\text{кр}} - k\omega_{\text{кр}}^2}{J} J_c \\ \sigma_{\Pi} &= \frac{M_{\text{ог}\Pi}}{W_{\Pi}} = \frac{6J_c}{Jb^2\ell} (M_{\text{кр}} - k\omega_{\text{кр}}^2) \left(1 - \frac{2R_{\text{гп}}}{R_a} \frac{1}{1+k_2} \right)\end{aligned}\quad (27)$$

3. От инерционния момент на самата лопатка J_{Π}

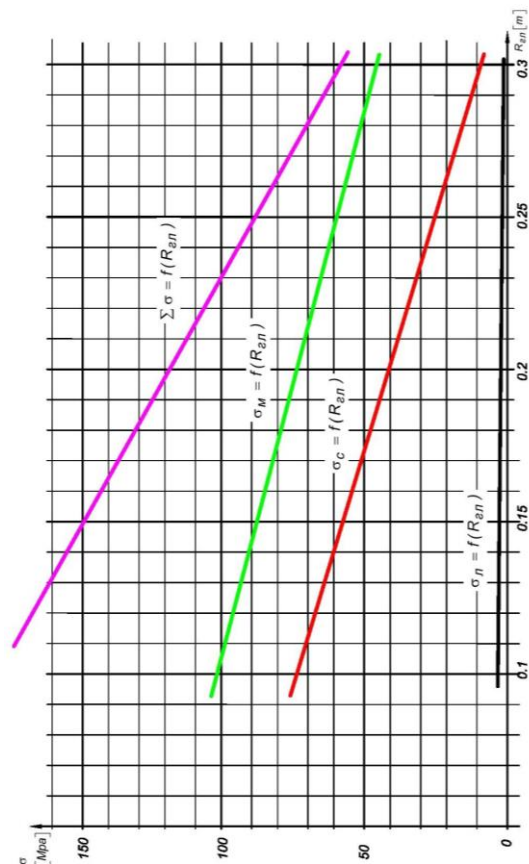
$$M_{\text{ог}\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{2R_a} (R_a - R_{\text{гп}}) \quad (28)$$

$$M_{\Pi} = \varepsilon J_{\Pi} = \frac{M_{\text{кр}} - k\omega_{\text{кр}}^2}{J} J_{\Pi}, \text{Nm} \quad (29)$$

$$M_{\text{ог}} = \frac{J_{\Pi}}{2JR_a} (R_a - R_{\text{гп}}) (M_{\text{кр}} - k\omega_{\text{кр}}^2), \text{Nm} \quad (30)$$

$$\sigma_{\text{ог}} = \frac{M_{\text{ог}}}{W_{\Pi}} = \frac{6J_{\Pi}}{2JR_a b^2\ell} (R_a - R_{\text{гп}}) (M_{\text{кр}} - k\omega_{\text{кр}}^2), \text{Pa} \quad (31)$$

От изведените зависимости се вижда, че огъващите напряжения намаляват с квадрата на дебелината на лопатката. Това е напълно разбираемо, само че с увеличаване дебелината на лопатката, се намалява количеството на активния сачмен пълнеж и се увеличава инерционния момент на водимата част на ЦСС. По тези причини се търси възможност лопатките да останат по-тънки.



Фиг. 3. Напряжения в отделните елементи на ротора

На фиг.3 е показано изменението на напряжението при различни стойности на главината на ротора за ЦСС 800/0.6. Видно е, че с увеличаване на $R_{\text{гп}}$ напряженията

намаляват. Нарастването на главината от конструктивна, технологична и стойностна страна също е неприемливо. По тази причина в съвременните ЦСС се поставят опорни дискове. Направените число-аналитични изследвания показват, че при два диска, поставени на разстояние 0.5ℓ (в средата на главината), напреженията в лопатката са малко по-големи от тези при плътна главина. Това решение позволява значително олекотяване на ротора, а също така е много по-технологично. Диаметърът на дисковете най-често се приема равен на половината от активния диаметър, а дебелината на лопатката се определя при $\sigma_{\text{доп}} \leq 80 \text{ МПа}$. Желателно е те да се изпълняват от високовъглеродна стомана.

За инженерни пресмятания може да се приеме, че максималния момент, M който се натоварва лопатката е

равен на максималния момент, който развива двигателя, което е много близко до повечето случаи. При това:

$$\sigma_{\text{ог}} = \frac{M_{\text{кр}}}{6W_{\text{л}}}$$

Съединители с големи мощности с опорни дискове се изработват от десетки години и показват значителна експлоатационна сигурност. За тяхното пресмятане се използват горните зависимости.

Литература

Тасев, В.П., 1990. *Възможности за приложение на центробежните сачмени съединители с водещ шестлопатен ротор в задвижване на машините от минно-добивния отрасъл*, Дисертация, ВМГИ.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОЩНОСТТА НА БАРАБАННА ПОЛУАВТОГЕННА МЕЛНИЦА ТИП SAG 8,5 X 5,3 ЧРЕЗ МЕТОДИТЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКАТА СТАТИСТИКА

Иван Минин

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: minin@dir.bg

РЕЗЮМЕ. Изследвани са параметрите влияещи на мощността, изразходвана от полуавтогенна мелница, работеща в условията на „Челопеч Майнинг“ – АД. Направен е пасивен факторен експеримент, като резултатите от него са обработени с методите на математическата статистика. Получен е адекватен математичен модел чрез който може да бъде определена мощността на двигателя на мелницата.

DETERMINATION OF THE POWER OF TUMBLING SAG MILL TYPE SAG 8,5 X 5,3 BY METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

Ivan Minin

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: minin@dir.bg

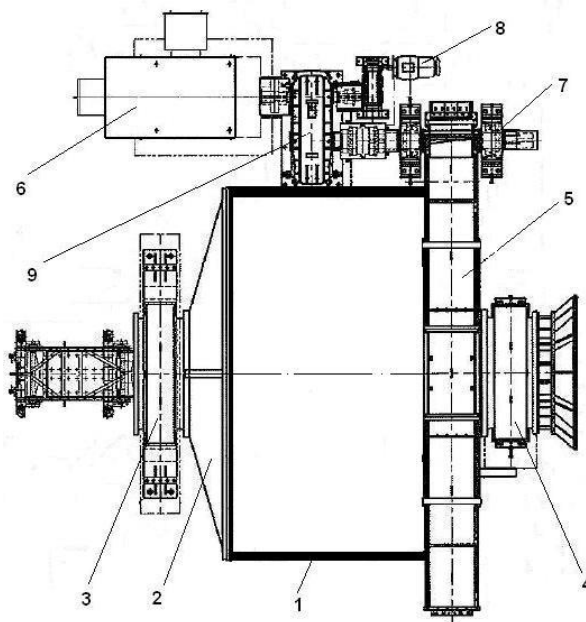
ABSTRACT. The parameters affecting the consumed power of SAG mill operating in "Chelopech Mining" were examined. There was made a passive factorial experiment, the results of which are processed through the methods of mathematical statistics. An adequate mathematical model is received by which the engine power of the mill can be determined.

Състояние на проблема

Методиките за определяне на мощността на барабанните мелници дават сравнително точни резултати при изчисляването на мощността на двигателя на топковите и прътови барабанни мелници. Обаче, при изчисляване на мощността на двигателите на автогенните и полуавтогенните барабанни мелници, те дават резултати различаващи се съществено от действителните. Това се дължи вероятно на факта, че много съществени параметри влияещи на изразходваната мощност, остават неопределени и не могат да бъдат предвидени. Такива са едрината на рудните късове в барабана на мелницата, количеството на топките, средната плътност на пълнежа и др.

При определяне на мощността на двигателя на полуавтогенна барабанна мелница, работеща в условията на „Челопеч Майнинг“-АД, е използвана една от най-разпространените методики за определяне на мощността на двигателите на барабанните мелници.

Мелница тип METSO - SAG 8,5 X 5,3 (Фиг. 1) се състои от барабан 1, със страничните дъна (капази) 2, на които са монтирани шийките лагерувани на плъзгащите лагери 3 - заден и 4 - преден. Двигателят 6 задвижва чрез съединител редуктора 9, който е куплиран на вал-зъбното колело 7, зацепено със зъбният венец 5. Задвижването е оборудвано и с помощен двигател 8 и спирачка използвани при техническо обслужване и ремонт на мелницата.



Фиг. 1 Общ изглед на мелница SAG 8,5 X 5,3

Методиката за определяне на мощността (Цветков, 1976; Минин, 2012) на двигателя на мелницата води до получаването на следните резултати:

1. Светъл диаметър на барабана
$$D_1 = D_8 - 2\delta = 8m; \quad (1)$$

където:

$D_{\delta} = 8,5m$ е диаметърът на барабана;
 $\delta = 0,25m$ - дебелината на облицовката.

2. Критична ъглова скорост на барабана

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{2g}{D_1}} = 1,566 \text{ rad / s} \quad (2)$$

където:

g - земното ускорение;

$D_1 = 8m$ - светлият диаметър на барабана.

3. Действителна ъглова скорост на барабана:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 1,088 \text{ rad / s}, \quad (3)$$

където $n = 10,4 \text{ min}^{-1}$ е честотата на въртене на барабана.

4. Относителна ъглова скорост на барабана

$$\psi = \frac{\omega}{\omega_{кр}} = 0,7 = 70\%. \quad (4)$$

Получената стойност на критичната ъглова скорост на барабана показва, че мелницата работи в каскаден скоростен режим.

5. Работен обем на мелницата

$$V_1 = \pi R_1^2 \cdot L = 273m^3 \quad (5)$$

където:

$R_1 = \frac{D_{\delta} - 2\delta}{2}$ е радиусът на барабана без облицовката;
 L - дължината на барабана.

6. Маса на пълнежа на мелницата

$$M_{CM} = M_T + M_P = M_T + \rho_P \cdot V_1 \cdot \varphi = 232000kg \quad (6)$$

където: M_P, kg е масата на рудата в мелницата;

$M_T = 30000kg$ е масата на топките в барабана на мелницата;

$\rho_P = 2700kg / m^3$ - плътността на рудата;

$\varphi = 0,35$ - коефициентът на запълване на барабана на мелницата.

7. Тегло на смилащата и смилана среда

$$G_{CM} = g \cdot M_{CM} = 2280 \cdot 10^3 N. \quad (7)$$

8. Тегло на барабана

$$G_{\delta} = g \cdot M_{\delta} = 5830 \cdot 10^3 N, \quad (8)$$

където $M_{\delta} = 583000kg$ е масата на барабана на мелницата с включени в него всички въртящи се маси.

9. Мощност на празен ход

$$N_{пр.х.} = 0,5 \cdot \mu \cdot G_{\delta} \cdot \omega \cdot d \approx 64kW, \quad (9)$$

където:

$\mu = 0,01$ е коефициентът на триене в лагерите;

G_{δ} - теглото на барабана;

ω - действителната ъглова скорост;

$d = 2m$ - диаметърът на шийката на лагерите на мелницата.

10. Допълнителна мощност

$$N_{дон.} = 0,5 \cdot \mu \cdot G_{CM} \cdot \omega \cdot d \approx 25kW, \quad (10)$$

където G_{CM} е теглото на смилащата среда.

11. Мощност на издигане на топките и смилащата среда

$$N_G = \rho_{CM} \cdot g \cdot L \cdot \omega_{кр} \cdot \Psi^3 \cdot R_1^3 \left[(1 - k_2^4) - \frac{2}{3} \Psi^4 (1 - k_2^6) \right] = 2331kW \quad (11)$$

където:

$\rho_{CM} \approx 3725kg / m^3$ е плътността на смилащата среда. Тя се определя като усреднена стойност от плътността на топките и плътността на рудата.

Ψ - относителната ъглова скорост на барабана;

$k_2 = 0,551$ - относителният радиус за най-вътрешния слой от топките и едри късове руда.

Стойности на относителният радиус $K_2 = R_2 : R_1$ в зависимост от параметрите ψ и φ са показани на таблица 1.

Таблица 1

Коефициент на запълване на φ , %	Стойности на K_2 при относителна скорост ψ , %			
	65	70	75	80
30	0,527	0,635	0,700	0,746
35	-	0,511	0,618	0,683
40	-	0,237	0,508	0,606
45	-	-	0,288	0,506
50	-	-	-	0,332

12. Мощност на двигателя за задвижване на мелницата

$$N_{дв.} = \frac{N_{пр.х.} + N_{дон.} + N_G}{1000 \cdot \eta_{\mu}} \approx 3100kW, \quad (13)$$

където:

$N_{пр.х.}$ е мощността на празен ход;

$N_{дон.}$ - допълнителната мощност;

N_G - мощността на издигане на топките и едрите късове руда;

$\eta_{\mu} = 0,78$ - механичен К.П.Д. на задвижването.

Полученият резултат значително се различава от инсталираната мощност на мелницата, която е $5400kW$.

Получената значителна разлика между изчислената и реално инсталираната мощност на двигателя на полуавтогенната барабанна мелница показва, че методиките за определяне на мощността не могат да бъдат използвани за автогенните и полуавтогенни барабанните мелници. Единствения начин да бъде определена мощността на подобен тип машини, е създаването на точен адекватен математичен модел на базата на многофакторен

експеримент, който чрез методите на подобие да бъде използван за определяне на мощността на всякакви по типоразмер полуавтогенни мелници.

Провеждане на пасивен факторен експеримент

Целта на проведеното изследване е да се опише с математически средства мощността на двигателя чрез провеждане на пасивен факторен експеримент. За целта са направени измервания върху мелница тип SAG 8,5 x 5.3 работеща в условията на "Челопеч Майнинг" - АД.

Като управляващи фактори в изследването са определени следните параметри:

1. Маса на пълнежа на мелницата $M_{CM,t}$. Този параметър се измерва от товарна клетка посредством тензометрични датчици, монтирани в задния лагер на мелницата.

2. Обороти на двигателя на мелницата min^{-1} . Измерванията са направени посредством скоростен датчик за измерване на оборотите на двигателя на .

3. Вътрешен диаметър на барабана на мелницата D, m . Този параметър зависи от износването на облицовките и се определя посредством измервания с лазерна рулетка в 6 места от цилиндъра на барабана като се изчислява средно аритметична стойност.

След направените измервания са получени следните резултати, показани в таблица 2.

Таблица 2

№	X_1 D, m	X_2 M_{CM}, t	X_3 $n_{min^{-1}}$	Y_1 P, kW
1.	8,308	106,17	1069,5	5930
2.	8,308	105,7	1047,7	5774,4
3.	8,308	105,4	1052,3	5781
4.	8,394	103,1	1069	5775,8
5.	8,394	103	1069	5756,8
6.	8,394	104	1090	6189
7.	8,405	103,8	1090,4	6176
8.	8,405	103	1090,6	6166
9.	8,1	110,6	1069,5	5019,1
10.	8,1	110,4	1062,5	5014,7
11.	8,1	110,2	1038,3	5010,6
12.	8,15	113,1	1004,3	5152,1
13.	8,15	113,1	1004,3	5077,6
14.	8,15	113,1	1004,4	5100,6
15.	8,176	109,7	1014,4	5470
16.	8,176	109,8	1014,5	5545,8
17.	8,176	109,9	1014,7	5567,1
18.	8,21	104,3	1012	5108
19.	8,21	104,3	1012,9	5147,7
20.	8,21	104,3	1013,6	5140,4

21.	8,22	107,5	1015,1	5234,3
22.	8,22	107,6	1015,3	5212,6
23.	8,22	107,64	1015,6	5228,6
24.	8,22	106,8	1010,2	5261,7
25.	8,22	106,8	1069,5	5276
26.	8,22	107	1011	5228
27.	8,28	107,2	1011	5606,4
28.	8,33	100,1	1017,8	5386,7
29.	8,33	100,1	1043,7	5426,7
30.	8,33	100,1	1044	5423,3
31.	8,33	107,5	1044,2	5647,7
32.	8,33	107,4	1017,8	5576,5
33.	8,39	96,3	1017,8	5534,4
34.	8,39	96,3	1062,6	5574
35.	8,39	96,3	1062,6	5534,2
36.	8,1	113,3	1062,6	4853
37.	8,1	113,3	1005,3	4856
38.	8,1	113,3	1005,3	4859
39.	8,12	115,6	1005,4	4857,5
40.	8,12	115,6	951,6	5415,1
41.	8,12	115,6	977,4	5396,7
42.	8,16	113,6	991,8	4891
43.	8,16	114	963,4	4935,6
44.	8,16	114,5	963,3	4700
45.	8,21	109,5	933,7	4872
46.	8,21	109,6	971,6	4916
47.	8,21	109,7	974	4740
48.	8,22	107,4	964,4	3984
49.	8,22	107,9	878,6	3977
50.	8,22	108,4	876	3974
51.	8,22	105	877	5364
52.	8,22	105	1034,5	5362
53.	8,1	117,8	1033,1	3453
54.	8,1	117,8	880,6	3438
55.	8,1	117,8	880,6	3442
56.	8,15	115,2	879,8	4826,8
57.	8,15	115,2	1004,3	4858,3
58.	8,15	115,2	1004,2	4796
59.	8,2	111,7	1004,2	4215,7
60.	8,2	111,7	939,6	4003,5

Статистическа обработка на резултатите от измерването

Резултатите от експеримента са обработени статистически, като се използва програма STATGRAFICS.

Оценката на значимостта на коефициентите на регресия се извършва по критерия на Студент при ниво на значимост $\alpha = 0,05$ и 8 бр. на степени на свобода $\nu \geq 8$

(Божанов и др., 1973). В програмата тази процедура е известна като се оценява вероятността за значимост на коефициентите на регресия. Ако тази вероятност е $P - Value < \alpha$, то коефициентът на регресия е значим.

Аналогично се оценява и адекватността на уравнението посредством значимостта на критерия на Fisher. Ако стойността на критерия е $< \alpha$ то уравнението е адекватно.

За целите на практическото изследване на работния процес са търсени модели и коефициенти на регресия, които могат да бъдат приети с нива на доверителна вероятност над 95 %, като се очаква, че допустими нива на инженерната грешка от 5% са приемливи за технически изделия, каквито са барабанните полуавтогенни мелници и конкретно – SAG 8,5х3.

В резултат от статистическия анализ на мощността на барабанната полуавтогенна мелница са получени няколко модела, които не могат да бъдат определени като адекватни поради това, че не отговарят на описаните по горе оценки. Освен тях се получи и модел с много висок коефициент на регресия (над 99%) и много висока оценка по критерия на Фишер, което дава основание да се счита че този модел е адекватен и с много голяма точност дава връзка между управляващите фактори и целевата функция – мощност. Параметрите на този модел са показани в таблица 3.

Таблица 3

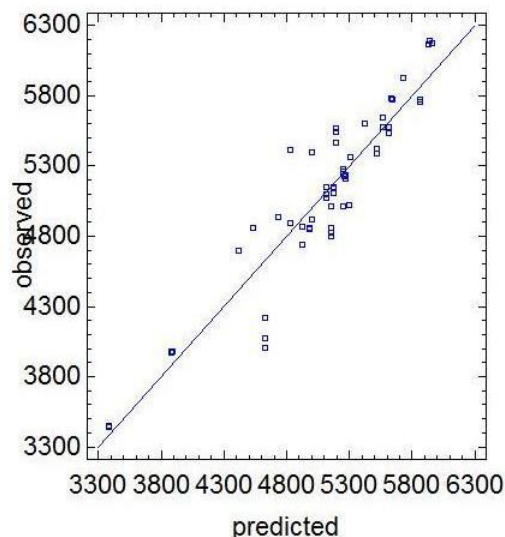
Parameter	Estimate	Error	Statistic		P-Value
X_1	2757,53	536,06	5,14411		0
X_2	260,063	48,23	5,39218		0
X_3	-19,32	4,97	-3,88883		0,0003
X_2 / X_3	-265,891	45,74	-5,81267		0
	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1,60E+09	4,00	4E+08	77168	0
Residual	2,95E+06	57,00	51778,4		
Total	1,60E+09	61,00			
R squared				99,8157%	
R squared (adjusted for d.f.)				99,806%	
Standard Error of Est.				227,549	
Mean absolute error				163,481	
Durbin – Watson statistic				0,623789	
Lag 1 residual autocorrelation				0,627814	

На фигура 2 е показано графично корелационната връзка между експерименталните данни и полученият модел.

Разглеждайки параметрите на този модел се вижда, че коефициентът на множествена корелация R^2 е 99,82%, а коригираният коефициент на множествена корелация е над 99%. Стойността на показателя на доверителна вероятност ($P-Value < 0,005$) за модела е под критичната, т.е. може да се приеме, че моделът е адекватен.

Математически този моделът може да бъде представен във вида:

$$Y = 2757,5.X_1 + 260.X_2 - 19,32.X_3 - 0,29 \frac{X_2}{X_3} \quad (14)$$



Фиг. 2

С натурални параметри моделът може да бъде представен по следния начин:

$$P = 2757,5.D + 260.M_{CM} - 19,32.n - 0,29 \frac{M_{CM}}{n}, kW \quad (15)$$

4. Изводи

1. Полученият математичен модел с голяма точност определя мощността на мелницата в зависимост от диаметъра на барабана, масата на пълнежа и ъгловата скорост на барабана на мелницата.

2. С нарастването на диаметъра на барабана на мелницата нараства мощността на двигателят и. Това се дължи на факта, че се увеличава мощността за издигане на топките и едрите късове руда.

3. Увеличаването на пълнежа на мелницата също увеличава изразходваната мощност поради увеличаването на мощността на празен ход, допълнителната мощност и мощността за издигане на едрите късове руда.

4. Ъгловата скорост на барабана на мелницата се променя в малки граници при пасивен експеримент и влияе незначително на мощността на мелницата, като за получения модел с увеличаването си намалява изразходваната мощност. Това най-вероятно се дължи на факта, че с намаляване на скоростта на барабана на мелницата, се увеличава големината на мъртвата зона и това повишава мощността за преодоляване на триенето между движещите се слоеве и тази зона при каскаден скоростен режим.

Литература

- Цветков, Х., 1976. Обогадителни машини, С., Техника.
Минин, И., 2012. Техника и технологии за обогатяване на полезни изкопаеми, С. Авангард Прима.
Божанов Е. С., И. Вучков, 1973. Статистически методи за моделиране и оптимизиране на многофакторни обекти, С., Техника.

МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ КОЕФИЦИЕНТА НА УСТОЙЧИВОСТ НА ХИДРАВЛИЧНИТЕ ЕДНОКОФОВИ БАГЕРИ ПО ВРЕМЕ НА РАБОТА

Иван Минин

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: minin@dir.bg

РЕЗЮМЕ. Създадена е методика за определяне на коефициента на устойчивост на хидравличните еднокофови багери. Разгледани са най-опасните положения на багера по време на работа - при копаене и при въртене на горния строеж с пълна кофа. Изведени са зависимостите за определяне на коефициента на устойчивост. За създаване на методиката са използвани конструкциите на хидравличните еднокофови багери тип „O&K RH 200 C” и ZO-6124.

METHODOLOGY FOR DETERMINATION THE COEFFICIENT OF RESISTANCE OF HYDRAULIC SHOVEL DREDGERS WHILE IN USE

Ivan Minin

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: minin@dir.bg

ABSTRACT. It was established a technique for determining the coefficient of resistance of hydraulic shovel dredgers. The most dangerous situations of the excavator at work are reviewed - while digging and rotating of upper construction with a full bucket. Dependencies are derived to determine the coefficient of resistance. To create a methodology there are used the designs of hydraulic shovel dredgers type "O & K RH 200 C" and EO-6124.

Под статична устойчивост на багера се разбира способността му да стои стабилно върху ходовия механизъм при работа или в движение. Статичното изчисляване на багерите се извършва при конструирането им и при експлоатацията в следните случаи:

- когато вместо стандартна кофа се използва кофа с по-голям обем;
- при замяна на работния орган с друг нехарактерен за модела;
- когато машината работи в тежки условия.

Като критерий за устойчивостта на багера служи т.н. коефициент на устойчивост k_y , който представлява отношение на сумата на моментите на задържащите сили $\sum M_Z$ и сумата на моментите на обръщащите $\sum M_O$.

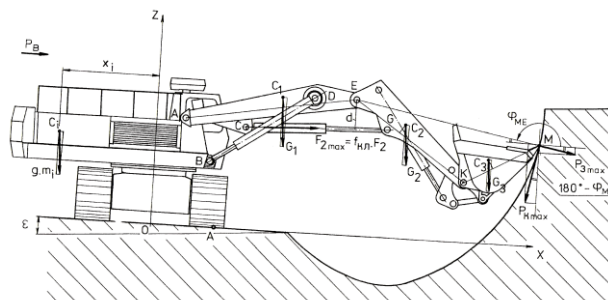
$$k_y = \frac{\sum M_Z}{\sum M_O} \geq 1,05 \div 1,2 \quad (1)$$

Работният цикъл на еднокофовите багери се състои от следните операции: копаене, преместване на напълнената кофа до мястото на разтоварване, което става чрез завъртане на машината с пълна кофа, след което следва разтоварване и връщане на кофата до забоя. След като багерът изкопае и натовари скалната маса, която се намира в обсега на действие на работния му орган, той се премества по-близо до забоя. От гледна точка на устойчивостта, най-опасни са случаите, когато багерът копае и завърта горния си строеж с пълна кофа.

Статична устойчивост по време на копаене

Най опасна от гледна точка на устойчивостта на багера е ситуацията описана по следния начин (Фиг.1):

- багерът е разположен върху наклонена площадка с максимален работен наклон, напречно на гъсеничната ходова платформа – в това направление опорната база е минимална и е равна на α ;
- работният орган е разположен напречно на гъсеничната ходова платформа (по посока на низходящия наклон на площадката), а спрямо забоя положението му е такова, че силата на копаене P_K и реакцията на забоя P_3 , както и теглата на елементите на работния орган, разположени пред линията на обръщане, създават максимален обръщащ момент спрямо тази линия;
- максимално допустимото ветрово натоварване действа по посока на низходящия наклон.



Фиг. 1. Сили действащи на багера при копаене

С багера може да бъде свързана пространствена Декартова координатна система, ориентирана по следния начин:

- ос OY е насочена по посока на напредване на багера към забоя и съвпада с надлъжната ос на гъсеничната ходова платформа;

- ос OX е насочена напречно на гъсеничната ходова платформа (по направление на тази ос е низходящият наклон на работната площадка);

- ос OZ съвпада с оста на въртене на горният строеж (платформата).

Пълният задържащ момент M_Z се създава от косинусовите компоненти на теглата на всички елементи на багера, разположени зад линията на обръщане от страна на противотежестта.

Пълния обръщащ момент M_O се създава от перпендикулярните и успоредните на работната площадка компоненти на силата на копаене и реакцията на забоя, косинусовите компоненти на теглата на всички елементи на багера, разположени пред линията на обръщане от страна на работния орган (включително теглото на материала в кофата), синусовите компоненти на теглата на всички елементи на багера и ветровото натоварване.

Линията на обръщане за описаната ситуация минава през външните реборди на ролките на разположените от страна на забоя вериги на ходовия механизъм (т. О на фиг.1).

Багерът може да бъде разделен на три относително самостоятелни конструктивно обособени части: работен орган (включващ стрела, ръка и кофа), гъсенична ходова платформа и горен строеж. Необходимо е да бъдат известни масите на всички елементи, които ги изграждат, както и координатите на масовите им центрове във вече дефинираната координатна система $OXYZ$.

Обръщащ и задържащ моменти, създавани от гъсеничната ходова платформа

В процес на копаене гъсеничната ходова платформа остава неподвижна. Спрямо линията на обръщане, успоредна на ос OY и отстояща от нея на разстояние a , обръщащия и задържащи моменти могат да се пресметнат по формулите:

$$M_{O1} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (x_i - a) \cdot \cos \varepsilon + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} m_i \cdot z_i \cdot \sin \varepsilon, Nm. \quad (2)$$

$$M_{Z1} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (a - x_i) \cos \varepsilon, Nm, \quad (3)$$

където: n_1 е броят на елементите на ходовата платформа, за чиито абсциси е изпълнено условието $x_i > a$;

n_2 - броят на елементите на ходовата платформа, за чиито абсциси е изпълнено условието $x_i < a$;

x_i, z_i са абсцисите и апликатите на масовите центрове на елементите с маса m_i .

Обръщащ и задържащ моменти, създавани от горния строеж на багера

При описаната ситуация горният строеж на багера е разположен напречно на ходовата платформа така, че надлъжната му ос съвпада с координатната OX . Преобръщащият и задържащ момент са съответно:

$$M_{O2} = g \left[\sum_{i=1}^{n_1} m_i (x_i - a) \cdot \cos \varepsilon + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} m_i \cdot z_i \cdot \sin \varepsilon \right] \cdot Nm. \quad (4)$$

$$M_{Z2} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (a - x_i) \cos \varepsilon, Nm. \quad (5)$$

Обръщащ и задържащ моменти, създавани от силата на копаене и теглото на работния орган на багера

Очевидно най-голям относителен дял в стойността на пълния обръщащ момент има тази част, която се създава от работния орган. Това е така, защото към него са приложени силата на копаене и реакцията на забоя, както и теглата на изграждащите го елементи – ръка, стрела и кофа (с материал). В процеса на копаене приложните точки на тези сили изменят координатите си в пространството, което води до промяна на големината на моментите им спрямо линията на обръщане. Благодарение на своите три степени на свобода работният орган може да заема неограничен брой положения в работната си област и между тях трябва да се определи онова положение, при което обръщащият момент, създаван от силата на копаене, реакцията на забоя и теглата на елементите на работния орган, е максимален.

Максималната стойност на този момент се определя от следните величини:

- стойностите на координатите x_M и z_M на режещия ръб на кофата – приложна точка на силата на копаене и реакцията на забоя, и координатите на приложните точки на теглата на ръката, стрелата и кофата. Всички зависят от положението на буталните пръти (ходовете S_1, S_2 и S_3) съответно на хидравличните цилиндри II_1, II_2 и II_3 ;

- големината на активната сила F_2 , развивана от цилиндъра II_2 , чрез който се осъществява процеса на копаене.

Цилиндърът II_1 изменя наклона на стрелата, с което се извършва подаване на ръката с кофата към забоя след изкопаване на поредния блок стружки.

Цилиндърът II_2 осигурява копаене по дъговидна траектория с център т.Е и радиус ЕМ, при което от забоя се снемат стружки с постоянна ширина b (равна на широчината на кофата) и променлива дебелина δ , зависеща от поредността на стружката. Чрез този цилиндър се извършва процесът на копаене. Силата F_2 , развивана от него, създава в точката на контакт на режещия ръб на кофата със забоя (точка М) сила на

копаене P_K , насочена по тангентата на траекторията на копаене по посока на движение на работния орган.

Цилиндърът $Ц_3$ задава ъгъл на рязане, който остава постоянен в процеса на копаене (в рамките на времето за снемане на една стружка). Положението на неговия бутален прът определя разстоянието ЕМ, което при постоянен ъгъл на рязане се запазва неизменно.

В процеса на копаене е възможно кофата да опре в непреодолимо препятствие в забоя. Тогава цилиндърът $Ц_2$ развива максимална бутална сила F_{2MAX} , по-голяма от номиналната F_2 и лимитирана от настройката на вградените в хидравличната система предпазно-преливни клапани. Тази сила се определя от израз:

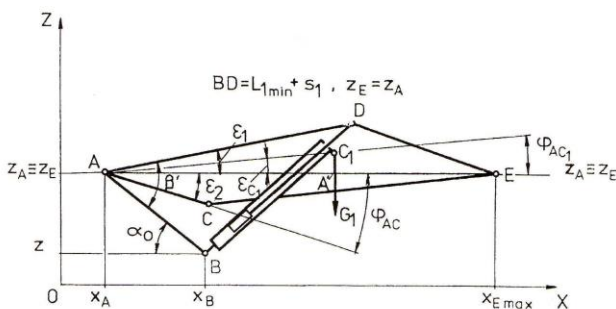
$$F_{2MAX} = k_K \cdot F_2 \cdot N, \quad (6)$$

където коефициентът k_K отчита налягането, на което тези клапани са настроени.

Силата F_{2MAX} създава съответно максимална сила на копаене P_{KMAX} и максимална реакция на забоя P_{3MAX} .

Чрез комбинация от премествания S_1, S_2 и S_3 на хидравличните цилиндри $Ц_1, Ц_2$ и $Ц_3$ могат да бъдат осъществени неограничен брой положения на режещия ръб на кофата в работното поле, за всяко от които стойностите на P_{KMAX} и P_{3MAX} са различни. Изследването на разпределението на силите и големината на обръщачия момент за всяко едно от тях е свързано с голям обем изчислителна работа. С цел свеждането им до минимум е необходимо да се дефинира и обоснове онова положение на работния орган, при което обръщачият момент от приложените върху него сили е най-голям.

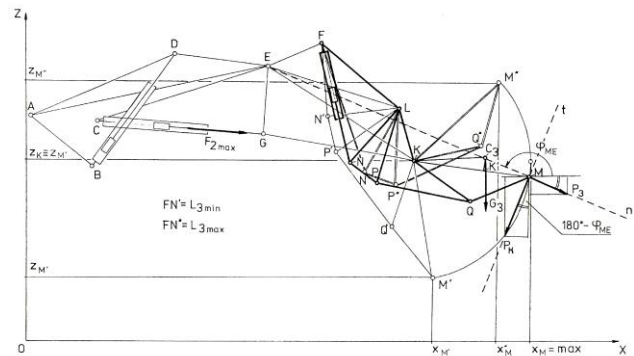
Това положение ще бъде постигнато когато стрелата е така разположена, че ръката и кофата са максимално изнесени към забоя, а от тук и най-голям обръщач момент от силата на копаене и гравитационните сили (Фиг.2).



Фиг. 2. Положение на стрелата на багера при което се създава максимален обръщач момент

Положението на ръката на багера се определя спрямо описаното положение на стрелата, като се приема за фиксирано при по нататъшно преместване (положението на точки С и Е е еднозначно определено и техните

координати за известни). При фиксирана ръка и стрела се определя положението на кофата, при което обръщачият момент от силите на копаене, реакцията на забоя и теглата на стрелата, ръката и кофата с материал е максимален (Фиг.3).



Фиг. 3. Положение на работния орган на багера по време на копаене при което се създава максимален обръщач момент

При това положение максималната сила на копаене може да бъде определена. След решаване уравнението на равновесие на системата и след приемане на някои закръглени се получава:

$$P_{KMAX} \approx -G_3 = G_K + G_M \quad (7)$$

Това означава, че постоянната по големината цилиндрична сила F_{2MAX} , развивана от цилиндъра $Ц_2$, се разпределя за силата на копаене P_{KMAX} в т.М и за уравнивяване на теглата на ръката G_2 и кофата G_3 и теглото на материала в кофата G_M , което е променливо: най-малко ($G_M = 0$) в началото и най-голямо ($G_M = \frac{g \cdot q \cdot \rho \cdot k_H}{k_P}$) в края на загребването. В последната формула q е обемът на кофата на багера, ρ - плътността на материала, k_H - коефициентът на напълване, k_P - коефициентът на разбухване на материала.

Тогава обръщачият момент, създаван от работния орган спрямо т.А може да бъде определен по формулата:

$$M_{PO} = P_{KMAX} \left[\begin{aligned} &(-\cos \varphi_{ME} + \psi \sin \varphi_{ME})(x_M - a) - \\ &(\sin \varphi_{ME} + \psi \cos \varphi_{ME})z_M \end{aligned} \right] + \\ + G_1 \left[\cos \varepsilon (x_{C_1} - a) - \sin \varepsilon \cdot z_{C_1} \right] + \\ + G_2 \left[\cos \varepsilon (x_{C_2} - a) - \sin \varepsilon \cdot z_{C_2} \right] + \\ + G_3 \left[\cos \varepsilon (x_{C_3} - a) - \sin \varepsilon \cdot z_{C_3} \right], Nm \quad (8)$$

Пълни обръщащ и задържащ моменти

Пълният обръщащ момент може да бъде определен съгласно израза:

$$\sum M_O = M_{O1} + M_{O2} + M_{PO} + M_B, Nm, \quad (9)$$

където M_B е обръщащ момент от ветровото натоварване, което се пресмята по формулата:

$$M_B = P_D \cdot F_H \cdot z_H, Nm, \quad (10)$$

където P_D, Pa е динамично налягане на вятъра, F е площта на багера по посока на вятъра, а z_H е апликацията на геометричния център на F .

Пълният задържащ момент се определя от израза:

$$\sum M_Z = M_{Z1} + M_{Z2}, Nm. \quad (11)$$

Коефициентът на сигурност (устойчивост) на багера при работа се определя съгласно израз (1).

Статична устойчивост при въртене на горния строеж

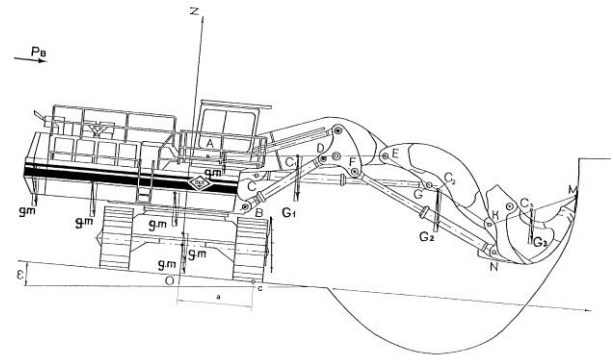
След изкопаване на стружката и излизане на пълната кофа от забоя, горният строеж на багера се завърта към точката на разтоварване. В най-общия случай периодът на въртене се състои от време за ускоряване, време за равномерно движение и време за спиране.

През времето на равномерно движение горният строеж (заедно с работния орган) се върти с максимална ъглова скорост и върху него в равнината XOZ освен гравитационните сили действат и центробежни сили, създаващи допълнителен обръщащ и задържащ момент.

Най-опасна за устойчивостта на багера ситуация през време на въртенето на горния строеж възниква когато багерът е разположен напречно върху наклонена работна площадка, горният строеж се върти с максимална скорост, положението на работния орган в равнината XOZ е такова, че обръщащият момент от компонентите на теглата на елементите на работния орган и от действащите върху тях центробежни сили е максимален (Фиг. 4). Освен това ветровото натоварване действа по посока на низходящия наклон на площадката. При тези условия линията на обръщане, минава през външните реборди на ролките на разположената от страна на забоя верига на ходовия механизъм (т. А на фиг.4).

Обръщащ и задържащи моменти създавани от гъсеничната платформа

В процеса на въртене на горния строеж, гъсеничната ходова платформа остава неподвижна. Спрямо линията на обръщане, успоредна на ос OY и отстояща от нея на разстояние a , обръщащият момент M_{O1} се пресмята по формула (2), а задържащият момент по зависимост (3).



Фиг. 4. Положение на багера с максимален обръщащ момент при въртене на горния строеж

Обръщащ и задържащи моменти създавани от горния строеж на багера

При описаната ситуация горният строеж е достигнал положение, напречно на ходовата платформа, така че надлъжната му ос съвпада с координатната ос OX . Спрямо линията на обръщане, успоредна на ос OY и отстояща от нея на разстояние a , обръщащият и задържащият моменти се определят съответно от изразите:

$$M_{O2} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i [(x_i - a) \cdot \cos \varepsilon + z_i \cdot \sin \varepsilon] + \omega_{MAX}^2 \sum_{i=1}^{n_1} m_i \cdot x_i \cdot z_i, Nm. \quad (12)$$

$$M_{Z2} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (a - x_i) \cos \varepsilon + \omega_{MAX}^2 \sum_{i=1}^{n_1} m_i \cdot x_i \cdot z_i, Nm \quad (13)$$

където: $\omega_{MAX}, rad / s$ е максималната ъглова скорост на въртене на горния строеж.

Обръщащ и задържащи моменти, създавани от работния орган на багера

В процеса на въртене на горния строеж върху стрелата са приложени нейното тегло G_1 и центробежната сила Φ_1 , чиято големина и приложна точка зависят от положението на стрелата в равнината XOZ . Тези сили създават обръщащ момент, който може да бъде определен от израза:

$$M_{OC} = G_1 (x_{C1} \cos \varepsilon + z_{C1} \sin \varepsilon) + \Phi_1 \cdot z_{S1}, Nm, \quad (14)$$

където големината на центробежната сила е:

$$\Phi_1 = g \cdot l_{CTP} \cdot \omega_{MAX}^2 \cdot x_{S1} \cdot N \quad (15)$$

В процеса на въртене на горния строеж върху ръката са приложени нейното тегло G_2 и центробежната сила Φ_2 , чиято големина и приложна точка зависят от положението на стрелата в равнината XOZ . Тези сили създават обръщащ момент, който може да бъде определен от израза:

$$M_{OP} = G_2 (x_{C2} \cos \varepsilon + z_{C2} \sin \varepsilon) + \Phi_2 \cdot z_{C2}, Nm \quad (16)$$

където големината на центробежната сила е:

$$\Phi_2 = g \cdot l_P \cdot \omega_{MAX}^2 \cdot x_{S2}, N. \quad (17)$$

Аналогично при въртене на горния строеж, върху кофата с материал са приложени нейното тегло G_3 и центробежната сила Φ_3 , чиято големина и приложна точка зависят от положението на стрелата в равнината XOZ . Тези сили създават обръщащ момент, който може да бъде определен от израза:

$$M_{K+M} = G_3 (x_{C3} \cos \varepsilon + z_{C3} \sin \varepsilon) + \Phi_3 \cdot z_{S3}, Nm \quad (18)$$

където големината на центробежната сила е:

$$\Phi_3 = \frac{G_3}{g} \omega_{MAX}^2 \cdot x_{S3}, N. \quad (19)$$

Пълен обръщащ и задържащи моменти създавани от работния орган на багера и коефициент на сигурност

Пълният обръщащ момент се определя от израза:

$$\sum M_O = M_{O1} + M_{O2} + M_{OC} + M_{OP} + M_{K+M} + M_B, Nm \quad (20)$$

където M_B е обръщащ момент от ветровото натоварване, което се пресмята по формула (10).

Пълният задържащ момент се определя от израза:

$$\sum M_Z = M_{Z1} + M_{Z2}, Nm. \quad (21)$$

Коефициентът на сигурност на багера при въртене на горния строеж се определя съгласно израз (1).

Изводи

В методиката са разгледани две от най-опасните положения на багера по време на работа. Положението на работния орган на багера зависи от положението на буталните пръти на трите двойки хидравлични цилиндри задвижващи стрелата, ръката и кофата. Следователно положенията на работния орган на багера при работа може да бъде различно от разгледаните. Използвайки методиката, може да бъде създадена компютърна програма, която да изчислява коефициентът на устойчивост при различни положения на работния орган и да определя най-критичната ситуация за багера по време на работа.

Литература

Беркман, И. Л. и др. 1971. Одноковшовые экскаваторы и самоходные краны с гидравлическим приводом, М., Машиностроение.
Technisches Handbuch Erdbewegung. Ausgabe 1985, Liebherr-Internatinal AG, 1985.

МЕТОДИКА ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА САМОСВАЛИ ЗА ОТКРИТИ РУДНИЦИ С ХИДРОМЕХАНИЧНА ПРЕДАВКА

Христо Шейретов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, sheiretov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Разработена е методика за изчисляване на руднични самосвали с хидромеханична предавка. Първоначално се избира модела и товароподемността на самосвала. След това се определят диаметъра на гумите, масата на натоварения самосвал, максималната теглителна сила, броя на степените на скоростната кутия, максималните скорости и предавателните отношения за всички степени на скоростната кутия. Построяват се граничните тягови и спирачни характеристики на самосвала. Определят се максималните скорости, средните скорости, необходимите теглителни и спирачни сили за всички участъци от трасето на пътя, продължителността на рейса и производителността на самосвала. Накрая се прави проверка на продължителната тангенциална мощност на дизеловия двигател (на периферията на задвижващите колела).

На базата на разработената методика е решен конкретен пример.

Разработената методика може да се използва както от студентите, така и от специалистите, които работят в миннодобивната и строителната промишленост.

METHODOLOGY FOR THE CALCULATION OF MINING DUMP TRUCKS WITH HYDROMECHANICAL TRANSMISSION

Hristo Sheiretov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" Sofia, sheiretov@abv.bg

ABSTRACT. A methodology for the calculation of mining dump trucks with hydromechanical transmission is developed. At first the model and the payload of the truck are selected. After that the diameter of tires, the weight of the loaded truck, the maximum traction force, the number gears in the gearbox, the maximum speed and the ratio of all gears in the gearbox are determined. The rimpull-speed-gradeability and brake performance characteristics of the truck are drawn. The maximum speed, the average speed, the required traction and brake forces of all of sections the road, the duration of the tour and the output of the truck are determined. Finally a check is made for the tangential continuous power of the diesel engine (at the periphery of the drive wheels).

A concrete example is solved using the developed methodology.

The methodology may be useful for the students, and also for the specialists, working in the mining and in the construction industry.

Увод

В Дьяков (1986) са дадени основите на теорията и изчисляването на автомобилния транспорт в откритите рудници. В Овчиников (2006) е разгледано изчисляването на хидромеханичните предавки на дизеловите локомотиви, като някои основни положения от методиката могат да се използват и при самосвалите.

В Caterpillar са дадени техническите параметри, тяговите и спирачните характеристики на всички произведени от фирмата руднични самосвали. В Komatsu е разгледана практическа методика за определяне на производителността на челните товарачи, багерите и самосвалите за открити рудници.

На базата на тези литературни източници и допълнителна информация от Интернет е разработена цялостна методика за изчисляване.

Описание на методиката

Входни данни

Самосвалите се натоварват от челен товарач Komatsu WA 600 с вместимост на кофата $q = 5,4 \text{ m}^3$. Изкопаният материал е пясъчлива глина с плътност в разбухнало състояние $\rho = 1,6 \text{ t/m}^3$. Опростеният надлъжен профил на трасето и състоянието на пътя са дадени в табл. 1:

Таблица 1

Данни за трасето на пътя

Участък	1	2	3	4	5	6
Дължина L_i [m]	330	50	120	120	50	330
Наклон i_i [%]	0	10	0	0	-10	0
w_{oi} [%]	5	5	5	5	5	5

w_{oi} - основно относително съпротивление (2-3,5 - за път в добро състояние (със здрава повърхност); 5-за път в средно състояние (повърхността се огъва под натиска на колелата); 8-10 - за път в лошо състояние (основата не е уплътнена и бързо се образуват коловози); 15-20 - за път в много лошо състояние (кален път с мека повърхност и дълбоки бразди).

Избор на самосвал

Самосвалите се избират в зависимост от вместимостта на кофата на багера или челния товарач q според табл.2 и табл.3.

Таблица 2

Избор на максимална товароподемност на самосвала

q [m ³]	2,5 - 3,5	3,5 - 10	10 - 15	15 - 16,5
G [t]	25	30 - 65	63 - 100	90 - 100

G - максимална товароподемност на самосвала

Таблица 3

Класификация на произвежданите модели двуосни самосвали с хидромеханична предавка по товароподемност (ТП)

Клас по ТП	25 t	30 - 36,5 t	41 - 46 t
Фирма			
Caterpillar		770 36,3 t	772 46 t
Komatsu	HD255 25 t	HD325 36,5	HD405 41 t
Terex		TR35 32 t	TR45 45 t
БелАЗ		7540 30 t	4547 45 t

Клас по ТП	55 - 55,5 t	63 - 65 t	90 - 99 t
Фирма			
Caterpillar	773E 55,5 t	775F 63 t	777D 99 t
Komatsu	HD465 55 t	HD605 63 t	HD785 91 t
Hitachi		EH1100 65 t	EH1700 95 t
Terex	TR60 55 t		TR100 91 t
БелАЗ	7555 55 t		75570 90 t

Избирам самосвал Caterpillar със следните параметри:
 Максимална товароподемност $G = 36,3$ t;
 Собствена маса $m = 34,6$ t;
 Максимална мощност на двигателя $N_{\text{дв}} = 381$ kW;
 Номинална честота на въртене на двигателя (при максимална мощност) $n_{\text{дв}} = 1800$ min⁻¹;
 Максимална конструктивна скорост $V_{\text{max}} = 74,5$ km/h;
 Предавателно число на главната предавка $i_{\text{гн}} = 2,74$;
 Предавателно число на колесната предавка $i_{\text{кл}} = 4,8$;
 Гуми 18.00R33.

Диаметър на гумите

$$D_e = (D_{\text{ож}} + 2B_e) \cdot 0,0254 = (33 + 2 \cdot 18) \cdot 0,0254 = 1,75 \text{ m}, \quad (1)$$

където: $D_{\text{ож}}$ е диаметърът на джантата в инчове;
 B_e - ширината на гумата в инчове.

Маса на натоварения самосвал

$$P = m + n_k \cdot q \cdot k_3 \cdot \rho = 34,6 + 4,5 \cdot 4,0 \cdot 9,16 = 65,7 \text{ t}, \quad (2)$$

където: n_k е броят на кофите, необходими за натоварването на самосвала;
 k_3 - коефициентът на запълване на кофата на багера или товарача ($k_3 = 0,7 - 1,1$).

$$n_k = \frac{G}{q \cdot k_3 \cdot \rho} = \frac{36,3}{5,4 \cdot 0,9 \cdot 1,6} = 4,7 \quad \text{Приемам } n_k = 4. \quad (3)$$

Максимална теглителна сила на самосвала

Определя се от условието за сцепление между колелата и пътя (липса на буксуване):

$$F_{\text{max}} = 1000 P_{\text{сц}} \cdot \psi_{\text{max}} = 1000 \cdot 42,7 \cdot 0,643 = 27450 \text{ kg}, \quad (4)$$

където: $P_{\text{сц}}$ - сцепна маса на самосвала (която се пада върху водещите колела);

ψ_{max} - максимален коефициент на сцепление между колелата и пътя ($\psi_{\text{max}} = 0,3 - 0,7$; приемам $\psi_{\text{max}} = 0,65$ за сух път на повърхността);

$$P_{\text{сц}} = \xi \cdot P = 0,65 \cdot 65,7 = 42,7, \quad (5)$$

където ξ е коефициентът, който отчита каква част от масата на самосвала се пада върху водещите колела (за самосвали с колесна формула 4x2 $\xi = 0,65$).

Минимална скорост на самосвала при блокиран хидротрансформатор

При потегляне на самосвала е включена първа степен на скоростната кутия и дизеловият двигател работи с максимална мощност. Теглителната сила на самосвала е максимална ($F = F_{\text{max}}$), а скоростта му е нула ($v = 0$). При ускоряването на самосвала трансмисията работи в режим на хидротрансформатор, теглителната сила намалява от F_{max} до $F_{\text{хт}}^{\text{min}}$, а скоростта му се увеличава от нула до $v_{\text{хт}}^{\text{max}}$.

При скорост $v_{\text{хт}}^{\text{max}}$ хидротрансформаторът се блокира и започва да работи като твърд съединител с предавателно число $i_{\text{хт}} = 1$.

Минималната скорост на самосвала при блокиран хидротрансформатор (в директен режим) v_{min} е равна на максималната скорост на самосвала в режим на хидротрансформатор $v_{\text{хт}}^{\text{max}}$.

По-нататъшното ускоряване на самосвала се осъществява чрез превключване на степените на скоростната кутия (от по-ниска към по-висока степен), а в рамките на една степен - чрез увеличаване на честотата на въртене на дизеловия двигател от $n_{\text{дв}}^{\text{min}}$ до $n_{\text{дв}}$. Скоростта на самосвала при включена първа степен се увеличава от v_{min} до v_{max1} , при включена втора степен - от v_{max1} до v_{max2} и т.н. При скорости v_{min} , v_{max1} , v_{max2} , v_{max3} и т.н. дизеловият двигател работи с максимална мощност.

$$v_{\text{min}} = v_{\text{хт}}^{\text{max}} = \frac{3600 N_m^{\infty}}{F_{\text{min}}^{\text{хт}} \cdot g} = \frac{3600 \cdot 227}{9150 \cdot 9,81} = 9,1 \text{ km/h}, \quad (6)$$

където N_m^{∞} е продължителната тангенциална мощност на самосвала (на периферията на задвижващите колела);

$$N_m^{\infty} = N_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{хт}} \cdot k_{\text{хк}} = 381 \cdot 0,7 \cdot 0,85 = 227 \text{ kW} \quad (7)$$

$$F_{\min}^{xm} = \frac{F_{\max}}{k_{xm}} = \frac{27450}{3} = 9150 \text{ kg} \quad (8)$$

$\eta_{хл}$ - к.п.д. на хидромеханичната предавка ($\eta_{хл} = 0,7 - 0,72$);
 $k_{хк}$ - коефициентът, отчитащ каква част от мощността на двигателя се изразходва за задвижване на ходовите колела на самосвала (останалата мощност се изразходва за задвижване на спомагателните механизми) ($k_{хк} = 0,85 - 0,88$);
 $k_{хт}$ - коефициентът на хидротрансформация (избира се в зависимост от товароподемността на самосвала според табл.4).

Таблица 4

Коефициент на хидротрансформация

G [t]	30-36,5	41 - 46	55-55,5	63 - 65	90 - 99
$k_{хт}$	3	2,8	2,7	2,6	2,4

Брой на степените на скоростната кутия

За максималните скорости на движение на самосвала за различните степени можем да запишем:

$$\begin{aligned} v_{\max 1} &= v_{\min} \cdot \delta & v_{\max 2} &= v_{\max 1} \cdot \delta = v_{\min} \cdot \delta^2 \\ v_{\max 3} &= v_{\min} \cdot \delta^3 \dots & v_{\max} &= v_{\min} \cdot \delta^z, \end{aligned} \quad (9)$$

където: $\delta = \frac{n_{\delta}^H}{n_{\delta}^{\min}} = 1,35$ е коефициентът на еластичност на

дизеловия двигател;

z - броят на степените на скоростната кутия.

Като логаритмуваме равенство (9) се получава:

$$z = \frac{\lg \frac{v_{\max}}{v_{\min}}}{\lg(\delta)} = \frac{\lg \frac{74,5}{9,1}}{\lg 1,35} = 7,02 \quad \text{Приемам 7 степени.}$$

Максимални скорости на самосвала за различните степени на преден ход:

$$v_{\max 1} = v_{\min} \cdot \delta = 9,1 \cdot 1,35 = 12,3 \text{ km/h}$$

$$v_{\max 2} = v_{\min} \cdot \delta^2 = 9,1 \cdot 1,35^2 = 16,6 \text{ km/h}$$

$$v_{\max 3} = v_{\min} \cdot \delta^3 = 9,1 \cdot 1,35^3 = 22,5 \text{ km/h}$$

$$v_{\max 4} = v_{\min} \cdot \delta^4 = 9,1 \cdot 1,35^4 = 30,3 \text{ km/h}$$

$$v_{\max 5} = v_{\min} \cdot \delta^5 = 9,1 \cdot 1,35^5 = 40,9 \text{ km/h}$$

$$v_{\max 6} = v_{\min} \cdot \delta^6 = 9,1 \cdot 1,35^6 = 55,2 \text{ km/h}$$

$$v_{\max 7} = v_{\max} = v_{\min} \cdot \delta^7 = 9,1 \cdot 1,35^7 = 74,5 \text{ km/h}$$

Предавателни числа на степените на скоростната кутия

$$i_{ck1} = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n_{\delta}^H \cdot D_e}{60 \cdot v_{\max 1} \cdot i_{en} \cdot i_{kn}} = \frac{3,6 \cdot 3,14 \cdot 1800 \cdot 1,75}{60 \cdot 12,3 \cdot 2,74 \cdot 4,8} = 3,67 \quad (10)$$

Аналогично определяме предавателните числа за останалите степени (табл.5).

Таблица 5

Предавателни числа на степените на скоростната кутия

Степен i	2	3	4	5	6	7
i_{cki}	2,72	2,01	1,49	1,1	0,82	0,61

$$\text{На задна степен } i_{ckR} = k_R \cdot i_{ck2} = 1,04 \cdot 2,72 = 2,83, \quad (11)$$

където k_R е коефициентът за определяне на предавателното число на задна степен (табл.6).

Таблица 6

Коефициент за определяне на предавателното число на задна степен

G [t]	30-36,5	41 - 46	55-55,5	63 - 65	90 - 99
k_R	1,04	1,05	1,06	1,06	1,26

Максимална скорост на заден ход

$$v_{\max R} = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n_{\delta}^H \cdot D_e}{60 \cdot i_{ckR} \cdot i_{en} \cdot i_{kn}} = \frac{3,6 \cdot 3,14 \cdot 1800 \cdot 1,75}{60 \cdot 2,83 \cdot 2,74 \cdot 4,8} = 15,9 \text{ km/h} \quad (12)$$

Построяване на граничната тягова характеристика на самосвала

Граничната тягова характеристика (фиг.1а) представлява зависимостта на теглителната сила на самосвала F [kg] от скоростта му на движение v [km/h] при гранични (максимално допустими) условия.

Първоначално нанасяме точките с координати $v_{\max i}$, $F_{\min i}$ и точката с координати $v_{\min}$, $F_{\min}^{xm}$ при които дизеловият двигател работи с максимална мощност. Теглителните сили $F_{\min i}$, които съответстват на максималните скорости $v_{\max i}$ за съответните предавки се определят по формулата:

$$F_{\min i} = \frac{3600 N_m^{\infty}}{v_{\max i} \cdot g}, \text{ kg} \quad (13)$$

Координатите на тези точки са дадени в табл.7

Таблица 7

Координати на точките, при които дизеловият двигател работи с максимална мощност

Степен i	1A	1B	2	3
$v_{\max i}$ [km/h]	9,1	12,3	16,6	22,5
$F_{\min i}$ [kg]	9150	6770	5020	3700
Степен i	4	5	6	7
$v_{\max i}$ [km/h]	30,3	40,9	55,2	74,5
$F_{\min i}$ [kg]	2750	2040	1510	1110

От тези точки построяваме кривите 1B, 2,3,4 и т.н. за отделните степени на скоростната кутия, като използваме външната характеристика на дизеловия двигател $M_{\delta} = f(n_{\delta})$ и формулите, чрез които честотата на въртене n_{δ} [min⁻¹] и въртящият момент M_{δ} [N.m] на двигателя се преобразуват в скорост и теглителна сила на самосвала:

$$v_i = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n_{\delta} \cdot D_e}{60 \cdot i_{cki} \cdot i_{en} \cdot i_{kn}}, \text{ km/h} \quad (14)$$

$$F_i = \frac{2.M_0 \cdot \eta_{\text{ХМ}} \cdot k_{\text{ХК}} \cdot i_{2\text{П}} \cdot i_{\text{КП}} \cdot i_{\text{СК}i}}{g \cdot D_2}, \text{ kg} \quad (15)$$

След това от точката с координати $0, F_{\text{max}}$ (ограничение на характеристиката по сцепление) до точката с координати $v_{\text{min}}, F_{\text{min}}^{\text{ХМ}}$ прекарваме права линия 1А, каквато е външната характеристика на хидротрансформатора. Тази линия съответства на работата на предавката на първа степен в режим на хидротрансформатор.

И накрая построяваме вертикална линия между точките с координати $v_{\text{max}}, F_{\text{min}}^{\text{ХМ}}$ и $v_{\text{max}}, 0$, която съответствува на ограничението на характеристиката по максимална скорост.

Построяване на граничната спирачна характеристика на самосвала

Спирачната характеристика (фиг.16) представлява зависимостта на спирачната сила на самосвала B [t] от скоростта му на движение v [km/h] при включен хидрозабавител. Представлява начупена линия с координати на точките (v_{min}, B_1) ; $(v_{\text{max}1}, B_1)$; $(v_{\text{max}1}, B_2)$; $(v_{\text{max}2}, B_2)$; $(v_{\text{max}2}, B_3)$ и т.н.

Изискването е характеристиката на хидрозабавителя да бъде такава, че при спускането на натоварения самосвал по наклонен участък с общо относително съпротивление $w_i = -7 \div -10\%$, той да развива скорост 30 km/h.

От получените максимални скорости за отделните степени на скоростната кутия виждаме коя скорост е най-близка до 30km/h (в нашия случай това е 4-та степен) и за следващата (5-та) степен определяме необходимата спирачна сила, създавана от хидрозабавителя:

$$B_5 = \frac{P \cdot w_5}{100} = \frac{P \cdot 7}{100} = \frac{65,7 \cdot 7}{100} = 4,6 \text{ t} \quad (16)$$

След това определяме спирачните сили и за останалите степени:

$$B_4 = B_5 \cdot \frac{i_{\text{СК}4} \cdot \eta_4}{i_{\text{СК}5} \cdot \eta_5} = 4,6 \cdot \frac{1,49 \cdot 0,96^3}{1,1 \cdot 0,96^3} = 6,23 \text{ t} \quad (17)$$

$$B_6 = B_5 \cdot \frac{i_{\text{СК}6} \cdot \eta_6}{i_{\text{СК}5} \cdot \eta_5} = 4,6 \cdot \frac{10,82 \cdot 0,96^4}{1,1 \cdot 0,96^3} = 6,23 \text{ t и т.н.} \quad (18)$$

$$\eta_i = \eta_{3\text{П}}^y, \quad (19)$$

където: η_i е к.п.д. на предавката за съответната степен;
у - броят на зъбните предавки за съответната степен;
 $\eta_{3\text{П}} = 0,96$ - к.п.д. на закритата зъбна предавка.

Таблица 8

Необходими спирачни сили на хидрозабавителя

Степен i	1	2	3	7
B_i [t]	16,58	11,84	8,4	2,45

На фиг. 1а с пунктир са показани спирачните сили създавани едновременно от хидрозабавителя (ретардера) и дизеловия двигател (при блокиран хидротрансформатор).

Общи относителни съпротивления, максимални скорости, средни скорости, времена за движение и необходими теглителни сили на самосвала за различните участъци от трасето

Тези величини са дадени в табл.9.

Таблица 9

Общи относителни съпротивления w_i , максимални скорости v_i^{max} , средни скорости v_i^{CP} , времена за движение t_i и необходими теглителни сили F_i на самосвала за различните участъци от трасето

i	L_i [m]	w_{oi}	i	w_i	степен	v_i^{max} [km/h]
1	330	5	0	5	5	30 (40) → 30
2	50	5	10	15	2	12 (20) → 12
3	120	5	0	5	5	30 (60) → 30
4	120	5	0	5	7	62 (65) → 62
5	50	5	-10	-5	7 (5)	74,5 (40) → 40
6	330	5	0	5	7	62 (65) → 62

i	k_{vi}	v_i^{CP} [km/h]	t_i [min]	F_i [kN]
1	0,5	15	1,32	32,2
2	0,6	7,2	0,42	96,6
2	0,6	18	0,4	32,2
4	0,35	21,7	0,33	16,95
5	0,7	28	0,11	-16,95
6	0,7	53,4	0,46	16,95

$$\sum_{i=1}^6 t_i = 3,01 \text{ min}$$

За участъци 1, 2, 3, 4 и 6 максималните скорости се определят по граничната тягова характеристика, а за участък 5 - по спирачната характеристика.

В скоби са дадени максималните скорости на движение на самосвала според правилника за безопасност. От двете скорости (отчетена и максимална безопасна) се приема по-малката.

$$w_i = w_{oi} \pm i_i \quad (20)$$

$$v_i^{\text{CP}} = k_{vi} \cdot v_i^{\text{max}} \quad (21)$$

$$t_i = \frac{0,06 \cdot L_i}{v_i^{\text{CP}}} \quad (22)$$

$$F_i = \frac{1}{100} \cdot P \cdot w_i \cdot g, \text{ kN} - \text{ за участъци 1, 2 и 3 (натоварен самосвал)} \quad (23)$$

$$F_i = \frac{1}{100} \cdot m \cdot w_i \cdot g, \text{ kN} - \text{ за участъци 4, 5 и 6 (празен самосвал)}, \text{ където: } k_v - \text{коэффициент на скорост (табл.9)} \quad (24)$$

Таблица 9

Коефициент за определяне на средната скорост на самосвала за различните участъци от пътя

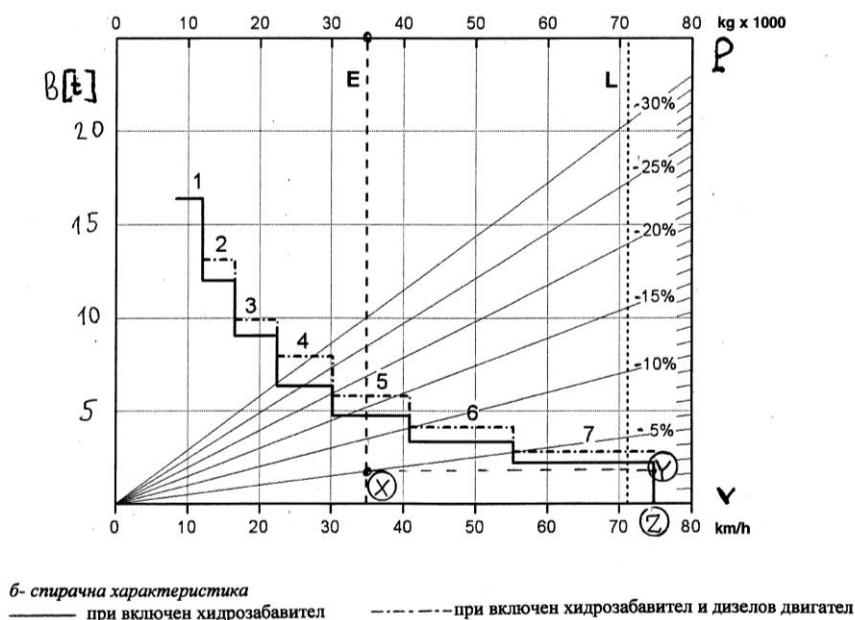
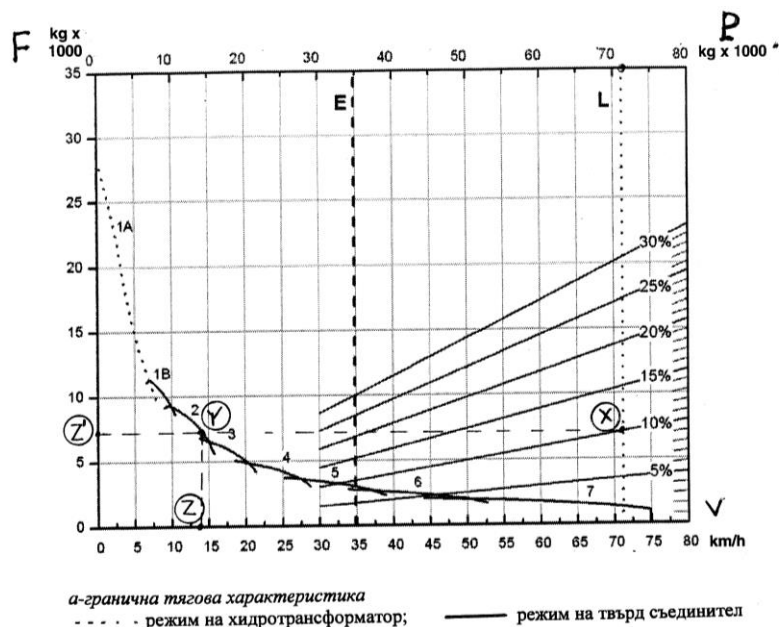
L_i [m]	при потегляне (участъци 1 и 4)	при движение без спиране (у-ци 2, 3, 5 и 6)
0 - 100	0,25 - 0,50	0,50 - 0,70
100 - 250	0,35 - 0,60	0,60 - 0,75
250 - 500	0,50 - 0,65	0,70 - 0,80
500 - 750	0,60 - 0,70	0,75 - 0,85
750 - 1000	0,65 - 0,75	0,80 - 0,85
Над 1000	0,7 - 0,85	0,80 - 0,90

За участъци 1, 3, 4 и 6 (движение по хоризонтален път или път с малък наклон) се взимат най-малките стойности на k_v от диапазона. За участък 5 (движение надолу при голям наклон) се взима най-голямата стойност от диапазона. За участък 2 (движение нагоре при голям наклон) се взима средната стойност от диапазона.

Нека да определим по графиката от фиг.1а необходимата теглителна сила и максималната скорост на натоварения самосвал Caterpillar 770 ($P=71,2t$) при движение нагоре в

изходната траншея на рудника (участък №2 от трасето). Наклонът на траншеята е $i_2=5\%$, а пътят е в средно състояние ($w_{02}=5\%$).

На една графика (фиг.1а) се нанасят граничната тягова характеристика на самосвала $F=f(v)$ и зависимостите $F=f(P)$ при различни общи относителни съпротивления $w_i[\%]$ (5%, 10%, 15% и т.н.), където: F_i [kg] - необходими теглителни сили на самосвала за участъците с различни w_i .



Фиг.1. Характеристики на самосвал Caterpillar 770 с хидромеханична предавка, максимална товароподемност 36,3 t и седемскоростна кутия
 Е - празен самосвал; L - натоварен самосвал; v - скорост на движение на самосвала; F - теглителна сила на самосвала; P - пълна маса на самосвала (собствена маса + маса на товара); B - спирачна сила на самосвала

Зависимостите $F=f(P)$ представляват прави линии, започващи от точката с координати 0,0 и преминаващи през точките с координати P, F_i , където:

$$F_i = 10 \cdot w_i \cdot P, \text{ kg} \quad (25)$$

От точката, съответстваща на $P=71200\text{kg}$ прекарваме вертикална линия L до пресичането на правата, съответстваща на $w=10\%$ ($w_2=w_{02}+i_2=5+5=10$). От пресечната точка X прекарваме хоризонтална линия до пресичането и с ординатната ос в т. Z и отчитаме

необходимата теглителна сила $F_2=7400\text{kg}$. От пресечната точка У на тази линия с граничната тягова характеристика спускаме вертикална линия до пресичането и с абсцисната ос в т.З и отчитаме максималната скорост на самосвала за този участък $v_{2\max}=14\text{km/h}$ (самосвалът работи на 2-ра степен).

Нека сега да определим по графиката от фиг.16 максималната безопасна скорост на празния самосвал Caterpillar 770 ($m=34,6\text{t}$) при спускане надолу в изходната траншея на рудника (участък №5 от трасето). Наклонът на траншеята е $i_2=10\%$, а пътят е в средно състояние ($w_{02}=5\%$).

На една графика (фиг.16) се нанасят граничната спирачна характеристика на самосвала $B=f(v)$ и зависимостите $B=f(P)$ при различни общи относителни съпротивления $w_i[\%]$ (-5%, -10%, -15% и т.н.), където: $B[\text{kg}]$ - необходими теглителни сили на самосвала за участъците с различни w_i .

Зависимостите $B=f(P)$ представляват прави линии, започващи от точката с координати 0,0 и преминаващи през точките с координати P, B_i , където

$$B_i = 10 \cdot w_i \cdot P, \text{ kg.} \quad (26)$$

От точката, съответстваща на $m=34600\text{kg}$ прекарваме вертикална линия Е до пресичането на правата, съответстваща на $w=-5\%$ ($w_5=w_{05}+i_5=5-10=-5$). От пресечната точка Х прекарваме хоризонтална линия до пресичането и с граничната тягова характеристика. От пресечната точка У спускаме вертикална линия до пресичането и с абсцисната ос в т.З и отчитаме максималната скорост на самосвала за този участък $v_{5\max}=74,5\text{km/h}$ при включена 7-ма степен.

Според правилника за безопасност, обаче, скоростта на самосвала при спускане не може да бъде по-голяма от 40km/h . За да поддържа тази скорост самосвалът трябва да работи с включена 5-та степен на скоростната кутия (при която максималната скорост е 41km/h), и водачът трябва да натиска леко механичната спирачка.

Продължителност на рейса на самосвала

$$T = \sum_{i=1}^6 t_i + t_n + t_p + t_m = 3,01 + 2,6 + 1,15 + 0,3 = 7,06 \text{ min.} \quad (27)$$

където: t_n [min] е времето за натоварване на самосвала;
 t_p - времето за разтоварване на самосвала ($t_p = 0,5 - 2 \text{ min}$);
 t_m - времето за маневри при натоварване ($t_m = 0,1 - 0,5 \text{ min}$);

$$t_n = n_k \cdot t_{c_i} = 4,065 = 2,6 \text{ min} \quad (28)$$

t_{c_i} - продължителността на един цикъл на челния товарач или багера ($t_{c_i} = 0,55 - 0,75 \text{ min}$ за челни товарачи).

Производителност на самосвала

$$Q = n_k \cdot q \cdot k_3 \cdot \rho \cdot \frac{60}{T} \cdot k_n = 4,5 \cdot 6,0 \cdot 9,16 \cdot \frac{60}{7,06} \cdot 0,83 = 219 \text{ t/h}, \quad (29)$$

където k_n е коефициентът на производителност ($k_n = 0,7 - 0,83$).

Проверка на продължителната тангенциална мощност на самосвала

$$N_m^\infty > N_m'^\infty \quad 227 > 158 \text{ kW}, \quad (30)$$

където $N_m'^\infty$ е необходимата продължителна тангенциална мощност;

$$N_m'^\infty = \frac{F_\infty \cdot v_{cp}}{3,6} = \frac{29,19,7}{3,6} = 158 \text{ kW} \quad (31)$$

F_∞ [kN] - продължителната теглителна сила на самосвала;
 v_{cp} [km/h] - средната скорост на движение на самосвала.

$$F_\infty = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 F_i^2 \cdot t_i}{T}} = \sqrt{\frac{32,2^2 \cdot 1,32 + 96,9^2 \cdot 0,42 + 32,2^2 \cdot 0,4 + 16,95^2 \cdot 0,33 + 16,95^2 \cdot 0,46}{7,06}} = 29 \text{ kN}$$

За участък №5 теглителната сила е отрицателна и не се включва в горната формула.

$$v_{cp} = 0,06 \cdot \frac{\sum_{i=1}^6 L_i}{\sum_{i=1}^6 t_i} = 0,06 \cdot \frac{330 + 50 + 120 + 120 + 50 + 330}{3,01} = 19,7 \text{ km/h} \quad (33)$$

Литература

- Дьяков, В.А. 1986. *Транспортные машины и комплексы открытых разработок*. М., Недра. 385 с.
 Овчинников, В.М. 2006. *Гидравлические передачи тепловозов*. Белорусский государственный университет транспорта. Гомель, 321 с.
 Komatsu. *Погрузчики, экскаваторы, карьерные самосвалы. Расчет производительности.*, справочник.
 Caterpillar. *Construction mining trucks.*, справочник.

МЕТОДИКА ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА САМОСВАЛИ ЗА ОТКРИТИ РУДНИЦИ С ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНА ПРЕДАВКА

Христо Шейретов

Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“, 1700 София, sheiretov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Разработена е методика за изчисляване на руднични самосвали с електромеханична предавка. Първоначално се избира модела и товароподемността на самосвала. След това се определят диаметъра на гумите, масата на натоварения самосвал и продължителната мощност на тяговите двигатели и генератора. Избират се тягов електродвигател и тягов генератор. Определя се максималната теглителна сила на самосвала от условията за сцепление и максимален въртящ момент на тяговите електродвигатели, максималната спирачна мощност и максималната спирачна сила на самосвала. Построяват се граничните тягови и спирачни характеристики на самосвала. Определят се максималните скорости, средните скорости, необходимите теглителни и спирачни сили за всички участъци от трасето на пътя, продължителността на рейса и производителността на самосвала. Накрая се правят проверки на продължителната тангенциална мощност на дизеловия двигател (на периферията на задвижващите колела) и на тяговите електродвигатели за нагряване.

На базата на разработената методика е решен конкретен пример.

Разработената методика може да се използва както от студентите, така и от специалистите, които работят в миннодобивната и строителната промишленост.

METHODOLOGY FOR THE CALCULATION OF MINING DUMP TRUCKS WITH HYDROMECHANICAL TRANSMISSION

Hristo Sheiretov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" Sofia, sheiretov@abv.bg

ABSTRACT. A methodology for the calculation of mining dump trucks with electromechanical transmission is developed. At first the model and the payload of the truck are selected. After that the diameter of tires, the weight of the loaded truck and the continuous power of the traction motors and generator are determined. Traction motor and traction generator are selected. The maximum traction force is determined from the conditions of adhesion and maximum torque of the traction motors, the maximum retard power and the maximum retard force are determined. The rimpull-speed-gradeability and brake performance characteristics of the truck are drawn. The maximum speed, the average speed, the required traction and brake forces of all of sections the road, the duration of the tour and the output of the truck are determined. Finally checks are made for the tangential continuous power of the diesel engine (at the periphery of the drive wheels) and for the heating of the traction motors.

A concrete example is solved using the developed methodology.

The methodology may be useful for the students, and also for the specialists, working in the mining and in the construction industry.

Увод

В Дьяков (1986) са дадени основите на теорията и изчисляването на автомобилния транспорт в откритите рудници. В Проектирование электропривода мотор-колеса (2011) са разгледани видовете видовете електро-механични предавки на самосвалите и проектирането им.

В Caterpillar и БелАЗ са дадени техническите параметри, тяговите и спирачните характеристики на произвежданите от фирмите руднични самосвали. В Komatsu е разгледана практическа методика за определяне на производителността на челните товари, багерите и самосвалите за открити рудници.

На базата на тези литературни източници и допълнителна информация от Интернет е разработена цялостна методика за изчисляване.

Описание на методиката

Входни данни

Самосвалите се натоварват от хидравличен багер права лопата с вместимост на кофата $q = 20 \text{ m}^3$; Изкопаният материал е желязна руда с плътност в разбухнало състояние $\rho = 2,2 \text{ t/m}^3$; Упростеният надлъжен профил на трасето и състоянието на пътя са дадени в табл.1:

Таблица 1

Данни за трасето на пътя

Участък	1	2	3	4	5	6
Дължина L_i [m]	300	100	1000	1000	100	300
Наклон i_i [%]	0	10	0	0	-10	0
w_{oi} [%]	8	5	3,5	3,5	5	8

1 - движение на натоварения самосвал в рудника от багера до изходната траншея; 2 - движение на натоварения самосвал нагоре в изходната траншея; 3 - движение на натоварения самосвал на повърхността от изходната

траншея до товарния пункт; 4 - движение на празния самосвал на повърхността от товарния пункт до изходната траншея; 5 - движение на празния самосвал надолу в изходната траншея; 6 - движение на празния самосвал в рудника от изходната траншея до багера.

w_{oi} - основно относително съпротивление (2-3,5 - за път в добро състояние (със здрава повърхност); 5-за път в средно стояние (повърхността се огъва под натиска на колелата); 8-10 - за път в лошо състояние (основата не е уплътнена и бързо се образуват се коловози); 15-20 - за път в много лошо състояние (кален път с мека повърхност и дълбоки бразди)).

Избор на самосвал

Самосвалите се избират в зависимост от вместимостта на кофата на багера q според табл.2 и табл.3.

Таблица 2

Избор на максимална товароподемност на самосвала

q [m ³]	10 - 15	16 - 20	21 - 34	35 - 40
G [t]	130 - 136	130 - 190	160 - 292	220 - 363

G - максимална товароподемност на самосвала

Таблица 3

Класификация на произвежданите модели двусни самосвали с електромеханична предавка по товароподемност (ТП)

Клас по ТП	130 - 136 t	160 - 190 t	220 - 222 t
Фирма			
Hitachi		EH3500 190 t	EH4000 222 t
Komatsu		730E 184 t	830E 222 t
Unit Rig	MT 3300 136 t	MT 3700 186 t	MT 4400 221 t
БелАЗ	75137 130 t	75170 160 t	75302 220 t
Liebherr		T252 180 t	T262 220 t

Клас по ТП	240 - 292 t	313 - 327 t	360 - 363 t
Фирма			
Caterpillar		795F AC 313 t	
Komatsu	730E 292 t	960E 327 t	
Hitachi	EH 5000 290 t		
Unit Rig		MT 5500 326 t	MT 6300 363 t
БелАЗ	75310 240 t	75600 320 t	75601 360 t
Liebherr	T272 270 t	T282 327 t	

Избирам самосвал **БелАЗ 75170** със следните параметри:

Максимална товароподемност $G = 160$ t;

Собствена маса $m = 134$ t;

Максимална мощност на диз. двигател $N_{дд} = 1491$ kW;

Номинална честота на въртене на дизеловия двигател (при максимална мощност) $n_{д^H} = 1900$ min⁻¹;

Максимална конструктивна скорост $v_{max} = 50$ km/h;
Гуми 36.00R51.

Диаметър на гумите

$$D_e = (D_{дж} + 2.B_e).0,254 = (51 + 2.36).0,254 = 3,12 \text{ m}, \quad (1)$$

където: $D_{дж}$ е диаметърът на джантата в инчове;
 B_e - ширината на гумата в инчове.

Маса на натоварения самосвал

$$P = m + n_k.q.k_3.p = 134 + 4.20.0,9.2,2 = 292 \text{ t}, \quad (2)$$

където: n_k е броят на кофите, необходими за натоварването на самосвала;

k_3 - коефициентът на запълване на кофата на багера или челния товарач ($k_3 = 0,7 - 1,1$).

$$n_k = \frac{G}{q.k_3.p} = \frac{160}{20.0,9.2,2} = 4,04 \text{ Приемам } n_k = 4. \quad (3)$$

Избор на тягов електродвигател

Тяговият електродвигател се избира според необходимата номинална продължителна мощност $N_{н}^{\infty}$:

$$N_{н}^{\infty} = \frac{N_m^{\infty}}{2.\eta_p} = \frac{973}{2.0,95} = 512 \text{ kW}, \quad (4)$$

където: N_m^{∞} е продължителната тангенциална мощност на самосвала (на периферията на задвижващите колела);
 η_p - к.п.д. на редуктора на мотор-колелото (при двустъпален планетарен редуктор $\eta_p = 0,95$);

$$N_m^{\infty} = N_{дд}.k_{дд}.\eta_e.\eta_{ен}.\eta_p = 1491.0,85.0,95.0,85.0,95 = 973 \text{ kW} \quad (5)$$

$k_{дд}$ - коефициентът, отчитащ каква част от максималната мощност на дизеловия двигател се отдава на тяговия генератор ($k_{дд} = 0,85 - 0,9$);

η_e - к.п.д. на тяговия генератор ($\eta_e = 0,95$);

$\eta_{ен}$ - к.п.д. на електрическата предавка ($\eta_{ен} = 0,85 - 0,9$ при променливо-постояннотокова предавка).

Избирам постояннотоков тягов електродвигател **ЭК-590** със следните параметри:

номинална продължителна мощност $N_{н}^{\infty} = 590$ kW;

номинално напрежение $U_n = 830$ V;

номинална честота на въртене $n_n = 950$ min⁻¹;

максимална честота на въртене $n_{max} = 2570$ min⁻¹;

максимален въртящ момент $M_{max} = 16530$ N.m;

продължителен ток $I_a^{\infty} = 760$ A.

Избор на тягов генератор

Тяговият генератор се избира според необходимата номинална продължителна мощност $N_{гн}^{\infty}$, номиналната честота на въртене на дизеловия двигател $n_{дн}$ и номиналното напрежение на тяговия електродвигател U_n :

$$N_{гн}^{\infty} = N_{дд}.k_{дд} = 1491.0,85 = 1267 \text{ kW} \quad (6)$$

Избирам синхронен тягов генератор **СГТ-1400** със следните параметри:

номинална продължителна мощност $N_{2H}^{\infty} = 1400 \text{ kW}$;

максимално изправено напрежение $U_H = 910 \text{ V}$;

номинална честота на въртене $n_{2H} = 1900 \text{ min}^{-1}$.

Предавателно отношение на редукторите на мотор-колелата

$$i_p = \frac{3,6 \cdot n_{\max} \cdot D_e \cdot \pi}{60 \cdot v_{\max}} = \frac{3,6 \cdot 25703,12 \cdot 3,14}{60 \cdot 50} = 30,21 \quad (7)$$

Максимална теглителна сила на самосвала

От условието за сцепление между колелата и пътя (липса на буксуване):

$$F_{\max} = 1000 P_{\text{сц}} \cdot \psi_{\max} = 1000 \cdot 190,05 = 95000 \text{ kg}, \quad (8)$$

където: $P_{\text{сц}}$ е сцепната маса на самосвала (която се пада върху водещите колела);

$\psi_{\max}$ - максималният коефициент на сцепление между колелата и пътя ($\psi_{\max} = 0,3 - 0,7$);

$$P_{\text{сц}} = \xi \cdot P = 0,65 \cdot 292 = 190 \quad (9)$$

ξ - коефициентът, който отчита каква част от масата на самосвала се пада върху водещите колела (за самосвали с колесна формула 4x2 $\xi = 0,65$).

От условието за максимален въртящ момент на тяговите електродвигатели:

$$F_{\max} = \frac{4 \cdot M_{\max} \cdot i_p \cdot \eta_p}{D_e \cdot g} = \frac{4 \cdot 1653030 \cdot 21,095}{3,12 \cdot 9,81} = 62000 \text{ kg} \quad (10)$$

От двете стойности приемаме по-малката, т.е. $F_{\max} = 62000 \text{ kg}$.

Построяване на граничната тягова характеристика на самосвала

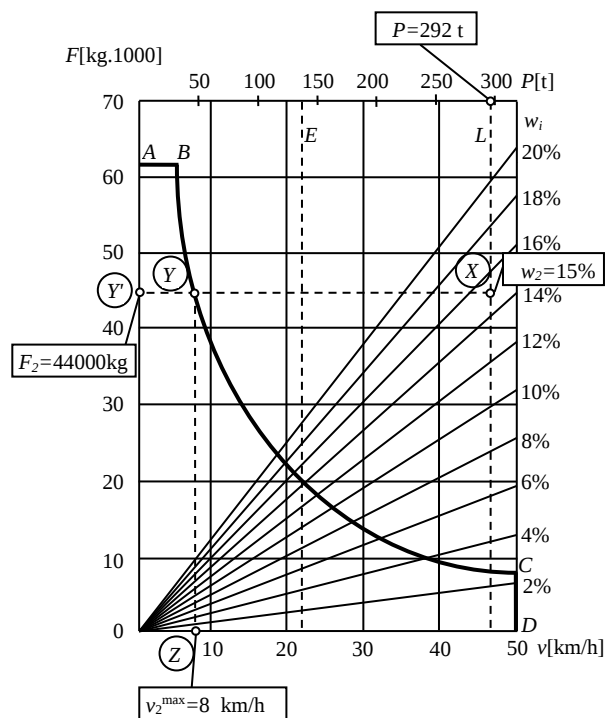
Граничната тягова характеристика (фиг.1) представлява зависимостта на теглителната сила на самосвала $F \text{ [kg]}$ от скоростта му на движение $v \text{ [km/h]}$ при гранични (максимално допустими) условия.

Участъкът AB представлява ограничението на характеристиката по максимална теглителна сила и се построява, като се прекара хоризонтална линия от точката с координати $0, F_{\max}$.

Участъкът BC представлява ограничението по максимална мощност и се построява като се използва зависимостта:

$$F = \frac{3600 N_m^{\infty}}{v} = \frac{3600 \cdot 973}{v} = \frac{3502800}{v}, \text{ kg} \quad (11)$$

Участъкът CD представлява ограничението по максимална скорост и се построява като се прекара вертикална линия от точката с координати $v_{\max}, 0$.



Фиг.1. Гранична тягова характеристика на самосвал БелАЗ 75170 с електромеханична предавка и максимална товароподемност 160 t
 E - празен самосвал; L - натоварен самосвал;
 v - скорост на движение на самосвала; F - теглителна сила на самосвала;
 P - пълна маса на самосвала (собствена маса + маса на товара); w_i - общо относително съпротивление при движение

Построяване на граничната спирачна характеристика на самосвала

Граничната спирачна характеристика (фиг.2) представлява зависимостта на спирачната сила на самосвала $B \text{ [kg]}$ от скоростта му на движение $v \text{ [km/h]}$ в режим на електродинамично спиране при гранични (максимално допустими) условия.

Участъкът AB представлява ограничението на характеристиката по максимална спирачна сила и се построява, като се прекара хоризонтална линия от точката с координати $0, B_{\max}$, където: $B_{\max}$ - максимална спирачна сила.

$$B_{\max} = \frac{F_{\max}}{k_{cn}} = \frac{62000}{1,38} = 44930 \text{ kg} \quad (12)$$

k_{cn} - коефициент, който зависи от максимално допустимия ток на тяговите двигатели, и се приема според табл.4.

Таблица 4

Коефициенти за определяне на максималната спирачна сила и максималната спирачна мощност

$G \text{ [t]}$	130	160	220	240	320
k_{cn}	1,76	1,38	1,25	1,64	1,65
k'_{cn}	1,87	1,95	1,8	2	2,37

Участъкът BC представлява ограничението по максимална спирачна мощност и се построява като се използва зависимостта:

На една графика (фиг.1) се нанасят граничната тягова характеристика на самосвала $F=f(v)$ и зависимостите $F=f(P)$ при различни общи относителни съпротивления w_i [%] (2%, 4%, 8% и т.н.), където: F_i [kg] - необходими теглителни сили на самосвала за участъците с различни w_i .

Зависимостите $F=f(P)$ представляват прави линии, започващи от точката с координати 0,0 и преминаващи през точките с координати P, F_i , където:

$$F_i = 10 \cdot w_i \cdot P, \text{ kg} \quad (20)$$

От точката, съответстваща на $P=292\text{t}$ прекарваме вертикална линия L до пресичането на правата, съответстваща на $w = 15\%$ ($w_2 = w_{02} + i_2 = 5 + 10 = 15$). От пресечната точка X прекарваме хоризонтална линия до пресичането и с ординатната ос в т. Z' и отчитаме необходимата теглителна сила $F_2 = 44000 \text{ kg}$. От пресечната точка Y на тази линия с граничната тягова характеристика спускаме вертикална линия до пресичането и с абсцисната ос в т. Z и отчитаме максималната скорост на самосвала за този участък $v_2^{\max} = 8 \text{ km/h}$.

Нека сега да определим по графиката от фиг.2 максималната и минималната безопасна скорост на празния самосвал БелАЗ 75170 ($P = m = 134 \text{ t}$) при спускане надолу в изходната траншея на рудника (участък №5 от трасето). Наклонът на траншеята е $i_2 = -10\%$, а пътят е в средно състояние ($w_{02} = 5\%$).

На една графика (фиг.16) се нанасят граничната спирачна характеристика на самосвала $B = f(v)$ и зависимостите $B_i = f(P)$ при различни общи относителни съпротивления w_i [%] (-4%, -6%, -8% и т.н.), където: B_i [kg] - необходими спирачни сили на самосвала за участъците с различни w_i .

Зависимостите $B_i = f(P)$ представляват прави линии, започващи от точката с координати 0,0 и преминаващи през точките с координати P, B_i , където:

$$B_i = 10 \cdot w_i \cdot P, \text{ kg} \quad (21)$$

От точката, съответстваща на $P = 134 \text{ t}$ прекарваме вертикална линия L до пресичането на правата, съответстваща на $w = -5\%$ ($w_5 = w_{05} + i_5 = 5 - 10 = -5$). От пресечната точка X прекарваме хоризонтална линия до пресичането и с граничната тягова характеристика. От пресечните точки Y и Y' спускаме вертикални линии до пресичането им с абсцисната ос в т. Z и т. Z' и отчитаме максималната безопасна скорост на самосвала за този участък $v_5^{\max} = 50 \text{ km/h}$ и минималната безопасна скорост на самосвала за този участък $v_5^{\min} = 4 \text{ km/h}$.

Според правилника за безопасност, обаче, скоростта на самосвала при спускане не може да бъде по-голяма от 40 km/h . За да поддържа тази скорост водачът трябва да натиска леко механичната спирачка.

Пресечната точка Y'' на хоризонталната линия през т. X с ординатната ос показва необходимата спирачна сила B на самосвала за участък 2 ($B = 7100 \text{ kg}$).

Продължителност на рейса на самосвала

$$T = \sum_{i=1}^6 t_i + t_n + t_p + t_m = 8,6 + 1,9 + 1,15 + 0,3 = 11,95 \text{ min} \quad (22)$$

където: t_n [min] - време за натоварване на самосвала;
 t_p - време за разтоварване на самосвала ($t_p = 0,5 - 2 \text{ min}$);
 t_m - време за маневри при натоварване ($t_m = 0,1 - 0,5 \text{ min}$);

$$t_n = \frac{1}{60} \cdot n_k \cdot t_u = \frac{1}{60} \cdot 4,28 = 1,9 \text{ min} \quad (23)$$

t_u - продължителност на един цикъл на багера ($t_u = 22-33 \text{ s}$ и зависи от вместимостта на кофата и ъгъла на завъртане на багера).

Производителност на самосвала

$$Q = n_k \cdot q \cdot k_3 \cdot \rho \cdot \frac{60}{T} \cdot k_n = 4,20 \cdot 0,9 \cdot 2,2 \cdot \frac{60}{11,95} \cdot 0,83 = 660 \text{ t/h} \quad (24)$$

където: k_n - коефициент на производителност ($k_n = 0,7-0,83$ в зависимост от условията на експлоатация).

Проверка на продължителната тангенциална мощност на самосвала

$$N_m^{\infty} > N_m^{\infty} \quad 973 < 979 \text{ kW}, \quad (25)$$

където: N_m^{∞} - необходима продължителна тангенциална мощност;

$$N_m^{\infty} = \frac{F_{\infty} v_{cp}}{3,6} = \frac{179,19,5}{3,6} = 979 \text{ kW} \quad (26)$$

F_{∞} [kN] - продължителна теглителна сила на самосвала;
 v_{cp} [km/h] - средна скорост на движение на самосвала.

$$F_{\infty} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 F_i^2 \cdot t_i}{T}} = \sqrt{\frac{229^2 \cdot 2,4 + 430^2 \cdot 1,25 + 100^2 \cdot 1,87 + 46^2 \cdot 1,84 + 105^2 \cdot 0,91}{11,95}} = 181 \text{ kN} \quad (27)$$

За участък №5 теглителната сила е отрицателна и не се включва в горната формула.

$$v_{cp} = 0,06 \cdot \frac{\sum_{i=1}^6 L_i}{\sum_{i=1}^6 t_i} = 0,06 \cdot \frac{300 + 100 + 1000 + 1000 + 100 + 300}{8,6} = 19,7 \text{ km/h} \quad (28)$$

Проверката не излиза с малко и затова трябва незначително да се намалят скоростите на движение на самосвала.

Проверка на тяговите двигатели за нагряване

Средноквадратичният ток в двигателя, при изминаването на самосвала на един рейс (от багера до товарния пункт и обратно), трябва да е по-малък от продължителния ток на двигателя:

$$I_{ср кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 I_i^2 t_i}{T}} < I_a^\infty \quad 607 < 760 \text{ A} \quad (29)$$

$$I_{ср кв} = \sqrt{\frac{790^2 \cdot 2,4 + 1368^2 \cdot 1,3 + 342^2 \cdot 2,9 + 243^2 \cdot 1,8 + 160^2 \cdot 0,2 + 365^2 \cdot 0,9}{11,95}} = 607 \text{ A},$$

където: I_i [A] - токове в двигателя при движението на самосвала по различните участъци от трасето;

$$I_i = \frac{I_a^\infty I\%_i}{100}, \text{ A} \quad (30)$$

$I\%_i$ - процентни стойности на токовете от продължителния ток в двигателя. Отчитат се от универсалната електромеханична характеристика на тяговия двигател $M\% = f(I\%)$ (фиг.3) в зависимост от процентните стойности на необходимите въртящи моменти $M\%_i$ от номиналния въртящ момент на двигателя M_H за различните участъци от трасето.

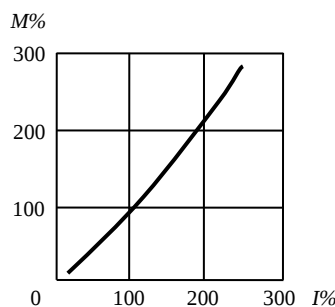
$$M\%_i = \frac{M_i}{M_H} \cdot 100, \% \quad (31)$$

$$M_i = \frac{1000 F_i D_K}{4 \cdot i_p \cdot \eta_p}, \text{ N.m} \quad (32)$$

Таблица 7

Необходими теглителни сили на самосвала, необходими въртящи моменти и токове на тяговите електродвигатели и времена на движение на самосвала за различните участъци от трасето

У-к	1	2	3	4	5	6
F_i [kN]	229	420	100	46	-66	105
M_i [N.m]	6224	11415	2718	1904	1250	2854
$M\%_i$	104	191	45	32	21	48
$I\%_i$	104	180	45	32	21	48
I_i [A]	790	1368	342	243	160	365
t_i [min]	2,4	1,25	2,87	1,84	0,21	0,91



Фиг.3. Универсална електромеханична характеристика на постояннотоковите тягови електродвигатели тип ЭК

$I\%$ - процентна стойност на тока от продължителния ток в двигателя; $M\%$ - процентна стойност на въртящия момент от номиналния въртящ момент на двигателя

$$M_H = \frac{1000 N_H^\infty}{\omega_H} = \frac{1000 \cdot 590}{99} = 5980 \text{ N.m} \quad (33)$$

ω_H е номиналната ъглова скорост на тяговия електродвигател;

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 950}{30} = 99 \text{ rad/s} \quad (34)$$

Ако проверката не излезе трябва да се намалят скоростите на движение на самосвала или да се намали масата на транспортирания материал.

Литература

- БелАЗ 75570 и други - проспекти.
 Дьяков, В.А. 1986. *Транспортные машины и комплексы открытых разработок*. М., Недра. 385 с.
 Проектирование автоматизированного электропривода мотор-колеса большегрузного самосвала БелАЗ - справочник, 2011.
 Komatsu. *Погрузчики, экскаваторы, карьерные самосвалы. Расчет производительности*, справочник.
 Caterpillar. *Construction mining trucks*, справочник.

ВЪРХУ ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ВИБРАЦИОННИТЕ ЧЕЛЮСТНИ ТРОШАЧКИ

Кристиян Цветков, Юлиян Димитров, Живко Илиев

Минно-геоложки университет "Св.Ив.Рилски", 1700 София, juldim@abv.bg, kho@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В работата се разглежда влиянието на честотата на трепене на подвижната челюст на вибрационната трошачка върху производителността. Взема се под внимание действието на гравитационните сили, силите на триене и тези от преносното движение в процеса на разтоварване на материала от зоната на трошене.

Направена е оценка за влиянието на различните фактори върху честотата на трепене на подвижната челюст и върху техническата производителност на трошачката.

ON THE CAPACITY OF THE VIBRATIONAL JAW CRUSHER

Kristian Tsvetkov, Julian Dimitrov, Zhivko Iliev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, juldim@abv.bg, kho@mgu.bg

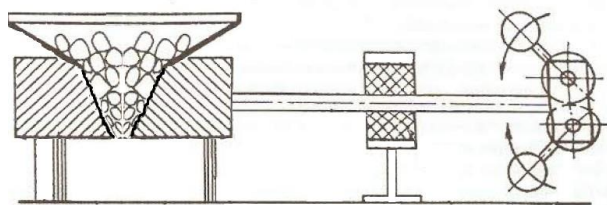
ABSTRACT. The present paper examines the impact of the frequency of oscillation of the movable vibrational jaw crusher productivity. Take into account the effect of gravitational forces, frictional forces and those of the transmission traffic in the process of unloading the material from the crushing zone. An assessment of the impact of various factors on the oscillation frequency of the movable jaw and the crusher technical capacity.

Въведение

Производителността на челюстната трошачка е най-важният ѝ технологичен показател, с който тя участва в производствения процес при раздробяването на минералните суровини.

Трошенето на материала при челюстните трошачки се извършва в клиновидно вертикално пространство, образувано между подвижната и неподвижната челюст, което е отворено отгоре – за постъпване на материала, и отдолу – за разтоварването му. Движението на материала в зоната на трошене става под действие на собственото му тегло. Движението на подвижната челюст осъществява работния процес: като при приближаването ѝ към неподвижната челюст се извършва разтрошаването на материала, а при отдалечаването ѝ – разтоварването на готовия продукт. Изследване върху производителността на челюстните трошачки с просто движение на подвижната челюст (система Блек) е направено в Цветков и Димитров (2012).

В този материал се обсъжда производителността на вибрационните челюстни трошачки. Отличителната особеност на конструкцията на вибрационните челюстни трошачки е непосредствената връзка на подвижната челюст с vibrator посредством еластичен, метален вълновод (фиг.1). Под действието на вибрационните сили в челюстите на трошачката възникват надлъжни и други сложни вибрации. Амплитудата на трепенето на челюстите се определя от параметрите на възбуждащия вълновод.



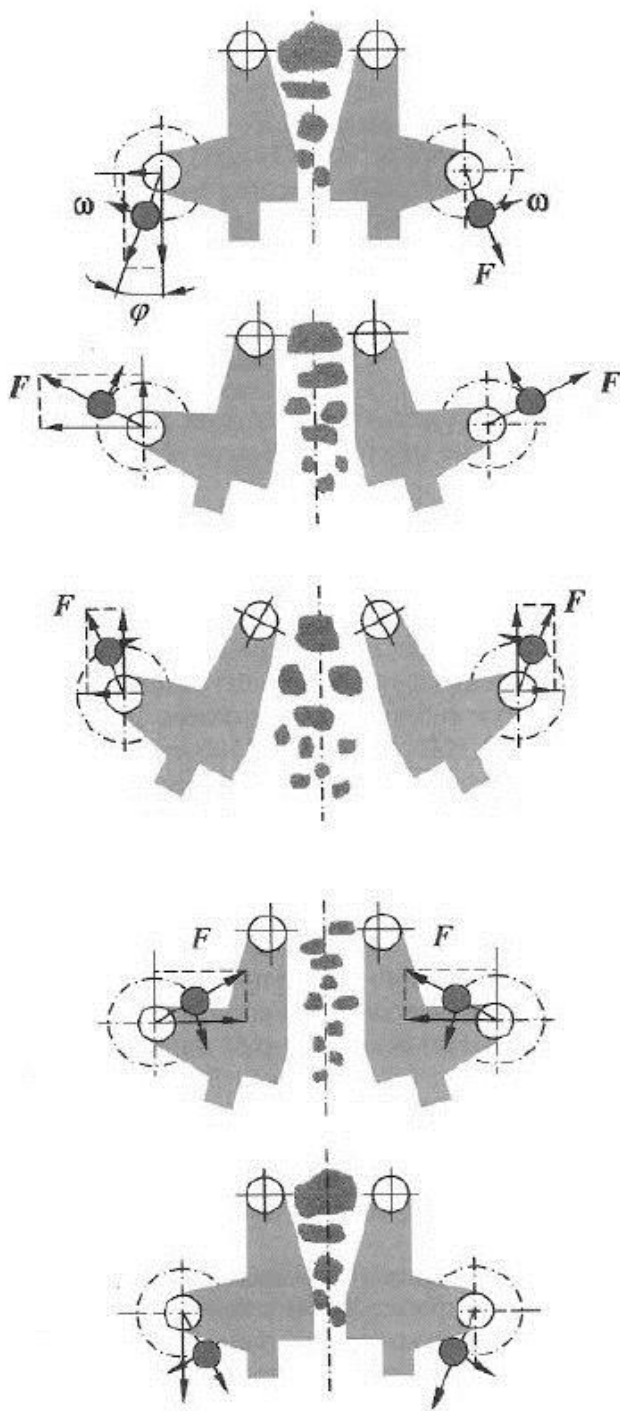
Фиг. 1. Пинципна схема на вибрационна челюстна трошачка

Ударно-вибрационната трошачка се характеризира с висок скоростен режим, има по-интензивно разтоварване на раздробения материал. Това се осигурява чрез съгласувано движение на челюстите отгоре надолу в момент на тяхното разтваряне.

Прилагането на дебалансираща система, действаща на челюстите на трошачката, дава възможност за създаване на практически неограничени усилия в работната област. Тези усилия се ограничават само от якостта на машината. Честотата на въздействие е от порядъка на 1000 – 1500 импулса за минута. При реализацията на машината е заменено кинематичното въздействие на ексцентрика с инерционна връзка – вълновод, който предава вибрационното въздействие. Това техническо решение значително опростява конструкцията. Използва се явлението самосинхронизация на vibratorите, което снижава масата и размерите на съоръжението.

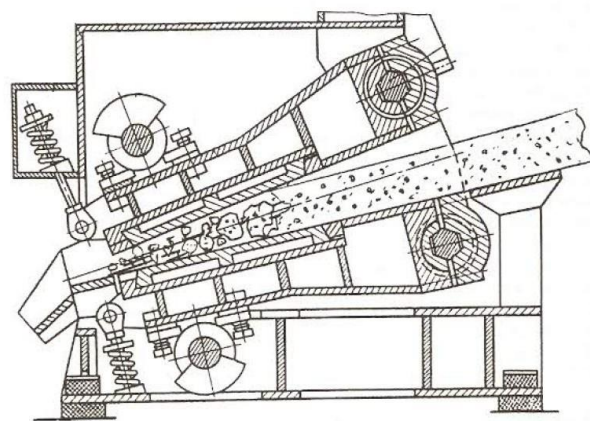
Принципът на работа на вибрационната трошачка е представен на фиг.2. При завъртане на дебаланса на даден ъгъл, центробежната сила предизвиква разтваряне

на челюстите. В следващ момент се произвежда удар на челюстите върху материала. При един пълен цикъл се осъществява разтрошаване на материала и последващо освобождаване на готовия продукт.



Фиг. 2. Принцип на работа на вибрационна челюстна трошачка

На фиг. 3 е дадена схемата на един специален вид вибрационна трошачка, при която работната камера е почти хоризонтална (Вайсберг и др., 2004).



Фиг. 3. Пример на вибрационна трошачка със специално предназначение

Ако в обичайните трошачки разтоварването на продукта се осъществява за сметка на гравитационните сили, то в тази машина разтоварването е за сметка на импулсите, предизвикани от раздробявания материал. Представената на фиг. 3 трошачка е предвидена за разтрошаване на железобетонни блокове. Двете челюсти на трошачката са подвижни, като върху тях се въздейства синхронно от дебалансиращи вибратори. Окачването на трошачката представлява комбинирана еластична система.

Аналитични изследвания

За разлика от обикновените челюстни трошачки, височината на призмата на попадане на раздробения материал се определя не само от разстоянието, изминато от материала при свободно падане за времето на отваряне на челюстите, но и от частта от пътя, изминат от челюстите относно движещия се материал.

Относителното преместване на материала спрямо трошачката y_{OTH} се определя по формулата (Вайсберг и др., 2004):

$$y_{OTH} = \frac{1}{2}gt^2 + \frac{2F}{M_{TP}w^2}, \quad (1)$$

където

F - силата, приложена от вибратора;

M_{TP} - масата на трошачката;

w - честотата на вибратора и

g - земното ускорение.

Обработваният материал изминава допълнителен път $y_{ДОП}$, определен от скоростта, която придава на материала трошачката в момента на разтваряне на челюстите

$$y_{ДОП} = \frac{2Ft}{M_{TP}w}. \quad (2)$$

Тук $\frac{2F}{M_{TP}w}$ е скоростта, която трошачката придава на

материала в посока на разтоварване.

По този начин общият път, изминат от материала за времето на разтваряне на челюстите, който представлява височината на призмата на попадане е

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + \frac{2F}{M_{TP}w^2} + \frac{2Ft}{M_{TP}w}. \quad (3)$$

Формулата дава възможност да се оцени пропускателната способност и работната област на трошачката.

Теоретично производителността Q може да бъде представена с формулата

$$Q = k_{yn}, \quad (4)$$

където

k е коефициентът за пълнота на призмата на попадане;

y - общият път, изминат от материала;

n - броят на циклите на разтваряне на челюстите за единица време.

Пресмятане на производителността на трошачката

При пресмятането на производителността на трошачката по формула (4) е прието, че материалът се разтоварва от трошачната камера съгласно закона (фиг. 4).

$$h = \frac{1}{2}gt^2, m, \quad (5)$$

където

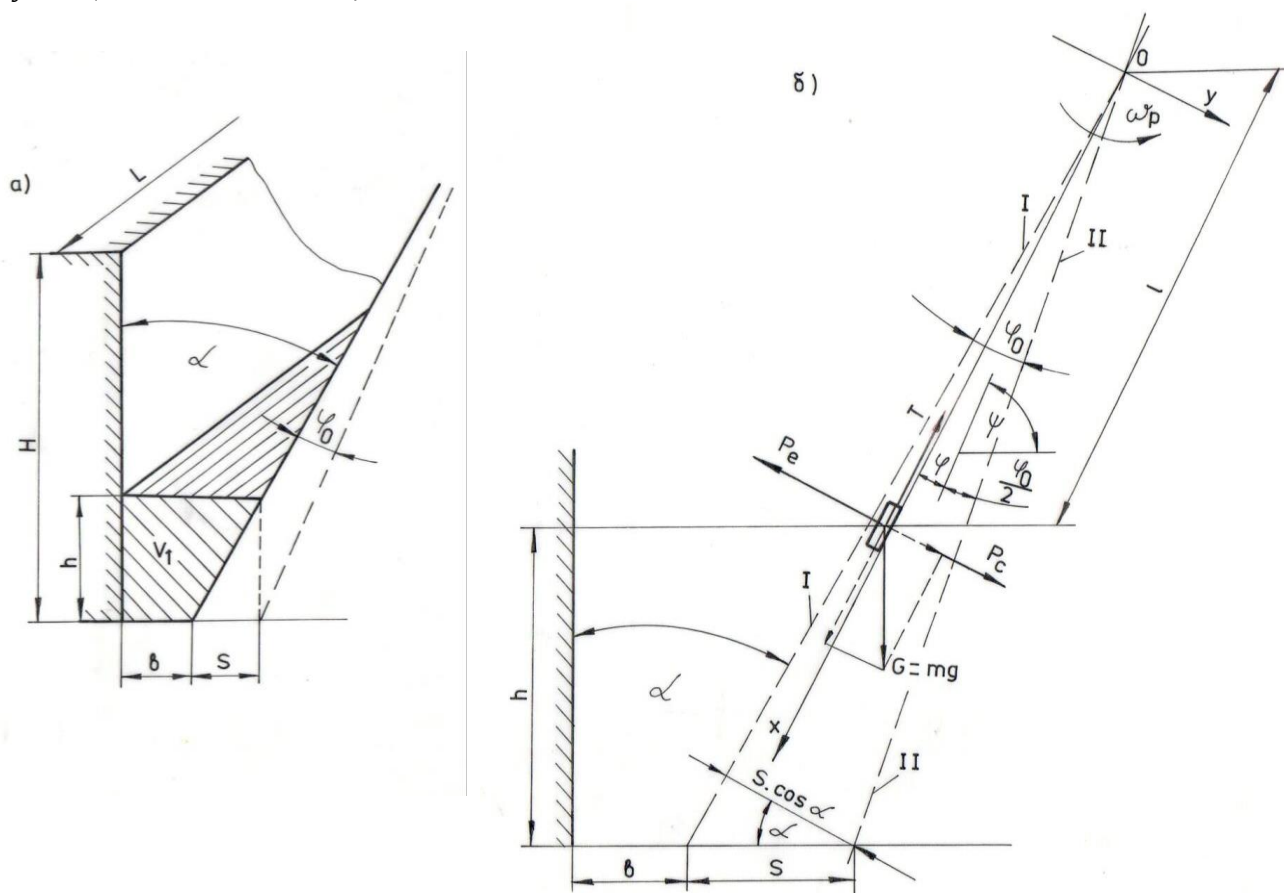
$g, [m/s^2]$ е земното ускорение;

h - височината на основата на разтоварената призма, m ;

$t = \frac{30}{n}$ - времето равно на половината период на

колебанието на подвижната челюст;

n - честотата на дебалансиращия вибратор.



Фиг. 4. Схема за определяне честотата на трепене и производителността на челюстна трошачка с просто движение на подвижната челюст

Разтоварването на разтрошения материал от работната камера на трошачката е възможно само по времето на обратния ход на подвижната челюст. При симетричен цикъл на движение това време ще бъде

$$Z = \frac{1}{2Z_T}, s, \quad (6)$$

където Z_T е теоретичният брой трепения на подвижната челюст, s^{-1} .

Скоростта, която придобива раздробения материал се определя от формула (2):

$$\dot{y} = \frac{2F}{M_{TP}w}. \quad (7)$$

Определя се преместването на трошачката в опорните пружини

$$y_0 = \frac{2F}{M_{TP}w^2}. \quad (8)$$

Общото преместване на раздробения материал Y се определя съгласно формула (3).

Обемът на работното пространство при един цикъл се определя с

$$V = L(2b + s)Y. \quad (9)$$

Производителността на трошачката се определя с

$$Q = 60V\mu n, \quad (10)$$

където

μ е коефициентът на разбухване;

γ - плътността на раздробявания материал и

n - честотата на дебалансиращия вибратор.

Разглеждаме частичката като релативно движение върху трептящата равнина при наличието на сили на триене. С достатъчна за практиката точност може да се приеме, че трептеливото преносно движение на подвижната челюст се извършва по закона (фиг. 4):

$$\varphi = \frac{1}{2} \varphi_0 \sin \omega t, \quad (11)$$

$$\text{където: } \varphi_0 = \frac{s \cos \alpha}{l + h / \cos \alpha}; \quad (12)$$

$$\omega = 2\pi Z_T. \quad (13)$$

В такъв случай скоростта и ускорението на преносното движение ще бъдат съответно:

$$\left. \begin{aligned} \omega_p &= \dot{\varphi} = \frac{1}{2} \varphi_0 \cos \omega t; \\ \varepsilon_p &= \ddot{\varphi} = -\frac{1}{2} \varphi_0 \omega^2 \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Законът на движение на частичката ще се определи от уравнението:

$$m\ddot{x} = G \cos \alpha - \mu N, \quad (15)$$

където N е нормалната реакция между частичката и подвижната челюст. Едно решение на (15) е дадено в Цветков, Димитров (2012).

Законът за движение на частичката се представя чрез уравнение 15 само когато реакцията $N > 0$. При $N < 0$ подвижната челюст се движи по закона на преносното движение, а частичката пада свободно. Тъй като свободното падане на частичката ѝ осигурява най-бързо разтоварване, то очевидно условието, при което $N \leq 0$, е по-благоприятно, т.е.

$$G \sin \alpha + P_c \leq P_c. \quad (16)$$

Получава се

$$g \sin \alpha \leq \frac{1}{2} l \omega^2 \varphi_0 \sin \omega t - \varphi_0 \dot{\omega} \cos \omega t. \quad (17)$$

Частичката получава възможност за движение когато подвижната челюст започва обратния си ход и силата на притискане на частичката между челюстите е нула. Тогава $\dot{x} = 0$, $\omega t = \pi/2$, а неравенството 17 добива вида

$$g \sin \alpha \leq \frac{1}{2} l \varphi_0 \omega^2. \quad (18)$$

Съгласно Цветков, Димитров (2012) получаваме

$$k = \frac{l \varphi_0 \omega^2}{2g \sin \alpha} = \frac{\pi^2 l}{4(l + h \cos \alpha)} \quad (19)$$

При челюстните трошачки $h / \cos \alpha < 0,1l$, следователно формула 17 ще добие вида:

$$k \geq \frac{\pi^2}{4,4}. \quad (20)$$

Анализ на получените резултати

Зависимост 18 показва, че в момента на започване на разтоварването на частичката, ускорението от преносното движение е повече от 2 пъти по-голямо от съответната компонента на земното ускорение, т.е. още в началния момент на движението контактът между частичката и подвижната челюст е нарушен и частичката се намира в условията на свободно падане. Аналогично, както в Цветков, Димитров (2012) се доказва, че всяко намаляване на честотата на трептене на подвижната челюст с полупериод $t_1 < t_2$ ще доведе до контакт на челюстта с частичката преди последната да е напуснала трошачната камера. Поради това, че вибрационните трошачки работят с много по-голяма честота, този извод няма практическа стойност. Изведените зависимости от (11) до (20) могат да се използват за определянето на закона за движение на частиците на обработвания материал и при вибрационните трошачки.

В работата се разглежда главно влиянието на честотата на трептене на подвижната челюст на вибрационната трошачка върху производителността. Отчита се влиянието на различните сили, действащи на частичките от разтрошавания материал, при движението им върху подвижната челюст. Взема се под внимание действието на гравитационните сили, силите на триене и тези от преносното движение в процеса на разтоварване на материала от зоната на трошене.

Литература

- Алехин, А. Г., И. Л. Водольянов и Б. В. Клушанцев, 1971. *Влияние кинематики щековой дробилки на срок службы и характер износа дробящих плит*. Строительные и дорожные машины №10.
- Андреев, С.Е., В. В. Зверевич и В. А. Перов, 1980. *Дробление измельчение и грохочение полезных ископаемых*. М., Недра.
- Быховский И.И., 1968. *Основы теории вибрационной техники*, Машиностроение, Москва.
- Вайсберг Л.А, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин, 2004. *Вибрационные дробилки, Основы расчета, проекти-*

- рования и технологического применения*, Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ.
- Миклашевский Е., Н. Мельгунов, 1960. *Вибрационные строительные машины*, Прфтехиздат.
- Рыжиков, Р.К., 1977. *Расчет пропускной способности дробилки крупного дробления*. Строительные и дорожные машины № 6.
- Цветков, Х. К., 1978-1979. *Кинематични особености на челюстни трошачки със сложно движение на подвижната челюст*. Годишник на ВМГИ, т. XXV, св. 1
- Цветков, К.Х., 2007. *Видове конструкции и технологично пресмятане на челюстни и конусни трошачки*. С.
- Цветков, К.Х., 1988. *Обогатителни машини*. Техника, С.
- Цветков, К., Ю. Димитров, 2012. *Върху производителността на челюстните трошачки с просто движение на подвижната челюст*, Годишник МГУ.
- Чешанков, Б. И. и Х. К. Цветков. 1980. *Някои особености при задвижването на челюстни трошачки с просто движение на подвижната челюст*. Машиностроение № 1, С.
- Höffe, K., 1985. *Zerkleinerungs – und Klassiermaschinen* Leipzig.

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ УДАРНО – ВИБРАЦИОННИТЕ МАШИНИ

Юлиян Димитров, Кристиан Цветков, Живко Илиев

Минно-геоложки университет "Св.Ив.Рилски", 1700 София, juldim@abv.bg, kho@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Прилагането на аналитични методи в проектирането на вибрационни машини среща определени проблеми, при опит да се получи по-голяма прецизност. Оказва се, че тези проблеми са от решаващо значение при изучаването на ударно – вибрационните процеси. Статията обсъжда основните модели и параметри на процесите при ударно-вибрационните машини.

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES IN SHOCK – VIBRATION MACHINES

Julian Dimitrov, Kristian Tsvetkov, Zhivko Iliev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, juldim@abv.bg, kho@mgu.bg

ABSTRACT. The application of analytical methods in design of vibration machines encountered problems when trying to obtain greater precision. It turns out that these problems are critical in studying the shock – vibration processes. The paper discussed the main models and parameters of the process of shock – vibration machines

Увод

При вибрационните машини основна роля има ударно-вибрационният процес. Представя се с модела на ударно-вибрационна система (Миклашевский, Мельгунов, 1960, Быховский, 1968, Вайсберг и др., 2004). Пример на такъв процес има при използване на вибробуч, при уплътнение на почви с вибрационна трамбовка и при задвижване на вибрационния конвейер.

Ударно-вибрационните процеси могат да бъдат и вредни. Като пример може да се дадат случаите, при които вибрациите водят до разрушаване на корпуса на машината или на фундамента, на който са монтирани.

Ударът е такова взаимодействие на две тела, при което се възпроизвежда бързо изменение на някоя от механичните величини, характеризираща движението на телата. Възприета е класификация на мигновеното явление (удар):

- при удар от първи род скоростта има прекъсване;
- при удар от втори род втората производна на преместването (ускорението) претърпява прекъсване и т.н.

Вибрационните машини имат различни приложения и в зависимост от това, съответна конструкция. Намират приложение при строителството и производството на строителни материали, при добива и преработката на полезни изкопаеми и др. Използват се: при транспортиране на материали като вибро-транспортъри; за разтоварване на материали – вибрационни разтоварващи

машини; за раздробяване на твърди материали – вибрационни трошачки; за смилане на твърди материали – вибрационни мелници; за пробиване на тунели или анкерни дупки.

Конструкцията на вибрационната машина е съобразена с нейното предназначение и като цяло има най-различни принцитни схеми на вибрационни машини (Миклашевский, 1960). Основно в принципната схема участва еластичен елемент (пружина) и дисипативен елемент (демпфер) и загубата на енергия в системата се представя с дисипативния елемент.

Основни принципи на динамичното деформиране и разрушаване на скалата

Механичният метод на разрушаване и пробиване на скалата най-често е чрез въртливо и ударно въздействие на работния инструмент. Приема се, че процесът на пробиване се подчинява на енергетичен закон за разрушаване на твърдото тяло. Изводът е, че по размера на частиците, които се образуват в процеса на разрушаване на скалата, може да се съди за ефективността на работата на машината. Колкото по-малки са частиците, които се отделят, толкова по-неефективен е процесът, понеже енергията отива за раздробяване на излишно малки частици с голяма обща площ. Преодоляването на този ефект частично се постига с използването на специфична форма на работния инструмент – форма на лопатки на работното тяло. През

1952 г. Ф. Бонд е предложил кинетичен модел на разрушаването на късове материал с неправилна форма. Натиското усилие, приложено към късовете от материала, ги раздробява, като площта на раздробените частици е пропорционална на якостта на материала. Ако напрежението, възникнало в дадена точка, превъзхожда разрушаващото напрежение, то се образува пукнатина. Енергията се превръща в работа, изразходвана за развитие на пукнатината, което води до разрушаване на материала. Понеже границата на еластичност на трошлив материал е равна на границата на якостта му, то преди образуването на първата пукнатина, енергията необходима за разрушаване на материала, се натрупва във вид на енергия на еластични напрежения. Ако натискотата сила е приложена извънредна бързо, което се случва при вибрационно въздействие, то пукнатината се появява преди в материала да е установено равновесно разпределение на енергията. Като резултат се реализира намаляване на количеството енергия, необходимо за разрушаване на материала. Тази теория не отчита пластичните ефекти, но предложеният модел на динамиката на разпространение на пукнатините има важно принципно значение. Много други, по-късно формулирани теории уточняват процеса на разрушение на материала при ударно въздействие.

За получаване на представа за ефекта от внедряването на работния инструмент разглеждаме плосък, кръгъл щамп. Съгласно Щрейнер (1950) разпределението на натиска в равнината на контакт е неравномерно само в началото. След това може да бъде прието равномерно разпределение

$$p = \frac{P}{\pi a^2}, \text{ където}$$

P е силата на натиска на щампа; a - радиусът на щампа.

Преместването на щампа се определя от формулите:

$$\delta = \frac{P(1-\mu^2)}{2aE} \text{ за неравномерен натиск и}$$

$$\delta = 0.54 \frac{P(1-\mu^2)}{aE} \text{ за равномерен натиск. Тук } \mu \text{ е коефициентът на Поасон и } E - \text{модулът на Юнг.}$$

При въздействието на елементите на работния инструмент обработваната скална повърхност преминава в гранично състояние, като достига натиск $\sigma_{i \max}$ при нормален натиск по контакта p (Спивак, 1979).

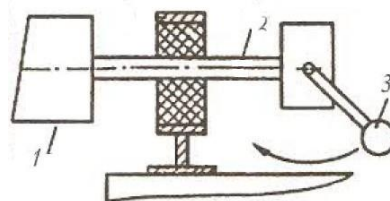
$\sigma_{i \max} = K p$, където K е максималната относителна интензивност на тангенциалните напрежения. В Спивак (1979) са дадени стойности на параметъра K за различни форми на щампа и при число на Поасон на скалата $\mu = 0.25$.

В Цветков, Димитров (2012) са представени основни принципни схеми на действие на работния инструмент. Чрез сравнителен анализ на ефекта от въздействието при различни форми на елемента на работния инструмент се определя най-подходящата форма и минималното натоварване за преминаване в гранично състояние на обработваната повърхност.

Схема на ударно-вибрационен механизъм

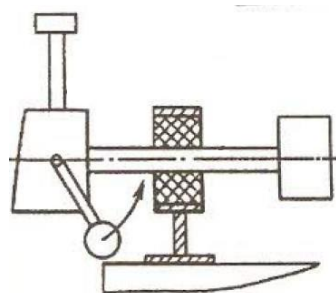
На фиг. 1 е представена принципна схема на ударно-вибрационен механизъм, който има следните елементи:

- 1 – работно тяло;
- 2 – вълновод;
- 3 – дебалансен вибратор.



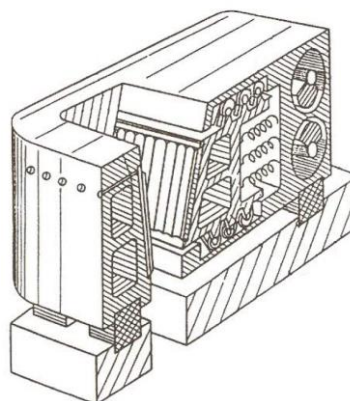
Фиг. 1: Принципна схема на ударно-вибрационен механизъм

На фиг. 2 е представен специален ударно-вибрационен механизъм, при който вибраторът е монтиран непосредствено в работното тяло и за реализиране на вълновия процес се използват вертикален и хоризонтален резонансни вълноводи.



Фиг. 2: Принципна схема на ударно-вибрационен механизъм с вертикален и хоризонтален резонансни вълноводи

От представените схеми на ударно-вибрационен механизъм може да се направи извода, че една необходима, съществена част е вълноводът. Една от задачите в тази работа е представяне на процеса на пренасяне на ударния импулс във вълновода. Моделът описва пренасянето и отразяването на вибрационните вълни. Друг важен процес е взаимодействието на работния елемент с обработвания материал. Този процес се представя чрез линеен модел на ударно-вибрационна система.



Фиг. 3: Ударно-вибрационна челюстна трошачка

Представената на фиг.3 ударно – вибрационна челюстна трошачка е с вградени в един корпус вибратори, вълновод и челюсти.

Математически модел на пренасяне на ударния импулс

Процесът на пренасяне по вълновода на ударния импулс може да бъде описан чрез вълново уравнение като функция на времето. Ефективността при разрушение на ударния инструмент се определя от формата, максималната амплитуда и продължителност на импулса.

Общи принципи и модели на удара са представени в Димитров и Цветков (2011).

Вълновият модел на Сен – Венан отразява достатъчно пълно динамичните процеси при взаимно удрящите се тела. Разглеждаме безкрайно малък елемент на прът, който се движи под действието на сила. Съгласно закона

на Нютон е изпълнено $m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{\partial P}{\partial z} dz$, където

$m = \rho A dz$ е масата на елемента с дължина dz ,

ρ - плътността на пръта,

A - лицето на сечението на пръта,

x - преместването по дължината на пръта и

P - осевата сила.

След като се приложи и закона на Хук за еластично тяло, се стига до вълновото уравнение:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

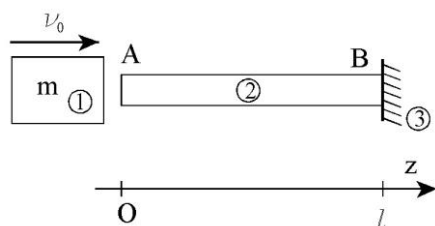
където $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ е скоростта на разпространение на

вълните на деформацията и E - модулът на Юнг на пръта.

В Димитров и Цветков (2011) са представени моделите: „Ударен процес при свободен прът” и „Ударен процес при взаимодействие с абсолютно твърдо тяло”.

Модел на процеса на взаимодействие с обработваната среда

Разглеждаме модел, с твърд, тежък, недеформируем ударник с маса m и еластичен вълновод (фиг. 4)



Фиг. 4. Схематичен модел с твърд, тежък, недеформируем ударник: 1. – ударник; 2. – вълновод и 3. – обработвана среда

Преместването в сечение z от пръта е представено като сума на права и обратна вълна:

$$x(z, t) = f(vt - z) + \varphi(vt + z).$$

В сечението на пръта при $z = 0$ е изпълнено

$$-m \frac{\partial^2 x(0, t)}{\partial t^2} + EA \frac{\partial x(0, t)}{\partial z} = 0, \quad \text{където } E \text{ и } A \text{ са}$$

съответно модулът на Юнг и сечението на пръта.

Граничните условия при $z = l$ са

$$EA \frac{\partial x(l, t)}{\partial z} + kx(l, t) = 0, \quad x(l, t) = \text{const}, \quad v(l, t) = 0,$$

$$\frac{\partial x(l, t)}{\partial z} = 0, \quad \text{където } k = \frac{P}{x} \text{ - твърдостта на контакта.}$$

Начални условия:

$$x(0, 0) = 0, \quad \frac{\partial x(0, 0)}{\partial z} = v_0 \text{ - скорост в началния момент}$$

$$\text{на удара, } x\left(l, \frac{l}{v}\right) = \frac{\partial x\left(l, \frac{l}{v}\right)}{\partial z} = 0.$$

За правата вълна се получава:

$$f(vt - z) = \frac{v_0 l}{v \alpha} \left[1 - e^{-\frac{\alpha}{l}(vt - z)} \right], \quad (2)$$

където $\alpha = \frac{\rho A l}{m}$ - отношение на масите на вълновода и

ударника. За обратната вълна се получава

$$\varphi(vt + z) = \frac{v_0 l}{v \alpha} (1 + \lambda) \left[e^{-b(vt + z - 2l)} - e^{-\frac{\alpha}{l}(vt + z - 2l)} \right], \quad (3)$$

$$\text{където } b = \frac{k}{EA} \text{ и } \lambda = \frac{\alpha + bl}{\alpha - bl}.$$

Съвместен модел на работното тяло и вълновода

Разглеждаме случая, когато ударният инструмент се състои от ударен прът и конично ударно тяло (Алимов, 1976). В този случай към вълновото уравнение, написано за пръта,

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0 \text{ се прибавя и уравнението}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + \frac{2q}{qz - 1} \cdot \frac{\partial y}{\partial z} - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \text{ за работното тяло. Тук } x \text{ е}$$

преместването на сечението в точка от пръта и y - на сечението на ударника.

Уравненията се свързват с:

Начални условия

$$x|_{t=0} = y|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial t}|_{t=0} = \frac{v_0}{a}, \quad \frac{\partial y}{\partial t}|_{t=0} = 0.$$

Гранични условия

$$\frac{\partial x}{\partial z}|_{z=-L} = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial z}|_{z=\infty} = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial z}|_{z=0} = \frac{\partial y}{\partial z}|_{z=0} = 0, \quad x|_{z=0} = y|_{z=0} = 0.$$

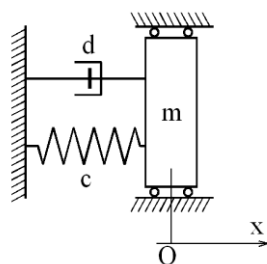
Тук $z = -L$ е в работната повърхнина на ударника и $z = \infty$ се отнася за отдалечени от ударника точки на пръта.

При равенство на модулите на еластичност на двете тела отношението на ударната плътност е $\tau = \frac{F}{F_0}$,

където F е сечението на ударника и F_0 - сечението на пръта.

Дисипативно съпротивление на обработваната среда

Основен модел, представящ процесите във вибрационните машини е линейна система със дисипативен елемент (фиг.5).



Фиг.5. Принципна схема на линейна вибрационна система

Системата се състои от пружина и демпфер, представени с постоянни коефициенти. При движението на тялото на фиг. 5, на него действат сила на пружината $C = -cx$ и сила на демпфера $B = -b\dot{x}$. По закона на Нютон $m\ddot{x} = B + C$, от където получаваме уравнението на движение на системата

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0 \quad (4)$$

В уравнението участват три константи: масата на тялото - m , коефициентът на твърдост - b и коефициентът на еластично съпротивление - c . Със системата се свързват три вида енергии:

кинетичната енергия на системата - $T = m \frac{\dot{x}^2}{2}$,

потенциалната енергия на пружината - $\Pi = c \frac{x^2}{2}$ и

разсейваната дисипативна енергия $D = b \int_0^t \dot{x}^2 dt$.

Уравнение (4) има решение

$$x = \frac{x_0}{\omega} e^{-ht} \sin \omega t, \quad (5)$$

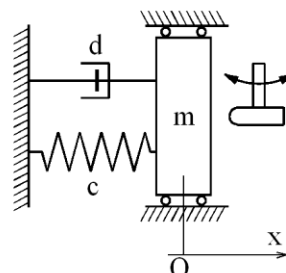
където $h = \frac{b}{2m}$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$ и $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$.

Разгледаният модел на вибрационния процес може да бъде допълнен, така че да се представи ударно-вибрационния процес на обработка на материала (фиг.6). Като пример можем да дадем разтрошаването при вибрационните челюстни трошачки.

При ударния процес, в периода между два удара е валиден модела представен с уравнение (4). При самия удар на системата се придава кинетична енергия K , като е в сила равенството

$$\frac{m\dot{x}_+^2}{2} - \frac{m\dot{x}_-^2}{2} = K, \quad (6)$$

където $\dot{x}_-$ и $\dot{x}_+$ са съответно скоростите на тялото преди и след удара.



Фиг.6. Принципна схема на линейна ударно-вибрационна система

Изводи

Основните процеси при работа на ударно - вибрационните машини се моделират с:

- модел на Сен Венан за пренос на ударния импулс;
- модел на линейна вибрационна система представяща процеса на обработване на материала и
- модели описващи разрушаването на скалите.

Съчетаването на тези модели дава по-голяма прецизност на представянето на процесите при ударно вибрационните машини.

Литература

- Алимов О. Д., Л. Т. Дворников. 1976. *Бурильные машины*, М. Машиностроение.
- Быховский И.И., 1968. *Основы теории вибрационной техники*, М., Машиностроение.
- Буллат А., В. Виноградов, 2002. *Опорно - анкерное крепление горных выработок угольных шахт*, Днепропетровск.
- Вайсберг Л.А., Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин, 2004. *Вибрационные дробилки, Основы расчета, проектирования и технологического применения*, Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ.
- Димитров Ю., Кр. Цветков, 2011. Изследване на формата на отразения импулс при чука на Шмид, Годишник МГУ.
- Димитров Ю., Кр. Цветков, 2012. Моделиране на процеса пробиване на анкерна дупка, Годишник МГУ.
- Энштейн Е. Ф., 1939. *Теория бурения - резания горных пород твердыми сплавами*, Л., ГОНТИ.
- Миклашевский Е.П., Н.Ф. Мельгунов, 1960. *Вибрационные строительные машины*, Прфтехиздат.
- Спивак А.И., А. Н. Попов, 1979. *Разрушение горных пород при бурении скважин*, Москва, «Недра».
- Шрейнер Л.А., 1950. *Физические основы механики горных пород*, М. - Л., Гостоптехиздат.

ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ НА МЕХАНИЧНАТА ЧАСТ НА ЕДИНИЧНОТО ЗАДВИЖВАНЕ НА ЕЛЕКТРОЛОКОМОТИВ K10

Любен Тасев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", катедра „Механизация на мините“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Единичното задвижване на електроконтактен локомотив K10 е основна силова единица. Неговия ремонт представлява значителна част от ремонта на целия локомотив. В статията са разгледани различни начини за възстановяване и ремонт на отделните възли и детайли. Показан е начина за тяхното сглобяване, проверка и реглаж.

RESTORATION OF THE MECHANICAL PARTS OF THE SINGLE DRIVE OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVES K10

Lyuben Tasev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The single drive of electric locomotive K10 is the basic power unit. Its repair is a significant part of a renovation of the entire locomotive. The article looks at various ways to recover and repair of individual components and details. Shown is the way for their assembly, inspection and adjustment.

Увод

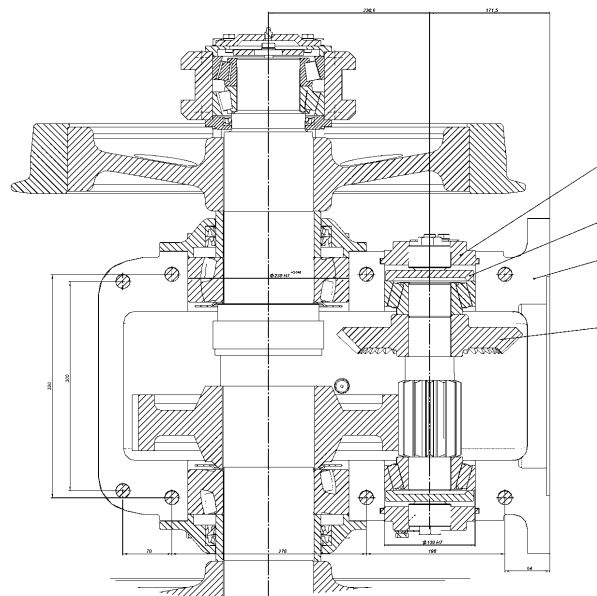
Рудничният електроконтактен локомотив K10 е изключително сигурен и непретенциозен и се е наложил като основен извозен локомотив във всички подземни рудници, неопасни по газ и прах. Той има много добри тягови характеристики, лесен е за управление и непретенциозен за различните минни условия. Локомотивът е изключително ремонтно пригоден, което е още едно условие за приложението му минната практика. Локомотивите използвани в България са с ширина на релсовия път 600 mm.

Чертеж на единично задвижване на електролокомотивът K10 е показано на фиг. 1 и се състои от:

- Електродвигател ДРТ 33
- Колоос;
- Вал зъбно колело с корона;
- Корпус;
- Букси.

Единичното задвижване, чрез колооста предава тяговото усилие на локомотива. Колооста представлява неразглобяем възел. На вала са запресовани голямото зъбно колело z63 и два колесни центъра. Корпуса на редуктора се състои от горна и долна част, които са стоманени отливки. Долната част служи за маслена вана и е снабдена с изпускателна пробка. Горната половина има капачка за преглед на зъбните колела и отвор за доливане на масло и разположение на маслоуказателя. Редукторът лежи на колооста, чрез два двуредни търкалящи лагери 22226 СС WW 33 (ГОСТ 3526). Въртящият момент от електродвигателя, чрез коничната двойка със спирални зъби, се преда-

ва на междинния вал (вал зъбно колело), а от него през цилиндричната право зъбна двойка се предава на колооста.

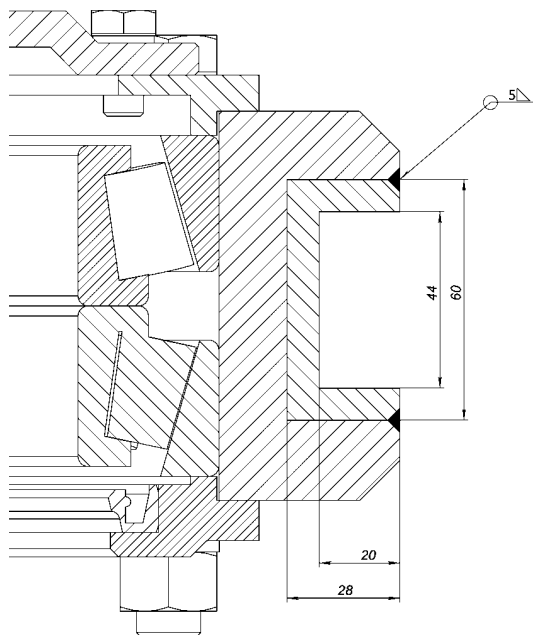


Фиг. 1. Разрез редуктор K10

На ремонт подлежат всички детайли от колоосно редукторната група. Винаги трябва да се преценява целесъобразността от извършването му. В много случай е по-изгодно да се изработят нови вместо да се възстановяват старите. Това ще бъде подчертано за всеки детайл.

Възстановяване на отделните детайли

Букси



Фиг. 2. Схема възстановяване на букса

Буксата е сравнително скъп възел и при всички възможни случаи се ремонтира. Ремонтът се заключава във възстановяване леглата на водене на буксата във водачите на рамата. Тези легла се износват както по дължина така и по ширина и дълбочина, като обикновено добиват неправилна форма. Ремонтът се извършва, чрез наваряване в следната последователност. Установява се размерът на износването. В различните точки и направления и с помощта на ръчно електродъгово наваряване се нанасят подходящи по дебелина слоеве метал. Използват се специални стоманени електроди, като самото заваряване се извършва поетапно за да се позволи буксата да се нагрява равномерно и да се избегнат термични деформации и напрежения. Задължително се проверяват лагерните легла за установяване липсата на деформации вследствие на заварката. Ако размерите на отворите не съответстват на конструктивно заложените, те също се наваряват с подходяща дебелина. След получаване на необходимия по дебелина слой, детайлът се отпуска. След отпускането се обработва до фабричните размери на универсална фреза.

При по-големи износвания, за да се намали обема на заваръчната работа, възстановяването на буксата се извършва със поставяне на допълнителен елемент. За целта се изработва специален U образен елемент виж фиг.2, който да позволи компенсирането на всички износвания. Буксата се разтъргва на универсална фреза до размерите на влагачия се елемент. Елементът се заварява челно по цялата си дължина. Водещия улей се уточнява след заварката.

Колесен център и бандажна гривна

Колесният център по принцип не се износва по време на работа на агрегата. При много редки случаи се наблюдават спуквания на главината. В случаите на промяна на

сглобката, вследствие на разпесоването, вътрешния размер на главината се разтъргва и шлайфа на ремонтен такъв. Обикновено 0.5 до 1 mm по-голям от конструктивния. При разпесоване и повторно набиване частите на повърхнините трябва да бъдат добре почистени, изтрити до сухо и намазани леко с растително масло. Силите за набиване се пресмятат по следната формула [Христов 1980]:

$$P_{\text{наб}} = p_{\text{max}} \pi \mu_{\text{наб}} \ell d N; \quad (1)$$

където:

$$p_{\text{max}} = \frac{\delta_{\text{max}}}{d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)}$$

е максималното налягане в съединението, Pa;

δ_{max} - максималната стегнатост на сглобката, m;

$\mu_{\text{наб}} \approx 0.15$ - коефициентът на триене при набиването;

ℓ - дължината на пресовото съединение, m;

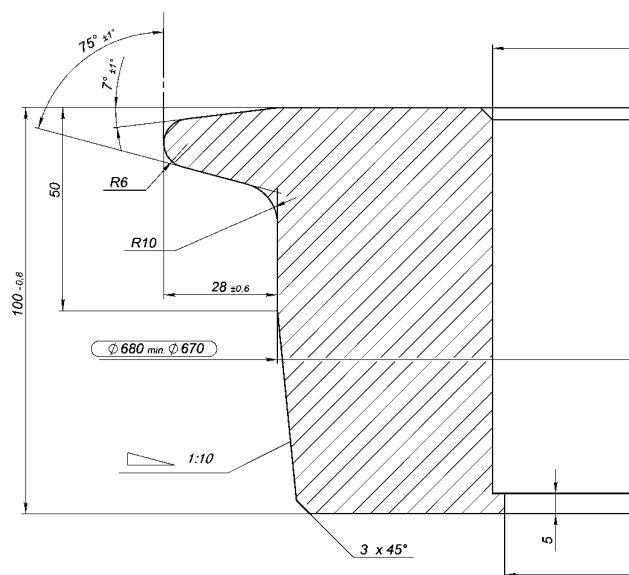
d - диаметърът на пресовото съединение, m;

C_1 и C_2 - коефициенти на Поансон;

E_1 и E_2 - модули на еластичност за двата метала.

За конкретната сглобка:

$$P_{\text{наб}} = 414 \text{ kN}$$



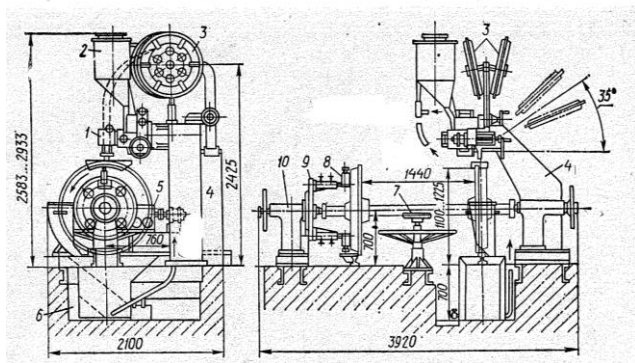
Фиг. 3. Ремонтни размери на бандажна гривна

Бандажните гривни се износват най-много и задължително подлежат на възстановяване и ремонт. В случая когато износванията са по-малки от 10% от дебелината на гривната, то същата се престъргват на ремонтен размер, които се определят от размера на по износената гривна (виж фиг. 3). Разстъргването се извършва на специален бандажен струг, който престъргва двете бандажни гривни едновременно. Снабден е с копирно устройство, което формира точния профил на бандажната гривна. Допуска се престъргването и да стане на обикновен универсален струг, като двете бандажни гривни се престъргват поотделно, а със специално изработен шаблон се контролира точността на профила. От особено значение е да се спазва разлика по малко от 1mm в диаметъра на търкаляне и

разстояние между вътрешния ръб на ребордите 598⁻² mm. Радиално и аксиално биене се допуска в границите от 0.2 mm.

В случаите когато износванията са големи се извършва машинно наваряване на работната повърхност на специално заваръчно автоматична установка (виж фиг. 4

Фиг.) (Вилов, 1986). Колооста е разположена между центрове на предното и задното седло (поз. 4 и 10). Предното седло 10 има план шайба 9 със зъбен венец и два водача 8 за захващане и въртене на колооста с помощта на задвижването 5. На стационарната колонка 4 са постави дъговата заваръчна глава 1 бункер 2, две бобини с електроден проводник 3 и пулт за управление. Заваръчната глава 1 може да се премества с помощта на хоризонтален и вертикален супорт в рамките от 350 до 500 mm. Предвидена е възможност наклоняване на главата по и напречно на шева. Винтовият крик 7 служи за закрепване на колооста на линията на центрите и завъртането и в хоризонталната плоскост за наваряване на втората бандажната гривна. Излишният флюс се изсипва в флюсосборник 6 и от там се връща в бункера 2 на флюсоапарата.



Фиг. 4. Автоматична установка за наваряване

Заваръчната глава 1 подава електронен проводник с диаметър 5 mm едновременно от две бобини при следния режим на заваряване:

- Ток 500A
- Напрежение 24-26 V;
- Скорост на преместване на дъгата 12-18 m/h

Електродите са разположени един след друг на разстояние 60-80 mm. В наварения метал въглерода не трябва да бъде повече 0.20%, защото в наварката ще се появят пукнатини. Основното предназначение на флюса при автоматичната заварка е да защити метала от вредното влияние на атмосферния въздух, да осигури правилно формиране на шефа и да намали загубите на метал. След наваряването бандажите се престъргват на бандажен струг по описания вече начин.

При големи износвания на бандажната гривна, надхвърлящи 30 % от общата ѝ дебелина, се преминава към подмяна на последната. Свлягането на износената бандажна гривна се извършва чрез срязване. То се извършва с кислород, като се внимава да не се повреди повърхнината на колесния център. Набиването става след като новата бандажна гривна се нагрее до 200-220 °C и се спусне ко-

лооста с колесния център в нея, като се остави да се охладва бавно. При набиването трябва да се осигури сглобка със стегнатост от 0,6 до 0,8 mm. След набиване на двете бандажни гривни, те се обработват на бандажен струг.

Вал (Колоос)

Най честите износвания се наблюдават в шийките на буксовите лагери. Износванията в повечето случаи са по малки от милиметър и тяхното възстановяване се извършва чрез ръчно електродъгово наваряване (фиг. 5 Фиг.).



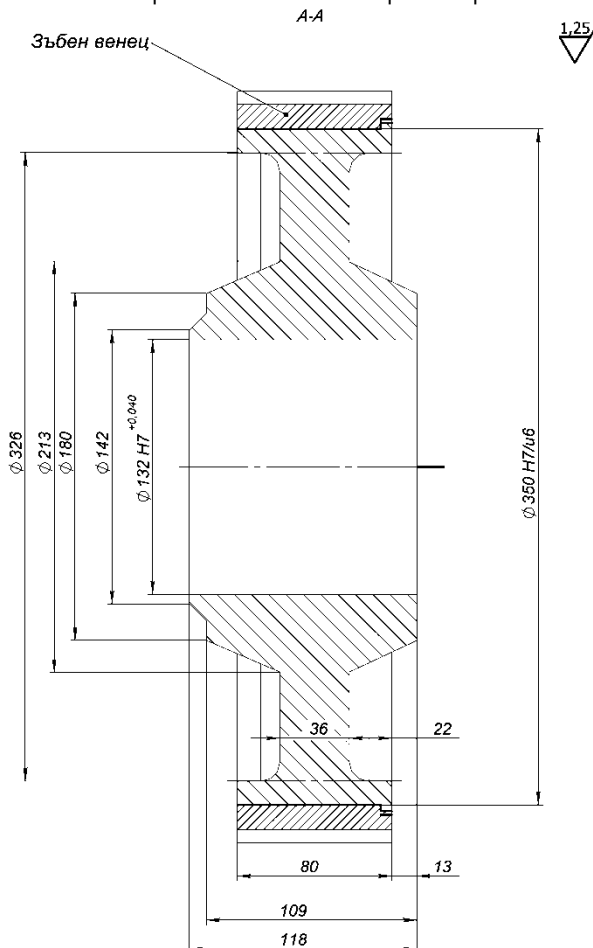
Фиг. 5. Наварена лагерна шийка



Фиг. 6. Шийка на колоос след разпресоване

Престъргването се извършва на обикновен универсален струг, като валът се качва на два центъра. Когато са повредени челните резбови отвори M12, отворите се пробиват и пренарязват с резба M14. Когато отворите са много разбити, те се запълват и се пробиват нови отвори на същата делителна окръжност, изместени на 60°. Когато по пресовите сглобки след разпресоване има промяна в диаметъра или големи надирания (фиг. иг. 6), то тези шийки се наваряват, престъргват и шлайфат на ремонтен размер по-голям 0,5 до 1 mm от конструктивния. Размерът се увеличава за да може да се почистят надиранията и по вътрешните отвори на колесния център или голямото зъбно колело.

Контактният пръстен се почиства и пришлайфа.



Фиг. 7. Ремонта схема на зъбно колело z63 t6

Голямо зъбно колело

Зъбното колело z63 t6 се износва в процеса на работа и при извършване на ремонт задължително се възстановява или подменя. Възстановяването на зъбното колело е възможно да се извърши по два начина. При първия със специална заваръчна технология се запълват пространството между зъбите с ръчно или механично електронаваряване, като се използват специални електроди. След извършване на наваряването детайлът се отпуска и зъбите се пренарязват. Следва закаляване чрез ТВЧ с твърдост до 55-60 HRC и шлайфане на зъбите. Вторият начин е чрез изработване на нов зъбен венец. За целта зъбното колело се отпуска, зъбите се престъргват и се изработва венец (втулка), чийто вътрешен диаметър съответства на диаметъра, на който е престъргано зъбното колело със стегнатост 0.5 mm (фиг. 7).

Венецът се загаря до 200 °C и в него се вкарва престърганото зъбно колело. Остава се да изстинат бавно. След това се обработва по описания по-горе начин. Венецът може да бъде изработен от листов материал 40X с дебелина 30mm и да се огъне пръстен на валцова машина и съответно завари. По-добър начин е да се използва центробежно лята тръба с външен диаметър 400 mm и с дебелина 40-50 mm.

Изработването на новото зъбно колело се извършва от стомана 40X Ø400. Опитът в ремонта на зъбните колела е показал следното:

- цената на възстановените колела се различава незначително от цената на ново зъбно колело;
- времето за възстановяване и за изработване на ново е несъществена;
- качеството на новоизработеното колело при всички случаи остава по-високо от това на възстановеното.

По тези причини в повечето случаи се пристъпва към изработване на ново колело.

Корпус

1. Възстановяване на износените лагерни легла може да се извърши по следните начини:

Чрез ръчно електродръгово наваряване при износвания по-малки от 1 mm, ръчно електродръгово наваряване на износените повърхнини. Наваряването се извършва със стоманени електроди. След наваряването, корпусът се отпуска. Почистват се челните повърхнини. Събират се двете половини на корпуса с всички болтове и наварените повърхнини се обработват на борверг до необходимия размер.

При износвания по-големи от 1 mm се фрезват контактните чела на черупките, които след това се обработват по описания по-горе начин. Този начин на възстановяване има недостатъка, че резбовите отвори за захващане на опорните капачки се изместват от делителната си окръжност, което налага изработването на нови отвори на капачките. На борверг се обработват и лагерните легла на вал зъбното колело.

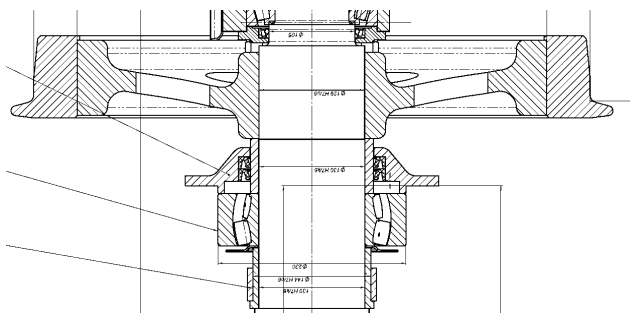
2. Резбовите отвори за фиксиращата капачка се разпробиват и пренарязват с мечик M18. Съответно се разширяват отворите на капачките до Ø19. Повредените отвори за контролната капачка се разпробиват и се нарязва резба M14. Дефектиралите отвори за пробка и нивомера се разпробиват на Ø30mm. В отвора се набива предварително изработена резбова втулка и се заварява. След което отвора M24x2 се прогонва с мечик.

3. Отворите на фланеца към които се присъединява двигателя се разбиват в някои случаи до 10-15 mm. Възстановяват се като се разпробиват на размер Ø50-60 mm, набиват се вложки които плътно се заварява и от двете страни. Двете черупки на корпуса се събират и спрямо отвора за вкарване на двигателя се определят центъра на осите на отворите. След което се разпробиват на размер Ø32.

4. Дефектите по корпуса се свеждат до изкривяване на челния фланец за закрепване на двигателя, спукване и счупване на час от него и откътрване на ушите за повдигане на корпуса. Възстановяването се извършва с ръчно електродръгово заваряване на счупванията. Изкривените фланци се изправят като с помощта на кислородното на изкривяване се нагрива. След почервяване на зоната на изкривяване, внимателно с чук се прилага усилие в посока противоположна на изкривяването. След изправянето в зоната на изкривяване се слагат подсилващи репери, които се заваряват. За окончателно изправяне, челната повърхнина се обработва на борверг. При отчупване на парче, счупената повърхнина се подравнява на фреза или с ръчен ъглошлайф. Изработва се парче, което съответства по размери на отчупеното, заварява се отвън и отвътре със стоманени електроди, слагат се и се заваряват подсилващи репери. Разпробива се отвора Ø32.

5. Каналите за регулиращата капачка се разбиват, а капачката се износват. Канала на сглобения корпус се коригира до точен размер. Изработват се нови капачки, чийто размер да съответства на канала. В случаи на много голямо износване (над 5 mm) се изработва нова друга конструкция капачка, чието захващане към корпуса се осъществява с шест болта M12.

6. В случай на износване на лабиринтното уплътнение, то може да се замени с уплътнител радиален (семеринг) виж фиг. 8.



Фиг. 8. Подмяна на лабиринтно уплътнение със семеринг

Сглобяване на редуктор-колоосната група

Сглобяване на колооста

Всички шийки на вала се почистват и намазват с растително масло. В технологичен порядък набиването започва от вътрешните към външните детайли. Първо се набива зъбното колело z63. Това става на студено на хоризонтална хидравлична. Целият процес на набиването трябва да бъде плавен и равномерно нарастващ. Поставят се маслоотражателните дискове и се монтират лагерите 22226 CC WW 33, които предварително са нагreti във маслена баня до температура 60-80 °C. Монтира се лабиринтният диск, набиват се опорните втулки и се поставят опорните капачки. При преминаване от лабиринтни към контактно уплътнение в капачката се монтират семеринги 150x180x15 (DIN 3760). След като се подредят всички елементи, се запресоват колесните центрове на хидравлична хоризонтална. Бандажната гривна се монтира след като се нагрее до 200-220 °C и се спусне колооста с колесния център в нея. Остава се да бавно да изстинат. Профилът на бандажните гривни се уточнява на бандажен струг, като се коригира вътрешното разстояние между ребордите. Поставят се вътрешните капачки на буксите заедно със семерингът 105X140X12. След което се монтират буксовите лагери 32218 предварително загreti в маслена баня до 60-80 °C. Поставя се осигурителната капачка, затяга се с 3 болта M12x35 клас 8.8, като се монтират осигурителни шайби срещу превъртане. Предварително загretата до 60-80 °C букса се монтира върху лагерите. Поставя се външната капачка. Внимателно се притягат болтовете M16 докато въртенето на ръка стане трудно. Измерва се разстоянието между капачката и буксата с лufтомер. Подбира се набор от подложни шайби, които да са 0.05 mm по големи от лufта. Те се поставят между капачката и буксата и болтовете се затягат окончателно. Проверя се дали буксата се върти свободно на ръка. Снимка на сглобена колоос може да се види на фиг. 9.

Вал зъбно колело

Събирането на възела става в следния порядък. Повърхнините трябва да бъдат добре почистени, изтрети до сухо и намазани леко с растително масло. На хидравлична преса се набива короната до упор. В последствие се извършва монтажа на лагерите 32312, като за по-лесното им монтиране предварително могат да се загreti в маслена баня до 60-80 °C.



Фиг. 9. Колоос K10

Сглобяване на редуктора и центроване на колесната двойка

Почистената и боядисана долна черупка се поставя на дървени трупчета на височина 300 mm от пода. Колооста се поставя върху корпуса така че самонагждащите се лагери 22226 CC WW 33 да легнат в леглата си. Сглобеното вал – зъбно колело също се поставя в лагерните му легла. Монтират се притескателните дискове и опорните капачки с регулиращия винт (фиг. 10). Делителната повърхнина на долния корпус се намазва със масло-термоустойчив силикон с кръгова дюза с диаметър 4-5 mm. Горната половина на корпуса се поставя. Скрепителните болтове се поставят на местата си и се затяга с усилие 150 Nm. Приетата практика в НРБМО е болтовете да се осигуряват срещу превъртане със втора гайка, като се затяга към първата с 150 Nm. Челните повърхнини на опорните капачки се намазват



Фиг. 10. Редуктор K10

със силикон и се притягат към корпуса. Проверя се усилието с, което се върти колооса. Тя трябва спокойно да се превърта на ръка, като прилаганата сила трябва да е равномерна за едно пълно превъртане. Не трябва да има шумове чукания и др.

Монтаж на двигателя и реглаж на коничната зъбна двойка

Малкото зъбно колело се монтира на оста на двигателя със шпонка 16 mm. Короната гайка M33x1.5 се затяга с усилие 100 Nm. Монтира се шплинта 6x40. Двигателят се повдига и подава към фланеца на редуктора или с кран или с палет количка. Между двигателя и редуктора се монтира такова количество регулировъчни шайби, че контактната повърхност на голямото зъбно колело да се намира в средата на пиньона. С индиго хартия се проверява контактното петно на зъбната двойка и се регулира по технологията предложена от (Мърхов, 2007). Стегнатостта на зъбната двойка се регулира с винтовете след окончателното определяне на контактното петно. Конусната зъбна двойка лагерува в ролкови лагери, при които от значение е осигуряване на необходимата първоначална стегнатост. При по-голяма стегнатост се натоварват допълнително лагерите и се повишава триенето и износването. При по-малка стегнатост или наличие на хлабина се появяват удари при работата на предавката. Стегнатостта се измерва с помощта на оловна тел, която се прекарва през зъбите с леко превъртане на двойката и в двете посоки и с помощта на микрометър се измерва хлабината. Тя трябва да бъде в размера на 0.15-0.2 mm. След получаване на желаната стегнатост, регулировачните винтове се фиксират с помощта на пластини. След окончателното регулиране, болтовете на двигателя M30 клас 8.8 се затягат окончателно.

Завиват се магнитната пропка и маслоотдушника. През инспекционния отвор се налива редукторно масло EP90 приблизително 5 литра или до $\frac{3}{4}$ от максимума оказан на нивомера. Капачката на инспекционния отвор се затяга с болтове M12.

На клемите на двигателя се подава напрежение от постоянно токов електрожен. Плавно увеличаваме тока до завъртане на редуктора. Колосите трябва да се въртят спокойно и безшумно. Токът на двигателя не трябва да надхвърля 20 А. След триминутен тест се проверява нагряването на лагерите на ръка, не трябва да се усеща топлина в нито един от тях.

Заклучение

Статията отразява близо 20 годишния опит във възстановяването и модернизирването на руднични контактни локомотиви и в частност редуктор-колоосни групи в Базата по Минно Оборудване към МГУ „Св. Иван Рилски“.

Литература

- Н. Мърхов, 2007. *Експлоатация и ремонт на минна механизация*. С.
- Вилков, 1986. *Технология на производството и ремонта на горните машини*. Киев.
- Арнаудов и др. 1980. *Машинни елементи*. Техника.
- Христов, 1980. *Пресмятане и конструиране на машинни елементи*. С.

АБРАЗИВНО ИЗНОСВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ МИННАТА МЕХАНИЗАЦИЯ

Кристина Илиева-Стойчева

Филиал на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски" София, 6600 Кърджали, ilievakrisi@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Оценката на ресурса на елементи от минната механизация е в пряка връзка с качеството на контактните повърхнини, което от своя страна е функция на режима на триене и процесите на износване.

Изследванията на качеството на контактните повърхнини са актуални по технически и икономически причини. Настоящата статия представя резултати от сравнително изследване на абразивно износване на различни материали за производство на детайли от минната механизация

ABRASION WEAR OF ELEMENTS FROM MINING EQUIPMENT

Kristina Ilieva-Stoycheva

Branch of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, 6600 Kardzhali, ilievakrisi@gmail.com

ABSTRACT. The assessment of the resource elements of the mining equipment is in direct relation to the quality of the contact surfaces, which in turn is a function of the system of friction and the wear process.

The studies of the quality of the contact surfaces are relevant to technical and economic reasons. This article presents the results of a comparative study of abrasive wear of different materials for the production of parts for mining machinery.

Увод

Проблемите, свързани с триенето и износването, представляват интерес за съвременната наука. Изследванията на качеството на различни покрития са все по-актуални по технически и икономически причини.

Разрушаването зависи от външните механични въздействия на средата, свойствата и качествата на контактните повърхности при триене. То се класифицира като допустимо и недопустимо. Най-разпространено допустимо разрушаване е окислителното износване, свързано с образуването на вторични защитни структури по повърхностите на триене. Недопустимите видове са задирането, абразивните и якостните процеси.

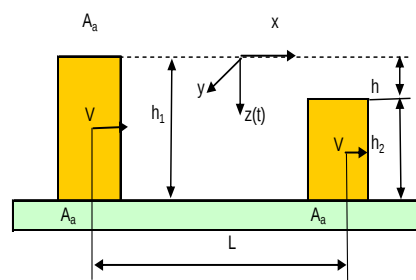
Абразивното износване е сложен процес, който се разглежда като резултат на механично въздействие при наличие на относителна скорост на твърди частици, намиращи се в свободно или закрепено състояние (Гаркунов Д.Н. и др., 2008). Механизмът на абразивното износване се състои в отделяне на материал от износената повърхност. Този материал може да бъде във вид на много тънка стружка; фрагмент от материала от драскотина в следствие на пластична деформация; дисперсни частици, отделящи се при еднократно или многократно въздействие (Крамов, 1987).

Необходимо условие за поява на абразивно износване в процеса на триене е по-голяма твърдост на износващото тяло спрямо износваното.

Методите за измерване на износването са интегрален, диференциален и чрез изменение на изходните параметри на контактната система. Интегралният метод се подразделя на оценка на сумарното износване и анализ на продуктите на износването в смазката. Диференциалният метод се подразделя на микрометриране, метод на изкуствените бази и метод на повърхностна активация.

В настоящата работа се анализират свойствата на различни видове материали за производство на детайли от минната механизация, които са подложени на абразивно износване. Избраната методика за определяне на абразивното износване е по интегралния метод с оценка на сумарното износване и пресмятане на масовото износване на образците.

Масовото износване представлява разрушената маса от повърхностния слой за определен път на триене или за определено време (фиг. 1) (Кандева, 2011).



Фиг. 1. Схема на износването

Износената маса може да се определи от израза:

$$m = \rho V = \rho A_a h, \text{ kg} \quad (1)$$

където:

m - износената маса, kg

ρ - плътността на материала, kg/m³

V - износен обем, m³

A_a - номинална контактна площ, m².

Износеният слой е:

$$h = \frac{m}{\rho A_a}, \text{ m.} \quad (2)$$

Интензивност на износването i представлява разрушената дебелина на материала за единица път на триене. Получената величината е бездимензионна.

$$i = \frac{h}{L} = \frac{m}{\rho A_a L} \quad (3)$$

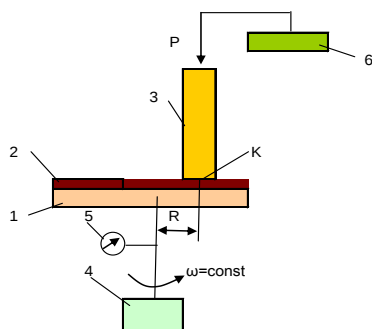
където L е пътът на триене, m.

Абсолютната износоустойчивост е реципрочната стойност на интензивността на износване.

$$I = \frac{1}{i} = \frac{\rho A_a L}{m}. \quad (4)$$

Експериментално изследване

Устройството, с което са проведени експерименталните изследвания за абразивно износване, е представено на фиг. 2 (Кандева, М., 2011).



Фиг. 2. Схема на устройството за изследване на износване при сухо триене по закрепен абразив

Изследваният образец 3 се монтира неподвижно със специално приспособление в натоварващата глава 6 като челната му повърхнина K контактува с абразивната повърхнина 2 на противотялото 1 /хоризонтален диск/. Централното нормално натоварване P се предава на образца чрез сферичен накрайник като се задава автоматично с лостова система. Почистването на контактната зона от фини частици от износването се осъществява чрез засмукване от вакуумпомпа 5.

Изменението на оборотите на въртене на диска е от управляващ блок 4. Регулира се и разстоянието R от центъра на контактната площадка до оста на въртене на диска.

Пътят на триене е

$$L = 2\pi RN, \text{ m,} \quad (5)$$

където

N са оборотите на въртене на диска, min⁻¹

R – разстоянието от центъра на контактната площадка до оста на въртене на диска, m.

Номиналното контактно налягане е

$$p_a = \frac{P}{A_a}, \text{ N/m}^2. \quad (6)$$

Опитът се провежда при следните параметри: натоварване 1 kg, абразив - шкурка № E-28-P80, радиус $R=40$ mm. Отчитането на масата на образците е с електронна везна WPS180/C/2 с точност до 0,1 mg.

Номиналното контактно налягане на уреда върху образците, пресметнато по геометрична площ е

$$p_a = \frac{P}{A_a} = \frac{g \cdot m}{A_a} = \frac{9,81 \cdot 2,05}{2,56} = 7,855 \text{ N/cm}^2 \quad (7)$$

Резултати и обсъждане

В работата са изследвани следните опитни образци:

- 1- стомана Sanbar20, използвана за пробивен инструмент моноблок – химически състав C 0,97 %, Si 0,24 %, Mn 0,27 %, Cr 1,0 %, Mo 0,22 %, твърдост 40 HRC;
- 2- сравнителна стомана 40X;
- 3- твърдосплавна пластина, използвана за пробивен инструмент моноблок;
- 4- твърдосплавна пластина за стругарски нож;
- 5- покритие с електрод Lincoln Hardfacing2008 – химически състав C 4,2%, Si 2,7 %, Cr 18 %, Mo 8,5 %, Nb 9 %, W 7%, твърдост 63 HRC;
- 6- образец EH 350 – химически състав на стоманата – C 0,20%, Si 1.00 %, Mn 1.60 %, Cr 1.80 %, твърдост 279 HB;
- 7- образец EH 550 – химически състав на стоманата – C 0,50 %, Si 2,40 %, Mn 0,40 %, Cr 9 %, твърдост 60 HRC;
- 8- образец EH 600 – химически състав на стоманата – C 0,58 %, Si 2,50 %, Mn 0,30 %, Cr 9,5 %, твърдост 61 HRC;

Данни за образците са посочени в Таблица 1

Таблица 1.

образец	наименование на образца	номинална площ A_a [cm ²]	номинална площ A_a [m ²]	плътност ρ [g/cm ³]
1	стомана за моноблок	2.8396856	$2.8397 \cdot 10^{-4}$	7.210
2	сравнителна стомана 40X	2.8396856	$2.8397 \cdot 10^{-4}$	5.604
3	твърдосплавна пластина за моноблок	1.9600000	$1.96 \cdot 10^{-4}$	13.748
4	твърдосплавна пластина за ст.нож	2.5600000	$2.56 \cdot 10^{-4}$	12.642
5	покритие Lincln Hardfacing2008	1.3225000	$1.3225 \cdot 10^{-4}$	7.610
6	EH350	3.2400000	$3.24 \cdot 10^{-4}$	7.104
7	EH550	2.5600000	$2.56 \cdot 10^{-4}$	5.009
8	EH600	3.2400000	$3.24 \cdot 10^{-4}$	7.800

В резултатите на проведените експерименти образците могат да се обособят в две групи – абразивно неизносоустойчиви /1, 2, 6, 7 и 8/ и абразивно износоустойчиви /3, 4 и 5/.

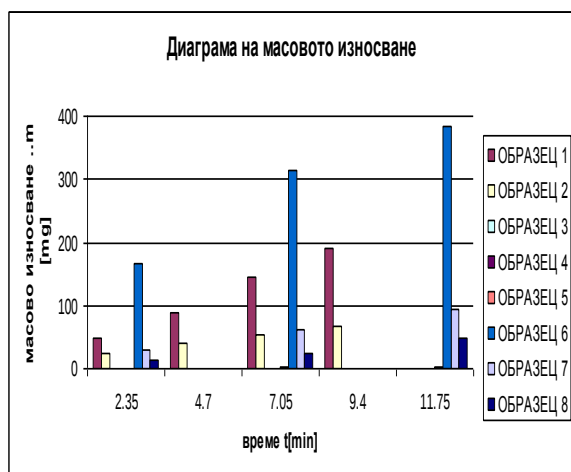
В таблица 2 са показани опитните резултати за параметрите на масовото износване на типичните представители от групата на абразивно неизносоустойчивите материали /образец 1/ и групата на абразивно износоустойчивите /образец 5/.

Таблица 2.

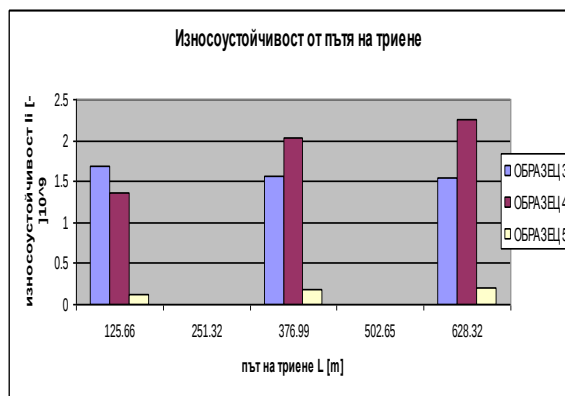
ОБРАЗЕЦ 1							
1	обороти N	0	500	1000	1500	2000	2500
2	време t [min]		2.35	4.7	7.05	9.4	11.75
3	изминат път L [m]		125.66	251.32	376.99	502.65	628.32
4	тегловна маса m [g]	13.161	13.1123	13.0741	13.0151	12.9707	11.9707
5	изношена маса Δm [mg]		49.1	87.3	146.3	190.7	203.7
6	скорост на износване dm/dt [mg/min]		20.9894	18.574	20.751	20.287	20.265
7	интензивност по маса $i_m = m/\rho A_s L$		$0.190 \cdot 10^{-6}$	$0.170 \cdot 10^{-6}$	$0.190 \cdot 10^{-6}$	$0.190 \cdot 10^{-6}$	$0.190 \cdot 10^{-6}$
8	износоустойчивост по маса I_m		$5.26 \cdot 10^{-6}$	$5.88 \cdot 10^{-6}$	$5.26 \cdot 10^{-6}$	$5.26 \cdot 10^{-6}$	$5.27 \cdot 10^{-7}$

ОБРАЗЕЦ 5							
1	обороти N	0	500	1000	1500	2000	2500
2	време t [min]		2.35	4.7	7.05	9.4	11.75
3	изминат път L [m]		125.66	251.32	376.99	502.65	628.32
4	тегловна маса m [g]	39.85	39.8493	39.8486	39.8482	39.8477	39.8473
5	изношена маса Δm [mg]		1.00	2.00	2.10	2.56	3.00
6	скорост на износване dm/dt [mg/min]		0.43	0.43	0.30	0.28	0.26
7	интензивност по маса $i_m = m/\rho A_s L$		$7.87 \cdot 10^{-9}$	$7.87 \cdot 10^{-9}$	$5.51 \cdot 10^{-9}$	$5.21 \cdot 10^{-9}$	$4.73 \cdot 10^{-9}$
8	износоустойчивост по маса I_m		$0.127 \cdot 10^{-9}$	$0.127 \cdot 10^{-9}$	$0.1813 \cdot 10^{-9}$	$0.201 \cdot 10^{-9}$	$0.21156 \cdot 10^{-9}$

На базата на експериментално получените стойности за параметрите на износването са построени диаграмите на масовото износване спрямо времето (фиг.3) и на износоустойчивостта на абразивно износоустойчивите материали (фиг.4)



Фиг. 3. Диаграма на масовото износване на всички образци спрямо времето



Фиг. 4. Диаграма на износоустойчивостта спрямо пътя на триене на абразивно износоустойчивите образци

Експериментално получените резултати са илюстрирани на направените под микроскоп снимки с 4-кратно учеличение (фиг. 5 до фиг. 12). Опитните образци са с размери: ширина 7 mm на височина 5 mm.



Фиг. 5. Образец 1



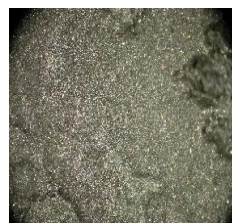
Фиг. 6. Образец 2



Фиг. 7. Образец 3



Фиг. 8. Образец 4



Фиг. 9. Образец 5



Фиг. 10. Образец 6



Фиг. 11. Образец 7



Фиг. 12. Образец 8

Изводи

На базата на проведените изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Сравнителното изследване на различни материали за производство на детайли от минната механизация дава възможност да се обосноват нови решения за избора на материал и/или конструкция на отделни части от минната техника, които работят в условия на абразивно износване.

2. Моделирането на процесите на абразивно износване в лабораторни условия създава възможност за правилен избор между подходяща технология за повърхностна обработка на контактната повърхност и/или полагане на подходящо покритие.

3. Анализът на резултатите от абразивно износване на конкретни елементи от минната механизация създава възможност за предприемане на мерки за повишаване на тяхната дълготрайност.

Литература

- Гаркунов, Д.Н., З.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк, 2008. *Триботехника*, М., МГТУ, 80-81 с.
- Икрамов, У.А. 1987. *Расчетные методы оценки абразивного износа*, М., Машиностроение, 40 с.
- Кандева, М.К. 2011. *Цикъл лекции по инженерна трибология за докторанти* – С, Проект BG051PO001-3.3.06-0046, 3, 50,61 с.

ПОДОБРЯВАНЕ НА ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТТА НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ МИННАТА МЕХАНИЗАЦИЯ ЧРЕЗ НАНАСЯНЕ НА ПОКРИТИЯ ВЪРХУ КОНТАКТНИТЕ ИМ ПОВЪРХНИНИ

Кристина Илиева-Стойчева

Филиал на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски" София, 6600 Кърджали, ilievakrisi@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Голям процент от работните органи в минната механизация са подложени на ударно-абразивно въздействие, което определя техния малък експлоатационен срок по причина на загуба на ресурс. Това е довело до използването на скъпо струващи материали за производството на работните елементи за добив на материал, които пряко контактуват с различни по твърдост и състав механични породи.

В последно време се дава превес на изследванията, свързани с покрития на контактните повърхности, за сметка на изследвания, свързани с подобряване на качеството на различни материали.

Предмет на настоящата статия е изследване на изнosoустойчивостта на тези елементи за установяване на оптимална връзка между потребността от използването на скъпо струващи материали за изработването им и използването на по-обикновени материали в комбинация с подходящи покрития.

ENHANCE WEAR RESISTANCE OF ELEMENTS OF MINING EQUIPMENT THROUGH COATING OF THEIR CONTACT SURFACES

Kristina Ilieva-Stoycheva

Branch of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, 6600 Kardzhali, ilievakrisi@gmail.com

ABSTRACT. A large percentage of the working bodies in the mining machinery are subjected to impact-abrasion, which determines their small lifetime because of the loss of resources. This has led to the use of expensive materials for the operating members for the extraction of material in direct contact with different hardness and mechanical composition breeds.

In recent times, giving priority to research related to painting contact surfaces at the expense of research related to improving the quality of different materials.

The object of this article is a study of the abrasion resistance of these elements to establish an optimal relationship between the need for the use of expensive materials for their preparation and the use of more conventional materials in combination with suitable coatings

Увод

За работните органи на минната механизация проблемите със загубата на ресурс в следствие на износването са сериозни, тъй като техниката е нестандартна и скъпа. В това отношение интерес представляват инструментите, подложени на ударно натоварване.

Процесът на разрушаване на контактните повърхности от абразив чрез ударно взаимодействие е ударно-абразивно износване (Гаркунов, Д.Н. и др. 2008).

Съществена разлика между абразивното износване и ударно-абразивното износване е, че при абразивното износване се получават следи по посока на въздействието на абразива, докато при ударно-абразивното износване липсват насочени задирания. Причина за този качествен признак на различаване на ударно-абразивното износване са следите от пряко динамично внедряване на абразивните частици и липсата на тяхното относително преместване по контактната повърхност. В следствие на удара

абразивните частици предизвикват в метала крехки пукнатини, които се разпространяват в близост до абразива. Друга особеност при ударно-абразивното износване е съпровождащото деформиране на повърхностния слой в зоните на удара, завършващо с разрушаване на микрообеми от метала и образуване на частици на износ. Малоцикличната умора на микрообеми от материала в следствие на прилагането на динамично натоварване при еластични и еластично-пластични контакти също е характерна за механизма на ударно-абразивното износване (Виноградов, В.Н., и др. 1982).

По-голямата част от минната механизация е подложена на ударно натоварване в следствие на спецификата на технологичните процеси /трошене, смилане, копаене/. Контактът със силно абразивна среда води до голямо износване и за целите на изследването е избран пробивен инструмент бургия моноблок. Експериментите са проведени с образци на материали от които се изработва моноблока и образци от различни видове покрития, чиято употреба би повишила изнosoустойчивостта на контактната повърхност

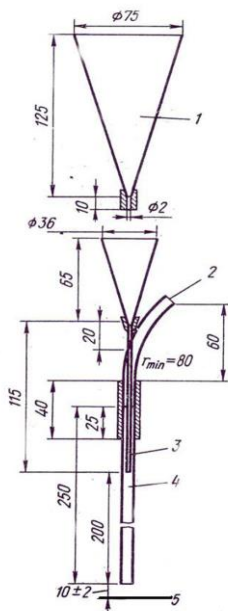
Методика на изследването

В настоящия експеримент условията на ударно-абразивно износване се симулират чрез прилагането на опитна постановка за струйно-абразивно /ерозийно/ износване. Струята от абразив във флуиден поток въздейства механично на контактната повърхност през определен интервал от време и наподобява удар.

Експериментът е реализиран по методика и с устройство за струйно-абразивно износване с абразивен пясък, базиран на модифициран метод на Шух и Керн.

Методът се състои в следното: образец с покритие се подлага на въздействието на поток от сгъстен въздух с карбидни частици за определено време. При проникване през дебелината на покритието до основния материал на изпитвания участък се появява сиво петно и подаването на абразивната струя се прекратява. Изчислява се разходът на абразив.

На фиг.1 е показана схемата на струйно-абразивното износване по метода на Шух и Керн. Абразивът се подава от контейнера с абразив - 1 през дюза с диаметър 2 mm. Съвместно с него през дъговидна тръба 2 със закръгление 80 mm се подава въздух. Вътрешната тръба 3 е с външен диаметър $4 \pm 0,25$ mm и вътрешен диаметър 2,5 mm. Смесената струя се подава по тръба 4 с външен диаметър 8,5 mm и вътрешен диаметър $6,5 \pm 0,10$ mm към хоризонтално разположен образец 5.



Фиг. 1. Схема на струйно абразивно износване по метода на Шух и Керн

Предимство на конструкцията на стенда е възможността за регулиране на дебита на въздушната струя и параметрите на частиците на абразива.

Опитът се провежда при следните условия: постоянно налягане на въздуха $p = \text{const} = 10^5 \text{ Pa}$, хоризонтално разположени опитни образци спрямо подаваната струя, абразив – черен корунд с диаметър на частиците $d_a = 500 \mu\text{m}$, масов дебит на абразивните частици за 1 min - $\dot{m}_a = 166,7 \text{ g/min}$, продължителност 6 min, среден разход на абразивен материал за 6 min - 780 g.

Отчитането на масата на образците е с електронна везна WPS180/C/2 с точност до 0,1 mg.

Износването Δm се определя като разлика в масата на образеца в първоначалния момент $m(N=0)$ и в определен следващ момент $m(N_i)$:

$$\Delta m = m(N=0) - m(N_i), \text{ kg.} \quad (1)$$

Скоростта на ерозионното износване е:

$$\frac{d\Delta m}{dt} = \dot{m} \quad (2)$$

където:

$\dot{m}$ е скоростта на ерозионно износване, kg/s;
t – времето, s

Интензивността по ерозионно износване /безразмерна величина/ е:

$$i_e = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_a} \quad (3)$$

където:

$\dot{m}_a$ е масовият дебит на абразивните частици, kg/s.

Износоустойчивостта по ерозионно износване е реципрочна на интензивността по ерозионно износване и е безразмерна величина:

$$I = \frac{1}{i_e} \quad (4)$$

Експеримент и резултати

За целите на експеримента на ерозионно износване са подложени следните опитни образци:

4 – твърдосплавна пластина за стругарски нож

5 – електродно покритие Lincoln Hardfacing2008

6 – EN350 – химически състав на стоманата – C 0,20%, Si 1.00 %, Mn 1.60 %, Cr 1.80 %, твърдост 279 HB

7 – EN550 – химически състав на стоманата – C 0,50 %, Si 2,40 %, Mn 0,40 %, Cr 9 %, твърдост 60 HRC

8 – EN600 – химически състав на стоманата – C 0,58 %, Si 2,50 %, Mn 0,30 %, Cr 9,5 %, твърдост 61 HRC

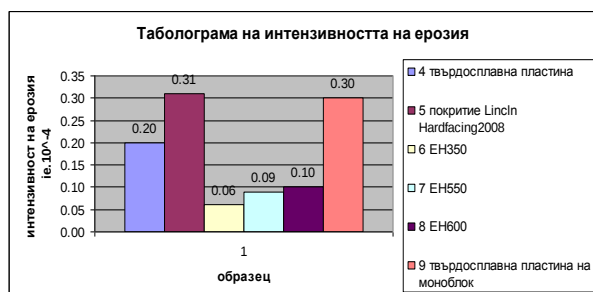
9 – твърдосплавна пластина от моноблок.

Резултатите от проведените опити са представени обобщено в таблица 1.

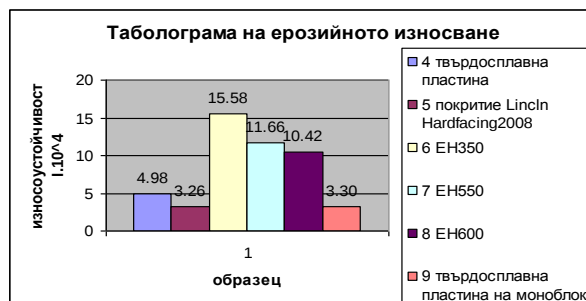
Таблица 1

образец	наименование на образца	маса преди износването m [g]	маса след износването m [g]	износване Δm [g]	скорост на износване m [mg/min]	интензивност на ерозия ie	износоустойчивост I
1	2	3	4	5	6	7	8
4	твърдосплавна пластина стр. нож	13.8516	13.8315	0.0201	3.35	$0.200 \cdot 10^{-4}$	$4.98 \cdot 10^{-4}$
5	покритие Lincoln Hardfacing2008	39.8473	39.8166	0.0307	5.12	$0.310 \cdot 10^{-4}$	$3.26 \cdot 10^{-4}$
6	EN350	32.7761	32.7697	0.0064	1.07	$0.060 \cdot 10^{-4}$	$15.58 \cdot 10^{-4}$
7	EN550	42.0556	42.0470	0.0086	1.43	$0.090 \cdot 10^{-4}$	$11.66 \cdot 10^{-4}$
8	EN600	41.5854	41.5758	0.0096	1.60	$0.100 \cdot 10^{-4}$	$10.42 \cdot 10^{-4}$
9	твърдосплавна пластина на моноблок	53.2367	53.2064	0.3030	5.05	$0.300 \cdot 10^{-4}$	$3.30 \cdot 10^{-4}$

От резултатите са изведени таболограми на интензивността на ерозия и на ерозийното износване, представени съответно на фиг. 3 и фиг. 4.



Фиг. 3. Таболограма на интензивността на ерозия



Фиг. 4. Таболограма на ерозийното износване

Изводи

Експериментално са изследвани материали за изработването на моноблок (твърдосплавна пластина) и съвременни покрития, които намират приложение в практиката.

Направени са експерименти за струйно-абразивно износване и като резултат са получени близки стойности на параметрите на износоустойчивостта между съществуващата твърдосплавна пластина за моноблок и електродно покритие Lincoln Hardfacing 2008.

От проведените изследвания може да се направи концептуално ново решение за конструкция на моноблок и замяна на твърдосплавната пластина с материал с високи стойности на износоустойчивост и покрития на контактната повърхност на моноблока.

Литература

- Виноградов, В.Н., Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев, 1982. *Изнашивание при ударе*, М., Машиностроение, 31-33 с.
- Гаркунов, Д.Н., Мельников, З.Л., Гаврилюк, В.С. 2008. *Триботехника*, М., МГТУ, 80-81 с.
- Кандева, М.К. 2011. *Цикъл лекции по инженерна трибология за докторанти* – С, Проект BG051PO001-3.3.06-0046, 3, 40 с.

СЪЩЕСТВУВАЩИ КОНСТРУКЦИИ НА МНОГОЦЕЛЕВИ ШРЕДЕРИ И НАСОКИ ЗА УСЪВЪРШЕНСТВАНЕТО ИМ

Малина Вацкичева, Михаил Вълков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София, E-mail: malina_vatz@abv.bg; mvulkov@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Статията е посветена на изучаването на многоцелеви шредери като основни машини при рециклирането на техногенни и строителни отпадъци. Разгледани са съществуващите конструкции на машини за раздробяване на бетони, армирани бетони, гума, пластмаса и дърво, т.е. на материали с якостни показатели, вариращи в широк диапазон. Направена е класификация на съществуващите конструкции. Анализирани са техните предимства и недостатъци. Формулирани са препоръки за тяхното усъвършенстване и са набелязани насоки за бъдеща работа.

Ключови думи: рециклиране, техногенни и строителни отпадъци, многоцелеви шредери.

EXISTING STRUCTURES OF MULTIPURPOSE CRUSHERS AND GUIDELINES FOR PROCESSING

Malina Vatskicheva, Mihail Valkov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: www.malina_vatz@abv.bg, mvulkov@abv.bg

ABSTRACT. The article is dedicated to the study of multi-purpose crushers as the basic machinery for the recycling of technological and construction debris. Addressed are existing structures of machines for fragmentation of concrete, reinforced concrete, rubber, plastic and wood, i.e. materials with a wide range of strength indicators. A classification of existing structures is made. Their advantages and problems are analyzed. Recommendations are formulated for their improvement and guidelines are marked for future work.

Key words: recycling, technological and construction debris, multipurpose crushers.

Въведение

Непрекъснатият процес на производство и употреба на изделия от гума, пластмаса и усиленото строителство води до сериозно натрупване на отпадъци и опасност за околната среда. Във всички индустриални общества се появява необходимост от редуциране на битовите и на техногенните отпадъци и повторното им включване в процеса на производство. Такова отношение към вторичните суровини е предпоставка за устойчиво развитие на обществото, както и за задължителната защита на хората и околната среда от вредни субстанции.

Съществуват различни методи за третиране на горепосочените видове отпадъци, като определящ е крайният продукт и неговото предназначение. Познати са различни комплексни решения за преработка на излезлите от употреба изделия от бетон, гума, пластмаса, дърво и реализацията на крайния продукт.

Развитието на рециклиращата промишленост показва нарастваща нужда от раздробени материали с различен състав и характеристики. Създаването на нови конструкции раздробяващи машини (шредери), тяхното изследване чрез адекватни механо-математически модели, инженерното им проектиране и практическата им реализация са актуален научен проблем (Lowrison, 1974).

Раздробяването на материалите с цел рециклиране решава важни екологични задачи, свързани с опазване на

околната среда. Те са продиктувани от необходимостта за пълно и ефективно използване на по-голяма част от непреработваните в момента отпадни продукти, които от една страна са важна суровина за индустрията, а от друга - водят до замърсяване, ако не бъдат оползотворени. Всичко това е сериозна предпоставка за създаване на нови технологии и машини, предназначени за преработка на широк кръг вторични суровини и отпадни материали.

Дезинтегрирането като част от процеса рециклиране успешно може да се прилага при преработка на битови и промишлени отпадъци, за раздробяване на еднокомпонентни и многокомпонентни материали, както и за смилане на вторични суровини с различни механични характеристики – от жилаво-еластичните автомобилни гуми и някои видове пластмаси до твърдите и крехки материали като стъкло, порцелан, шамот, слюда, бетон и др. (Абаджиев, Тонков, 2007).

Съществуващи машини за раздробяване на суровини. Шредери

Основните машини, които се прилагат за раздробяване на суровини в индустрията, са трошачките. Широко приложение в практиката са намерили (Цветков Х., 1988):

- челюстни трошачки (с просто и сложно движение на подвижната челюст);
- конусни трошачки (с неподвижна ос и с подвижна ос и горен лагер);
- роторни трошачки ексцентрик тип;
- валцови трошачки (с един набразден и един гладък валец и с индивидуално задвижване на всеки валец);
- колерганги (с неподвижна тава и обикалящи около нея валци; с въртяща се тава и неподвижни валци);
- чукови трошачки (с шарнирно закрепени чукове и с неподвижно закрепени чукове);

- дезинтегратори.

Повечето от тях са предназначени за преработка само на определен вид изходен продукт.

Една алтернатива на машините, раздробяващи вторичните и отпадни материали, са шредерите. Това е група сравнително нови машини, които се класифицират основно според броя на работните валове (Тонков, Г., 2007). Основните видове съществуващи шредери са представени в таблица 1.

Таблица 1. Основни видове шредери

Видове шредери	Конструктивни особености	Предимства	Недостатъци
Едновалови		Здрава и стабилна конструкция, дълъг експлоатационен живот	Ниска производителност, защото работят на бавна скорост
Двувалови	със синхронизирани валове	Висока производителност	Висока цена, висока себестойност на поддръжката
	с несинхронизирани валове		
Четиривалови		Едновременно преработване на различни видове материали	Висока цена, висока себестойност на поддръжката

Раздробяващи валове на някои от изброените видове шредери са представени на фиг.1.



а) едновалов



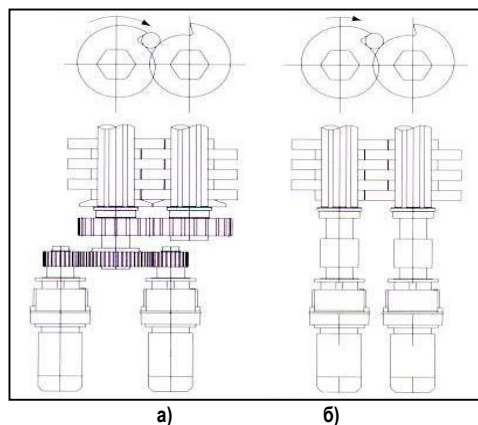
в) четиривалов

Фиг.1. Основни видове шредери според броя на раздробяващите валове

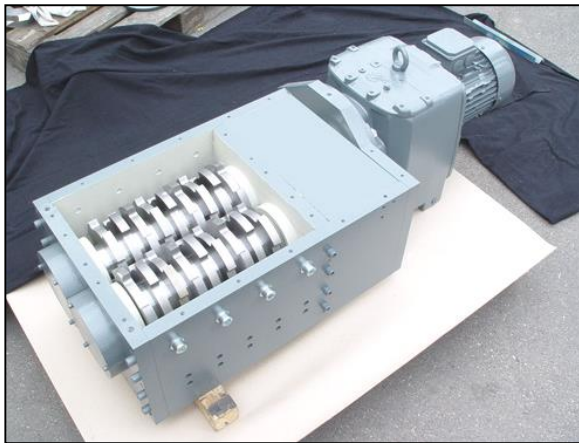


б) двувалов

Принципна схема на двувалови шредери е показана на фиг.2, а общият му вид - на фиг.3.



Фиг.2. Принципна схема на двувалови шредери
а) със синхронизирани валове;
б) с несинхронизирани валове



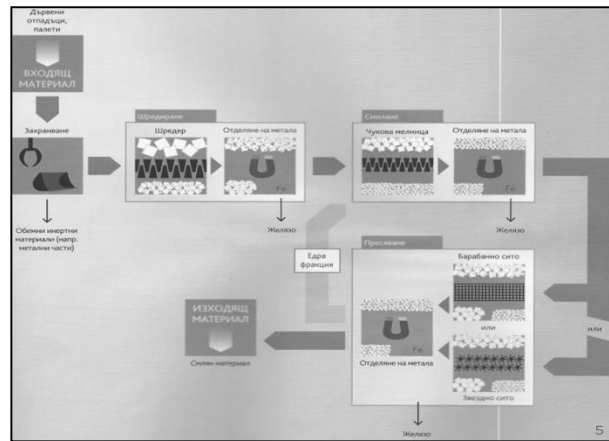
Фиг.3. Общ вид на двувалов шредер

При двуваловите шредери със синхронизирани валове, показани на фиг.2а, валовете се въртят с една и съща честота.

При двуваловите шредери с несинхронизирани валове, показани на фиг.2б, валовете се въртят с различна честота.

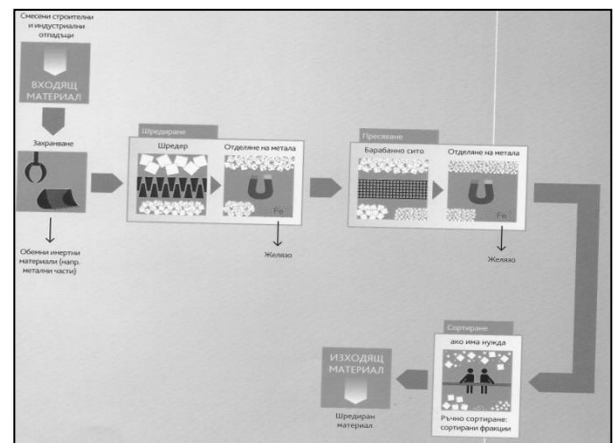
Едно сериозно предимство на шредерите е възможността да бъдат включени в системи за едновременно преработване на различни видове отпадни многокомпонентни материали с разделяне и оползотворяване на отделните компоненти. Например, отворен инженерен проблем е създаването на технология, в основата на която се включват машини от този тип, за рециклиране на стари монитори. Като е известно, те са изградени от пластмаса, стъкло и метал и е необходимо без предварителна подготовка, от тях да се извлекат всичките им полезни компоненти. Едновременно с това те да бъдат получени и сепарирани във фино насипно състояние, като в този си вид да се подават за следваща поетапна преработка. Подобни проблеми съществуват и при рециклиране на стари автомобилни гуми, отпадни кабели, проводници и изолатори, печатни платки и т.н. Десетки хиляди тона електрическо и електронно оборудване излиза от употреба всяка година в България. За целия свят тези количества са между 30 и 50 милиона тона. Отпадъците се генерират от промишления, от търговския и от битовия сектор. Те включват електрозахранващо оборудване, електрически инструменти, домакински електроуреди, битова електроника, телефони и компютърна техника и т.н. (<http://nashinovini.blog.bg>, <http://www.bgreporter.com>).

От прегледа на съществуващите конструкции многоцелеви шредери се определят и насоките за усъвършенстването им. Като цел пред изследователите в тази област може да се постави конструирането на шредер, който да намери приложение при рециклиране на по-широка гама от отпадни продукти с подобрена енергийна ефективност в сравнение с механизмите, известни до момента.

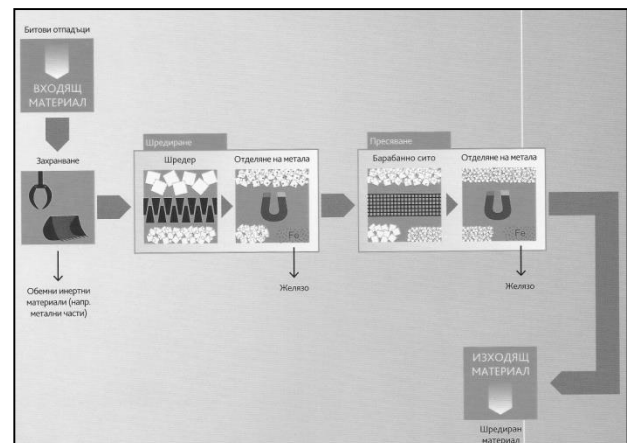


Фиг.4. Рециклиране на дървени отпадъци

Съществуващи схеми за рециклиране на често срещани отпадни продукти, в които такива шредери ще изпълняват основна функция (Вучев, Й.1983), са показани на фиг. 4,5, 6.



Фиг.5. Рециклиране на индустриални/строителни отпадъци



Фиг.6. Рециклиране на битови отпадъци

Параметри на предлаганата конструкция. Цели и задачи на изследването

Целта на изследването е да се създаде нова конструкция на двувалов многоцелеви шредер, предназначен за раздробяване на широка гама суровини с

цел включването им в процеса на рециклиране. За проектиране на основния възел на машината – раздробяващата камера, се използват следните данни:

- максимална якост на натиск на разрушаваните елементи – 55 МПа;
- ориентировъчни размери на светлото сечение на камерата - 900 x 700 мм;
- захранване на шредера – поточно, дискретно, управлявано от оператор;
- отделяне и товарене на раздробения материал – поточно, непрекъснато, автоматично;
- отделяне на металните частици в раздробения материал – поточно, непрекъснато, автоматично, с магнитни дъски;
- задвижване на машината – хидравлично, от помпа/хидромотори/цилиндри и двигател с вътрешно горене/електродвигател;
- ориентировъчна мощност на задвижването – 210 kW;

Като предмет на бъдещите изследвания за постигане на набелязаните цели, си поставяме следните задачи:

- оптимизиране на теглото на отделните детайли на универсална рециклираща машина като се направят якостни изчисления на основните детайли и възли;
- постигане на минимално тегло при запазване якостните характеристики на машината;
- разработване на различни видове раздробяващи ножове в зависимост от механичните качества на обработвания материал и необходимия капацитет на машината;
- разработване на затворено-отворена хидравлична система на задвижване при минимално количество на хидравличната течност;
- постигане на оптимална мощност, променяща се в зависимост от натоварването на раздробяващите валове във връзка с вида на раздробявания материал, т.е. автоматично регулиране производителността на машината в зависимост от твърдостта на входния материал;
- постигане на гъвкавост и висока енергийна ефективност на задвижването чрез автоматично увеличаване или намаляване скоростта на раздробяване, респ. капацитета на машината при запазване на входящата мощност.

Резултатите от решаване на изброените задачи ще бъдат представени в следващи публикации.

Изводи

Необходимостта от създаване на универсални раздробяващи механизми, които да бъдат с по-висока техникоикономическа ефективност, е обоснована от редица факти. Най-важните от тях са:

- натрупване на огромни количества отпадъци от всякакво естество - битови и промишлени, голяма част от които в момента не се преработват;
- недостатъчна и скъпоструваща техника за осъществяване на екологосъобразни процеси по преработване на тези продукти;
- голям разход на енергия на съществуващите рециклиращи съоръжения.

От направените констатации следва, че изследванията, свързани с теоретичното изучаване и практическото осъществяване на нови конструкции шредери са актуални и представят редица предизвикателства.

Литература

- Абаджиев В., Г. Тонков. 2007. Относно синтеза на технологични зъбни механизми за дезинтеграционни процеси. С., Индустриален иновационен форум „МАШИНИ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛИ'07“, 123.
- Вучев, Й. В. 1983. Изследване на минно обогатителни машини и съоръжения с оглед оптимизирането им. Хабилизационен труд за присъждане на научното звание „Професор“. ВМГИ, 7-23.
- Тонков, Г. 2007. Аспекти върху проектирането и изработката на дезинтегриращ зъбен механизъм. Научна конференция, Технически университет-София, филиал Пловдив. Сборник доклади, том II – Технически и природоматематически науки, 24.03.2007 Пловдив, 68-76.
- Цветков, Х. 1988. Обогатителни машини. С., Техника, 95-227.
- Lowrison, G. Ch. 1974. Crushing and Grinding. The Size Reduction of Solid Materials. L., Lutterworths & Co, 125-138.
- <<http://nashinovini.blog.bg/viewpost.php?id=84387>>, достъпен на 12.05.2013 г.
- <<http://www.bgreporter.com/index.php?n=read&id=2122>>, достъпен на 12.05.2013 г.

ACQUISITION SYSTEM FOR TEMPERATURE MONITORING AND CONTROL IN SIX MEASUREMENT POINTS MADE USING PIC16F877A MICROCONTROLLER

Antonie Nicolae¹, Borcosi Ilie², Cozma Vasile³

¹ "Constantin Brâncuși" University from Târgu Jiu

² "Constantin Brâncuși" University from Târgu Jiu

³ "Constantin Brâncuși" University from Târgu Jiu

ABSTRACT. In industrial applications and beyond, temperature measurement is one of the most common situations. In this paper we present the development of a data acquisition system for temperature monitoring and control in two chambers, a system built around a core type PIC16F877A microcontroller.

СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА ТЕМПЕРАТУРАТА И КОНТРОЛ В ШЕСТ ИЗМЕРВАТЕЛНИ ПУНКТА, ОСЪЩЕСТВЕНА С МИКРОКОНТРОЛЕР PIC16F877A

Антони Николае¹, Боркози Илие², Козма Василе³

¹ "Университет „Константин Бранкузи“ от Търгу Жиу

² "Университет „Константин Бранкузи“ от Търгу Жиу

³ "Университет „Константин Бранкузи“ от Търгу Жиу

РЕЗЮМЕ. Измерването на температурата е една от най-често срещаните ситуации в индустрията и на други места. В този доклад се представя разработването на система за събиране на данни за мониторинг и контрол на температурата в две камери, система изградена около микроконтролер с ядро тип PIC16F877A.

The description of development PIC16F877A

The PIC16F877A Microcontroller is part of the 8-bit PIC microcontrollers family, has a complex internal structure, is able to acquire analog signals having constituted an analog-digital 10-bit, can generate PWM signals, can communicate with external devices lends itself particularly well in industrial applications.

It presents five bidirectional ports configurable for use by installation and can be used in very complex applications.

In this paper we propose creation of a data acquisition system for temperature monitoring and control in six chambers.

The block diagram used for temperature monitoring is shown in the figure 1.

The LM35 temperature sensor is part of integrated sensors and measurement range is between -55 and 150 degrees Celsius.

The analog signals taken from the temperature sensors LM 35 type are applied to two of the microcontroller analog inputs which are converted via an analogue incorporated digital converter.

All these signals are processed by the microcontroller through the program written in his memory.

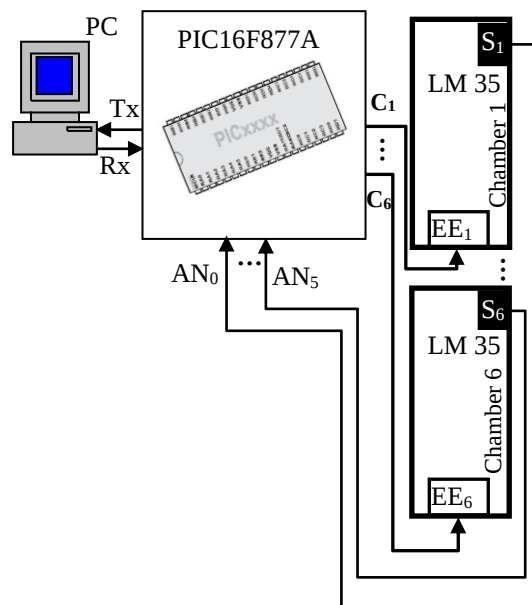


Fig. 1. The block diagram used for temperature monitoring

The processed data are submitted by the serial to a computer that running a software purchase which serves to display signals in graphical form and the human operator using an interface can view the processed data and can intervene by setting certain parameters for alarm, etc.

The proposed acquisition system can be extended to other applications by adapting the signals to the system requirements, by modifying the program written in program memory of the microcontroller to the new arrangement and operator interface running on the computer.

The serial module transmission of the data between the microcontroller and the computer circuit is provided with optocouplers for galvanic isolation so that a fault can occur in the purchasing system will not cause damage to computer systems and vice versa.

The electronic signal acquisition diagram used is shown in the figure 2.

The LM35 temperature sensor is part of integrated sensors and measurement range is between -55 and 150 degrees Celsius.

Integrated transducers for measuring temperature are first integrated transducers occurred. Although their measurement range is not too large (- 50, 1500 C), they are a number of applications from measuring ambient temperature, but also to measure other quantities through temperature variations from these quantities.

Are widespread two types of integrated sensors for temperature measurement:

- Output current transducer that varies in direct proportion to absolute temperature;
- Sensors that output voltage varies in direct proportion to absolute temperature.

For the first category is representative AD590 circuit (Analog Devices product - U.S.).

In the second category presents the integrated circuit LM 35 (National Semiconductor - USA).

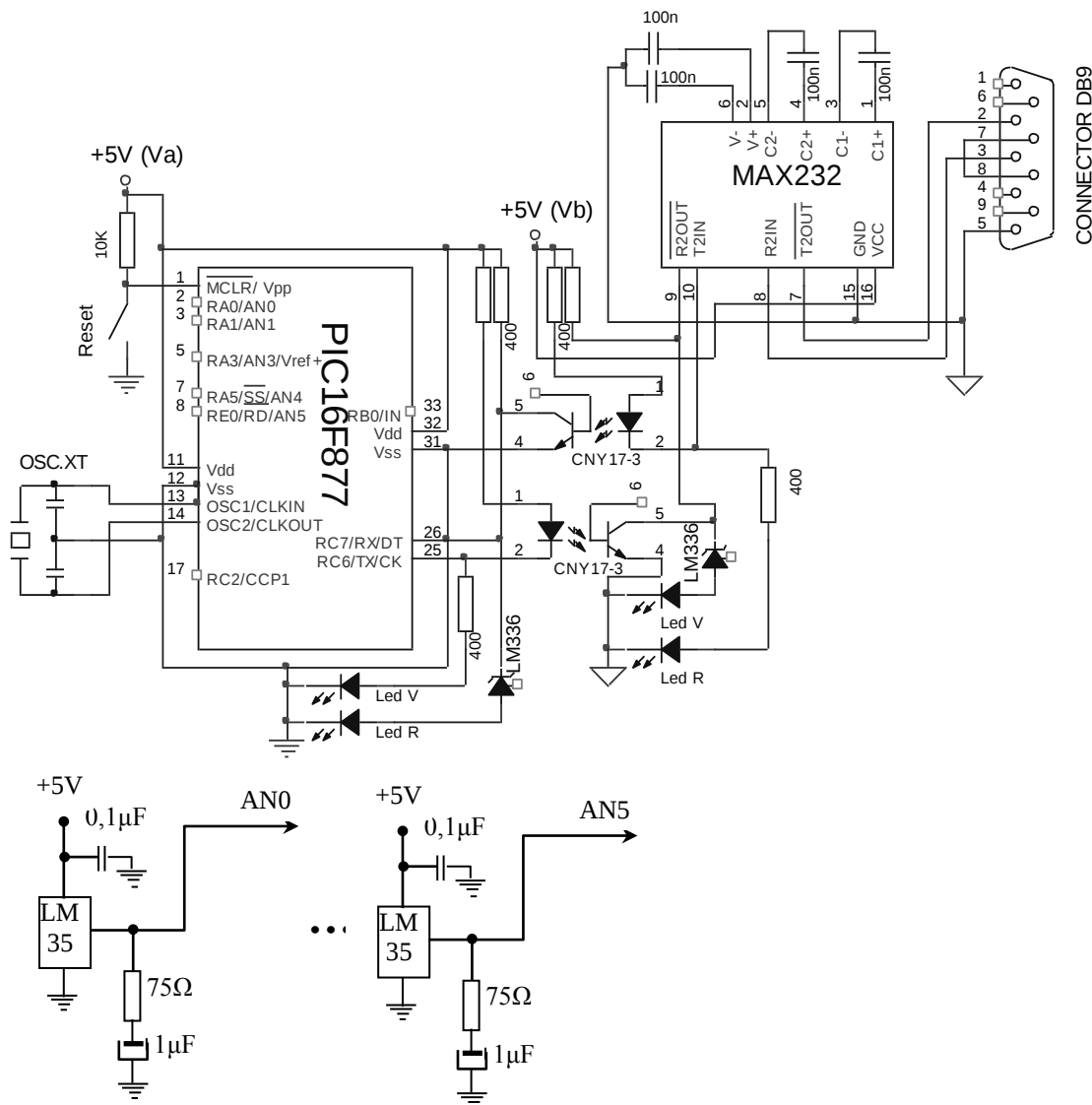


Fig. 2. The electronic signal acquisition diagram

The analog signals taken from the temperature sensors LM 35 type are applied to two of the microcontroller analog inputs

which are converted via an analogue incorporated digital converter.

All these signals are processed by the microcontroller through the program written in his memory.

The processed data are submitted by the serial to a computer that running a software purchase which serves to display signals in graphical form and the human operator using an interface can view the processed data and can intervene by setting certain parameters for alarm, etc.

The proposed acquisition system can be extended to other applications by adapting the signals to the system requirements, by modifying the program written in program memory of the microcontroller to the new arrangement and operator interface running on the computer.

The serial module transmission of the data between the microcontroller and the computer circuit is provided with optocouplers for galvanic isolation so that a fault can occur in the purchasing system will not cause damage to computer systems and vice versa.

Tacking changes in temperature in the six chambers was achieved by using a virtual instrument with the programming environment LabWindows / CVI.

In figure 3 is shown the front panel control and visualization and it represents the interface between the purchasing system and human operator.



Fig. 3. The front panel control interface

The human operator can set via the interface certain temperature ranges represent the limits within which it wishes to maintain the temperature in each chamber.

The temperature control can mean, for example, design a control system working on a follow-up. The control system aims the temperature at a chamber and trying to maintain constant temperature in the second chamber. This system can be used to control an installation that introduces fresh air ventilation in a room. The control is achieved by modifying the reference to compensation for summer and winter to maintain the temperature difference between inside and outside to a level as low as possible.

Conclusions

The complexity of developing such a system does not stop here, it may be extended depending on the requirements and complexity of technological devices that must be managed. By simply removal in the external using connector of the microcontroller port, we can expand the applications that can be achieved through the platform and the possibilities, and not only, of serial communication such microcontrollers with a process computer or other such devices to be increasingly used in complex industrial applications, etc.

An important advantage of the application submitted is the discounted price of made and flexibility.

References

- Antonie, N., Borcoși, I., Dincă, A., Ionescu, M., *FOC Control System of AC Machines*, Analele Universitatii „Constantin Brancusi” din Tg. Jiu, Seria Inginerie, no.2/2008, ISSN 1844 – 4856, pag. 307-312.
- Antonie, N., Borcoși, I., Ionescu, M., Acquisition and development system with PIC16F84 and PIC16F877 microcontrollers, Analele Universitatii „Constantin Brancusi” din Tg. Jiu, Seria Inginerie, no.3/2010, ISSN 1842 – 4856, pag. 293-301.
- Borcoși I., Onisifor O., Popescu M.C., Antonie N., "A Method to Protect from no Pulse for a Three-Phase Rectifier Bridge Connected with the Resistive-Inductive Load", Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, Bucharest, November 2008, pp.146-152.
- Borcoși I., Olaru O., Popescu M.C., Antonie N., "Method to Protect from no Pulse for a Three-Phase Rectifier Bridge", International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, January 2009, pp.473-482.
- Borcoși Ilie, Olaru Onisifor, Popescu Marius-Constantin, Dincă Alina, Device with Analogical Circuits for Protection to the Lack of the Pulse for the Three-Phase Rectifiers in Bridge, Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on MATHEMATICAL and COMPUTATIONAL METHODS in SCIENCE and ENGINEERING (MACMESE '08), Bucharest, Romania, Nov. 7-9, 2008, Part I, ISSN: 1790-2769, ISBN:978-960-474-019-2, pp. 152-157.
- Borcoși Ilie, Olaru Onisifor, Popescu Marius-Constantin, Dinca Alina, Antonie Nicolae, Ionescu Marian, Device with Analogical Circuits for Protection to the Lack of the Pulse for the Three-Phase Rectifiers in Electrical Drive, INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICAL MODELS AND METHODS IN APPLIED SCIENCES, Issue 4, Volume 2, December 2008, ISSN: 1998-0140, pp. 483-492.
- Ilie Borcoși, Onisifor Olaru, Nicolae Antonie, Device for Protection to the Lack of the Pulse for the Tri-Phase Rectifiers in Bridge, International Journal of Coputers, Communications& Control, ISSN 1841-9836, E-ISSN 1841-9844, Vol. III, 2008, pp. 196-200.
- Marius-Constantin Popescu , Ilie Borcoși, Onisifor Olaru, Luminița Popescu, Florin Grofu, Simulation Hybrid Fuzzzz Control of SCARA Robot, 2007, Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Applied and THEORETICAL MECHANICS (Mechanics '07), Tenerife, Spain, December 14-16, 2007, pag. 175-180 Published by WSEAS Press, ISBN: 978-960-6766-19-0, ISSN: 1790-2769;
- Marius-Constantin Popescu , Ilie Borcoși, Onisifor Olaru, Luminița Popescu, Florin Grofu, The Simulation Hybrid Fuzzy Control of Scara Robot, WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS AND CONTROL, Issue 2, Volume 3, February 2008, ISSN: 1991-8763.
- Popescu M.C., Mastorakis N., Borcoși I., Popescu L., Asynchronous Motors Drive Systems Command with Digital Signal Processor, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Issue 2, Vol.3, pp.64-73, 2009.
- Paturca, S., V., Covrig, M., Cepisca, C., Serita, G., Proposed Schemes for Improving the Steady State Behaviour of Direct Torque Controlled Induction Motor, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, September 15-17, 2007, pp. 53-58.
- Borcoși, I., Dincă, A., Nebunu, D.L., Antonie N., A., High performance digital control system of AC Machines, Annual of University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski” – Sofia, vol. 51, Part III, Mechanization, electrification and automation in mines, 2008, ISSN 1312-1820, pp. 23-26.
- PIC 16F877 Datasheet 28/40-Pin CMOS FLASH Microcontrollers.
- LM35/LM35A Datasheet, Precision Centigrade Temperature Sensors.
- Nenova Z. P., Velev G. Ts., Measurements and control in the occupational safety engineering, “Gabrovo Print”-EOD, 2008, ISBN: 978-954-436-024-5

ПОВИШАВАНЕ НА БЪРЗОДЕЙСТВИЕТО НА СИСТЕМИТЕ ЗА ПРОГРАМНО УПРАВЛЕНИЕ НА НАСИПООБРАЗОВАТЕЛИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА МАТЕМАТИЧНИ МОДЕЛИ

Здравко Илиев¹, Диана Ташева²

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: iliev@mgu.bg

² Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: decheva@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Зависимостите по които се определят параметрите на работните движения на насипообразователите са относително сложни, съдържащи множество тригонометрични функции. Оценката им е свързана със значителни изчислителни и времеви загуби. С цел повишаване на бързодействието в системите за програмно управление на тези машини е предложен подход при който тези зависимости се заменят с регресионни модели. Изведени са модели, позволяващи определяне на основни параметри на работните движения. Доказана е тяхната приложимост.

MATHEMATICAL MODELS FOR INCREASE THE FAST RESPONSE OF PROGRAM CONTROL SYSTEMS OF SPREADERS

Zdravko Iliev¹, Diana Tasheva²

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, E-mail: iliev@mgu.bg

² University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, E-mail: decheva@mgu.bg

ABSTRACT. The dependencies, which define the parameters of working movements of spreaders, are relatively complicated. These dependencies contain multiplicity of trigonometric functions. Their evaluation is related to significant losses of calculations and time. In order to increase the fast response of program control systems for these mashines is proposed an approach. The dependencies are replaced by regression models. Models are outputted and they allow determination of the main parameters of working movements. Their applicability has proved.

Въведение

При открития добив на полезни изкопаеми се разрушават големи площи от терена, под който е разположено находището. Това налага успоредно с напредване на минните работи да се осъществява рекултивация. Първият етап на техническата рекултивация (Атанасов 2007, Богданова, 2010) се състои във формиране на насипища. Качеството на насипищните работи в значителна степен определя обема, енергоемкостта и крайния резултат от следващите рекултивационни дейности.

Най-перспективното направление за подобряване на енергийните показатели и повишаване на качеството на формираните насипища е разработването на системи за автоматизация и програмно управление на насипообразователите (Найденев, 2005). Те създават възможност за:

- лесна реализация на различни технологични схеми на насипване;
- увеличаване коефициента на запълване на насипа;
- намаляване обема на подравнителните работи;
- реализиране на селективно насипване с цел предотвратяване на самозапалване, осигуряване на устойчивост на насипа или следваща рекултивация;
- намаляване на специфичния разход на енергия.

Необходимост от повишаване на бързодействието при реализиране на изчислителните операции в системите за програмно управление на насипообразователи

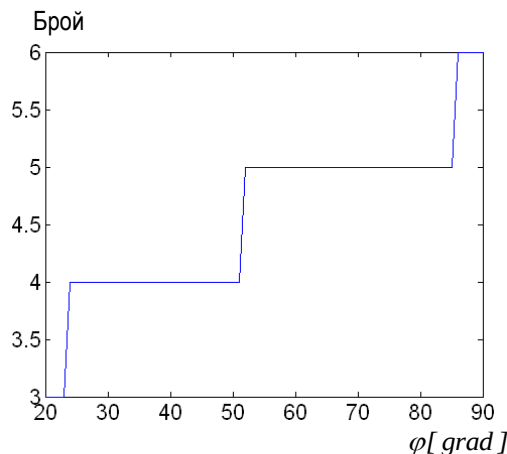
На системите за програмно управление се възлагат множество задачи: изчисляване на параметрите на работните движения; управление на основни механизми; диагностика; информационно осигуряване на манипуланта; комуникация с други компоненти на диспечерската система и др. В същото време бързодействието е от решаващо значение за качеството на управление.

Една от задачите, ангажираща значителен изчислителен и времеви ресурс, е изчисляването на параметрите на основните работни движения на насипообразователя. Причината е, че аналитичните зависимости за тяхното определяне включват множество прави и обратни тригонометрични функции. Тяхното изчисляване се извършва чрез използване на разложение в степенни редове от вида:

$$\sin(\varphi) = \varphi - \varphi^3 / 3! + \varphi^5 / 5! - \varphi^7 / 7! + \dots \quad (1)$$

$$\cos(\varphi) = 1 - \varphi^2 / 2! + \varphi^4 / 4! - \varphi^6 / 6! + \dots \quad (2)$$

С цел изследване на обема изчислителни операции, необходими за оценка на стойностите на тригонометричните функции, беше разработена програма в средата на MATLAB (<http://www.mathworks.com>, Йорданов 2010), с която беше определен броя от членове от реда, които трябва да бъдат включени за изчисляване на тригонометричната функция синус с точност 0,001. Получените резултати са представени на фиг. 1.



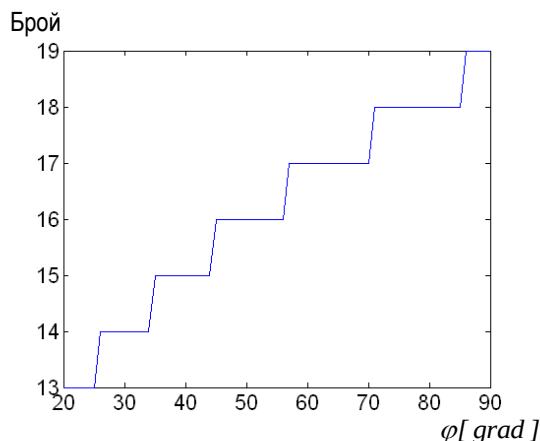
Фиг. 1. Брой членове от реда, необходими за изчисляване на тригонометричната функция синус с точност 0,001

Както се вижда, в зависимост от стойността на аргумента, при тази зададена точност, трябва да бъдат включени между 3 и 6 члена от реда. Обемът и видът на аритметичните операции, необходими за това са представени в Таблица 1.

Таблица 1. Брой и вид аритметични операции за изчисляване на тригонометрична функция синус с точност 0,001.

съставни в реда	Брой		
	умножения	деления	сумирания
3	9	2	2
4	13	3	3
5	17	4	4
6	21	5	5

Много рядко програмните модули за изчисляване на тригонометричните функции се разработват от приложните програмисти. Обикновено те са част от системното програмно осигуряване. В този случай точността на изчисляването им се определя от типа на данните чрез който е представен аргумента. Не е предвиден механизъм за задаване на желана по-ниска точност. В резултат броят на членовете, които се включват в реда нараства значително. На фиг. 2 е представен брой членове от реда, необходими за изчисляване на тригонометричната функция синус при аргумент от тип float.



Фиг. 2. Брой членове от реда, необходими за изчисляване на тригонометричната функция синус с вградена функция при аргумент от тип float

В случая за определяне на стойността на тази тригонометрична функция при изменение на аргумента между 20 и 90 градуса са необходими между 45 и 65 операции умножение и между 12 и 18 операции деление.

Един възможен подход за намаляване обема на изчислителните операции, а следователно и за повишаване на бързодействието, е замяната на аналитичните модели или поне на редовете за изчисляване на тригонометричните функции в тях с регресионни модели. Оценката на коефициентите в тези модели се извършва по метода на най-малките квадрати (Гарипов, 2004).

Регресионни модели, позволяващи повишаване на бързодействието при оценка на параметри на работните движения на насипообразуватели

Когато аналитичният модел за определяне на даден параметър на работните движения е функция от малък брой променливи и е относително прост, е целесъобразно да се търси регресионен модел, описващ цялата зависимост. Такъв е случаят с ъгъла на начално позициониране на насипващата стрела при долно насипване и схема на работа с движение на главна и междинна части по стар насип, изграден от предишната заходка - δ_{n1} . Аналитичната зависимост за определяне на стойността му има вида:

$$\delta_{n1} = \arcsin \frac{b_1}{L_c \cos E_{\mathcal{D}} + S}, \quad (3)$$

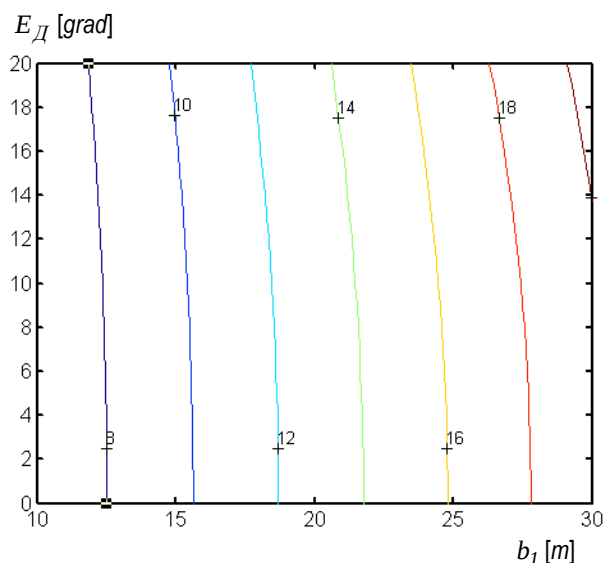
където: b_1 е разстоянието от оста на движение на насипообразувателя до външния горен ръб на предишната заходка, m;

L_c - разстоянието от оста на въртене на главна (насипна) част на насипообразувателя до върха на насипищата стрела, m;

$E_{\mathcal{D}}$ - ъгълът на наклон на насипищата стрела, grad;

S - разстоянието на изхвърляне на насипвания материал.

На фиг. 3 са представени линиите на еднакво ниво, представящи стойностите на δ_{n1} при изменение на b_1 в интервала от 10 до 30 m и на E_D между 0 и 20 grad.



Фиг. 3. Графично представяне на стойностите на δ_{n1} във функция от b_1 и E_D

Видът на графиката показва, че е необходимо търсене на нелинеен регресионен модел с двойно взаимодействие и евентуално включване на квадратични членове.

Таблица 2. Намерени модели за δ_{n1} и техни основни характеристики

№	Модел	$\hat{S}_{ocm}^2$	A_{max}
1	$\delta_{n1} = -0,0165 + 0,604b_1 - 0,0004E_D + 0,0039b_1.E_D$	0,0080	0,1995
2	$\delta_{n1} = 0,145 + 0,5942b_1 - 0,0004E_D + 0,0039b_1.E_D + 0,0005b_1^2$	0,0071	0,1685
3	$\delta_{n1} = 0,4022 + 0,6040b_1 - 0,0465E_D + 0,0039b_1.E_D + 0,0012E_D^2$	0,0029	0,1265
4	$\delta_{n1} = 0,4332 + 0,5942b_1 - 0,0465E_D + 0,0039b_1.E_D + 0,0012E_D^2 + 0,0005b_1^2$	0,0020	0,0955

Получените резултати позволяват да се направят следните изводи:

- четирите модела имат много добри интерпретиращи свойства;
- използването на модел №1 изисква само 5 операции умножение и 3 сумиране, а на пълния квадратичен модел (№4) – 11 операции умножение и 5 сумиране, което е в пъти по-малко в сравнение с прякото изчисляване по зависимост (3) чрез използване на вградените тригонометрични функции;
- изборът на конкретен модел трябва да се извърши чрез комплексно отчитане на изискванията за бързодействие и точност.
- не се препоръчва използването на модел №2, тъй като той има еднакви изчислителни загуби като модел №3, но е с по-лоши интерпретиращи характеристики.

За проверка на адекватността на намерените модели не може да бъде използван критерият на Фишер, тъй като липсва дисперсия на шума. Поради това като показатели за качествените им характеристики са използвани максималната абсолютна грешка A_{max} и остатъчната дисперсия $\hat{S}_{ocm}^2$.

$$A_{max} = \max |y_i - \hat{y}_i|, i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\hat{S}_{ocm}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - k}, \quad (5)$$

където: y_i е изчислената по аналитичната зависимост стойност на оценявания параметър; $\hat{y}_i$ - намерената по модела стойност на оценявания параметър; N - обемът на извадката; k - броят на коефициенти в модела.

Чрез програма, разработена в средата на MATLAB, са намерени модели от непълна и пълна втора степен описващи δ_{n1} във функция от b_1 и E_D . Техният вид и характеристики са представени в Таблица 2.

Повечето параметри на работните движения на насипообразувателя зависят от множество фактори. Например ъгълът δ_n при долно насипване и схема на работа с движение на главна част по пресен насип, а междинна - по стар насип се определя по зависимостта:

$$\delta_{n2} = \arcsin \frac{A - b_N - b_2}{L_C \cos E_D + S}, \quad (6)$$

където

$$A = L_M \cos E_M \sin \gamma_M + L_N \cos E_N \quad (7)$$

L_M е дължината на междинната част на насипообразувателя, m;

E_M - ъгълът на наклона на междинната част, град;

γ_M - ъгълът на хоризонталното отклонение на междинната част, m;

L_N - дължината на приемната част на насипообразувателя;

E_N - наклонът на приемната част, град;

b_N - разстоянието от оста на ГТЛ до оста на движение на междинна част, m;

b_2 - разстоянието от оста на движение на междинната част на насипообразувателя до горния ръб на стария насип, m.

Регресионният модел, описващ тази зависимост би следвало да бъде шестфакторен. Намирането му е принципно възможно, но той ще включва голям брой членове, което ще намали изчислителната ефективност от използването му. Поради тази причина беше възприето да се намерят относително прости регресионни модели, описващи тригонометричните функции в технологично определения диапазон на изменение на съответните аргументи.

Намерените модели за функции синус и косинус са представени в таблица 3. Диапазонът на изменение на аргумента, за който са приложими моделите и тяхни основни интерпретиращи характеристики, доказващи приложимостта им, са дадени в таблица 4.

Таблица 3. Модели за $\sin(\alpha)$ и $\cos(\alpha)$

Функция	Модел
$\sin(\alpha)$	$-0,0789 + 1,3179.\alpha + 0,0095\alpha^2$
$\cos(\alpha)$	$1,0001 - 0,0016.\alpha - 0,4913\alpha^2$

Таблица 4. Допустим интервал на изменение на аргумента и интерпретиращи характеристика на моделите

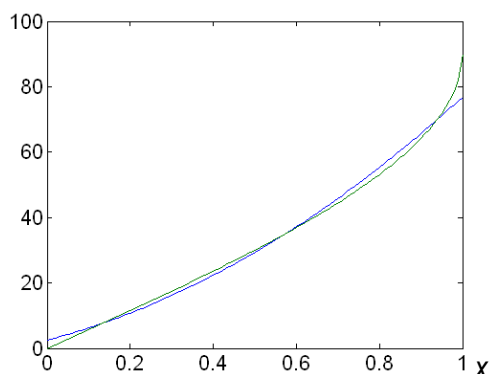
Функция	Диапазон	$\hat{S}_{ocm}^2$	A_{max}
$\sin(\alpha)$	$20 \leq \alpha \leq 90$	$1,0674 \cdot 10^{-5}$	0,0095
$\cos(\alpha)$	$0 \leq \alpha \leq 20$	$5,7278 \cdot 10^{-10}$	$6,8926 \cdot 10^{-5}$

За функция аркуссинус при пълния диапазон на изменение на аргумента беше намерен модел:

$$a \sin(x) = 2,4983 + 32,9650.x + 41,3773.x^2 \quad (8)$$

За него $\hat{S}_{ocm}^2 = 4,078$, а $A_{max} = 13.1595$. Недобрите интерпретиращи свойства на модела са илюстрирани на фиг. 4, където са представени графиките на аналитично определените стойности на функцията и тези намерени с използване на модела.

asin



Фиг. 4. Стойности на функцията, определени аналитично и с използване на модел

Повишаването на реда на модела не доведе до значимо подобряване на интерпретиращите му свойства. Поради това се премина към отсечкова апроксимация. Експериментално беше установено, че е целесъобразно целият диапазон да бъде разделен на три интервала. В таблица 5 са дадени границите на всеки интервал и намерения за него модел, а в таблица 6 – характеристики на моделите, пряко свързани с интерпретационните му свойства.

Таблица 5. Модели за $\sin(x)$

Диапазон	Модел
$0,0 \leq x \leq 0,7$	$0,2719 + 52,8605.x + 13,8187.x^2$
$0,7 < x \leq 0,9$	$51,8183 - 94,0923.x + 119,6354.x^2$
$0,9 < x \leq 0,99$	$955,2 - 2058,2.x + 1181,7.x^2$

Таблица 6. Основни характеристики на моделите

Диапазон	$\hat{S}_{ocm}^2$	A_{max}
$0,0 \leq x \leq 0,7$	0,0209	0,3816
$0,7 < x \leq 0,9$	0,003	0,1181
$0,9 < x \leq 0,99$	0,0432	0,3143

От получените резултати може да се направи извода, че чрез отсечкова апроксимация с три обособени диапазона грешката при използване на полиномилания модел в целия интервал е под 0,5 градуса, което е напълно задоволителна за практиката точност.

Заклучение

Представените изследвания доказват, че предложеният подход може успешно да се използва с цел повишаване на бързодействието при реализация на изчислителните операции в системите за програмно управление. Той може да бъде приложен не само за определяне на началния ъгъл на позициониране на насипващата стрела, но за изчисляване и на другите параметри на работните движения на насипообразувателите.

Литература

- <http://www.mathworks.com/>
 Атанасов А. 2007. Екологични проблеми и рекултивация на земите нарушени от минната промишленост. С., МГУ.
 Богданова, Е. 2010. Рекултивация на нарушени терени. С., ПъблишСайСет-Еко.
 Гарипов, Е. 2004. Идентификация на системи. С., ТУ.
 Йорданов Й. 2010. Приложение на MATLAB в инженерните изследвания - части 1, 2 и 3. Русенски унив. "Ангел Кънчев".
 Найденов К. 2005. Система за управление на насипообразувател в Мини Марица Изток. Инженеринг Ревю, бр. 6, 2005, 138-148.

АНАЛИЗ НА РУДНИЧНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ С РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЕНА НЕУТРАЛА

Владимир Перпелицев, Иван Стоилов

Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. За руднични мрежи 6 kV с голям капацитивен ток е предложено преминаване от система с изолирана неутрала към система с резистивно заземена неутрала. Изведени са аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и тока на земно съединение за мрежите със заземен през резистор звезден център. Изследвано е влиянието на преходната проводимост в мястото на земно съединение върху модула на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение при различни стойности на заземяващия резистор.

ANALYSIS OF MIDDLE VOLTAGE ELECTRICAL GRIDS WITH RESISTANCE EARTHED NEUTRAL IN MINES

Vladimir Perpelitsev, Ivan Stoilov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The current paper analysis middle voltage electrical grids 6kV in mines with high capacity current. For this grids it's make a proposal to passing from system with isolated neutral to system with resistance earthed neutral. In analysis is led analytic equations for voltage with zero successions, voltages compared to earth and earth fault current. It is make analyses the influence of the conductivity in the transitional place of the ground fault on the modulus of the zero sequence voltage and the ground fault at different values of a grounding resistor.

Въведение

Режимът на работа на звездния център на трансформаторите в електрическите мрежи средно напрежение в откритите рудници се определя от следните нормативни документи:

- Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии;
- Правилник за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин.

Наредба №3 определя режимите на заземяване на неутралата и съответните изисквания към устройството на заземителните инсталации в електрическите уредби над 1000V.

Правилникът за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин определя конкретни изисквания към режимите на работа на звездния център на трансформаторите. Указано е, че въздушно-кабелните мрежи за средно напрежение в откритите рудници могат да работят с изолиран звезден център при капацитивен ток до 15 A. При ток над 15 A се препоръчва работа със заземен, през дъгогасителен реактор, звезден център. При ток над 15A и когато кабелната част е по-голяма от 40% от общата дължина на мрежата трябва да се прилага система със заземен през резистор звезден център.

При всички случаи е необходимо да има релейни защиты за автоматично изключване на земните съединения,

защита срещу пренапрежения и защитно заземяване. Съпротивлението на заземителното устройство в откритите рудници не трябва да надвишава 4Ω .

В откритите рудници за добив на руда и въглища у нас като правило се прилага системата с изолиран звезден център на трансформатора. В част от електрическите мрежи на откритите рудници в „Мини Марица-Изток“ ЕАД е въведено заземяване на звездния център на трансформаторите през високоомнен резистор (Анев, 1994).

Електрическите мрежи 6 kV в откритите рудници на големите миннообогатителни предприятия „Елаците мед“ АД и „Асарел-Медет“ АД през последното десетилетие претърпяха значително развитие. Бяха въведени в експлоатация съвременни мощни електрохидравлични багери, изградени поточно-транспортни системи, построени нови цехове. Това доведе до значително увеличаване на общата дължината на кабелните електропроводи и съответно до нарастване на капацитивния ток. Електрическата уредба 6 kV в рудничния комплекс на „Елаците мед“ АД към настоящия момент има капацитивен ток в максимален режим 31,93 A. Дължината на кабелната част на мрежата е 3,4 пъти по-голяма от тази на въздушната и определя основната част от капацитивния ток. Капацитивният ток, създаван от въздушната електрическа мрежа, определен приблизително от известни графични зависимости [Нанчев, 1955] и емпирични формули, е под 1 A.

Вторичните намотки на тринамотъчните трансформатори 110/6/6 kV в подстанция „Руднична“ на „Асарел – Медет“ АД работят разделно. Общата дължина на стационарната кабелната мрежа към намотка I на трансформатора определя капацитивен ток $I_{c1} = 30,67$ А. Отношението на общите дължини на кабелната част към въздушната е 1,85. Въздушната част от електрическата мрежа създава и тук капацитивен ток под 1 А.

Освен несъответствието с изискванията на Правилника за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин, работата с изолиран звезден център на цитираните електрически системи създава проблеми и със селективността на защитите от земни съединения. Например извод ЦПТ от подстанция „Руднична“ на „Асарел-Медет“ АД има собствен капацитивен ток 26 А при общ капацитивен ток на мрежата 30,67 А. Очевидно приложената в случая непосочна токова защита от земни съединения Siprotect 7SJ6225 е неефективна. Необходимо е прилагане на посочна защита от земни съединения.

Електрическите мрежи в цитираните руднични комплекси не отговарят на изискванията на Правилника за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин и съществуват проблеми със защитата от земни съединения. Необходима е преоценка на режимите на работа на неутралата като се отчете настъпилата промяна в отношенията кабелна - въздушна част. Считаме, че за цитираните електрически мрежи е целесъобразно да преминат от работа с изолиран звезден център към система със заземен през високоомен резистор звезден център.

Обикновено вторичните намотки на силовите трансформатори са свързани в триъгълник и резисторът се свързва към мрежата посредством устройство за заземяване на звездния център. То представлява специален трансформатор, чиито намотки са свързани Y-0/D или Z-0 и има нисък импеданс за тока с нулева последователност. Възможни са два варианта за заземяване на неутралата: с високоомен или с нискоомен резистор. За рудничните мрежи средно напрежение е актуално само високооменното заземяване. Големината на тока, създаван от резистора според повечето автори трябва да се избира от условието $I_r = (0,5 - 1,0) I_c$ (Анев, 1994). При равенство на капацитивния и активния ток, пълният ток на метално земно съединение няма да бъде по-голям от $\sqrt{2}$ от капацитивния ток на мрежата.

Аналитични зависимости

При аналитични изследвания на мрежите средно напрежение в това число и рудничните обикновено се пренебрегва активното изолационно съпротивление на мрежата. Отчита се само капацитетът на мрежата и в някои случаи несиметрията му чрез коефициента на

$$\text{несиметрия } \dot{K}_c = \frac{C_a + a^2 C_b + a C_c}{C_a + C_b + C_c} \quad (\text{Нанчев, 1955}),$$

където C_a , C_b и C_c са капацитетите на фазите спрямо

земята. Това приемане е правилно за въздушните електрически мрежи, тъй като те имат много високо активно изолационно съпротивление и е налице несиметрия в капацитета спрямо земя.

Считаме, че рудничните мрежи с описаната конфигурация следва да бъдат разглеждани по отношение на изолацията спрямо земя като кабелни. Кабелите в рудничните електрически мрежи в основната си част са положени на открито, а багерните кабели са подложени и на механични натоварвания. В рудничните мрежи има не малък брой двигатели с номинално напрежение 6 kV, което също допринася за намаляване на общото активно изолационно съпротивление на мрежата. Следователно, при анализа на рудничните електрически мрежи с преобладаваща кабелна част, не трябва да се пренебрегва активната съставна на изолационното съпротивление. Несиметрията в мрежи от този тип се определя основно от активните изолационни съпротивления спрямо земя на отделните фази.

В преобладаващата част от анализите се приема, че земното съединение е метално и не се отчита преходното съпротивление в мястото на земно съединение. Практиката е показала, че при въздушно-кабелните мрежи са възможни земни съединения през значителни съпротивления. Тъй като напреженията спрямо земя, респективно токът на земно съединение, и съответно работата на релейните защиты зависят от големината на преходното съпротивление е необходимо при изследвания то да бъде отчитано (Сапунков и др., 2012).

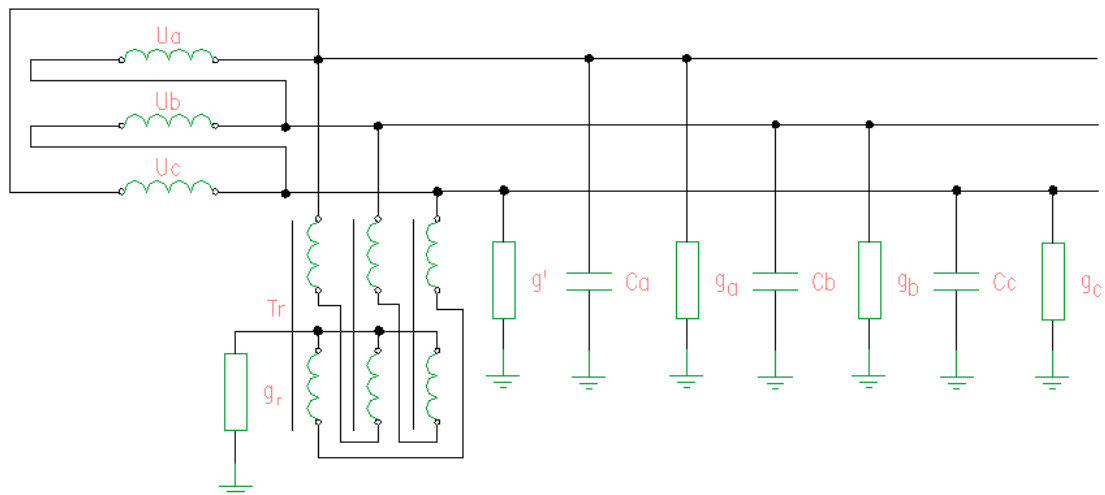
При аналитичното изследване на руднични електрически мрежи с конфигурация подобна на описаните по-горе (фиг.1) се приемат следните допускания:

- поради незначителното участие на въздушната част на мрежата във формирането на общия капацитивен ток се приема равенство и симетрия на капацитета на фазите спрямо земята а
- отчита се и големината на активната изолационна проводимост и несиметрията, която тя обуславя $g_a \neq g_b \neq g_c$;
- отчита се преходната проводимост в мястото на земно съединение g' ;
- отчита се проводимостта на резистора g_r и на устройството за присъединяване към електрическата мрежа.

Несиметрията в активните изолационни проводимости се дефинира чрез въведения от Стоилов (1988) векторен

$$\text{коефициент } \dot{K}_r = \frac{g_a + a^2 g_b + a g_c}{g_a + g_b + g_c}.$$

Уравненията за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и токовете на земно съединение, при направените допускания придобиват вида:



Фиг. 1 Заместваща схема на руднична електрическа мрежа

Напрежение с нулева последователност

При теоретични изследвания, свързани с електробезопасността, работата на защитите от земни съединения и особено при анализ на входните параметри на защитите с предпазно шунтиране е наложително да се оцени влиянието на естествената несиметрия в мрежата (Ягудев и др., 1988). В този случай при възприетите допускания напрежението с нулева последователност, определено от естествената несиметрия на активните изоляционни проводимости, се дава с израза (Стоилов, 1988):

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{K}_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0},$$

където: $tg \delta = \frac{g_0}{\omega C_0}$ отразява активната и капацитивната

изоляционна проводимост на мрежата;

$g_0 = \frac{g_a + g_b + g_c}{3}$ - средната активна проводимост на

фаза спрямо земя;

$C_0 = C_a = C_b = C_c$ - капацитетът на фаза спрямо земя;

Y_0 - пълната проводимост на резистора и устройството за създаване на изкуствен звезден център;

ω - ъгловата честота.

При еднофазно земно съединение в мрежите с резистивно заземена неутрала, напрежението с нулева последователност има по ниски стойности в сравнение с мрежите с изолиран звезден център. Върхът на вектора на

$\dot{U}_0$ описва елипса (Сирота и др. 1985), а не полуокръжност, както е при системите с изолиран звезден център. Напрежението с нулева последователност при земно съединение през преходно съпротивление g' се определя с изразите:

- земно съединение във фаза A:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a}; \quad (1)$$

- земно съединение във фаза B:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_b}; \quad (2)$$

- земно съединение във фаза C:

$$\dot{U}'_0 = \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_c}. \quad (3)$$

Напрежения на фазите спрямо земя

Напреженията на фазите спрямо земя, определени от естествената несиметрия на активните изоляционни проводимости са:

$$\dot{U}_a = U \left(1 - \frac{K_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0} \right); \quad (4)$$

$$\dot{U}_b = U \left(a^2 - \frac{K_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0} \right); \quad (5)$$

$$\dot{U}_c = U \left(a - \frac{K_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0} \right). \quad (6)$$

Напреженията спрямо земя при еднофазно земно съединение се определят с уравненията:

- земно съединение във фаза A:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a} \right]; \quad (7)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a} \right]; \quad (8)$$

$$\dot{U}'_c = U[a - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_a}]. \quad (9)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_a = U[1 - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_b}]; \quad (10)$$

$$\dot{U}'_b = U[a^2 - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_b}]; \quad (11)$$

$$\dot{U}'_c = U[a - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_b}]; \quad (12)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_a = U[1 - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_c}]; \quad (13)$$

$$\dot{U}'_b = U[a^2 - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_c}]; \quad (14)$$

$$\dot{U}'_c = U[a - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_c}]; \quad (15)$$

Ток на земно съединение

Токът на земно съединение през преходна проводимост g' се определя с изразите:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{I}'_a = U g'_a [1 - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_a}]; \quad (16)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{I}'_b = U g'_b [a^2 - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_b}]; \quad (17)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{I}'_c = U g'_c [a - \frac{3\omega C_0 \operatorname{tg} \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (\operatorname{tg} \delta + j) + Y_0 + g'_c}]. \quad (18)$$

Изследване на влиянието на преходната проводимост

Анализирана е руднична въздушно-кабелна мрежа с напрежение $U_H = 6 \text{ kV}$. Кабелната част от мрежата е с обща дължина 11km и има капацитет на фазите спрямо земя $C_a = C_b = C_c = 9,4 \mu\text{F}$. Активната изолационна проводимост на фазите спрямо земя се приема $g_a = g_b = g_c = 0,000001 \text{ S}$ (1MΩ). Приема се симетрия между капацитета и активната проводимост на фазите спрямо земя. Анализирани са напрежението с нулева последователност и токът на земно съединение в зависимост от големината на преходната проводимост при земно съединение в мрежата. Стойностите на преходната проводимост при земно съединение g' е прието да се изменят от 0.001S (1000Ω) до 1S (1Ω) (Сапунков и др. 2012).

Разгледани са три варианта:

- при големина на активното съпротивление за заземяване на неутралата 60Ω (представен с непрекъсната линия на фиг. 2 и 3);
- при големина на активното съпротивление за заземяване на неутралата 80Ω (представен с пунктирна линия на фиг. 2 и 3);
- при големина на активното съпротивление за заземяване на неутралата 120Ω (представен с прекъсната линия на фиг. 2 и 3).

При направените изчисления се пренебрегва импеданса на присъединяващия трансформатор. На базата на изведените уравнения, с помощта на програмата „MathCad“, са получени и графично представени следните зависимости:

а) ефективната стойност на напрежението с нулева последователност $\dot{U}_0$ във функция от преходната проводимост при земно съединение g' (Фиг.2).

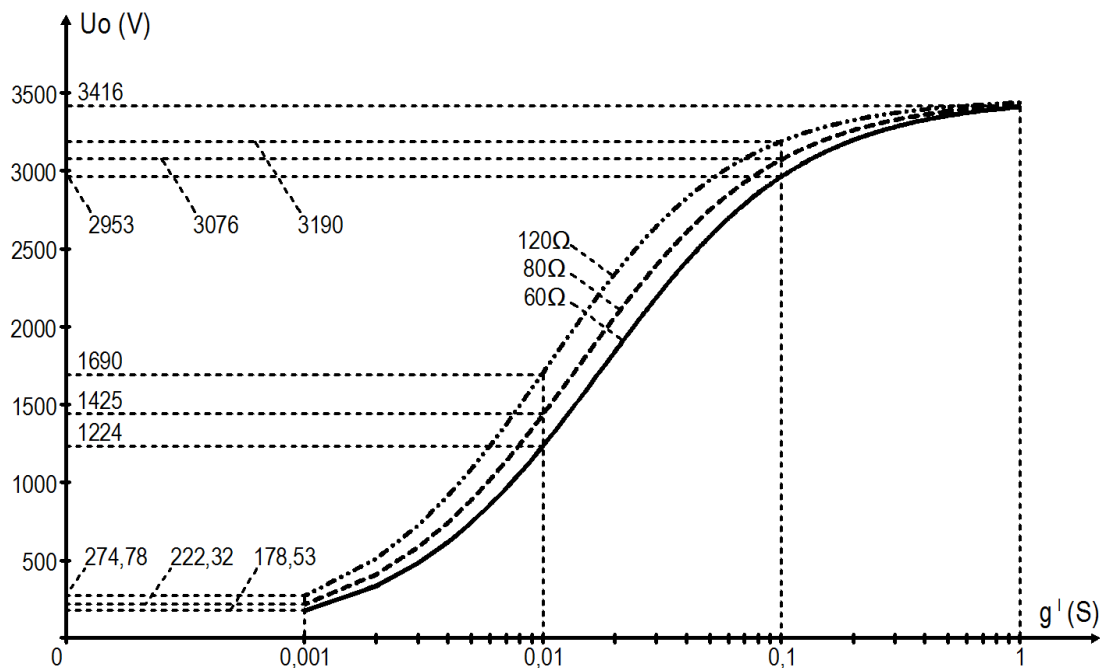
От графичните зависимости, показани на Фиг.2, се вижда характерът на изменение на напрежението с нулева последователност за различни стойности на резистора в неутралата и могат да се направят следните изводи:

- с увеличаване големината на активното съпротивление за заземяване на неутралата $R = 1/g_r$, стойностите на

напрежението с нулева последователност $\dot{U}_0$ нарастват.

- увеличаването на преходната проводимост при земно съединение g' води до намаляване на относителната разлика между стойностите на напрежението с нулева последователност и кривите при $g' = 1 \text{ S}$ (1Ω) на практика съвпадат.

- големината на активното съпротивление за заземяване на неутралата оказва най-голямо влияние на $\dot{U}_0$ при високи стойности на преходната проводимост при земно съединение - 0,001S (1000Ω).



Фиг. 2

б) ефективната стойност на тока на земно съединение на фаза А $\dot{I}'_a$ във функция от преходната проводимост при земно съединение g' (Фиг.3).

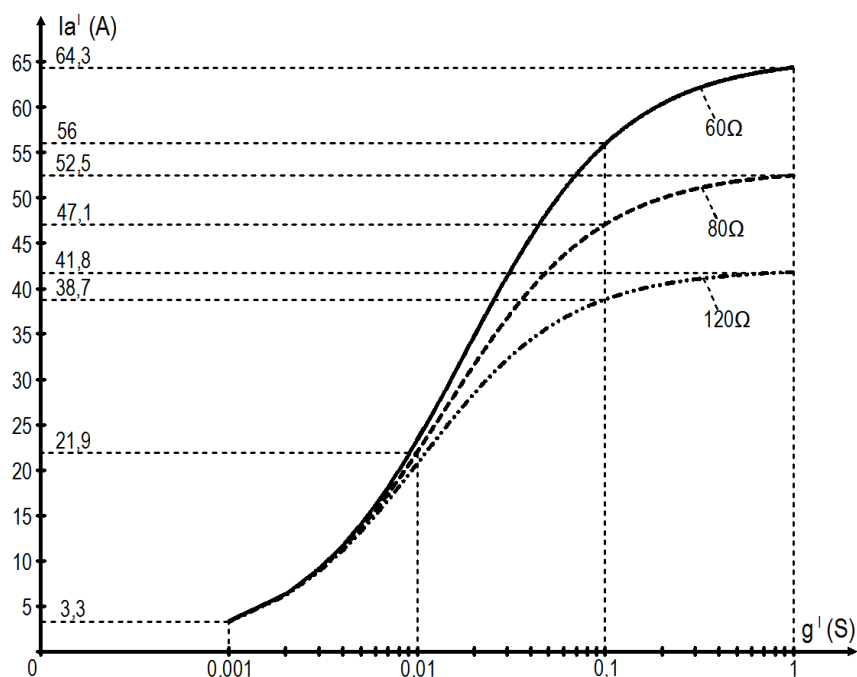
От графичните зависимости на Фиг.3 могат да се направят следните изводи:

- увеличаването на големината на активното съпротивление, свързано към устройството за създаване на изкуствен звезден център, води до намаляване на ефективната стойност на тока на земно съединение на фаза А $\dot{I}'_a$;

- при високи стойности на g' (0,001S - 1000 Ω) и различни стойности на активното съпротивление в неутралата (60 Ω , 80 Ω и 120 Ω) разлика в големината на тока на земно съединение почти няма;

- влиянието на преходната проводимост g' върху големината на тока на земно съединение в диапазона 0,001S (1000 Ω)- 0,01S (100 Ω) е незначително;

- най-значително е влиянието на стойността на резистора в неутралата е при метално земно $g' = 1S$ (1 Ω). Отношението на големините на тока на земно съединение в този случай са 1 : 1,25 : 1,54 спрямо тока в мрежа с резистор в неутралата 120 Ω .



Фиг. 3

Анализът на влиянието на големината на преходната проводимост при земно съединение върху модула на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение е проведен с цел да се прецени работата на релейните защиты от земни съединения. Въведени са параметри за характерна въздушно-кабелна руднична мрежа, средно напрежение, за която са възможни ниски стойности на преходната проводимост при земно съединение. Например при падане на проводник от въздушен електропровод на суха или замръзнала почва. При ниски стойности на преходната проводимост в мястото на земно съединение $0,001\text{S}$ (1000Ω), което е напълно реално за рудничните мрежи, напрежението с нулева последователност, както и токът, протичащ през защитата на повредения извод, имат много ниски стойности. Това води до незаработване на първо място на непосредните защиты от земно съединение, тъй като те имат високи стойности на настройките (отстройват се от капацитивния ток на защитавания извод). Посочните защиты от земни съединения са много по-чувствителни, тъй като те се отстройват само от тока на небаланс. Но много ниските стойности на напрежението с нулева последователност могат да доведат до нестабилна работа на тези защиты или до отказ.

Заключение

Известни са предимствата на системата със заземяване на неутралата пред системата с изолиран звезден център (Титенков, 2003; Сирота и др., 1985; Миронов, 2006; Пенчев, 2011): липсват дъгови пренапрежения; има възможност да се организира селективна релейна защита от земни съединения; отсъстват ферорезонансни процеси и др. Същевременно преминаването от система с изолирана неутрала към система с високоомно заземяване не изисква съществени промени в съществуващата електрическа мрежа и големи капиталовложения. Следователно за рудничните електрически мрежи с голяма дължина на кабелните линии може да се препоръча преминаване от система с изолирана неутрала към система със заземена през високоомен резистор неутрала.

Изведените аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията на фазите спрямо земя и тока на земно съединение са приложими за изследване на руднични електрически мрежи средно напрежение със заземена през резистор неутрала. Характерно е, че изследването се извършва като се отчита активната и капацитивната изолационна проводимост чрез обобщения показател $tg\delta$ и естествената несиметрия в

активната изолационна проводимост чрез векторния коефициент K_r . От проведенния анализ за влиянието на преходната проводимост в мястото на земно съединение на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение се установи, че при възникване на земно съединение с ниски стойности на преходната проводимост, дори съвременните чувствителни посочни защиты от земни съединения могат да бъдат неефективни.

Литература

- НАРЕДБА № 3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии. Обн., ДВ, бр. 90 и 91 от 2004г.
- ПРАВИЛНИК за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин. Министерство на труда и социалните грижи. Главна инспекция по труда. София, 1996.
- Анев Г., 1994. Полуефективно заземяване на звездния център на мрежите за средно напрежение в откритите рудници. Годишник на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски" т.40, св. III "Механизация, електрификация и автоматизация на минното производство", С.
- Титенков С.С. 2003. 4 режима заземления неутрали в сетях 6-35 кВ. Изолированную нейтраль обявим вне закона. ж. "Новости электротехники" №5 (23).
- Сирота И.М., С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. 1985. Режимы неутрали электрических сетей. Киев, Наукова думка.
- Миронов И.А., 2006. Проблемы выбора режимов заземления неутрали в сетях 6-35кВ "ЭЛЕКТРО" № 5.
- Пенчев Св., 2011. Контрол и измерване в електроснабдителните системи. Записки, ТУ Габрово.
- Types of neutral earthing in power distribution(part 1). <http://electrical-engineering-portal.com>
- Ягудеев Б.М., Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. 1982. Защита от электропоражения в горной промышленности. М. Недра.
- Стоилов И.Г. 1988. За несиметрията на проводимостта спрямо земя в мрежите с изолиран звезден център. Годишник на ВМГИ, С., т. XXXIV св. IV.
- Нанчев Н. 1955. Земни съединения в електрическите системи., С. Наука и изкуство.
- Сапунков М.Л., И.А. Костарев, А.А. Худяков. 2012. Исследование влияния переходного сопротивления на характеристики защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности. Горное дело, №4.

ПУСКОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СВЕТИЛНИ ИЗТОЧНИЦИ

Красимир Велинов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, candela@mail.bg; <http://lighting-bg.eu/>

РЕЗЮМЕ. Докладът представя резултатите от изследване направено върху процеса на стартиране на запалване газоразрядна лампа до прехода към устойчив режим на работа. Предмет на изследването са промени в основните електрически характеристики - ток, напрежение, мощност, светлинен добив, както и промяна в светлинния поток. Всички измервания са извършени в НИЛ "Осветителна техника" при Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски".

STARTING CHARACTERISTICS OF THE LIGHT SOURCES

Krasimir Velinov

University of mining and geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, candela@mail.bg; <http://lighting-bg.eu/>

ABSTRACT. The paper presents the results of the research done on the start-up process of discharge lamp ignition up to the transition into a steady-state regime of operation. The paper studies the change in the basic electrical characteristics - current, voltage, power, light output, as well as the change in the luminous flux. All measurements were performed in a research laboratory "Lighting" in the Mining and Geology University "St. Ivan Rilski".

Keywords: LED, luminaire, current, voltage, power, light output

Въведение

Светлинните източници не достигат номиналните си параметри веднага след включването им. В зависимост от типа на светлинния източник – газоразрядна лампа с високо или ниско налягане, или светодиод, за установяването на електрическите и светлинните параметри в номинален режим е необходимо известно време. В литературата има доста оскъдни сведения за това колко време е необходимо съответния осветител да влезе в стабилен режим (Платианов Ст., Пл. Цанков, Ив. Станчев, 2001). Във фирмените каталози тази информация отсъства. В настоящия доклад е направено експериментално изследване на осветители със светодиодни източници на светлина и газоразрядни лампи ниско налягане за да се проследи как се променят електрическите и светлинните характеристики след включване на осветителя в електрическата мрежа. Проследена е промяната на следните параметри:

- светлинен поток;
- захранващо напрежение;
- ток;
- консумирана мощност;
- светлинен добив.

Заснемането на горните параметри е извършено на всеки 15 секунди.

Опитна постановка

Като опитна постановка е използван модернизираният през 2012 г. в НИЛ „Осветителна техника“ към МГУ „Св. Иван Рилски“ кълбов фотометър с 12 бр. цифрови

фотосензора (Велинов К, 2011), чийто общ вид е представен на фигура 1.



Фиг. 1. Общ изглед на кълбовия фотометър

С помощта на кълбовия фотометър се извършва измерването на светлинния поток на светлинните източници (БДС EN 13032-1,2:2005). В дванадесетте фотосензора като фотоприемник е използвана интегралната схема TSL2561 (Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc., TSL2561, LIGHT-TO-DIGITAL CONVERTER). Всеки сензор за осветеност съдържа два канала със 16 разряден аналогово-цифров преобразувател, който интегрира тока от два фотодиода. Комуникацията с устройството се осъществява чрез стандартна двупроводна линия по I²C серийна шина. Всяко устройство съчетава два фотодиода върху CMOS

интегрална схема способни да осигурят по изчислителен път спектрална чувствителност близка до човешкото око.

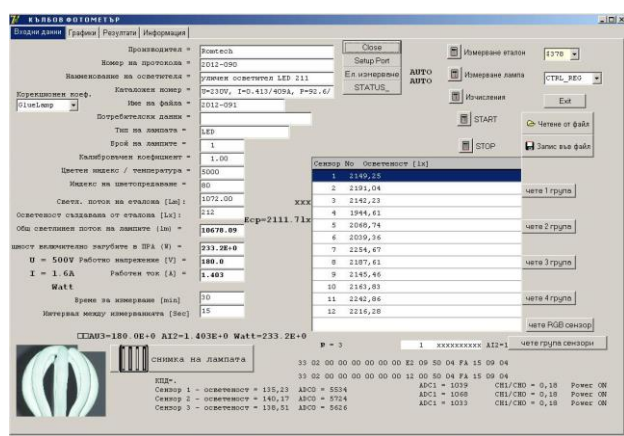
С оглед увеличаване на точността на измерванията, са монтирани дванадесет фотосензора – по шест във всяка половина на кълбото. Фотосензорите са разположени във формата на вписан икосаедър.

За да се контролират електрическите параметри на осветителите, по време на измерването се използва лабораторния измервател на мощност HM-8115-2 (фиг. 2). Той позволява измерването на напрежение, ток, активна и реактивна мощност, фактор на мощността. Управлението на уреда може да се извърши от компютър и резултатите да се получат по вградения интерфейс (Hameg HM8115-2, Programmable AC Power Meter).



Фиг.2. измервател на мощност HM-8115-2

За извършване на измерванията и обработката на измерените стойности е създаден подходящ софтуер. Програмите са написани на DELPHI. На фиг. 3. е показан екрана за управление на измерванията.



Фиг.3. Екран на софтуера за управление на измерванията

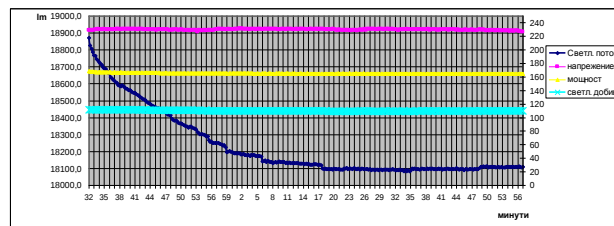
С този софтуер стойностите на напрежението, тока, активната мощност и светлинния поток се отчитат през 15 секунди и се записват във файл.

Изследвани са голям брой проби от два типа светлинни източници: светодиодни и луминесцентни.

Резултати от измерванията

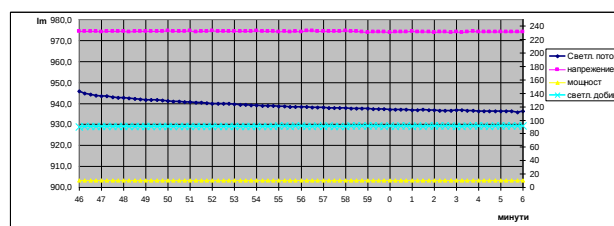
На фиг. 4 – 10 са показани резултатите от измерванията за светодиодни лампи и осветители. Забелязва се общата зависимост на намаляване на светлинния поток около 5 - 8% след включване на осветителя. Това се дължи на загряване на светодиодите и съответно на увеличаване на температурата на прехода, което води до

намаляване на светлинния добив (Cree® XLamp® Long-Term Lumen Maintenance, July 2009). От тези графики може да се съди до колко е добро охлаждането на осветителя и в какъв топлинен режим работи светодиода.



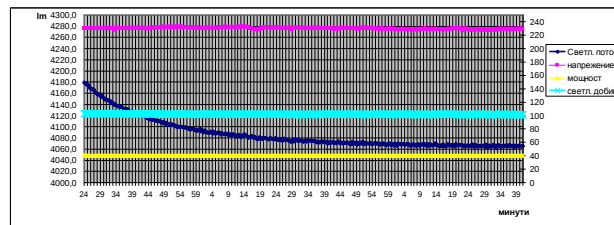
Работен ток	AC 0.73A
Активна мощност	165.6W
Cos(φ)	0.99
Светлинен поток	18130 lm
Светлинен добив	109.5lm /W

Фиг.4. Резултати от Проба № 278



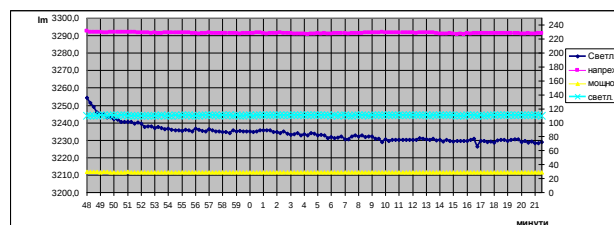
Работен ток	AC 0.048A
Активна мощност	10.24W
Cos(φ)	0.91
Светлинен поток	937 lm
Светлинен добив	91.9lm /W

Фиг.5. Резултати от Проба № 277



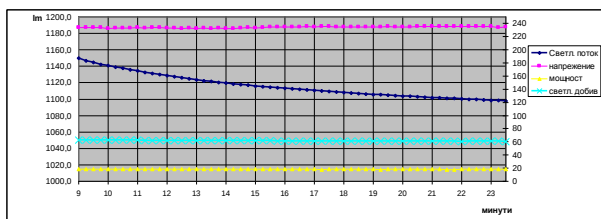
Работен ток	AC 0.186A
Активна мощност	40.3W
Cos(φ)	0.94
Светлинен поток	4065
Светлинен добив	100.9 lm/W

Фиг.6. Резултати от Проба № 267



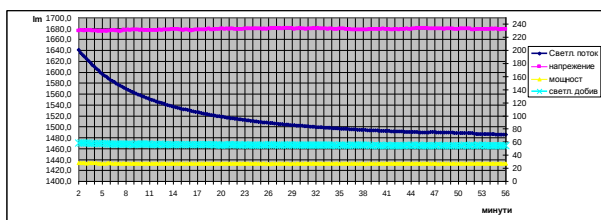
Работен ток	AC 0.131A
Активна мощност	29.1W
Cos(φ)	0.96
Светлинен поток	3232 lm
Светлинен добив	111.1 lm/W

Фиг.7. Резултати от Проба № 227



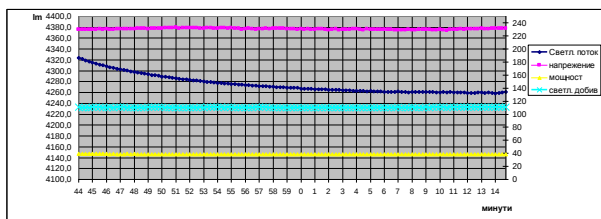
Работен ток	AC 0.137A
Активна мощност	18.08W
Cos(φ)	0.58
Светлинен поток	1086 lm
Светлинен добив	60.0 lm/W

Фиг.8. Резултати от Проба № 226



Работен ток	AC 0.198A
Активна мощност	27.2W
Cos(φ)	0.58
Светлинен поток	1486 lm
Светлинен добив	55.0 lm/W

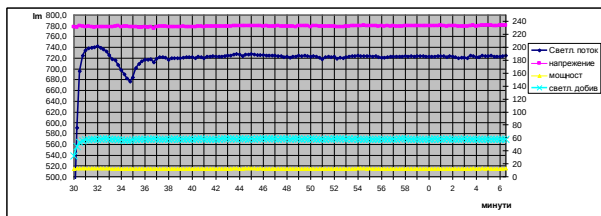
Фиг.9. Резултати от Проба № 225



Работен ток	AC 0.172A
Активна мощност	38.6W
Cos(φ)	0.98
Светлинен поток	4261 lm
Светлинен добив	110.4 lm/W

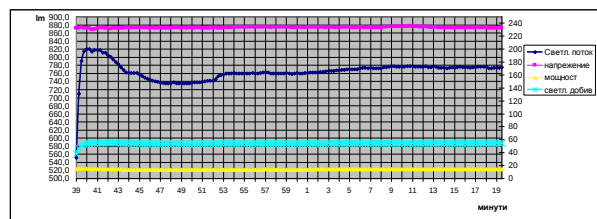
Фиг.10. Резултати от Проба № 172

На фиг. 11 – 15 са показани резултатите от измерванията на параметрите на компактни луминесцентни лампи. От графиките се вижда, че светлинният поток на лампата се стабилизира за време 5 – 10 минути.



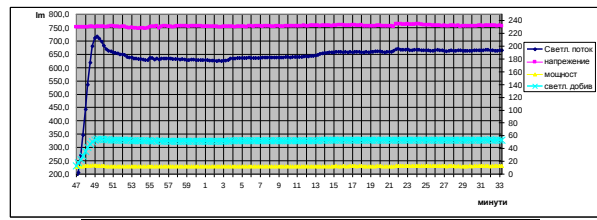
Работен ток	AC 0.086A
Активна мощност	11.6W
Cos(φ)	0.59
Светлинен поток	725lm
Светлинен добив	62.5 lm/W

Фиг.11. Резултати от Проба № 276



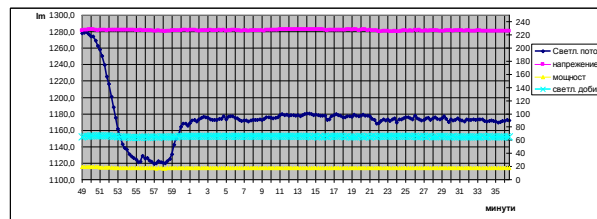
Работен ток	AC 0.096A
Активна мощност	13.3W
Cos(φ)	0.59
Светлинен поток	775lm
Светлинен добив	58.3 lm/W

Фиг.12. Резултати от Проба № 275



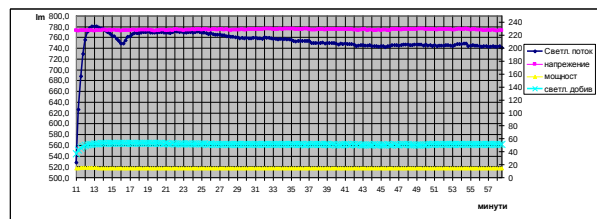
Работен ток	AC 0.086A
Активна мощност	11.8W
Cos(φ)	0.59
Светлинен поток	665lm
Светлинен добив	56.4 lm/W

Фиг.13. Резултати от Проба № 274



Работен ток	AC 0.13A
Активна мощност	17.8W
Cos(φ)	0.60
Светлинен поток	1150lm
Светлинен добив	64.6 lm/W

Фиг.14. Резултати от Проба № 273



Работен ток	AC 0.097A
Активна мощност	13.5W
Cos(φ)	0.60
Светлинен поток	738lm
Светлинен добив	54.7 lm/W

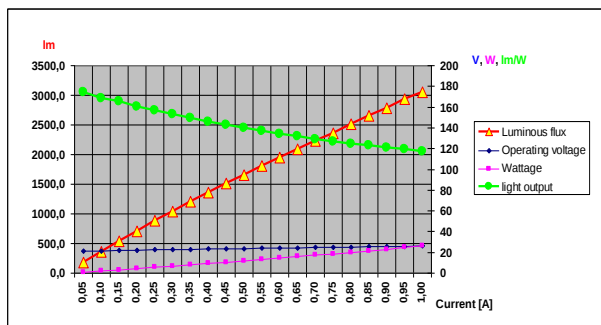
Фиг.15. Резултати от Проба № 271

Графиките на фиг. 11 – 15 показват, че този тип светлинни източници не са подходящи за места, където се налага често включване и изключване на осветителите (коридори, санитарни възли, килери). За тези места е подходящо използването на светодиодни осветители,

чиито пусковите характеристики са значително по-добри. Това се вижда на фиг. 4 – 10.

Важно свойство на един светлинен източник е възможността за димиране – до каква степен може да се намали светлинният поток и каква мощност ще се консумира в този момент. Различните светлинни източници имат различни димиращи характеристики. Така например газоразрядните лампи могат да работят при димиране до 30% от мощността. Луминесцентните лампи могат да се димират до 1%, но само при използването на специална електронна пусково-регулираща апаратура.

В много случаи представлява интерес работата на светлинните източници при намалена мощност. Така например за уличното и тунелното осветление в нощните часове, когато интензивността на движението е намалена, е допустимо реализираната яркост на пътното платно да достигне 50% от нормената. Друга възможност за приложение на димирането с оглед икономия на енергия е следната: всяка осветителна уредба се проектира така, че в края на експлоатационния период да реализира нормените стойности. Поради замърсяването на осветителите и стареенето на светлинните източници, осветителната уредба се проектира така, че в началото на експлоатация да реализира 1.3 – 1.5 пъти по-високи количествени показатели. Ако този процес може да се контролира и през целия период на експлоатация се реализират точните нормени стойности чрез димиране на осветителите, то ще се реализира значителна икономия на електроенергия. За Р. България в момента това би довело до намаление на върховата мощност от 200 до 300 MW. За съжаление, класическите източници на светлина с газоразрядни лампи не са подходящи за този режим на работа.



Фиг.16. Характеристика на димиране на светодиоди

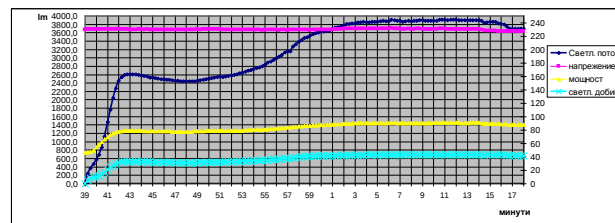
На фиг. 16 е показана характеристика на димиране на светодиоден източник. Този светлинен източник позволява ефективна работа при малка процентна мощност.

От фиг. 16 се вижда, че при работа в режим на ниско натоварване светлинният добив на светодиода се увеличава с 30 – 40% (при другите светлинни източници тази зависимост е обратна – фиг.18.).

В момента се смята, че най-ефективният светлинен източник са натриевите лампи с високо налягане (НЛВН). За лампи с мощност 400W това е така – светлинния добив с отчитане на загубите в дросела достига 125lm/W, но за малките мощности нещата са различни. На фиг. 17 е показана пусковата характеристика на НЛВН. От фигурата

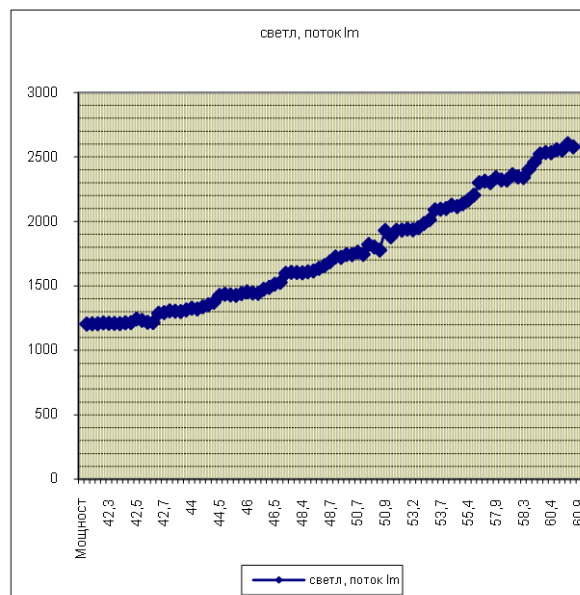
се вижда, че номиналният светлинен поток се постига след 20 минути работа. Следователно такъв източник на светлина може да се използва там където цикълът на светене е продължителен – повече от 2 часа. Това са осветителни уредби на открити площадки, складове и улично и тунелно осветление.

Прави впечатление че лампа с номинална мощност 70W има 92W активна мощност консумирана от електрическата мрежа. Повишената активна мощност на осветителя се дължи на загубите в пуско-регулиращата апаратура. В същото време светлинният поток, излъчен от осветителя е едва 3762 lm, съответно – светлинния добив е 40.9lm/W. А показаната на фиг. 17 лампа е от реномиран производител и е модел последно поколение. За съжаление, в уличното осветление това е най-масово използвания светлинен източник. Така например в гр. София от 80 хил. светлинни точки 44 хил. са с НЛВН 70W (Велинов К., 2010).



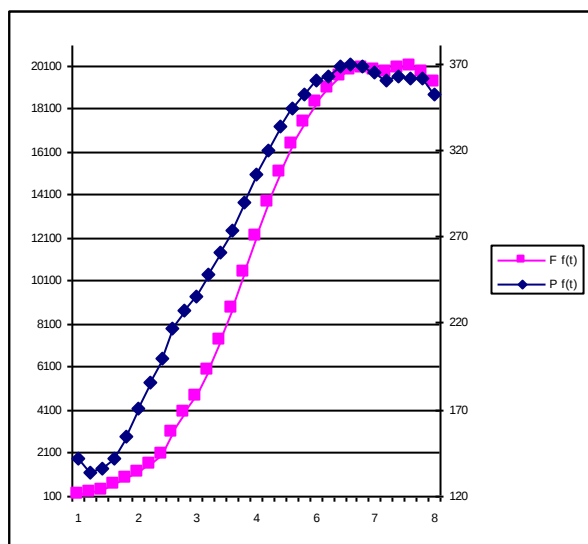
Работен ток	AC 0.97A
Активна мощност	92W
Cos(φ)	0.41
Светлинен поток	3762 lm
Светлинен добив	40.9lm/W

Фиг.17. Пускова характеристика на осветител с натриева лампа високо налягане 70W - проба № 253 и външен вид на НЛВН



Фиг.18. Характеристика на димиране на НЛВН 70W

На фиг. 18 е показана характеристика на димиране на натриева лампа високо налягане. Забелязва се, че скоростта на намаляване на светлинният поток е по-голяма от тази на мощността на лампата. Това означава, че една такава лампа за да свети с 50% от номиналния светлинен поток, трябва да и се подава 70% от номиналната мощност, което определено е икономически неоправдано. За съжаление в проектантската практика се наблюдават много случаи на използване на НЛВН именно в този режим. Такива примери има в улични и тунелни осветителни уредби. В такива случаи се препоръчва да се използват светодиодни осветители. На фиг. 6 е показан такъв осветител. Той има активна мощност 40.3W и светлинен поток излъчен от осветителя 4065lm, като може да замени осветителя от фиг. 17. За сравнение, параметрите на другия осветител са съответно активна мощност 92W и светлинен поток излъчен от осветителя 3762lm. Светодиодният осветител освен че има два пъти по-малка мощност от този с НЛВН, в режим на димиране на светлинния поток на 50% ще консумира само 40% от номиналната си мощност (фиг.16.) т.е. около 16W спрямо 63W за другия.



Фиг.19. Промяна на светлинният поток и мощността на живачна лампа 400W след включването ѝ

Все още в промишлеността и на отделни места в уличното осветление се използват осветители с живачни лампи високо налягане. Експлоатационните разходи на такива осветителни уредби са три пъти по-големи спрямо осветителни уредби изпълнени с НЛВН като те имат и съответно сравнително нисък светлинен добив. Освен тези недостатъци лампата се нуждае от 5-10 минути за да достигне номиналните си параметри. Това може да се проследи на фиг. 19.

Изводи

1. Пусковите характеристики на светлинните източници дават ценна информация. От тях може да се определи до колко е добро охлаждането на светодиоден осветител и в какъв топлинен режим работи светодиодът. По този начин може, без да се разглобява осветителя, да се провери дали термичното съпротивление между корпуса на светодиода и радиатора е малко. Много често производителите не се стараят много в това отношение, а това може да доведе до рязко намаляване на живота на светодиодите.

2. Използването на натриеви лампи с малка мощност (70W) в режим на димиране не е целесъобразно. От фиг.18. се установява, че за да се намали светлинният поток на 50% от номиналния, трябва да се подаде 73% от номиналната мощност.

3. При димиране светодиодните осветители повишават своята ефективност. При намаление на светлинния поток на 50%, необходимата активна мощност е само 40% от номиналната (фиг.16.)

4. Широко разпространените за осветление в бита компактни луминесцентни лампи не достигат веднага номиналния си светлинен поток. Поради това, не са подходящи за места, където се налага често включване и изключване на осветителите. За тези места е подходящо използването на светодиодни осветители.

Литература

- Платицанов Ст., Пл. Цанков, Ив. Станчев. 2001. Пускови характеристики на газоразрядни лампи с високо налягане. Сборник с доклади на XI национална конференция по осветление – ОСВЕТЛЕНИЕ – 2001, Варна, Международен дом на учените “Ф. Ж. Кюри”, Курорт “Св. Св. Константин и Елена”, стр. 243 – 248.
- Велинов К, 2012, Модернизация на гониофотометър с голям брой цифрови фотосензори, Годишник на МГУ “Св. Иван Рилски”.
- Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc., TSL2561, LIGHT-TO-DIGITAL CONVERTER.
- Hameg HM8115-2, Programmable AC Power Meter, <http://www.testequipmentdepot.com/hameg/powersupplies/hm81152.htm>.
- Cree® XLamp® Long-Term Lumen Maintenance, July 2009.
- Велинов К., 2010, Новости в системите за експлоатация и управление на уличното осветление, Национален семинар “Новости в осветителната техника”.
- БДС EN 13032-1,2:2005, Светлина и осветление. Измерване и представяне на фотометрични данни на лампи и осветители.

СИГНАЛНИТЕ ГРАФИ И ИЗПОЛЗВАНЕТО ИМ ЗА РЕШАВАНЕ НА ВЪПРОСИ ОТ ЕЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТТА В ТРИФАЗНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ

Стефан Стефанов, Иван Проданов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Методите на симетричните съставки и на възловите потенциали намират широко приложение за решаването на въпроси за електробезопасността. Те са трудоемки при изчисляването на сложни електрически вериги. В доклада се използват сигналните графи за изследване на електробезопасността на човека при различни режими на работа на трифазни електрически вериги.

SIGNAL GRAPHS AND THEIR IMPLEMENTATION FOR RESOLVING ISSUES REGARDING ELECTRICAL SAFETY IN THREE-PHASE ELECTRICAL CIRCUITS

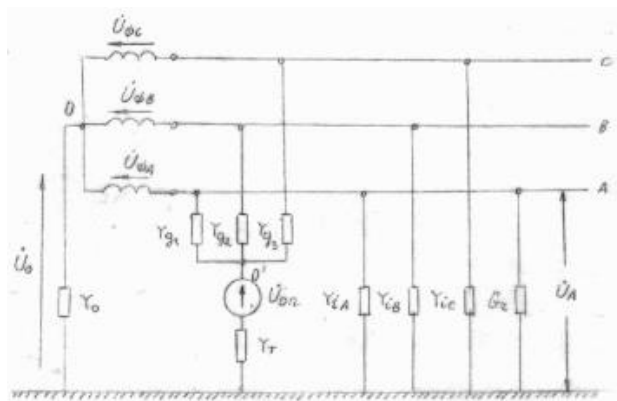
Stefan Stefanov, Ivan Prodanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The methodologies of symmetrical components and nodal analysis are widely applicable for the purpose of resolving issues regarding electrical safety. These methods are labor-intensive in process of calculating complex electrical circuits. This report encompasses signal graphs for the study of electrical safety of man during various operational modes of three-phase electrical circuits.

Понастоящем за решаването на въпроси на електробезопасността намират широко приложение методите на симетричните съставки и на възловите потенциали. Тези методи са свързани с решаването на алгебрични уравнения, затова за изчисляването на сложни електрически вериги се изисква много време и труд.

В доклада се използват сигналните графи за изследване на електробезопасността на човека при различни режими на работа на трифазна електрическа верига. Схемата на такава електрическа верига е дадена на фиг. 1.



Фиг. 1.

С $U_{\Phi A}, U_{\Phi B}, U_{\Phi C}$ са означени комплексните фазови напрежения на захранващия източник;

U_{OP} - комплексното напрежение на източник за оперативен ток с непромишлена честота;

Y_O - комплексната проводимост на клона между нулевата точка на захранващия източник (т. O) и земя;

Y_{g1}, Y_{g2}, Y_{g3} - комплексните проводимости, посредством които се създава изкуствена нулева точка (т. O') за свързване между нея и земя на датчик на устройството за контрол и защита;

Y_T - комплексната проводимост на датчика, включен между изкуствената нулева точка O' и земя;

Y_{iA}, Y_{iB}, Y_{iC} - комплексните проводимости на изолацията на фазите спрямо земя;

G_r - проводимостта на човешкото тяло.

Определяме тока през човека при еднофазно земно съединение в зависимост от параметрите и режима на работа на мрежата, от параметрите на устройството за контрол и защита и зависимостта на входния сигнал на това устройство от тока във веригата на човека.

За построяването на сигналния граф на електрическата мрежа показана на фиг. 1 се съставят уравнения по първия закон на Кирхов:

$$\begin{aligned} \dot{U}_O \cdot Y_O = & \left(\dot{U}_{\Phi A} - \dot{U}_O - \dot{U}_{ОП.} - \dot{U}_T \right) Y_{g1} + \\ & + \left(\dot{U}_{\Phi B} - \dot{U}_O - \dot{U}_{ОП.} - \dot{U}_T \right) Y_{g2} + \\ & + \left(\dot{U}_{\Phi C} - \dot{U}_O - \dot{U}_{ОП.} - \dot{U}_T \right) Y_{g3} + \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + \left(\dot{U}_{\Phi A} - \dot{U}_O \right) (Y_{iA} + G_r) + \\ & + \left(\dot{U}_{\Phi B} - \dot{U}_O \right) Y_{iB} + \left(\dot{U}_{\Phi C} - \dot{U}_O \right) Y_{iC}, \\ \dot{U}_T \cdot Y_T = & \left(\dot{U}_{\Phi A} - \dot{U}_O - \dot{U}_{ОП.} - \dot{U}_T \right) Y_{g1} + \\ & + \left(\dot{U}_{\Phi B} - \dot{U}_O - \dot{U}_{ОП.} - \dot{U}_T \right) Y_{g2} + \\ & + \left(\dot{U}_{\Phi C} - \dot{U}_O - \dot{U}_{ОП.} - \dot{U}_T \right) Y_{g3}, \end{aligned} \quad (2)$$

където $\dot{U}_O$ и $\dot{U}_T$ са напреженията съответно върху Y_O и Y_T .

Отчитайки, че фазовите напрежения на захранващия източник на мрежата са симетрични, можем да напишем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\Phi A} &= U_{\Phi}, \\ \dot{U}_{\Phi B} &= a^2 \cdot \dot{U}_{\Phi A} = a^2 U_{\Phi}, \\ \dot{U}_{\Phi C} &= a \cdot \dot{U}_{\Phi A} = a U_{\Phi}, \end{aligned} \quad (3)$$

където a е фазовият множител, а U_{Φ} - модулът на фазовото напрежение.

След решаване на уравнения (1) и (2), с отчитане на (3) по отношение на $\dot{U}_O$ и $\dot{U}_T$ се получава:

$$\begin{aligned} \dot{U}_O \cdot (Y_O + Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3} + Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r) = \\ = U_{\Phi} \cdot (Y_{g1} + a^2 Y_{g2} + a Y_{g3} + Y_{iA} + a^2 Y_{iB} + a Y_{iC} + G_r) - \\ - \dot{U}_{ОП.} \cdot (Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}) - \dot{U}_T \cdot (Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_T \cdot (Y_T + Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}) = U_{\Phi} \cdot (Y_{g1} + a^2 Y_{g2} + a Y_{g3}) - \\ - \dot{U}_O \cdot (Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}) - \dot{U}_{ОП.} \cdot (Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}). \end{aligned} \quad (5)$$

За съкращаване на записването на уравнения (1) и (2) означаваме:

$$Y_1 = Y_O + Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3} + Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r, \quad (6)$$

$$Y_2 = Y_T + Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}, \quad (7)$$

$$Y_3 = Y_{g1} + Y_{g2} + Y_{g3}, \quad (8)$$

$$Y_4 = Y_{g1} + a^2 Y_{g2} + a Y_{g3} + Y_{iA} + a^2 Y_{iB} + a Y_{iC} + G_r, \quad (9)$$

$$Y_5 = Y_{g1} + a^2 Y_{g2} + a Y_{g3}. \quad (10)$$

При това за $\dot{U}_O$ и $\dot{U}_T$ се получава:

$$\dot{U}_O \cdot Y_1 = U_{\Phi} \cdot Y_4 + \dot{U}_{ОП.} \cdot Y_3 + \dot{U}_T \cdot Y_3, \quad (11)$$

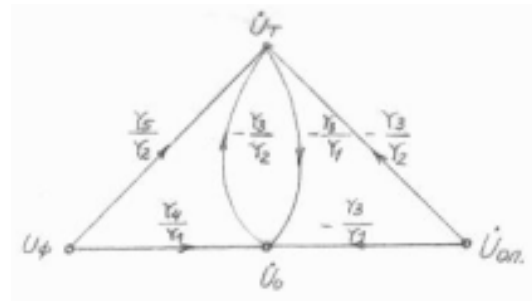
$$\dot{U}_T \cdot Y_2 = U_{\Phi} \cdot Y_5 + \dot{U}_O \cdot Y_3 + \dot{U}_{ОП.} \cdot Y_3, \quad (12)$$

откъдето:

$$\dot{U}_O = \frac{Y_4}{Y_1} U_{\Phi} - \frac{Y_3}{Y_1} \dot{U}_{ОП.} - \frac{Y_3}{Y_1} \dot{U}_T, \quad (13)$$

$$\dot{U}_T = \frac{Y_5}{Y_2} U_{\Phi} - \frac{Y_3}{Y_2} \dot{U}_O - \frac{Y_3}{Y_2} \dot{U}_{ОП.} \quad (14)$$

На основание на уравнения (13) и (14) се осъществява прехода от разглежданата схема (показана на фиг. 1), към нейния сигнален граф, показан на фиг. 2.



Фиг. 2.

Формулата на Meson, която е основна при изчисляването на сигналните графи, ни дава възможност да определим предавателните коефициенти на всички клонове на графа, а следователно и на всички необходими величини за извършване на съответните изчисления.

След използване на формулата на Meson и принципа на наслагването за напрежението $\dot{U}_O$ се получава:

$$\dot{U}_O = \frac{\frac{Y_4}{Y_1} - \frac{Y_3 \cdot Y_5}{Y_1 \cdot Y_2}}{1 - \frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2}} U_{\Phi} + \frac{\frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2} - \frac{Y_3}{Y_1}}{1 - \frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2}} \dot{U}_{ОП.} \quad (15)$$

Входният сигнал на устройството, реагиращо на напрежението на оперативния захранващ източник, датчикът на което е свързан към изкуствената нулева точка O' и земя, се определя с израз:

$$\dot{U}_T = \frac{\frac{Y_5}{Y_2} - \frac{Y_3 \cdot Y_4}{Y_1 \cdot Y_2}}{1 - \frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2}} U_{\Phi} + \frac{\frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2} - \frac{Y_3}{Y_1}}{1 - \frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2}} \dot{U}_{ОП.} \quad (16)$$

Анализът на израз (16) показва, че входният сигнал $\dot{U}_T$ е функция на: напрежението на мрежата, напрежението на оперативния захранващ източник, проводимостта на изолацията на мрежата по отношение на земя, проводимостта на елементите, посредством които е създадена изкуствената нулева точка O' , от проводимостите Y_O , Y_T и проводимостта на веригата на човека G_r .

При еднофазно земно съединение (фиг. 1), токът през човека е равен на:

$$\dot{I}_r = \dot{U}_A \cdot G_r = \left(\dot{U}_{\Phi A} - \dot{U}_O \right) \cdot G_r = \left(\dot{U}_{\Phi} - \dot{U}_O \right) \cdot G_r, \quad (17)$$

където $\dot{U}_A$ е напрежението на фазата, до която се е докоснал човека спрямо земя.

Следователно за определянето на тока $\dot{I}_r$ е необходимо да се знае напрежението $\dot{U}_O$ на сместване на неутралата.

След заместване на (15) в (17) за тока $\dot{I}_r$ получаваме:

$$\dot{I}_r = \left[\left(1 - \frac{\frac{Y_4}{Y_1} - \frac{Y_3 \cdot Y_5}{Y_1 \cdot Y_2}}{1 - \frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2}} \right) \cdot \dot{U}_{\Phi} - \frac{\frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2} - \frac{Y_3}{Y_1}}{1 - \frac{Y_3 \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_2}} \cdot \dot{U}_{ОП.} \right] \cdot G_r. \quad (18)$$

Величините $\dot{I}_r$ и $\dot{U}_T$ зависят преди всичко от режима на работа на звездния център на източника захранващ мрежата.

Разглеждаме следните случаи:

1. Липсва датчик, включен между изкуствената нулева точка O' и земя, т.е.:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ОП.} &= 0, \\ \dot{U}_T &= 0, \\ Y_T &= 0, \\ Y_{g1} &= Y_{g2} = Y_{g3} = Y_g = 0. \end{aligned}$$

При това уравнение (4) добива вида:

$$\begin{aligned} \dot{U}_O \cdot (Y_O + Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r) &= \\ &= \dot{U}_{\Phi} \cdot (Y_{iA} + a^2 \cdot Y_{iB} + a \cdot Y_{iC}), \end{aligned} \quad (19)$$

Полагаме:

$$Y_6 = Y_O + Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r, \quad (20)$$

и

$$Y_7 = Y_{iA} + a^2 \cdot Y_{iB} + a \cdot Y_{iC} + G_r. \quad (21)$$

Получаваме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_O \cdot Y_6 &= \dot{U}_{\Phi} \cdot Y_7, \text{ откъдето} \\ \dot{U}_O &= \frac{Y_7}{Y_6} \dot{U}_{\Phi}. \end{aligned} \quad (22)$$

При еднофазно земно съединение, токът през човека се определя, използвайки формула (17). В този случай след заместване на (22) в (17) получаваме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_r &= \left(\dot{U}_{\Phi} - \dot{U}_O \right) \cdot G_r = \left(\dot{U}_{\Phi} - \frac{Y_7}{Y_6} \dot{U}_{\Phi} \right) \cdot G_r = \\ &= \left(1 - \frac{Y_7}{Y_6} \right) \cdot G_r \cdot \dot{U}_{\Phi} = \frac{Y_6 - Y_7}{Y_6} \cdot G_r \cdot \dot{U}_{\Phi}, \end{aligned}$$

т.е.

$$\dot{I}_r = \frac{Y_O + (1 - a^2) \cdot Y_{iB} + (1 - a) \cdot Y_{iC}}{Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r} \cdot G_r \cdot \dot{U}_{\Phi}. \quad (23)$$

От израз (23) следва, че токът $\dot{I}_r$ при земно съединение в разглеждания случай зависи от: проводимостта Y_O , от проводимостите на изолацията Y_{iA}, Y_{iB}, Y_{iC} спрямо земя, от проводимостта на човека G_r и от фазовото напрежение $\dot{U}_{\Phi}$.

2. Директно заземен звезден център на източника захранващ мрежата.

В този случай $Y_O \gg Y_{iA}, Y_{iB}, Y_{iC}, G_r$.

Нека $Y_{g1} = Y_{g2} = Y_{g3} = 0$, $\dot{U}_{ОП.} = 0$ и $Y_T = 0$.

Тогава:

$$\dot{I}_r = G_r \cdot \dot{U}_{\Phi}. \quad (24)$$

Следователно случай токът $\dot{I}_r$ зависи само от проводимостта на човека G_r и от фазовото напрежение $\dot{U}_{\Phi}$.

3. Изолиран звезден център на източника.

В този случай $Y_O = 0$. При $Y_{g1} = Y_{g2} = Y_{g3} = 0$,

$\dot{U}_{ОП.} = 0$ и $Y_T = 0$,

$$\dot{I}_r = \frac{(1 - a^2) \cdot Y_{iB} + (1 - a) \cdot Y_{iC}}{Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r} \cdot G_r \cdot \dot{U}_{\Phi}. \quad (25)$$

Токът $\dot{I}_r$ зависи от проводимостите на фазите спрямо земя Y_{iA}, Y_{iB}, Y_{iC} , от проводимостта на човека G_r и от фазовото напрежение $\dot{U}_{\Phi}$.

4. Изолиран звезден център на източника,

$$Y_{g1} = Y_{g2} = Y_{g3} = Y_g, \quad U_{\text{ОП}} \neq 0 \text{ и } Y_T \neq 0.$$

В този случай:

$$I_r = \frac{\frac{3Y_g}{Y_T} \cdot (Y_T + A) + (A + G_r)}{\frac{3Y_g}{Y_T} \cdot (Y_T + B) + B} \cdot G_r \cdot U_{\Phi} - \frac{Y_T}{Y_T + B + \frac{Y_T}{3Y_g}} \cdot G_r \cdot U_{\text{ОП}}, \quad (26)$$

където:

$$A = (1 - a^2) \cdot Y_{iB} + (1 - a) \cdot Y_{iC},$$

$$B = Y_{iA} + Y_{iB} + Y_{iC} + G_r.$$

Токът I_r зависи от проводимостите $Y_g, Y_T, Y_{iA}, Y_{iB}, Y_{iC}, G_r$, от фазовото напрежение U_{Φ} и от оперативното напрежение $U_{\text{ОП}}$.

Напрежението U_T определяме, като се използва уравнение (16).

Ако приемем $Y_{iA} = Y_{iB} = Y_{iC} = Y$, $Y_{g1} = Y_{g2} = Y_{g3} = Y_g$ и отчетем изрази (6) ÷ (10), получаваме:

$$U_T = \frac{-\frac{3Y_g \cdot G_r}{C} \cdot U_{\Phi} + \frac{\frac{3Y_g \cdot 3Y_g}{C \cdot D} - \frac{3Y_g}{D}}{1 - \frac{3Y_g \cdot 3Y_g}{C \cdot D}} \cdot U_{\text{ОП}}, \quad (27)$$

където:

$$C = Y_O + 3Y_g + 3Y + G_r,$$

$$D = Y_T + 3Y_g.$$

Ако $Y_O = 0$, то:

$$U_T = -\frac{\frac{3Y_g \cdot G_r}{E}}{1 - \frac{3Y_g \cdot 3Y_g}{E \cdot D}} \cdot U_{\Phi} + \frac{\frac{3Y_g \cdot 3Y_g}{E \cdot D} - \frac{3Y_g}{D}}{1 - \frac{3Y_g \cdot 3Y_g}{E \cdot D}} \cdot U_{\text{ОП}}, \quad (28)$$

където:

$$E = 3Y_g + 3Y + G_r.$$

Анализът на формули (27) и (28) показва, че при докосване на човек до фаза, входният сигнал U_T изменя своята стойност и предизвиква сработване на защитата, като чувствителността се определя от съотношението на проводимостите Y_O, Y_g, Y, Y_T .

При свързване на датчика между изкуствената нулева точка на мрежата O' и земя, устройството може да се реализира без оперативен източник на захранване. В този случай входният сигнал на устройството ще се определя от първото събираемо в зависимост (27). При симетрия на проводимостта на изолацията на фазите спрямо земя и симетрични проводимости на елементите на датчика до докосването на човек до фаза ($G_r = 0$), входният сигнал е равен на нула. При докосване възниква входен сигнал и защитата сработва. Следователно, устройството реагира на несиметрията на фазовите напрежения спрямо земя (на напрежението с нулева последователност).

Обикновено за подобряване характеристиката на защитното устройство, то се изпълнява така, че проводимостта Y_g за тока с промишлена честота има неголяма стойност. В този случай първото събираемо в израз (28) има малка стойност и можем да не го отчитаме.

Тогава:

$$U_T = -3Y_g \cdot \frac{3Y + G_r}{E \cdot D - 9Y_g} \cdot U_{\text{ОП}}, \quad (29)$$

$$I_T = -\frac{3Y + G_r}{\frac{D}{Y_T \cdot 3Y_g} \cdot E + 1} \cdot U_{\text{ОП}}. \quad (30)$$

Литература

Афанасьевич, П. И., А. И. Даревский, Е. С. Кухаркин, В. Г. Миронов, Н. А. Мельников. 1967. Теоретические основы электротехники. Том I, „Висшая школа“, М.
Сучилин, А. М. 1971. Применение направленных графов к задачам электротехники. „Энергия“, Ленинградское отделение.

РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ТОКОВЕТЕ С НУЛЕВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ ПО ДЪЛЖИНАТА НА КАБЕЛНА ЛИНИЯ ПРИ ЕДНОФАЗНО ЗЕМНО СЪЕДИНЕНИЕ

Стефан Стефанов, Иван Проданов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Измерването на токовете с нулева последователност на отделни участъци и тяхното сравнение е един от ефективните методи за определяне на участъка от кабелна линия, в който е станало земно съединение. В доклада се разглеждат аналитични уравнения, чрез които количествено могат да се определят токовете с нулева последователност. Предлагат се препоръки за практическото приложение на получените уравнения.

ALLOCATION OF THE CURRENTS WITH ZERO SEQUENCE ALONG THE CABLE LINE IN SINGLE-PHASE GROUND FAULTS

Stefan Stefanov, Ivan Prodanov

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

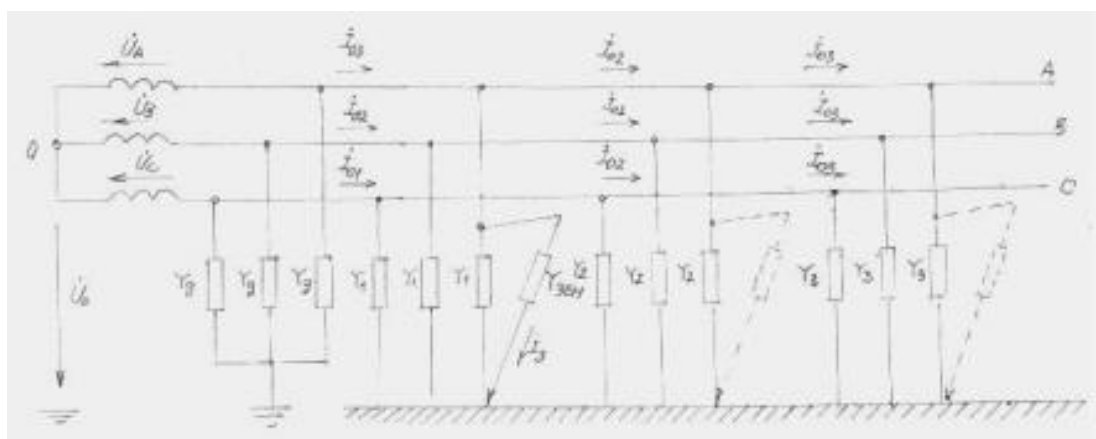
ABSTRACT. Measurement of currents with zero sequence of particular segments and their comparison is one of the effective methodologies for determining the section of the cable line where a ground fault has taken place. This report examines analytical equations through which a quantitative measurement of currents with zero sequence can be carried out. Recommendations with practical application of the resulting equations are proposed.

Един от ефективните методи за определяне на участъка от кабелна линия, в който е станало земно съединение е измерване на токовете с нулева последователност на отделни участъци и тяхното сравнение.

В доклада се дават аналитични уравнения, посредством които количествено могат да се определят токовете с

нулева последователност на отделни участъци от кабелна линия при еднофазно земно съединение на произволен неин n -ти участък, а също и препоръки за практическото използване на получените уравнения.

На фиг. 1 е показана изчислителна схема на кабелна линия условно разделена на три участъка.



Фиг. 1.

Приети са следните означения:

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазовите напрежения на захранващия трансформатор;

$\dot{U}_O$ - напрежението на сместване на неутралата;

Y_1, Y_2, Y_3 - комплексните проводимости на отделните участъци от линията по отношение на земя;

Y_g - проводимостта на изкуствена нулева точка на мрежата;

$\dot{I}_{O1}$ - токът с нулева последователност на първия участък, на който е станала повреда на изолацията;

$\dot{I}_{O2}, \dot{I}_{O3}$ - токовете с нулева последователност на неповредените участъци;

$\dot{I}_3$ - токът на еднофазното земно съединение.

А. Земно съединение на първия участък

Записваме фазовите симетрични напрежения с права последователност на захранващия трансформатор в комплексна форма:

$$\dot{U}_A = U_\Phi, \quad \dot{U}_B = a^2 U_\Phi, \quad \dot{U}_C = a U_\Phi,$$

където $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ е фазовият множител.

На основание на метода на симетричните съставки, токът с нулева последователност за първия участък е равен:

$$\dot{I}_{O1} = \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \right), \quad (1)$$

където:

$$\dot{I}_A = \left(\dot{U}_A - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_{ЗЕМ}), \quad (2)$$

$$\dot{I}_B = \left(\dot{U}_B - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3), \quad (3)$$

$$\dot{I}_C = \left(\dot{U}_C - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3).$$

След заместване в (1) получаваме:

$$\dot{I}_{O1} = \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_A - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_{ЗЕМ}) + \left(\dot{U}_B - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3) + \left(\dot{U}_C - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3) \right]. \quad (4)$$

Напрежението на сместване на неутралата определяме по формулата:

$$\begin{aligned} \dot{U}_O &= \frac{Y_A \cdot \dot{U}_A + Y_B \cdot \dot{U}_B + Y_C \cdot \dot{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \\ &= U_\Phi \cdot \frac{(A + Y_{ЗЕМ} + Y_g) + a^2 \cdot (A + Y_g) + a \cdot (A + Y_g)}{A + Y_{ЗЕМ} + Y_g + A + Y_g + A + Y_g} \\ &= U_\Phi \cdot \frac{B + C + D + E + Y_{ЗЕМ}}{3 \cdot A + Y_{ЗЕМ} + 3 \cdot Y_g} \\ &= U_\Phi \cdot \frac{Y_{ЗЕМ}}{3 \cdot A + Y_{ЗЕМ} + 3 \cdot Y_g} \\ &= U_\Phi \cdot \frac{Y_{ЗЕМ}}{Y_\Sigma + Y_{ЗЕМ} + 3 \cdot Y_g}, \end{aligned} \quad (5)$$

където:

$$A = Y_1 + Y_2 + Y_3,$$

$$B = Y_1 + a^2 \cdot Y_1 + a \cdot Y_1,$$

$$C = Y_2 + a^2 \cdot Y_2 + a \cdot Y_2,$$

$$D = Y_3 + a^2 \cdot Y_3 + a \cdot Y_3,$$

$$E = Y_g + a^2 \cdot Y_g + a \cdot Y_g,$$

а $Y_\Sigma = 3 \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3)$ е сумарната проводимост на разглежданата мрежа.

След заместване на (5) в (4) и съответни преобразувания, получаваме тока с нулева последователност за първия участък:

$$\dot{I}_{O1} = U_\Phi \cdot \frac{Y_{ЗЕМ} \cdot Y_g}{Y_\Sigma + Y_{ЗЕМ} + 3 \cdot Y_g} \quad (6)$$

При директно земно съединение, когато $Y_{ЗЕМ} = \infty$, токът $\dot{I}_{O1}$ е равен:

$$\dot{I}_{O1} = U_\Phi \cdot Y_g \quad (7)$$

Изразът за тока с нулева последователност на втория участък има вида:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O2} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{I}_A'' + \dot{I}_B'' + \dot{I}_C'' \right) = \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_\Phi - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) + \right. \\ &+ \left(a^2 \cdot \dot{U}_\Phi - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) + \left(a \cdot \dot{U}_\Phi - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) \left. \right] = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_\Phi + a^2 \cdot \dot{U}_\Phi + a \cdot \dot{U}_\Phi - 3 \cdot \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

След заместване на (5) в (8) се получава:

$$\dot{I}_{O2} = -U_\Phi \cdot Y_{ЗЕМ} \cdot \frac{Y_2 + Y_3}{Y_\Sigma + Y_{ЗЕМ} + 3 \cdot Y_g}. \quad (9)$$

При директно земно съединение $Y_{ЗЕМ} = \infty$, а токът:

$$\dot{I}_{O2} = -U_\Phi \cdot (Y_2 + Y_3) \quad (10)$$

Изразът за тока с нулева последователност на третия участък има вида:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O3} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{I}_A''' + \dot{I}_B''' + \dot{I}_C''' \right) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_\Phi + a^2 \cdot \dot{U}_\Phi + a \cdot \dot{U}_\Phi - 3 \cdot \dot{U}_O \right) \cdot Y_3 \right] = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left[\dot{U}_\Phi \cdot (1 + a^2 + a) - 3 \cdot \dot{U}_O \right] \cdot Y_3 = -\dot{U}_O \cdot Y_3. \end{aligned} \quad (11)$$

След заместване на (5) в (11), за тока $\dot{I}_{O3}$ се получава:

$$\dot{I}_{O3} = -U_{\Phi} \cdot Y_3 \cdot \frac{Y_{3EM}}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \quad (12)$$

При директно земно съединение, когато $Y_{3EM} = \infty$, за токът $\dot{I}_{O3}$ се получава:

$$\dot{I}_{O3} = -U_{\Phi} \cdot Y_3 \quad (13)$$

Б. Земно съединение на втория участък (показано с пунктир на фиг. 1).

Токът с нулева последователност на първия участък при земно съединение на втория участък не се изменя по отношение на предходния случай и следователно може да бъде определен с изрази (6) и (7).

Токът на втория участък определяме с изреча:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O2} &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(U_{\Phi} - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3 + Y_{3EM}) + \right. \\ &+ \left. \left(a^2 U_{\Phi} - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) + \left(a U_{\Phi} - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) \right] = \\ &= U_{\Phi} \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_1 + Y_2}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \end{aligned} \quad (14)$$

При $Y_{3EM} = \infty$,

$$\dot{I}_{O2} = -U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_2) \quad (15)$$

Токът с нулева последователност на третия участък при земно съединение на втория участък с отчитане на (5) е:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O3} &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(U_{\Phi} + a^2 U_{\Phi} + a U_{\Phi} - 3 \cdot \dot{U}_O \right) \cdot Y_3 \right] = \\ &= -U_{\Phi} \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_3}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \end{aligned} \quad (16)$$

При $Y_{3EM} = \infty$,

$$\dot{I}_{O3} = -U_{\Phi} \cdot Y_3 \quad (17)$$

В. Земно съединение на третия участък (на фиг. 1 е показано с пунктир).

Както и преди, токът с нулева последователност на първия участък не се изменя и се определя посредством уравнения (5) и (6).

Аналогично токът с нулева последователност на втория участък се изчислява посредством уравнения (14) и (15).

Токът с нулева последователност на третия участък, на който става земно съединение, с отчитане на (5) е равен на:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O3} &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(U_{\Phi} - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_3 + Y_{3EM}) + \left(a^2 U_{\Phi} + a U_{\Phi} - 2 \cdot \dot{U}_O \right) \cdot Y_3 = \right. \\ &= U_{\Phi} \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_1 + Y_2 + Y_g}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \end{aligned} \quad (18)$$

При директно земно съединение $Y_{3EM} = \infty$. Тогава:

$$\dot{I}_{O3} = U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_g) \quad (19)$$

По аналогичен начин могат да се получат изрази за токовете с нулева последователност в кабелната мрежа с произволен брой участъци при земно съединение, на който и да е от тях.

В качеството на пример в табл. 1 са дадени уравненията на токовете с нулева последователност при директно земно съединение на кабелна линия с три участъка.

Таблица 1.
Директно земно съединение в участъците

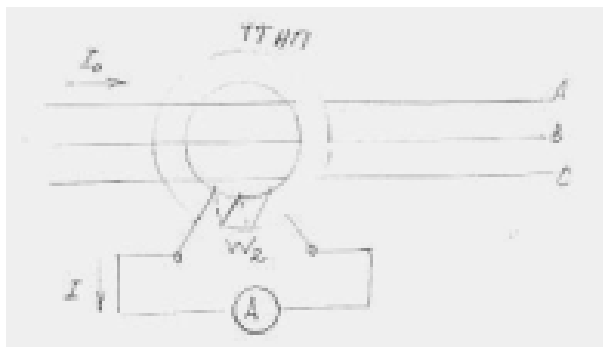
участък	уравнения на токовете при директно земно съединение		
	$\dot{I}_{O1}$	$\dot{I}_{O2}$	$\dot{I}_{O3}$
I	$U_{\Phi} \cdot Y_g$	$-U_{\Phi} \cdot (Y_2 + Y_3)$	$-U_{\Phi} \cdot Y_3$
II	$U_{\Phi} \cdot Y_g$	$U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_g)$	$-U_{\Phi} \cdot Y_3$
III	$U_{\Phi} \cdot Y_g$	$-U_{\Phi} \cdot Y_3$	$U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_g)$

Както се вижда от табл. 1, във всички случаи токът с нулева последователност на първия участък от кабелната линия е един и същ и се определя от допълнителната проводимост Y_g . Установява се също, че ако броят на участъците n е по-голям от три, то изразът за тока с нулева последователност на участъка, където е станало земното съединение може да се запише така:

$$\dot{I}_{On} = U_{\Phi} \cdot (Y_g + Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{n-1}) \quad (20)$$

От уравнение (20) следва, че с отдалечаване от началото на линията към нейния край, токът с нулева последователност при повредения участък се увеличава спрямо токовете с нулева последователност на другите участъци, винаги е положителен и най-голям по стойност сред положителните токове. Това свойство дава съответната информация при определянето на участъка с повредената изолация.

На практика токовете с нулева последователност могат да бъдат измерени с помоща на токов трансформатор за нулева последователност (фиг. 2).



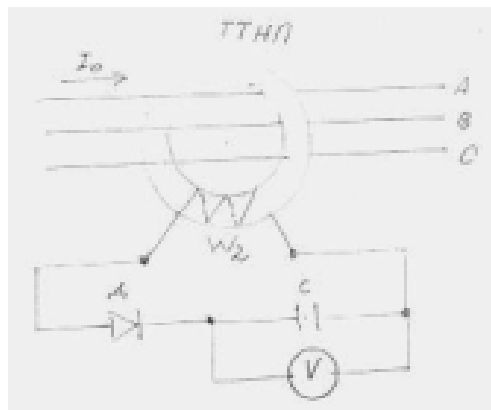
Фиг. 2.

Токът, протичащ през амперметъра е пропорционален на утроения ток с нулева последователност:

$$I = 3 \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot I_0,$$

където W_1 и W_2 са броя на навивките на първичната и вторичната намотки на трансформатора.

В случая, когато кабелната линия се изключва от защитата за земно съединение, за запазване на информацията за токовете с нулева последователност е необходимо да се измери не токът във вторичната верига на трансформатора, а напрежението, по схемата на фиг. 3.



Фиг. 3.

При това волтметърът трябва да има достатъчно голямо вътрешно съпротивление, за да остава кондензаторът зареден продължително време, необходимо за записване на показанията на волтметъра на всички участъци от кабелната линия.

Литература

- Цапенко, Е. Ф. 1986. Замыкание на землю в сетях 6-35 кВ. М., Энергоатомиздат.
- Бессонов, Л. А. 1964. Теоретические основы электротехники. М., Высшая школа.
- Сирота, И. М. 1983. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. Киев, Наукова думка.

СИНТЕЗ НА АПАРАТ ЗА КОНТРОЛ НА ЗАЗЕМИТЕЛНИЯ КОНТУР В ИТ МРЕЖИ НН, СЪДЪРЖАЩИ ВИСШИ ХАРМОНИЦИ

Милен Дренков¹, Стефан Чобанов², Драголюб Костов³, Менто Ментешев⁴

¹ CMC-C ЕООД, Пирдоп, e-mail: milen.drenkov@cmc-c.com

² CMC-C ЕООД, Пирдоп, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

³ Минно-геоложки университет "Св. Ив. Рилски", 1700 София, e-mail: drago@mgu.bg

⁴ CMC-C ЕООД, Пирдоп, e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ. Синтезирани са основните функционални качества и параметри на апарати за контрол на съпротивлението на заземяване на подвижни минни машини. Дадена е блокова схема на разработен апарат АКЗК, унифициран за най-често използваните напрежения със синусоидална форма и когато съдържат висши хармоници. Схемата е изпълнена с електронни елементи със средна и висока степен на интеграция.

SYNTHESIS OF THE DEVICES FOR CONTROL OF THE GROUNDING CONTOUR IN LV IT NETWORKS, WHICH CONTAINS HIGH HARMONICS

Milen Drenkov¹, Stefan Chobanov², Dragolub Kostov³, Mento Monteshev⁴

¹ CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: milen.drenkov@cmc-c.com

² CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

³ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: drago@mgu.bg

⁴ CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

ABSTRACT. The basic functional qualities and parameters of the devices for control of the grounding resistance of the movable mining machines are synthesized. A block scheme of the elaborated device type AKZK, unified for the most commonly used voltage with sinusoidal shape and with containing high harmonics is given. The scheme is implemented with electronic elements with medium and high degree of integration.

В електрическите мрежи, съдържащи честотно управляеми тиристорни и транзисторни електрозадвигания се генерират висши хармоници в тока и напрежението. В мините се наблюдава нарастващо приложение на посочените управления, които изместват релейно-контакторното управление, с ограничените си функционални възможности и надеждност.

В рудничните мрежи с изолирана неутрала (IT), висшите хармоници в напрежението оказват съществено влияние върху електробезопасността като резултат на нарастването на тока на утечка и произтичащите от това негативни последици [1]. Част от тях са свързани пряко с безопасните допустими стойности за съпротивлението на заземителния контур на подвижните минни машини (Menteshev, 1996; Дренников, 2009; Helfrich, 1985).

Функционални качества и параметри на апаратите за контрол на заземяването на подвижните машини

Подвижните машини не може да се заземяват локално и за обезопасяването им се разчита единствено на свързването им към общата заземителна мрежа. Тъкмо

това прави необходим непрекъснатия контрол и/или измерване на съпротивлението на заземителния контур. Функционалните качества и основните параметри на апаратите за тази цел трябва да бъдат съобразени с настъпилите изменения в рудничните мрежи.

При синтеза на апаратите трябва да се имат в предвид следните изисквания:

1. Да не допускат работа на мобилни машини при недопустимо увеличаване на съпротивлението на заземяване, при което нараства риска от електрозлополуки.
2. Граничното допустимо съпротивление на заземителния контур трябва да се определи в зависимост от:
 - възприетото допустимо безопасно напрежение 24V AC, съобразено с техническите условия за работа в мините: висока влажност, пожароопасност и взривоопасност, които правят неприемлива безопасната стойност на директното напрежение 50V AC регламентирана в (Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии, 2004);
 - напрежението на мрежата;
 - наличността и амплитудно-честотния спектър на хармониците в напрежението; които предпоставят нарастване на тока на утечка и съответно на допирното напрежение.

3. Апаратите трябва да са унифицирани, с възможност за въвеждане на настройки, съобразени с т.2:

- за напрежение на мрежата: 380; 500; 660; 1000 и 1140V AC;
- за хармоници в напрежението – три нива, характеризирани с коефициенти на несинусоидалност отчитащи деформацията $K_{nc}(THD)$ (БДС EN 50160:2007; БДС EN 61000-2-2:2004; БДС EN 61000-3-12:2006; БДС 61623-83):
 - при отсъствие на хармоници - $K_{nc}(THD) = 0$;
 - при стандартно допустими хармоници - $K_{nc}(THD)_U \leq 5\%$;
 - При силно присъствие на хармоници - $K_{nc}(THD)_U > 5\%$.

4. Да се измерва непрекъснатото съпротивление на заземителния контур с точност до 5%.

5. Да е предвидена възможност за периодично ръчно и/или автоматично тестване на функционалното действие на апарати и на точността при измерване на съпротивлението на заземителния контур.

6. Схемата да работи в режим на самоконтрол и при неизправност на съставните блокове и елементи, компрометиращи защитните функции на апарата, да не позволява работа на машината.

7. Да се използват електронни елементи със средна и висока степен на интеграция и съвременни електро-механични елементи, предпоставящи минимални размери на апарата и достатъчна надеждност.

Съществуващите апарати за контрол на заземяването на подвижни машини притежават само част от изброените качества: контролиране целостта на заземителния проводник, включвайки го във веригата за дистанционно управление – необходимо, но не и достатъчно условие за функционалните качества и безопасност; прилагане на устройства, изградени на базата на електро-механични и електронни елементи, които реагират само на прекъсване на заземителния проводник или при значително нарастване на съпротивлението на заземителния контур, което не гарантира безопасно допирно напрежение. Всички използвани апарати са с параметри, които не са съобразени с наличието на висши хармоници в напрежението (БДС EN 50160:2007; БДС EN 61000-2-2:2004; БДС EN 61000-3-12:2006; БДС 61623-83; Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии, 2004; Апарати за контрол на съпротивлението на заземяване на подвижни машини).

Блокова схема

На фиг.1 е дадена блоковата схема на апарат за контрол на съпротивлението на заземителния контур АКЗК на подвижни машини, притежаващ формулираните функционални качества и параметри.

За оценка на съпротивлението на заземителния контур се използва източник на постоянен ток (Gl). Микропроцесор (Pic) изчислява съпротивлението на заземителния контур $R_{з.к.}$ като отношение на измерения пад на напрежение в контура $U_{з.к.}$ като аналогов сигнал,

предварително преобразуван в цифров, и въведения константен оперативен ток $I_{оп} : R_{з.к.} = \frac{U_{з.к.}}{I_{оп}}$.

Изчислените стойности на съпротивлението на заземителния контур се индикират с двузряден дисплей (VII), и когато надхвърли зададената стойност, в микропроцесора (VI) се формира изключваща команда.

Съпротивленията на задействане зависят от напрежението на мрежата (380, 500, 660, 1000, 1140V) и коефициента на синусоидалност с възприети три дискретни нива: 0; <5% и >5%. Тези два параметъра се въвеждат като комбинация от две състояния 0 и 1 на микропревключвателя SW1, притежаващ четири контакта с позиции ON-OFF.

Когато измереното и изчислено съпротивление на заземителния контур превиши зададената безопасна стойност, въведена с SW1, Pic процесора (VI), подава команда към хибриден изключвателен блок (V), съдържащ транзистор и електро-механично реле KV1 с два превключващи контакта на изхода.

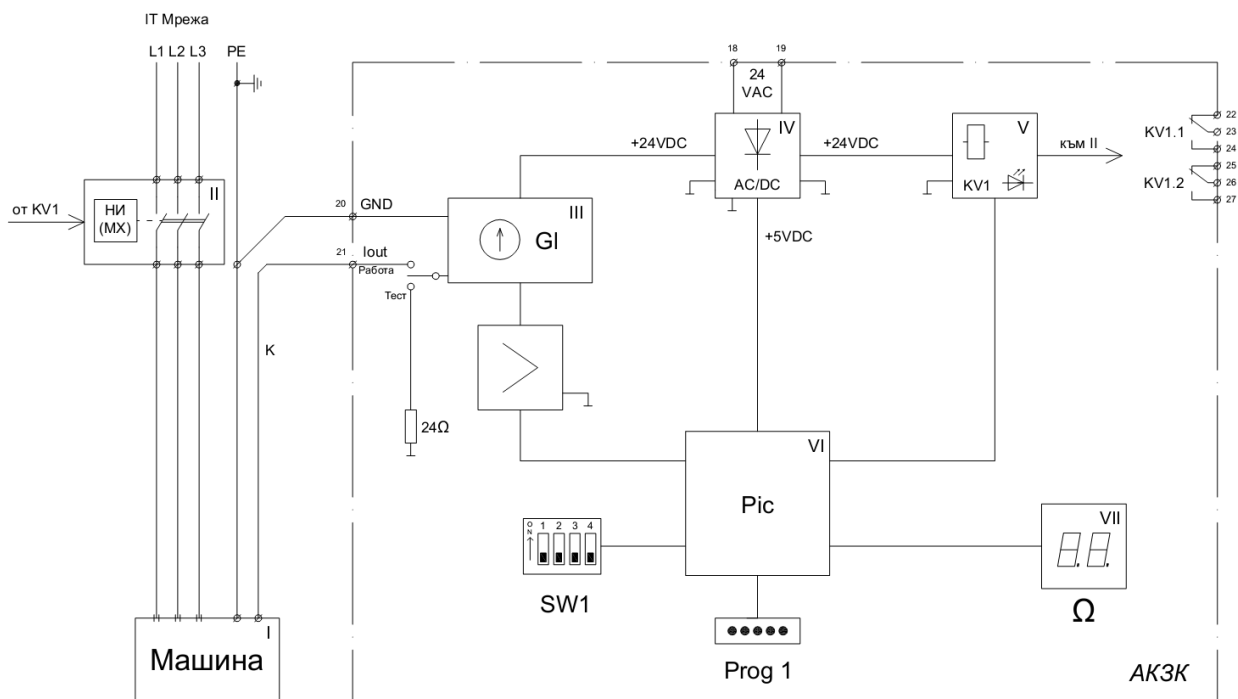
Подвижната машина (I) се захранва с пет жилен кабел 3P+PE+K от прекъсвач или контактор (II), присъединен към IT мрежата с 3P+PE (четирижилен кабел).

Апаратът АКЗК включва: захранващ блок AC/DC, (IV) с напрежение на входа 24V AC и 5V DC; блок за оценка съпротивлението на заземителния контур (III), който включва източник на ток (Gl) (44mA) и измервател на пада на напрежение; микропроцесор Pic (VI), в който се въвеждат настройките на микропревключвателя SW1, който разрешава/забранява работата на машината и управлява двузрядния седемсегментен дисплей (VII). Pic процесорът се програмира и препрограмира посредством изведен куплунг Prog1.

След присъединяване на изводите: I_{out} към проводника K и GND ($\equiv$) към PE проводника и подаване на напрежение 24V AC с превключвателя в позиция „Работа“, апаратът АКЗК е включен – зеленият светодиод свети. На дисплея се показва съпротивлението на заземителния контур, който има максимална допустима стойност за задействане 99Ω (настройка при синусоидално напрежение 380V ($K_{nc} = 0\%$), и минимална допустима стойност на задействане 31Ω (настройка при напрежение 1140V и $K_{nc} > 5\%$).

Когато съпротивлението на заземителния контур е по-голямо от въведените настройки, апаратът ще задейства и с контактите на транзисторно-релейния блок няма да разреши включване на превключвателя (контактора), а ако последният е бил включен и машината е работила, тя ще бъде изключена от мрежата, а зеленият диод ще угасне.

Дисплеят показва непрекъснато съпротивление на заземителния контур в интервала от 0Ω до 99Ω. При голямо съпротивление, включително и при прекъсване на заземителния контур, дисплеят ще показва 99Ω. При превключване на Qs в позиция „ТЕСТ“, на дисплея трябва да се появи показание $23 (\pm 1)\Omega$, а зеленият диод ще свети.



Фиг. 1 Блокова схема на апарат за контрол на съпротивлението на заземителен контур

Настройка на апаратите

Оптимизацията на настройките на апаратите, контролиращи съпротивлението на заземяването на подвижните минни машини е от изключително важно значение за безопасната им експлоатация.

Подходът за определяне на настройките трябва да се базира на самостоятелното и независимо действие на двете мерки, гарантиращи безопасността на електрическите уредби: защитното заземяване и защитата от токови утечки. Това е регламентирано в Наредбите и Правилата за безопасната им експлоатация в мините (Helfrich, 1985; Данков, 1991). Следователно, настройката на апаратите, контролиращи заземяването, в частност на мобилните машини, трябва да не допуска работата им при възможност да се получи опасно напрежение > 24V от индиректен допир при повреда в изолацията, т.е. при нарастване на тока на утечка.

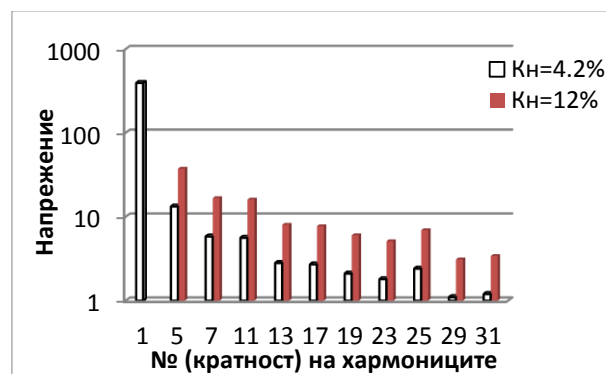
Критерият за настройка се определя от максималните стойности на тока на утечка. Те се лимитират от максималната активна и капацитивна проводимост на изолацията, а последната е честотно зависима (ωC) и ще зависи и от амплитудно-честотния спектър на висшите хармоници в напрежението на мрежата [Menteshev, 1996; Hewston, 2005].

Изоляционното състояние на рудничните мрежи е изследвано в много страни и у нас преди 2-3 десетилетия (Данков, 1991). Публикувани са данни за минималните, максималните и най-вероятните стойности на тока на утечка в мрежи с различни напрежения, но синусоидални, без висши хармоници (Данков, 1991). Значително по-малко са данните за изследвания на мрежи с висши

хармоници в напрежението, проведени главно през последните години (Чобанов и др., 2013; Hewston, 2005).

Този факт провокира измервания в реална руднична мрежа съдържаща честотни регулатори, управляващи асинхронни двигатели с единична мощност 200kW (Чобанов и др., 2013).

На фиг.2 е показан дискретният амплитудно-честотен спектър на висшите хармоници в мрежата с напрежение 0,4kV и трансформатор 1MVA. Основните мощности са свързани с гумено-транспортните ленти 2x200kW и 1x45kW с честотно управление, а допълнителната мощност - 140kW се управлява с релейно-контакторни схеми.



Фиг. 2 Дискретен амплитудно-честотен спектър

От експерименталните изследвания е определен коефициентът на несинусоидалност:

$$K_{н.с.U}(\text{THD})_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=5}^{31} U_i^2}}{U_1} \cdot 100 = 4,2\% \quad (1)$$

където:

U_i – са амплитудите на измерените хармоници – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, с честота кратна на първият хармоник U_1 (с честота 50Hz).

Изчислената стойност е по-малка от допустимата по стандартите (БДС EN 50160:2007; БДС EN 61000-2-2:2004; БДС EN 61000-3-12:2006; БДС 61623-83) деформация ($K_{nc}(THD) < 5\%$) при ниско напрежение.

Измерванията потвърдиха, че ограниченията в стандартите са изпълними с прилагане на хардуерни (филтри), на софтуерни (чрез оптимално програмиране) прийоми, и при избор на подходящо съотношение на мощностите на честотно управляемите задвижвания и мощността на захранващия трансформатор (в случая 6/0,4KV).

Последното обстоятелство има съществено значение, тъй като ефективните стойности на висшите хармоници в напрежението са функция от деформациите в тока, които са многократно по-големи. От експерименталните изследвания (Чобанов и др., 2013) следва, че изменението в коефициента на деформация в напрежението $THD_U = 4,2\%$ е предизвикано от значително по-голямата деформация на тока - $THD_I = 63\%$.

Висшите хармоници в напрежението с кратност k_i спрямо промишлената честота 50Hz, увеличават токовете на утечка преди всичко от нарастването на капацитивната проводимост на изолацията $\omega_i C = 314k_i$, която е много по-голяма от активната проводимост g , не зависеща от честотата. По-големият ток на утечка ще предизвика по-голямо допирно напрежение. Това може да се компенсира единствено с намаляване на съпротивлението на заземителния контур. За тези съоръжения настройката на апаратите трябва да се коригира при наличие на висши хармоници в напрежението. Предвидени са три нива на настройка:

- I – при отсъствие на висши хармоници в напрежението - $K_{nc}(THD)_U = 0$;
- II – при наличие на висши хармоници, ограничени по стандартите $K_{nc}(THD)_U \leq 5\%$;
- III – при забележимо присъствие на хармоници $K_{nc}(THD)_U > 5\%$.

Извършени са изчисления за нарастване на тока на утечка от висшите хармоници при $K_{nc}(THD)_U = 5\%$ и $K_{nc}(THD)_U = 12\%$ (при $K_{nc}(THD)_U > 10\%$) – мрежите са силно замърсени (БДС EN 50160:2007; БДС EN 61000-2-2:2004; БДС EN 61000-3-12:2006; БДС 61623-83). При същия честотен спектър на хармониците (фиг.2), са определени допустимите стойности на съпротивлението на заземителния контур, при възприето безопасно допирно напрежение 24VAC. Резултатите са дадени в таблица 1.

Таблица 1. Допустими стойности на съпротивлението на заземителния контур

№	$K_{nc}(THD)_U, \%$	Напрежение на мрежата, V				
		380	500	660	1000	1200
1	0	100	80	60	45	45
2	≤ 5	90	75	55	40	40
3	> 5	75	55	40	30	30

За сравнение, в таблица 2 са дадени нормираните стойности за съпротивлението на заземителния контур на подвижните минни машини в БДС 11623-83, в който не се визира формата на мрежовото напрежение. Коректно е тези стойности да се сравняват с дадените в таблица 1 – ред 1, т.е. за синусоидално напрежение $K_{nc}(THD)_U = 0$. Те се отличават значително по големината (от 20% до 55%) за всички напрежения от 500V до 1000V.

Разликата за 1140V е сравнително по-малка (10%).

Таблица 2. Нормирани стойности за съпротивлението на заземителния контур

Напрежение, V	380	500	660	1000	1140
Съпротивление на заземителния контур, Ω	100	100	100	100	50

Заклучение

1. Всички хармоници в напрежението, които са реалност в рудничните мрежи, трябва да бъдат отчитани в настройката на апаратите за контрол на съпротивлението на заземителния контур на подвижните минни машини, за да се ограничи напрежението при индиректен допир до безопасна стойност.

2. Необходимо е да се въведат допълнения към нормативните изисквания за електробезопасност в мините, които да отчитат специфичните особености на мрежите съдържащи висши хармоници в напрежението.

3. Апаратите за контрол на съпротивлението на заземителния контур на подвижните минни машини трябва да се синтезират универсални, за промишлени IT мрежи с различни напрежения и различна степен на замърсеност с висши хармоници в напрежението, което е реално осъществимо с използване на електронни елементи с висока степен на интеграция.

Литература

- Menteshev M. 1996. Safety in Mine Electric Circuits with Higher Harmonics in the voltage. Deva.
- Дренков, М. 2009. Параметри на заземителния контур за подвижни минни машини в IT системи, съдържащи висши хармоници в напрежението. Годишник на МГУ „Св.Иван Рилски“ т.52.
- Helfrich, W., R. Reynolds. 1985. Safety Grounding. A performance approach (IEEE). Mining industry technical conference. Golden Colorado. USA.
- Чобанов Ст., М. Дренков, М. Ментешев. 2013. Експериментално изследване и анализ на амплитудното – честотен спектър на хармониците на тока и напрежението в руднична мрежа с честотно управляеми двигатели. Год. на МГУ „Св.Иван Рилски“ т.56, св.III.
- БДС EN 50160:2007; БДС EN 61000-2-2:2004; БДС EN 61000-3-12:2006; БДС 61623-83.
- Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии С, 2004.
- Апарати за контрол на съпротивлението на заземяване на подвижни машини БКЗ (Русия). Pilot relay monitor PCM 177 (Австралия); Pilot relay Jumbo OSKAR EL (България).
- Данков, Е. 1991. Електроснабдяване на минните предприятия. Техника С.
- Hewtson, L.G., M.Brown, R.Balakrishnam. 2005. Faults, types and effects. Practical Power System Protection.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВИСШИТЕ ХАРМОНИЦИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МРЕЖА НА МЕМФ ПРИ МГУ „СВ. ИВ. РИЛСКИ“

Румен Исталиянов¹, Георги Костов², Димо Чолаков³

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: rgi@mgu.bg

² Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: georgi_kostov@mgu.bg

³ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В доклада са дадени резултати от измерване и анализ на висши хармоници в електрическата мрежа на лаборатории в Минно-електромеханичен факултет на МГУ по отношение на дадените норми в БДС EN 50160 и наредбата на ДКЕВР "Показатели за качество на електроснабдяване".

EXPERIMENTAL STUDY ON HARMONICS IN THE ELECTRICITY NETWORKS IN FACULTY OF MINING ELECTROMECHANICS TO UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI"

Rumen Istalianov¹, Georgi Kostov², Dimo Tsholakov³

¹University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Republic of Bulgaria, E-mail rgi@mgu.bg

²University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Republic of Bulgaria, E-mail georgi_kostov@mgu.bg

³University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Republic of Bulgaria

ABSTRACT. The report shows the results of measurement and analysis of harmonics in the electrical network of laboratories in Faculty of Mining Electromechanics f MGU in terms of a rule in BDS EN 50160 and State energy and water regulatory commission

Понятието качество на електрическата енергия се определя като съвкупност от характеристики на електрическата енергия, при които консуматорите ще работят нормално и ще изпълняват заложените в тях функции. Решаването на въпросите за контрола на показателите за качество на електрическата енергия изисква да се анализира структурата, параметрите и режимите на работа на електроснабдителната система и да се планира експериментално измерване и изследване, чрез които да се изясни характера на изменение на параметрите, определящи качеството ѝ.

В доклада е направено изследване и анализиране на висши хармоници в електрическата мрежа на лаборатории в Минно-електромеханичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“ по отношение на дадените норми в БДС EN 50160 и наредбата на ДКЕВР "Показатели за качество на електроснабдяване".

Измерванията са проведени с трифазен мрежов анализатор на качеството на електрическата енергия MULTIVER 3SN, който дава възможност за измерване, изчисляване, запис и анализ на всички електрически величини и показателите за качеството на електрическата енергия.

Получената информация от измерванията е обработена с допълнителен софтуер (Цветкова, 2012). Измерванията са проведени в една контролна точка, намираща се на шините на разпределително табло.

Захранващата мрежа е трифазна, четирипроводна със заземена неутрала.

В МГУ "Св. Иван Рилски" основните потребители на електрическа енергия са:

- осветление – реализирано в голямата си част с луминесцентни лампи с конвекционална пуско-регулираща апаратура и в малка част - с компактни луминесцентни лампи и лампи с нажежаема жичка,
- компютри и монитори;
- климатични системи;
- отопление с електрически печки (основно зимния сезон);
- електрически двигатели, задвижващи стругове фрези и др.;
- UPS;
- други;

Процентното съотношение на всеки от тях на практика не е известно.

Тази част ще бъде изследвана в продължение на два-три представителни месеца от годината, покриващи възможните максимални товари при пълна учебна натовареност.

Захранването на МГУ е от 2 трансформатора с мощност 630 и 400 kVA, които са разположени във външен трансформаторен пост. Към тях са

присъединени и външни потребители с неизвестна инсталирана мощност.

Първият етап от експерименталното изследване на качеството на електрическата енергия включва измерване в конкретни лаборатории. За такива са избрани: лаборатория №105 и лаборатория №103.

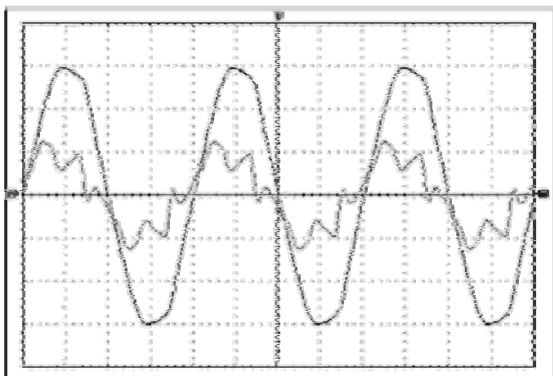
Лаборатория №105. Осветителната уредба е изпълнена със осветители с ЛЛ 3X36 W, тип 36.2.907.607. Общият брой на осветителите е 15. Осветителите са с индуктивен баласт и компенсирани с кондензатори по 4 μ F на фаза.

Лаборатория №103. Тя представлява компютърен клас, обзаведен с 9 броя компютри тип HP Compact dx6100MT и монитори 9 броя тип V7550.

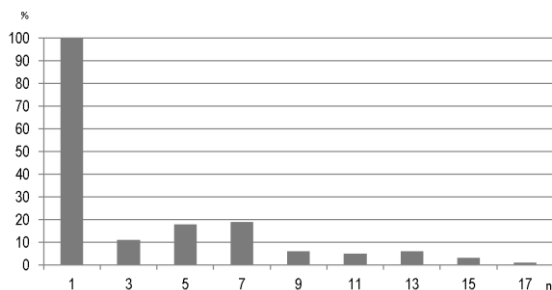
В таблото на лабораторията има възможност за включване на компютърните конфигурации към различни фази на мрежата.

Защитата на двете лаборатории е осъществена със стопяеми предпазители.

Лаборатория №105. Анализът на осцилограмата на формата на тока (фиг.1) показва, че в тока присъстват висши хармоници от №3 до №15, като №3,5,7 са преобладаващи. Спектърът на висшите хармоници е показан на фиг.2.



Фиг. 1 Осцилограма на ток и напрежение на осветителната уредба в лаб. 105 на МГУ

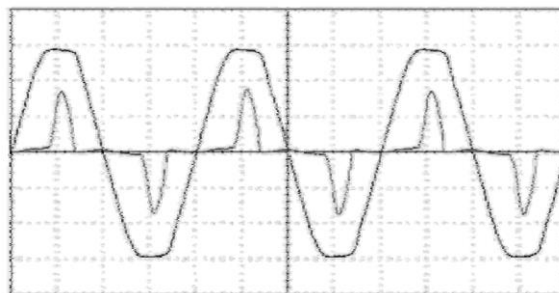


Фиг. 2 Спектр на висшите хармоници в осцилограмата на тока

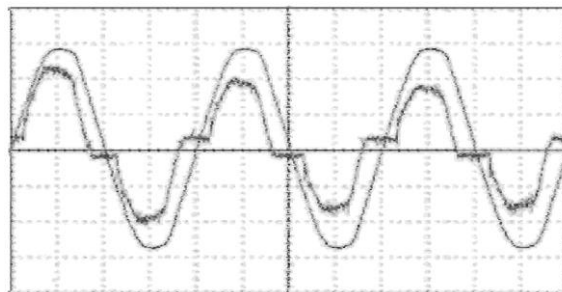
Лаборатория №103. Токът на компютърните конфигурации (фиг.3) има характерна форма, отговаряща на тока на класически импулсен източник на захранване. Формата на тока може да бъде близка до синусоидалната, ако в захранващите блокове съществува коректор на

фактора на мощност. Проблем е, че този тип захранващи блокове са доста скъпи.

За пример е представена сметата осцилограмата на преносим компютър тип Toshiba, чиито източник за захранване има коректор (фиг.4).



Фиг. 3 Осцилограма на ток и напрежение на консуматорите в лаб. 103 на МГУ



Фиг. 4 Осцилограма на ток и напрежение на преносим компютър тип Toshiba

Наличието на висши хармоници в тока на консуматорите с нелинейна характеристика води до редица негативни последствия:

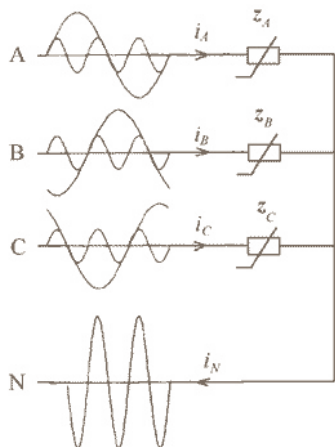
- понижава фактора на мощност;
- ускорява стареенето на изолацията на кабелните мрежи;
- води до прекъсване в работата на електронното оборудване и колебания в импулсните захранващи устройства;
- повишаване на вероятността от резонансни явления и комутационни пренапрежения със всички последствия от това;
- Ускорява износването на кондензаторните батерии.

Висшите хармоници на тока, кратни на три (3, 9, 15 и т.н.), определят и висока стойност на т.нар. Крест фактор (или амплитуден коефициент) при еднофазни консуматори.

В симетрични трифазни системи, токът във всяка фаза е изместен от другите на 120 електрически градуса. В резултат на това сумата от токовете в неутралния проводник е равна на нула, следователно и загубата на напрежение в него е нула. При наличие на трети и кратните на три хармоници се образува ток с нулева последователност (въпросните хармоници съвпадат по фаза с фазните проводници). Общият ток в нулевия проводник е:

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + \dots} \quad (1)$$

Този ток може да превиши фазния в най-лошия случай с около 70%. Това нагледно е показано на фиг.5.



Фиг. 5 Процес на формиране на тока през нулния проводник при наличие на трети хармоник

За потвърждаване на горните изводи компютърните конфигурации в лаборатория №103 бяха свързани в групи по три конфигурации на всяка фаза. Спектърът на висшите хармоници в една от фазите и нулевия проводник са показани на фиг.6 и фиг. 7.

Таблица 1 Стойности, на висшите хармоници във фаза А и нулевия проводник

Номер на хармоник	Фаза А	Нулев проводник
n	%	%
1	100	1,2
3	68,1	100
5	50	18,5
7	27,2	5,7
9	8,8	2,8
11	6,8	0
13	6,8	0
15	4,5	0
17	2,2	0

При стойности на тока във всяка от фазите А, В, С съответно:

$$I_A = 2,34 \text{ A};$$

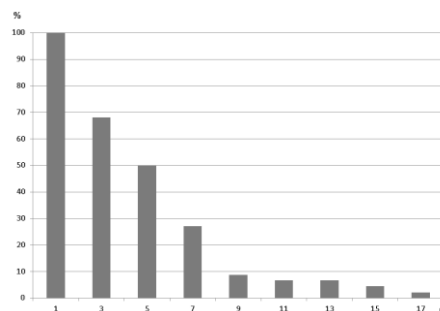
$$I_B = 2,07 \text{ A};$$

$$I_C = 2,50 \text{ A},$$

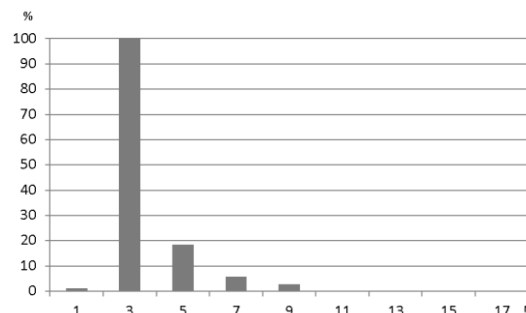
токтът в нулевия проводник е $I_N = 3,75 \text{ A}$, при силно изразен трети хармоник.

Факторът на мощност е в границите $0,6 \div 0,7$, при което реактивната мощност превишава активната, а това води до допълнителни загуби на мощност в електрическата мрежа.

Повишаването на фактора на мощност с обикновени компенсиращи устройства (кондензатори) в мрежа с високо ниво на хармоници е проблемно. В почти всички случаи е необходимо използването на филтро-компенсиращи устройства (ФКУ).



Фиг. 6 Спекър на висшите хармоници в осцилограмата на тока във фаза А



Фиг. 7 Спекър на висшите хармоници в осцилограмата на тока в нулевия проводник

В заключение може да се посочи, че в мрежата ниско напрежение на МГУ "Св. Иван Рилски" се очаква значително количество хармоници в тока и вероятно в напрежението при нормално натоварване на мрежата. Необходимо е провеждане на диагностика за състоянието на мрежата, с оценка на висшите хармоници, качеството на електрическата енергия, токовото натоварване на фазите и нулевите проводници.

Литература

- Цветкова С., 2012. IV Научна конференция, ЕФ, том 2, Изследване на показателите за качество на електрическата енергия в предприятие за производство на силова електроника за управление БДС EN 61000-3-2:2006 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 3-2: Гранични стойности. Гранични стойности за излъчвания на хармонични съставлящи на тока (входен ток на устройства/ съоръжения до и включително 16 А за фаза). ДКЕВР. Показатели за качество на електрооснабдяване на ДКЕВР, юли, 2004.

ОЦЕНКА НА ДОПУСТИМИТЕ КАПИТАЛОВИ ВЛОЖЕНИЯ ЗА ВНЕДРЯВАНЕ НА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛНО ОПРЕДЕЛЕН СРОК НА НЕЙНОТО ОТКУПУВАНЕ

Ради Пипев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700, radi.pipev@mail.bg

РЕЗЮМЕ. В доклада се прави оценка на допустимите капиталови вложения за внедряване на система за управление на улични осветителни уредби при предварително определен срок на нейното откупуване.

ASSESSMENT OF THE ALLOWABLE CAPITAL INVESTMENTS FOR THE IMPLEMENTATION OF A MANAGEMENT SYSTEM FOR STREET LIGHTING SYSTEMS IN A PREDEFINED PERIOD OF ITS REDEMPTION

Radi Pipev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; radi.pipev@mail.bg

ABSTRACT. The report assesses the allowable capital investments for the implementation of a management system for street lighting systems in a predetermined period of its redemption.

Въведение

С настоящия доклад е направен опит да се оценят допустимите капиталови вложения (ДКВ) за внедряване на система за управление на улични осветителни уредби (СУ-УОУ) при предварително определен срок на нейното откупуване.

В този материал е прието, че ДКВ са само допълнителните разходи направени за нуждите на управлението.

При изчисленията не е отразена нетната настояща стойност.

ДКВ са разгледани при използване в УОУ на три вида светлинни източници (СИ) – LED, МХЛ и НЛВН.

За нуждите на доклада предварително са определени оптималните мощности на използваните СИ за три вида типови улици, при оптимални междустълбья, височини на окачване, наклон на осветителите и дължини на рогатките, удовлетворяващи изискванията на светлотехнически класове (СК) ME6, ME5 и ME4a/b.

В доклада са използвани следните означения и формули:

P_1 – оптимална мощност на СИ удовлетворяваща изискванията на определен светлотехнически клас [W];

$K_{P, \text{дим.}}$ – коефициент на мощност при димиране на СИ на 50% ($\Phi=50\% \cdot \Phi_n$) [%];

ΔP_1 – икономисана мощност при димиране на СИ [W];

$T_{\text{г.дим.}}$ – годишно време на работа на СИ в режим на димиране [h/g.];

$C_{e, \text{ср.}}$ – средна цена на електрическата енергия с включен в нея ДДС в периода на действие на УОУ през денонощието [лв./kW.h];

$K_{\text{уег}}$ – коеф. на годишно нарастване на ел. енергия [%];

$T_{\text{отк.}}$ – срок на откупуване на направената инвестиция (капиталови вложения) за внедряване на СУ-УОУ за дадена УОУ [год.];

$\Delta C_{e, \text{г.1}}$ – годишна икономия от разходи за електроенергия при използване на димиране за един СИ [лв./СИ];

$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ – ДКВ за внедряване на управление на един СИ при определен всеки един от предните параметри [лв./СИ];

$\Delta K_{\text{доп.}}$ – ДКВ за внедряване на управление на едно табло за улично осветление (Т-УО) при определен бр. СИ захранвани от това табло [лв./Т-УО];

$N_{\text{СИ/Т-УО}}$ – Брой на СИ захранвани от едно табло (Т-ТО) [бр.],

където:

$$\Delta P_1 = (1 - K_{P, \text{дим.}}) \cdot P_1;$$

$$T_{\text{г.дим.}} = 2100 \text{ h/g.};$$

$$C_{e, \text{ср.}} = 0,113 \text{ лв./kW.h};$$

$$K_{\text{уег}} = 6 \text{ \%};$$

$$\Delta C_{e, \text{г.1}} = \Delta P_1 \times T_{\text{г.дим.}} \times C_{e, \text{ср.}} \text{ [лв.]};$$

$$\Delta K_{1, \text{доп.}} = T_{\text{отк.}} \times \Delta C_{e, \text{г.1}} \text{ [лв.]};$$

$$\Delta K_{\text{доп.}} = T_{\text{отк.}} \times \Delta C_{e, \text{г.1}} \text{ [лв.]}. \quad \square$$

Допустими капиталови вложения за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ6

В таблица 1, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ6 при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 24 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дйм.}} = 40 \% (\Phi = 50\% \cdot \Phi_n)$$

$$\Delta P_1 = 14,4 \text{ W}$$

Таблица 1.

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	3,42	3,42	68,34	85,43	102,51	119,60	136,68
2	7,04	14,08	281,57	351,96	422,36	492,75	563,14
3	10,88	32,64	652,72	815,91	979,09	1142,27	1305,45
4	14,95	59,79	1195,89	1494,86	1793,83	2092,80	2391,77
5	19,26	96,31	1926,26	2407,83	2889,39	3370,96	3852,52

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ5

В таблица 2, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ5 при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 47 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дйм.}} = 40 \% (\Phi = 50\% \cdot \Phi_n)$$

$$\Delta P_1 = 28,2 \text{ W}$$

Таблица 2

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	6,69	6,69	133,84	167,30	200,76	234,22	267,67
2	13,79	27,57	551,41	689,26	827,11	964,97	1102,82
3	21,30	63,91	1278,25	1597,82	1917,38	2236,94	2556,50
4	29,27	117,10	2341,95	2927,43	3512,92	4098,40	4683,89
5	37,72	188,61	3772,26	4715,33	5658,40	6601,46	7544,53

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ4a/b

В таблица 3, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на LED като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ4a/b при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 69 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дйм.}} = 40 \% (\Phi = 50\% \cdot \Phi_n)$$

$$\Delta P_1 = 41,4 \text{ W}$$

Таблица 3

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	9,82	9,82	196,48	245,61	294,73	343,85	392,97
2	20,24	40,48	809,52	1011,89	1214,27	1416,65	1619,03
3	31,28	93,83	1876,58	2345,73	2814,87	3284,02	3753,17
4	42,98	171,91	3438,18	4297,72	5157,26	6016,81	6876,35
5	55,38	276,90	5538,00	6922,51	8307,01	9691,51	11076,01

Допустими капиталови вложения за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ6

В таблица 4, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ6 при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 35 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дйм.}} = 60 \% (\Phi = 50\% \cdot \Phi_n)$$

$$\Delta P_1 = 14 \text{ W}$$

Таблица 4

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	3,32	3,32	66,44	83,06	99,67	116,28	132,89
2	6,84	13,69	273,75	342,19	410,62	479,06	547,50
3	10,58	31,73	634,59	793,24	951,89	1110,54	1269,19
4	14,53	58,13	1162,67	1453,33	1744,00	2034,67	2325,34
5	18,73	93,64	1872,76	2340,94	2809,13	3277,32	3745,51

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ5

В таблица 5, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ5 при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 50 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дим.}} = 60 \% (\Phi=50\%.\Phi_H)$$

$$\Delta P_1 = 20 \text{ W}$$

Таблица 5

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	4,75	4,75	94,92	118,65	142,38	166,11	189,84
2	9,78	19,55	391,07	488,84	586,61	684,37	782,14
3	15,11	45,33	906,56	1133,20	1359,84	1586,48	1813,12
4	20,76	83,05	1660,95	2076,19	2491,43	2906,67	3321,91
5	26,75	133,77	2675,36	3344,21	4013,05	4681,89	5350,73

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ4а/б

В таблица 6, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ4а/б при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 70 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дим.}} = 60 \% (\Phi=50\%.\Phi_H)$$

$$\Delta P_1 = 28 \text{ W}$$

Таблица 6

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	6,64	6,64	132,89	166,11	199,33	232,55	265,78
2	13,69	27,37	547,50	684,37	821,25	958,12	1095,00
3	21,15	63,46	1269,19	1586,48	1903,78	2221,08	2538,37
4	29,07	116,27	2325,34	2906,67	3488,00	4069,34	4650,67
5	37,46	187,28	3745,51	4681,89	5618,27	6554,64	7491,02

Допустими капиталови вложения за внедряване на СУ-УОУ при използване на НЛВН като СИ в УОУ

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на НЛВН като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ6 и МЕ5

В таблица 7, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ6 и МЕ5 при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 50 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дим.}} = 65 \% (\Phi=50\%.\Phi_H)$$

$$\Delta P_1 = 17,5 \text{ W}$$

Таблица 7

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	4,15	4,15	83,06	103,82	124,58	145,35	166,11
2	8,55	17,11	342,19	427,73	513,28	598,83	684,37
3	13,22	39,66	793,24	991,55	1189,86	1388,17	1586,48
4	18,17	72,67	1453,33	1816,67	2180,00	2543,34	2906,67
5	23,41	117,05	2340,94	2926,18	3511,42	4096,65	4681,89

ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на НЛВН като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ4а/б

В таблица 8, като са взети в предвид посочените подолу параметри, са показани ДКВ за внедряване на СУ-УОУ при използване на МХЛ като СИ в УОУ удовлетворяващи изискванията на СК МЕ4а/б при различен срок на откупуване и различен брой на СИ в УОУ.

$$P_1 = 70 \text{ W}$$

$$K_{P, \text{дим.}} = 65 \% (\Phi=50\%.\Phi_H)$$

$$\Delta P_1 = 24,5 \text{ W}$$

Таблица 8

Т _{отк.} [год.]	$\Delta C_{\text{ег.1}}$ [лв.]	$\Delta K_{1, \text{доп.}}$ [лв./СИ]	$\Delta K_{\text{доп.}}$ [лв./Т-УО]				
			N _{СИ/Т-УО} [бр. СИ/Т-УО]				
			20	25	30	35	40
1	5,81	5,81	116,28	145,35	174,42	203,48	232,55
2	11,98	23,95	479,06	598,83	718,59	838,36	958,12
3	18,51	55,53	1110,54	1388,17	1665,81	1943,44	2221,08
4	25,43	101,73	2034,67	2543,34	3052,00	3560,67	4069,34
5	32,77	163,87	3277,32	4096,65	4915,98	5735,31	6554,64

Изводи

От горните таблици се вижда, че допустимите капиталови вложения за внедряване на СУ-УОУ при предварително определен срок на тяхното откупуване, дават ясна представа за това, каква трябва да бъде търсената от инвеститора сборна цена на СУ-УОУ (от различните елементи съставляващи СУ) съотнесена към един СИ ($\Delta K_{1, \text{доп.}}$) или група СИ ($N_{\text{СИ/Т-УО}}$) принадлежащи и управлявани от едно Т-УО ($\Delta K_{\text{доп.}}$), при различни срокове (години) на откупуване.

Логичен е изводът и че при по-големите мощности на СИ допустимите капиталовите вложения могат да бъдат по-големи, защото при въвеждане на СУ-УОУ икономията на енергия е по-голяма в сравнение със случаите при използване на СИ с по-малки мощности, а оттам и срока на откупуване по-кратък. Трябва да се има в предвид обаче, че въпреки, че при по-големите мощности имаме по-големи допустимите капиталовите вложения, респективно по-кратък срок на откупуване, това не означава, че УОУ със СИ с тези мощности като цяло е по-ефективна, тъй като разходите ѝ за енергия през време на периодите, през които СУ-УОУ не упражнява димиране, ще са по-големи от тези в сравнение на това, ако в същата тази УОУ се използват СИ с по-малки мощности. Именно тук огромно значение играе определянето на оптималната мощност на СИ, използван за осветяване на дадена улица причислена към определен светлотехнически клас. Във връзка с последното, трябва да се отбележи факта, че разнообразието на гамата мощности използвани при LED СИ е огромно в сравнение с това използвано при класическите газоразрядните СИ.

Друг важен извод е, че икономически най-целесъобразно е използването LED СИ в УОУ, тъй като от таблиците ясно се вижда, че допустимите капиталови вложения за внедряване на СУ-УОУ при предварително определен срок на тяхното откупуване, са най-големи именно за тях.

ЛИТЕРАТУРА

- Велинов, К., Р. Пипев. 2012. Икономическа оценка на ефекта от управление на уличното осветление. – *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“*, том 55, св. III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 19-21, София.
- Велинов К., декември 2010. Новости в системите за експлоатация и управление на уличното осветление. – *Национален семинар „Новости в осветителната техника“*, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.
- Велинов, К., В. Войводов. 2012. Модернизация на кълбов фотометър с цифрови фотосензори. – *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“*, том 55, св. III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 22-25, София.
- БДС EN 13201-2:2003. Осветление на улици. Технически изисквания.
- Велинов, К., В. Василев. 2012. Повишаване на ефективността на уличното осветление. – *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“*, том 55, св. III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 15-18, София.
- Велинов К., юни 2013. Еволюция в развитието на българските светодиодни осветители. – Научно-приложен семинар и изложба на тема „Светодиодно осветление“, Център за международни срещи (Немската къща), ТУ-София, София.

КОНТРОЛ НА ИЗОЛАЦИЯТА В РУДНИЧНИ КОМБИНИРАНИ МРЕЖИ

Ангел Зъбчев¹, Ради Тенев²

¹ Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“, 1700 София

² Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“ – София, Филиал – гр. Кърджали

РЕЗЮМЕ. Разглежда се влиянието на директно свързани към мрежата токоизправители върху работата на апарати за контрол на изолацията – УАКИ, РУ и АЗУР. Направен е анализ на степента на това влияние и възможностите за коригирането му.

CONTROL OF ISOLATION OF MINING COMBINED NETWORKS

Angel Zabchev¹, Radi Tenev²

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

² University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" – Sofia, Branch of Kardzhali

ABSTRACT. The impact is considered of direct network attachment of rectifiers on the performance of equipment for controlling the isolation, such as UAKI, RU and AZUR. An analysis is presented of the extent of this impact and of the possibilities for its correction.

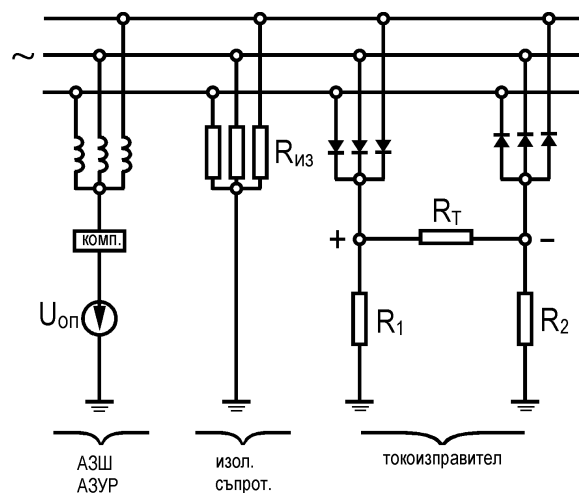
Въведение

Разглеждат се основните типове апарати за контрол на изолацията: УАКИ, РУ, АЗШ и АЗУР, които работят в български рудници. Тези апарати са предназначени за измерване на изолационното съпротивление на кабелите в чисти променливотокови (АС) мрежи с изолиран звезден център. Принципът им на работа е един и същ. Те притежават постоянен токов източник на напрежение $U_{оп}$, свързан в контур, в който се намира изолационното съпротивление $R_{из}$ (фиг.1). Така токът в този контур зависи от $R_{из}$ и от постоянен токов източник $U_{оп}$. Ако в този контур възникне и друг постоянен токов източник на напрежение, той се явява като паразитен и ще влияе върху работата на апарата. Такава ситуация възниква когато в АС мрежата е свързан директно токоизправител (без разделителен трансформатор). Тази мрежа вече не е чиста АС мрежа и се нарича комбинирана мрежа (Колосюк В.П., 1980), тъй като съдържа и DC компоненти. Промяната на изолационното съпротивление на кабелите в АС мрежата ще наричаме АС дефект. Промяната в изолационното съпротивление на кабела към плюса на токоизправителя е DC+ дефект и на кабела към минуса на токоизправителя е DC- дефект. Ще се опитаме да анализираме всички комбинации между тези дефекти и влиянието им върху чувствителността на апаратите за контрол на изолацията.

Анализ на схемите

На фиг.1 е представена опростена схема на апаратите АЗШ и АЗУР според принципните схеми от техните паспорти, съвместно с изолационното съпротивление $R_{из}$

на АС мрежата, токоизправителят (ТИ), изолационно съпротивление на кабела към плюса (R_1) и изолационно съпротивление на кабела към минуса (R_2).



Фиг. 1.

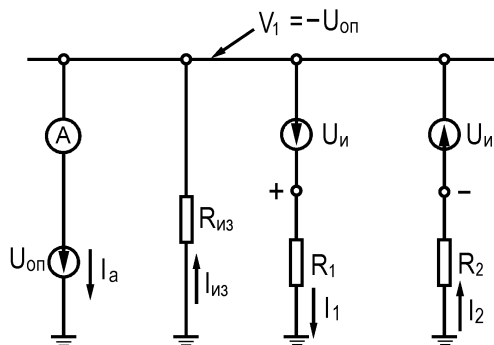
На фиг. 2 е дадена заместващата на горната схема. Токовете са съответно:

I_a – изходна величина. Ток, на който реагира компараторът.

$I_{из}$ – ток през изолационното съпротивление в АС мрежата.

I_1 – ток през изолационното съпротивление R_1 в DC мрежата.

I_2 – ток през изолационното съпротивление R_2 в DC мрежата.



Фиг. 2.

Катодната група на ТИ е представена в заместващата схема с идеален източник на напрежение $U_{и}$ с плюса към земя, а анодната група - с идеален източник на напрежение $U_{и}$ с минуса към земя. Товарното съпротивление не оказва влияние и е пропуснато.

По метода на възловите потенциали, определяме тока I_a . За възела „земя“ според втори закон на Кирхов записваме:

$$I_a + I_1 = I_{из} + I_2$$

$I_a = I_{из} - I_1 + I_2$, като трите тока отдясно на равенството се определят по следния начин:

$$I_{из} = U_{оп}/R_{из}.$$

Според закона на Ом за част от веригата за клон 1 написваме:

$$-U_{оп} = R_1 \cdot I_1 - U_{и}, \text{ следователно}$$

$$I_1 = (U_{и} - U_{оп})/R_1$$

По същия начин за клон 2:

$$-U_{оп} = R_2 \cdot I_2 + U_2, \text{ следователно}$$

$$I_2 = (U_{и} + U_{оп})/R_2$$

Заместваем трите тока и определяме тока I_a :

$$I_a = U_{оп}/R_{из} + (U_{оп}/R_1 + U_{оп}/R_2) + (U_{и}/R_2 - U_{и}/R_1) \quad (1)$$

Изразите в скоби изразяват изменението на тока на задействане на апаратите АЗШ и АЗУР в зависимост от стойностите на двете изолационни съпротивления на постояннотоковата мрежа. Когато тези съпротивления са безкрайно големи (при къси и нови кабели от изхода на токоизправителя), токът на задействане I_a се определя само от изолационното съпротивление на АС мрежата.

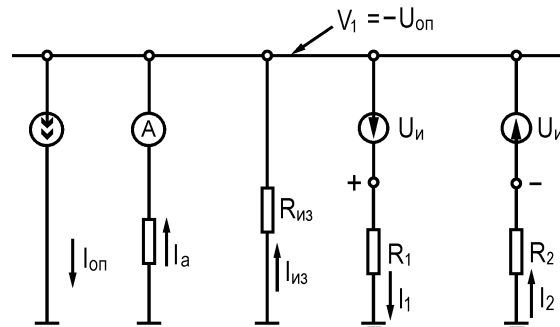
Заместващата схема на апарата УАКИ е същата, с тази разлика, че източникът на оперативно напрежение $U_{оп}$ е обърнат (свързан е с минуса към земя). Този факт води до размяна на местата на последните два члена и изходният ток на апарата УАКИ се определя по зависимостта:

$$I_a = U_{оп}/R_{из} + (U_{оп}/R_1 + U_{оп}/R_2) + (U_{и}/R_1 - U_{и}/R_2) \quad (2)$$

Заместващата схема на апарата РУ-380 е дадена на фиг.3

Източникът на оперативен сигнал работи като източник на ток $I_{оп} = \text{const}$ с неизменна стойност. Този оперативен ток, при липса на токоизправител, се разклонява на две –

през клон с токоизмерващ елемент (означен на схемата като амперметър) и през изолационното съпротивление $R_{из}$ на АС мрежата. При наличие на токоизправител, в анализа участват и двата тока I_1 и I_2 , които протичат през изоациите на постояннотоковите кабели.



Фиг. 3.

За петте тока в отделните клонове за възела „земя“ може да се напише:

$$I_{оп} + I_1 = I_a + I_{из} + I_2, \quad I_a = -I_{из} - I_2 + I_1 + I_{оп}.$$

Токовете в дясната част на последното равенството са:

$$I_{из} = U_{оп}/R_{из}, \quad I_1 = (U_{и} - U_{оп})/R_1 \quad \text{и} \quad I_2 = (U_{и} - U_{оп})/R_2.$$

Като ги заместим в горния израз, се получава:

$$I_a = I_{оп} - (U_{оп}/R_{из} + U_{оп}/R_1 + U_{оп}/R_2 + U_{и}/R_2 - U_{и}/R_1) \quad (3)$$

РУ-380 се задейства при спадане на тока I_a до нула, а това става когато изразът в скобите достигне стойността на $I_{оп} = \text{const}$. Изразът в скобите е точно равен на тока на задействане на АЗШ и АЗУР. От тук следва, че анализът за РУ е същият като този за АЗШ и АЗУР.

Чрез един пример ще илюстрираме влиянието на токоизправителя и на изолационните съпротивления на DC мрежата върху апаратите АЗШ и АЗУР.

Изходни данни:

$$U_{оп} = 150 \text{ V}$$

$$U_{из} = 300 \text{ V}$$

$R_{из} = 10 \text{ k}\Omega$ (за мрежа 380 V) – това е изолационното съпротивление, при което апаратът се задейства и изключва захранването.

За токът I_a без включен токоизправител получаваме: $I_a = U_{оп}/R_{из} = 15 \text{ mA}$ – това е прагът на задействане на АЗШ и АЗУР. При наличие на директно включен токоизправител трите величини $U_{и}$, R_1 и R_2 променят в определена степен стойността на тока I_a и прага на задействане, респективно изолационното съпротивление на задействане.

Изчислено е с колко mA се променя прагът на задействане, определен по израз (1) спрямо нивото 15 mA при някои типични комбинации между изолационните съпротивления R_1 и R_2 . Резултатите са представени в табл. 1.

Знакът минус в поправката на тока от табл.1 означава, че апаратът става по-нечувствителен и съответно изоляционното съпротивление, при което той се задейства, става по-малко.

Знакът плюс означава, че съпротивлението на задействане става по-голямо.

Таблица 1.

Поправка на тока I_a в mA според израз (1)

	$R_1 = 100 \text{ k}$	$R_1 = 50 \text{ k}$	$R_1 = 20 \text{ k}$
$R_2 = \infty$	- 1,5	- 3	- 7,5
$R_2 = 100 \text{ k}$	+ 3	+ 1,5	- 3
$R_2 = 50 \text{ k}$	+ 7,5	+ 6	+ 1,5
$R_2 = 20 \text{ k}$	+ 21	+ 19,5	+ 15

В табл. 2 са представени изчислените изоляционни съпротивления на задействане ($R_{из}$ на АС мрежата) при същите условия.

Таблица 2.

Изоляционни съпротивления на задействане при различни стойности на R_1 и R_2

	$R_1 = 100 \text{ k}$	$R_1 = 50 \text{ k}$	$R_1 = 20 \text{ k}$
$R_2 = \infty$	9,1	8,3	6,7
$R_2 = 100 \text{ k}$	12,5	11,1	8,3
$R_2 = 50 \text{ k}$	20	16,7	11,1
$R_2 = 20 \text{ k}$	∞	∞	∞

Вижда се, че при наличие на токоизправител при намаляване на изоляционното съпротивление на плюса R_1 , прагът на задействане става по-нисък, което е неблагоприятно. Обратно при намаляване на изоляционното съпротивление на минуса R_2 прагът на задействане става по-висок.

Заклучение

Работата на апарати за контрол на изолацията съвместно с директно включени в мрежата токоизправители се усложнява. Когато това не може да се избегне трябва да се прецени влиянието на токоизправителя и неговите изоляционни съпротивления, както това беше направено с примера за АЗШ и АЗУР.

Литература

- Колосюк В.П. 1980. Защитное отключение рудничных электро-установок, М., Недра.
 Манойлов В.Е. 1971. Основы электробезопасности, М., Энергия.
 Паспорти на апаратите УАКИ, РУ-380, АЗШ и АЗУР.

ТРАНЗИСТОР С ЕДИН ЕЛЕКТРОН: ПРИЛОЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМИ

Мила Илиева-Обретенкова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, milailieva@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Целта на този доклад е да представи накратко физичните процеси в наноелектронния елемент транзистор с един електрон (SET) и проблемите при неговото прилагане. Функционирането на SET се основава на контролирания трансфер на отделни електрони между малки проводящи „острови“. Свойствата на елемента са доминирани от квантовата механика и предоставят нови характеристики като кулонова осцилация, кулонова блокада, които са полезни за някои приложения. SET е способен да отстрани силициевите транзистори в близко бъдеще и да увеличи плътността на елементите. Настоящите изследвания предоставят нови идеи, които ще революционизират RAM-паметите и цифровите технологии за съхранение на данни.

SINGLE ELECTRON TRANSISTOR: APPLICATIONS AND PROBLEMS

Mila Ilieva-Obretenova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, milailieva@abv.bg

ABSTRACT. The goal of this paper is to review in brief the basic physics of nanoelectronic device single-electron transistor (SET) as well as to prospect the problems in its applications. SET functioning is based on the controllable transfer of single electrons between small conducting "islands". The device properties are dominated by the quantum mechanics and provide new characteristics: coulomb oscillation and coulomb blockade that are helpful in a number of applications. SET is able to shear a domain with silicon transistor in near future and enhance the device density. Recent research in SET gives new ideas which are going to revolutionize RAM and digital data storage technologies.

Въведение

Транзисторът с един електрон (SET) представлява елемент с критични размери от няколко нанометра. Използвани са метал, полупроводник, въглеродни нанотръби или индивидуални молекули. Конструкцията се състои от малък проводящ остров (квантова точка), свързан към сорса и дрейна чрез тунелни преходи и кондензатори, свързани към един или повече гейтове. За разлика от полевия транзистор, SET се базира на един квантов феномен – тунелен ефект. Електрическото поведение на тунелния преход зависи от два фактора.

1. Колко ефективно бариерата предава електронната вълна, което намалява експоненциално с дебелината.
2. Броят на модите на електронните вълни, които се удрят в бариерата, който се дава чрез площта на тунелния преход, разделена на квадрата на дължината на вълната.

Квантовата точка е мезоскопична система, в която добавянето или отстраняването на един електрон може да предизвика промяна в електростатичната енергия или Кулоновата енергия, която е по-голяма от топлинната енергия и може да контролира електронния транспорт към и извън квантовата точка. Чувствителността към индивидуалните електрони води до електроника, базирана на един електрон. За квантова точка нивото на дискретната енергия на електроните в нея е ясно изразено като това в атомите и молекулите, така че може да се говори за „изкуствени атоми и молекули“ (Kastner, 2000). Когато вълновите функции между две квантови точки се

припокриват, свързаните квантови точки демонстрират свойствата на молекула. За да се изяснят свойствата на електронния транспорт в квантова точка, нека разгледаме метална наночастица, разположена между два метални електрода, както е показано на Фиг. 1. Наночастицата е отделена от електродите чрез вакуум или изолационен слой като окис или органични молекули, така че междутях е разрешен само тунелинг (Fulton, 1987). Така можем да моделираме всеки от преходите наночастица-електрод с резистор в паралел с кондензатор. Съпротивлението се определя от тунелинга на електрони, а капацитетът (C) зависи от размера на частицата. Означаваме резисторите с R_1 и R_2 , кондензаторите с C_1 и C_2 , а приложеното напрежение между електродите с V . Ще разгледаме как токът I зависи от V . Когато започнем да увеличаваме V от нула, никакъв ток не може да протече между електродите, защото движението на един електрон към или от една първоначално неутрална наночастица коства енергия, дадена с уравнение (1).

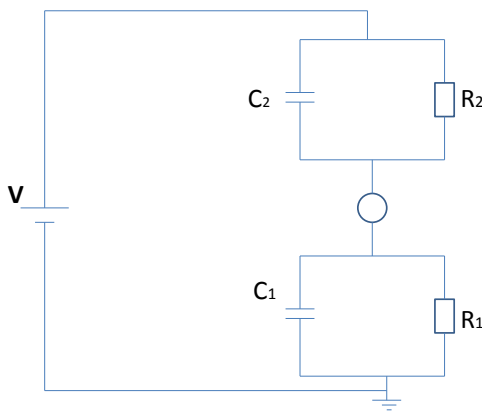
$$E_c = e^2/(2C), \quad (1)$$

където „ e “ е зарядът на електрона.

Това потискане на електронния поток се нарича Кулонова блокада. Ток започва да протича през наночастицата, само когато приложеното напрежение V е достатъчно голямо, така че

$$V_{th} \geq E_c = e^2/(2C) \quad (2)$$

V_{th} се нарича прагово напрежение. Така във волтамперната характеристика (V_{Ax}) очакваме права с нулев ток с ширина $2V_{th}$. Когато приложеното напрежение достигне V_{th} , един електрон се добавя или отстранява от наночастицата. При по-нататъшно увеличаване на напрежението токът не се увеличава пропорционално, защото се изисква да добавим (или отстраним) два електрона към наночастицата, което струва повече енергия. След като приложеното напрежение стане достатъчно голямо, за да преодолее Кулоновата енергия на два електрона, токът започва да нараства отново. Това води до стъпаловидно нарастване на V_{Ax} , наречено Кулонова стълба.



Фиг. 1. Структура на квантова точка

Теоретични основи

В историята на електрониката с един електрон „класическата“ теория, въведена от Кулик и Шектер (Bednarek, 2000), играе много важна роля в разбирането на поведението на елементи с един електрон. Това е обща теория, базирана на следните допускания:

А. Оразмеряването на енергията на електрона в проводниците се игнорира, т.е. спектърът на енергията на електрона се третира като непрекъснат. Това допускане е валидно, само ако Кулоновата енергия $E_C \ll k_B T$. Това често дава адекватно описание на наблюденията, доколкото $E_C \ll E_C$.

Б. Времето τ_t на тунелинг през бариерата се приема за нищожно малко в сравнение с други времена (включително интервала между съседни събития на тунелинг). Това допускане е валидно за тунелни бариери, използвани в елементи с един електрон. На практика $\tau_t \sim 10^{-15} s$.

В. Кохерентни квантови процеси, състоящи се от няколко едновременно квантови събития (ко-тунелинг) са игнорирани. Това допускане е валидно, ако съпротивлението R на всички тунелни бариери на системата е много по-голямо отколкото квантовото съпротивление R_Q ($R \gg R_Q$).

$$R_Q = h/4e^2 \sim 6,5 k \Omega, \quad (3)$$

където h е константата на Планк.

Класическата теория е количествено споразумение с всички експериментални данни за системи с метални проводници (с техните малки стойности на дължината на вълната на електрона на нивото на Ферми λ_F и дава поне качествено описание на повечето резултати за повечето полупроводникови структури, където количествените ефекти са по-забележими поради по-голяма λ_F). Следвани са тези изисквания при изследването на системи с един електрон.

Резултати

Приложения на SET

Суперчувствителен „електромер“

Високата чувствителност на транзисторите с един електрон ги превръща в „електромери“ в уникални физични експерименти. Например чрез тях са възможни ясни наблюдения на ефекти на еднаквост в суперпроводници. Демонстрирани са абсолютни измервания на екстремно ниски постоянни токове $\sim 10^{-20} A$. Транзисторите са използвани и в първото измерване на ефекти с един електрон в кутии и филтри с един електрон. Модифицирана версия на транзистора е използвана за първо доказателство на съществуването на възбуждане на частичен заряд в квантовия ефект на Хол.

Спектроскопия на един електрон

Едно от най-важните приложения на елементите с един електрон е възможността за измерване на енергиите за събиране на електрони (и следователно разпределението на нивата на енергиите) в квантови точки и други нанообекти.

Стандарти за постоянен ток

Едно от възможните приложения на тунелинг на един електрон е фундаменталната стандартизация на постоянен ток (Knobel, 2002). За тази цел се използва заключване на фазата на SET осцилации или Блох осцилации в прост осцилатор с външен радиочестотен източник на добре дефинирана честота F . Заключването на фазата ще предостави трансфера на определен брой m електрони за период на външния радиочестотен сигнал и следователно ще генерира постоянен ток, който е фундаментално свързан с честотата: $I = f(F)$. Този подход има ограничение на кохерентната осцилация, което се преодолява чрез използването на стабилен радиочестотен източник, който управлява елементи, които не демонстрират кохерентни осцилации в автономен режим.

Температурни стандарти

Може да се разработи нов подход към нов стандарт за абсолютна температура чрез използването на едно-измерни редици с един електрон (Matsumoto, 1996). При ниски температури, редици с $N \gg 1$ острови демонстрират V_{Ax} , подобни на тези на SET с ясна Кулонова блокада на тунелинга при ниски напрежения ($V < V_{th}$) и доближаваща линейната асимптота $V = N \cdot R \cdot I + \text{const}$ при $|V| \gg V_{th}$. Ако температурата се повиши над E_C/k_B , температурните флуктуации разрушават Кулоновата блокада и V_{Ax} е почти линейна при всички напрежения: $G = dI/dV \sim G_n = 1/NR$.

Единственият оставащ артефакт от Кулоновата блокада е малък наклон в диференциалната проводимост около $V=0$.

Откриване на инфрачервено излъчване

Изчисленията на фотоотговора на системи с един електрон на електромагнитно излъчване с честота E_c/h показват, че най-общо отговорът се различава от този при добре познатата теория на Тиен-Гордън за тунелинг, асистиран с фотони (Cleand, 1993). Фактически това се основава на допускането за независими събития на тунелинг, докато в системите с един електрон електронният трансфер е обикновено зависим. Този факт означава, че елементите с един електрон, по-специално едноизмерната много-преходна редица, с тяхната ниска степен на ко-тунелинг може да се използва за ултрачувствителен видео- и хетеродин детектор на високочестотно електромагнитно излъчване подобно на преходите в редиците суперпроводник-изолатор-суперпроводник (SIS). Поредицата с един електрон има предимства пред нейния аналог SIS:

- по-нисък shot шум (вид електронен шум, който произтича от дискретната природа на електричния заряд);
- удобна настройка на праговото напрежение.

Тези особености я правят перспективна за детекция в терагерцовия честотен диапазон, където още няма детектори, защитени от предишни излъчвания.

Логика „Състояние на напрежението“

Транзисторите с един електрон могат да се използват и в режим „състояние напрежение“. В този режим входното гейтово напрежение V контролира тока сорс-д्रेйн на транзистора, който се използва в цифрови логически схеми подобно на конвенционалните полеви транзистори. Това означава, че зарядните ефекти с един електрон са ограничени до вътрешността на транзистора, докато външно той изглежда като обичаен електронен елемент, превключващ мулти-електронни токове с двоично представено ($1/0$, високо-ниско) постоянно напрежение (Masumi, 2004). Тази концепция опростява проектирането на схеми, което може да игнорира всички подробности на „физиката с един електрон“. Един основен недостатък на схемите със състояние напрежение е, че никой от транзисторите във всяка комплементарна двойка не е затворен прекалено добре, така че статичната утечка на ток в тези схеми е напълно реална, от порядъка на 10^{-4} e/RC. Съответната статична консумация на мощност е нищожна за относително големи елементи, работещи при хелиеви температури. Обаче при експлоатация при стайна температура тази мощност става от порядъка на 10^{-7} W на транзистор. Въпреки че е очевидно ниска, тази цифра дава една неприемлива плътност на разсейване на статична мощност ($>10\text{ kW/cm}^2$) за хипотетични схеми, които могат да бъдат достатъчно плътни ($>10^{11}$ транзистора на cm^2), за да представляват реално предизвикателство за еталонната CMOS технология (Songphol, 2002).

Логика „Състояние на заряда“

Проблемът с утечка на ток се решава с използването на друг логически елемент, наречен логика със състояние на заряда, в който отделните битове информация са представени чрез наличието/липсата на отделни електрони в определени проводящи острови през цялата

схема. В тези схеми статичните токове и мощност изчезват, докато няма постоянен ток в някое статично състояние.

Програмируема логика Транзистор с един електрон

SET без функция на твърда памет е ключ към програмируема SET логика (Lingjie.1997, Ken Uchida. 2003). Промяна на фазата на полупериод прави функцията на SET допълваща към конвенционалните SET. Като резултат SET с функция на твърда памет имат функционалността на конвенционалните SET (като n-MOS) и допълващите SET (като p-MOS). Като се използва този факт, функцията на SET схема може да се програмира на базата на функцията, съхранена чрез функцията на паметта. Зарядът около квантовата точка на SET, а именно един SET остров променя фазата на Кулонова осцилация, експлоатира писане/триене на паметта, което инжектира/изхвърля заряд към/от паметта близо до SET острова. Това прави възможно да се настройва фазата на Кулонова осцилация. Ако инжектираният заряд е адекватен, промяната на фазата е половин период от Кулоновата осцилация.

Проблеми в реализацията на SET

Литографски технологии

Първият най-голям проблем с всички логически елементи с един електрон е изискването $E_c \sim 1000\text{ K}_B T$, което на практика означава размер на острова под нанометър за експлоатация при стайна температура. В схеми с много голяма степен на интеграция това ниво на производствена технология е много трудно. Освен това, даже ако тези острови са произведени по някакъв начин чрез нанолитография, трудно ще бъдат абсолютно правилни. Докато в такива малки проводници квантовата кинетична енергия дава доминантен принос към енергията за добавяне на електрон ($E_k \gg E_c$), даже малки вариации във формата на острова ще доведат до непредсказуеми и по-скоро съществени вариации в спектъра на енергийните нива и следователно в праговете на превключване на елемента.

Предишен заряд

Вторият основен проблем с логическите схеми с един електрон е лошата случайност на предишния заряд. Един зареден примес в изолиращата среда поляризира острова, създавайки на неговата повърхност заряд Q_0 от порядъка на e . Този заряд е ефективно извлечен от външния заряд Q_e .

Ко-тунелинг

Есенцията на ефекта е, че тунелинг на няколко електрона ($N>1$) през различни бариери по едно и също време е възможно като отделен кохерентен квантово-механичен процес. Енергията на този процес е приблизително $(R_Q/R)N-1$ пъти по-малка от тази за тунелинг на един електрон.

Ако уравнението, изразено с (3) е удовлетворено, тази енергия е доста малка. Въпреки това може ясно да се наблюдава ко-тунелинг в обхвата на Кулонова блокада, където класическият тунелинг е подтиснат.

Експлоатация при стайна температура

Първият голям проблем с всички известни типове логически елементи с един електрон е изискването $E_s \sim 1000 \text{ k}_B T$, което на практика означава размер на острова под нанометър за експлоатация при стайна температура.

Свързване на SET с външната среда

Индивидуалните структури определят коя функция като логическа схема трябва да бъде аранжирана в по-големи 2-измерни образци. Има две идеи. Първата е да се интегрира SET както и съответното оборудване със съществуващите MOSFET. Това е атрактивно, защото може да увеличи плътността на интеграция. Втората опция е да се преустанови свързване с проводник, а вместо него да се използва статичната електронна сила между основните клъстери за формиране на схема, свързана чрез клъстери, която се нарича квантов клетъчен автомат (QCA). Предимството на QCA е неговата висока скорост за обмен на информация между клетките (близка почти до светлинната скорост) само чрез електростатични взаимодействия, не са необходими проводници между редиците и размерът на всяка клетка може да бъде по-малък от 2,5 nm. Това ги прави много подходящи за памет с висока плътност и следваща генерация квантов компютър.

Заключение

Транзисторът с един електрон (SET) доказва своята стойност като инструмент в научните изследвания. Съпротивлението на SET се определя от тунелинг на електрон, а капацитетът зависи от размера на наночастицата. Токът започва да протича през прехода, когато приложеното напрежение е достатъчно, за да увеличи енергията на електрона над Кулоновата блокада. Това се нарича прагово напрежение V_{th} . Постоянен нулев ток съществува за $2 V_{th}$. Приложенията на наноелементи в метрологията, включващи фундаменталните стандарти за ток, съпротивление и температура, изглеждат много-обещаващи. Друго потенциално приложение е откриване на излъчвания в терахерцовия диапазон. Ситуацията е много по-сложна с цифровата „електроника с един електрон“. Концепцията на логика с един електрон, предложена досега, разглежда силни предизвикателства: или да се отстрани предишния заряд, или да се осигури

непрекъснат трансфер на заряд в наномасщаб. Основният проблем в наноерата е производството на наноелементи. SET предоставя потенциал за ниска консумация и интелигентни чипове, подходящи за всякакви приложения.

Литература

- A.N.Cleand, D.Estene, C.Urbina and M.H.Devoret. 1993. An extremely Low noise Photodetector based on the single electron Transistor, *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 93, Nos.3/4, pp.767-772.
- Ken Uchida, Jugli Kaga, Ryuji Ohba and Akira Toriumi. 2003. Programmable Single-Electron Transistor Logic for Future Low-Power Intelligent LSI: Proposal and Room-temperature Operation, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 50, №7.
- K. Matsumoto, M. Ishii, K.Segawa, Y.Oka, B.J. Vartanian and J.S. Harris. 1996. Room temperature operation of a single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nano oxidation process for the TiOx/Ti system, *Appl. Phys. Lett.* 68 (1), pp. 34-36.
- Lingjie Guo, Effendi Leobandung and Stephen Y. Chou. 1997. A silicon Single-Electron transistor Memory operating at room temperature, *Science* Vol. 275, pp. 649-651.
- M.A.Kastner. 2000. The single electron transistor and artificial atoms, Leipzig, *Ann.Phys.*, vol.9, pp. 885-895.
- Masumi Sailto, Hidenhiro Haratation and Toshiro Hiramoto. 2004. Room-Temperature Demonstration of Integrated Silicon Single-Electron Transistor Circuits for Current Switching and Analog Pattern Matching, San Francisco, USA, *IEEE International Electron Device Meeting*.
- R. Knobel, C.s. Yung and A.N.Clelanda. 2002. Single-electron transistor as a radio frequency mixer, *Applied Physics Letters*, Vol.81, № 3, pp. 532-534.
- S.Bednarek, B.Szafran and J.Adamovski. 2000. Solution of the Poisson Schrodinger problem for a single-electron transistor, *Phys.Rev.B*, Vol.61, pp.4461-4464.
- Songphol Kanjanachuchai and Somsak Panyakeow. 2002, Beyond CMOS: Single-Electron Transistors. Bangkok, Thailand, *IEEE International Conference on Industrial Technology*.
- T.A. Fulton and G.D.Dolan. 1987. Observation of single electron charging effect in small tunneling junction, *Phys.Rev.Lett.*, Vol.59, pp.109-112.

АНАЛИТИЧНА ДИСКУСИЯ ВЪРХУ ТРАНЗИСТОР С ЕДИН ЕЛЕКТРОН

Мила Илиева-Обретенова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, milailieva@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Транзисторът с един електрон е ключов елемент в съвременната изследователска област наноелектроника, който може да предложи ниска консумация и висока скорост. Този транзистор е нов ключов елемент, който запазва своите свойства на атомно ниво и дори отвъд него; той може да контролира движението на един електрон. Консумацията на елемента е приблизително пропорционална на броя електрони, предавани от източника на напрежение към земята при различни логически операции. Следователно този елемент се използва като схема с много голяма интеграция за намаляване на консумацията. Контролираният тунелинг на един електрон осигурява неговата висока скорост. В статията се прави сравнение между транзистор с един електрон и полеви транзистор, посочват се предимствата и недостатъците на първия и се дискутират причините за неговата популярност в областта на наноелектрониката.

ANALYTICAL DISCUSSION OF SINGLE ELECTRON TRANSISTOR

Mila Ilieva-Obretenova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, milailieva@abv.bg

ABSTRACT. Single Electron Transistor is a key element in the current research field nanoelectronics, which can offer low power consumption and high operating speed. This transistor is a new switching element, which retains its properties on atomic scale and besides this; it can control the motion of a single electron. Power consumption is roughly proportional to the electron number transferred from voltage source to the ground in various logic operations. Therefore, this element is generally utilized like an ULSI to reduce the power consumption. The controlled tunneling of a single electron makes its high operating speed. This paper focus on the basic comparison of SET and FET, on SET's advantages and disadvantages to make a clear picture about the reason behind its popularity in the field of nanoelectronics.

Въведение

Транзисторът с един електрон (SET) е много популярен в областта на наноелектрониката от десетилетие. SET е фундаментален триелектроден елемент с един електрон, който е способен да предложи ниска консумация и висока скорост. Откакто технологията достигна наноразмер, поведението на наноелектронния SET се контролира от квантово механични ефекти. Схематичната структура на SET е почти същата като тази на MOSFET. SET може да се разглежда като полеви транзистор, чиито канал се състои от малък, с нисък капацитет C , проводящ остров (квантова точка), която е свързана към сорса и дрейна чрез два тунелни прехода и капацитивно свързана към един или повече гейтове, които се използват да контролират трансфера на един електрон от сорса към дрейна. Тук тунелният преход не е нещо друго освен тънка изолационна бариера между два проводящи електрода. SET работи в режим един електрон, при който само един електрон може да се предава от сорса към дрейна през острова при прилагането на постоянно гейтово напрежение върху острова. Елементът с един електрон се базира на един квантов феномен, известен като тунелен ефект. Технологията „Тунелинг на един електрон“ представя възможността да се контролира трансфера на индивидуални електрони. SET може да се използва като чувствителен усилвател на линеен заряд чрез прилагане

на квантов тунелен ефект с един електрон. SET има чувствителност от порядъка на 10^{-6} e/Hz^{1/2}. Това означава, че вариация на заряда от порядъка на 10^{-6} може да се открие за 1 секунда. Двата основни процеса, които се извършват в този наноструктуриран електронен елемент са Кулонова блокада и тунелинг на един електрон. Понастоящем SET се разглежда като елемент с бъдеща ниска консумация и база за интегрални схеми с висока плътност поради възможната работа с няколко електрона. За практически приложения абсолютно необходимо е SET да работи при стайна температура. За тази цел размерът на острова трябва да бъде толкова малък, колкото е възможно, обикновено 10nm. Целта е да се намали общия капацитет на SET и да се преодолеят проблемите от температурни флуктуации.

Теоретични основи

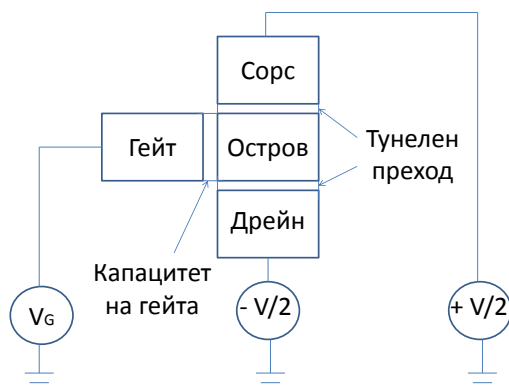
„Един електрон“ е фундаментална концепция в елементи като SET, която може да се представи чрез малка метална сфера. Сферата първоначално е електронеутрална, т.е. общият заряд е нула, поради еднакъв брой електрони и протони в нея. Допускаме, че един електрон е позициониран близо до сферата. В тази ситуация той е привлечен от сферата. Той се присъединява към нея и оставя отрицателен заряд от $-e$ върху нея. Поради

наличието на този заряд се създава електрично поле около сферата, така че, ако друг електрон дойде близо до нея, той ще срещне отблъскващата сила на полето. Концепцията зад „един електрон“ показва, че силата на този тунелинг ефект е зарядната енергия или електростатичната енергия, която се дава с формулата: $E_c = e^2/2C$. От горното уравнение е ясно, че ако капацитетът е много малък, зарядната енергия може да бъде доминираща. Феноменът на трансфер на един електрон може лесно да се разбере, ако концепцията за движението на електронен заряд през проводник е ясна. Токът тече през проводник по един непрекъснат начин, тъй като определен брой свободни електрони е наличен в него. Този ток може да се определи, като се изчисли зарядът, пренасян през полупроводника за интервал от време. Зарядът, пренасян през проводника, може да има някаква стойност, следователно той не е фиксиран количествено. В този случай трансферът на заряд през проводник е едно непрекъснато количество. Електронът се движи спрямо решетката на атомите и не може да бъде определен количествено в проводника. Ако един тунелен преход се постави в редови проводник, потокът от електрони, проникващи в тънката изолационна бариера, ще бъде ограничен от нея. Следователно токът през един проводник може да се определи количествено в тази ситуация. Електричният заряд може да бъде движан от непрекъснат и дискретен процес поради прилагането на тунелен преход като една изолираща бариера в редови проводник. Ако дискретни електрони могат да преминават през прехода, зарядът ще бъде акумулиран в него. Когато се приложи достатъчно високо напрежение напречно на прехода, преминава един електрон. Ликарев (Likharev, 1999) описва този феномен на тунелинг на един електрон като капещ кран. С други думи, ако тунелният преход е захранен с постоянен ток I , осцилацията на тунелинг с един електрон ще се случва с честота $f = I/e$. Зареждането и разреждането на тунелния преход и температурните флуктуации са тясно свързани една с друга. Температурните флуктуации могат да разстроят движението на електроните и да подтиснат количествените ефекти. Следователно, за да се избегне този проблем, Кулоновата енергия трябва да бъде по-голяма от температурните флуктуации. Необходимото условие за наблюдение на феномена „един електрон“ е: $E_c = e^2/2C > k_B T$, където k_B е константата на Болцман, а T е температурата в Келвин. Има две фундаментални условия за наблюдение на зарядния ефект при стайна температура. Първото условие, е че капацитетът C трябва да бъде по-малък от 3 af . Второто условие е, че квантовите флуктуации в броя на електроните трябва да бъдат незначителни, т.е. електроните трябва да бъдат локализирани само в острова и всички тунелни преходи трябва да бъдат непрозрачни за електроните, за да ги ограничават в островите. Това необходимо условие за непрозрачност може да се изпълни, ако тунелното съпротивление R_T е по-голямо от квантовото съпротивление, т.е. $R_T > h/(2\pi e^2) = 25,813 \text{ k}\Omega$, където h е константата на Планк, а e е зарядът на електрона.

Резултати

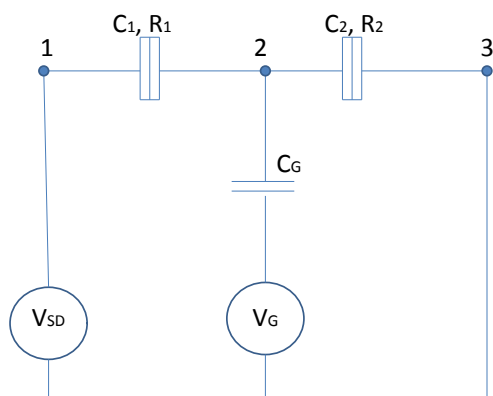
Схема на SET и неговата работа

SET е основен елемент при проектирането на схеми с ултрависока степен на интеграция. Триелектродният превключващ елемент, в който може да се наблюдава Кулонова блокада, е известен като транзистор с един електрон (Amiza, 2005). За разлика от полевите транзистори, транзисторите с един електрон се основават на квантов феномен, известен като тунелен ефект. Този ефект може да се наблюдава, когато два метални електрода са разделени от една изолираща бариера, известна като тунелен преход (Scholze, 2000). Тези елементи могат да пренасят електрони от сорса към дрейна един по един. Схематичната структура на SET е показана на фиг.1. Квантовата точка, която е по-малка от 100 nm в диаметър, е мезоскопична (Averin et al. 1991) система, в която електростатичната (Кулоновата) енергия може да се променя поради отстраняването или добавянето на един електрон. Тази енергия е по-голяма от термичната енергия и може да контролира транспорта на електрони към и от квантовата точка. С други думи, квантовата точка е малък проводящ остров, който съдържа управляем брой електрони, заемащи дискретни орбити.



Фиг.1. Схематична структура на SET

На фиг.2 е показано, че схемите са изградени от малки тунелни преходи, капацитети и източници на напрежение (Deer, 2006; Yu, 2006). Напрежението на гейта V_G се използва да контролира SET или, с други думи, то контролира последователния трансфер на електрони. Следователно, един електрон, преминаващ през тунел, може да се опише като дискретен заряд поради стохастичната природа на събитието тунелинг. На фиг. 2 възел 1 представя сорса, възел 2 е остров, а възел 3 представя дрейна. Тунелните преходи са локализирани между тези възли и са описани като тунелен капацитет C_1 и C_2 и тунелно съпротивление R_1 и R_2 . Теорията за тунелинг на един електрон зависи от класическата теория, която се фокусира върху зареждането на малкия проводящ остров с диаметър $\leq 100 \text{ nm}$. Капацитетът на острова се дава чрез уравнението за проводящ сферичен капацитет.



Фиг.2. Схема на транзистор с един електрон

SET може да бъде електростатично контролиран чрез гейтовия капацитет C_G . Следователно общият капацитет на острова се дава чрез

$$C = C_1 + C_2 + C_G \quad (1)$$

Принципи на тунелинг и Кулонова блокада

Тунелният преход представлява тънка изолираща бариера между два проводящи електрода. В случая на класическа електродинамика никакъв ток не може да протича през изолираща бариера. Но в съответствие с подхода на квантовата механика има някаква вероятност (по-голяма от нула) един електрон, разположен от едната страна на бариерата – тунелен преход – да достигне другата страна. Следователно трансферът на електрони през бариерите на квантовата точка предизвиква зареждане на квантовата точка. А това води до увеличаване на електростатичната енергия, която се дава чрез

$$E_C = e^2 / (2C). \quad (2)$$

Тази енергия е известна още като Кулонова зарядна енергия или енергия на Кулонова блокада. Тя е отблъскващата енергия на предишния електрон, съществуващ в острова спрямо следващия електрон, идващ към острова. В случай на миниатюрна система капацитетът C на острова е много малък. Следователно в съответствие с уравнение (2) Кулоновата зарядна или блокираща енергия E_C ще бъде много голяма и поради тази причина електроните са неспособни да се движат едновременно, а преминават един по един. Кулоновата енергия е отговорна за подтискането на едновременния трансфер на електрони. Този феномен е известен като Кулонова блокада (Grabert, 1992). Подтискането на трансфера може да бъде отстранено по един от следните два възможни начина:

А. Когато Кулоновата зарядна енергия се надвиши от термичните възбуждания при температура T , т.е.

$$T \sim T = E_C / K_B \quad (3)$$

Б. Когато Кулоновата зарядна енергия се превиши от външно приложено напрежение V , т.е.

$$V \sim V_{th} = E_C / e = e / (2C) \quad (4)$$

V_{th} е известно като прагово напрежение, което се дефинира като приложеното напрежение достатъчно да увеличи енергията на електрона над Кулоновата блокада. Следователно, ако напрежението V е по-малко от праговото напрежение V_{th} , системата е в състояние на Кулонова блокада. За да се изясни концепцията за Кулонова блокада, отново разглеждаме схемата с един електрон, в която при определено напрежение ще протече ток. Ако отстраним допълнителните ефекти, токът от тунелинг с първо приближение е пропорционален на приложеното напрежение. С други думи тунелният преход се държи като резистор с постоянна стойност, която зависи от дебелината на бариерата. Увеличаването на съпротивлението на тунелния преход около нулевото напрежение, се разглежда като Кулонова блокада. Следователно Кулоновата блокада може да бъде дефинирана като увеличено съпротивление на тунелния преход при много ниски напрежения на устройство, което се състои от поне един тунелен преход с малък капацитет. Кулонова блокада може да се получи само когато следните три условия са изпълнени:

а. Напрежението трябва да бъде по-ниско от елементарния заряд, разделен на собствения капацитет на острова, $V_{bias} < e/C$.

б. Термичната енергия $K_B T$ трябва да бъде под зарядната енергия, т.е. $K_B T < e^2 / C$. В противен случай електронът ще премине през квантовата точка чрез термично възбуждане.

в. Тунелното съпротивление R_T трябва да бъде по-голямо от $h / (2\pi e^2)$, което е изведено от принципа за неопределеност на Хайзенберг $R_T > h / (2\pi e^2) = 25813 \Omega$.

Класическа теория за работата на SET

Класическата теория за SET е квантово механичен анализ, който описва транспорта на електрони през тези елементи и също изразява произхода на Кулонова блокада. В този подход енергията (Yen et al., 2005), която определя транспорта през SET, е свободната енергия на Хелмхолц (F). Тази енергия може да се дефинира като разликата между общата енергия, съхранена в SET, означавана като E_Σ и работата, извършена от запазващите източници, означавана с W :

$$F = E_\Sigma - W \quad (5)$$

Общата енергия, съхранена в SET, включва всички три компонента, които трябва да се разгледат, когато един остров е зареден с един електрон. Общата енергия, съхранена в SET, може да се напише като

$$E_\Sigma = E_C + \Delta E_F + E_N \quad (6)$$

където E_C е енергията отразяваща взаимодействието електрон електрон;

ΔE_F – енергията на Ферми;

E_N – енергията на затваряне.

Промяната в свободната енергия на Хелмхолц показва оценяването на вероятността за тунелно събитие на електрон.

Взаимодействие Електрон-Електрон

Класическият модел на взаимодействие електрон-електрон се базира на електростатичната капацитивна зарядна енергия. Фактът за взаимодействието електрон-

електрон е, че, когато един допълнителен заряд dq се транспортира към проводник, трябва да се извърши работа спрямо полето, което се създава от вече съществуващи заряди върху този проводник. Основното изискване за остров с капацитет C , който може да бъде зареден с един електрон със заряд „ e “, се дава чрез (2).

Енергия на Ферми

Всички системи с един електрон, имащи малки острови, демонстрират и вторична енергия на взаимодействие електрон-електрон, която е известна като енергия на Ферми. Тази енергия може да се променя, когато островът е зареден с един електрон.

Енергия на затваряне

В случай когато намалява размерът на острова, разстоянието между енергийните нива на състоянията на един електрон се увеличава в някаква пропорция, която е индиректно свързана с квадрата на размера на квантовата точка. Ако се използва безкраен потенциал и прост модел на квантова точка, енергията на затваряне E_N може да се изчисли чрез решаване на следното уравнение на Шрьодингер:

$$E_N = (1/2m)(\hbar N/2d)^2, \quad (8)$$

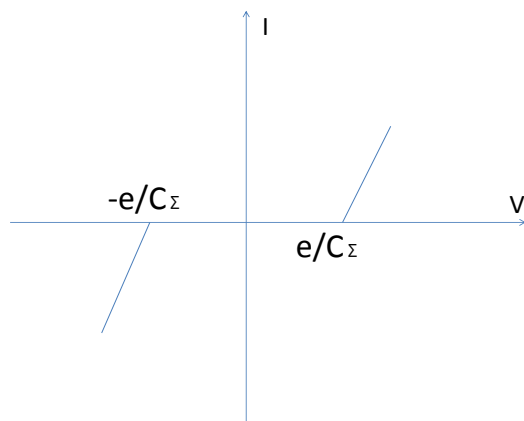
където d е диаметърът на острова.

Работа, извършена от хранящите източници

Термодинамично взаимодействащият остров представлява една отворена система. Следователно, работата, извършена от системата хранящи източници, трябва да бъде включена с цел да се определи общата налична енергия за събитие тунелинг.

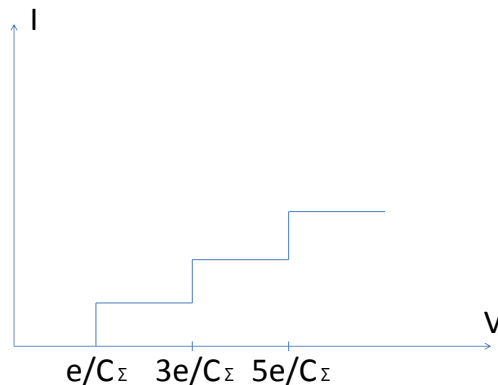
Волт-амперна характеристика на SET

Волт-амперната характеристика (VAx) за схема на SET със симетричен преход, където $C_1=C_2$ и $R_1=R_2$, е показана на фиг.3. Вижда се, че за $|V| < e/C_\Sigma$ токът е нула (Dubejsky, 2007). Ако външно приложеното напрежение V се увеличи до едно ниво, което е над праговото напрежение V_{th} , Кулоновата блокада се преодолява и започва да протича ток. В тази ситуация преходът се държи като резистор. Последващото влизане и излизане на един електрон от един преход към друг е известно като „Корелиран тунелинг на електрони“.



Фиг.3. VAx на SET със симетричен преход

Фиг.4 представя VAx за схема със силно асиметричен преход $R_1 \ll R_2$.



Фиг.4. VAx на SET с асиметричен преход

В този случай токоносителите - електрони влизат през единия преход и се насочват към втория поради наличието на високо съпротивление. Електроните се движат от единия преход към другия много бързо. Следователно това бързо движение на излишни електрони от единия преход към другия повишава общата енергия на острова. Ако напрежението се повиши, то ще увеличи популацията на електрони в острова. В този случай VAx представлява стъпаловидна графика, която е известна като „Кулонова стълба“.

Разлика между характеристики на MOSFET и SET

Структурата на SET е почти същата като тази на MOSFET, но има някои разлики между тях:

1. SET има тунелен преход на мястото на p-n-преход в MOSFET;
2. SET има малък проводящ остров – квантова точка на мястото на канал в MOSFET.

При SET електроните се предават един по един през канала (остров) от сорса към дрейна поради ефекта на Кулонова блокада. В случай на конвенционален MOSFET, брой от електрони се предава през канала за определено време. Следователно за разлика от SET в MOSFET много електрони едновременно участват в дрейновия ток. За разлика от идеалния MOSFET сорсът и дрейнът на SET са разделени от канала чрез достатъчно големи съпротивления, които действат като тунелни бариери. Характеристиките на SET и MOSFET са много различни една от друга. Общото е електростатичният ефект, който управлява и двата елемента, но в случая на SET електроните не са свободни да се движат от сорса към дрейна поради наличието на тунелни преходи. Поради ефекта на Кулонова блокада един електрон, създаващ малък отрицателно зареден регион, усеща електростатичното отблъскване от предишния електрон в този регион. Това регулира броя на електроните един по един в канала. При MOSFET дрейновият ток I_D зависи от броя на електроните, преминали през канала – повече електрони в канала, по-голям дрейнов ток. Следователно характеристиката $I_D=f(V_G)$ е монотонна (с V_G е означено напрежението на гейта). Това остава вярно и при ниска температура, тъй като скоростта на Ферми се увеличава с плътността на електроните. При SET дрейновият ток I_D не зависи от броя

на електроните, преминаващи през канала, или от скоростта на Ферми. Характеристиката $I_D=f(V_G)$ е периодична, което показва краен дрейнов ток само за специфични гейтови напрежения, където енергиите за N и $N+1$ електрон в канала са достигнати. Когато температурата надвиши зарядната енергия $e^2/(2C_\Sigma)$, нива N и $N+1$ нива са термично достъпни. Следователно и поведението на MOSFET е покрито от SET.

Предимства и недостатъци на SET

Предимствата на SET са следните (Kumar, 2010):

- ниска консумация на енергия;
- висока чувствителност;
- компактни размери;
- висока скорост;
- опростена схема;
- възможност за репродуктивност;
- прост принцип на работа;
- перспективна интеграция с традиционни CMOS схеми;
- по-висока производителност поради компактния размер;
- висок входен импеданс и ниско усилване по напрежение. Заедно с това те са много чувствителни към случаен предишен заряд. Поради това SET измества MOSFET в много приложения, където нисък изходен импеданс и голямо усилване по напрежение са необходими.

Недостатъците на SET са следните (Kumar, 2010):

- необходимост от интеграция на SET в голяма степен. За да работи SET при стайна температура, трябва да се синтезират големи количества от монодисперсни наночастици по-малки от 10 nm в диаметър. Трудно се произвеждат големи количества SET чрез традиционна оптична литография и обработка на полупроводници;
- трудно се свързва SET с външната среда;
- практически трудно се произвеждат SET.

Заклучение

Тази статия се фокусира върху теоретичната дискусия на основните принципи на SET и неговата важност в ерата на нанотехнологиите. Елементът предоставя ниска консумация и висока скорост и е подходящ за производството на различни схеми с ултрависока степен на интеграция.

Литература

- Amiza R. & U. Hashim. 2005. Single-electron transistor (SET): Literature Review, *Journal* 2005, Koieg, Malaysia.
- Averin D.V., K.K. Likharev, B.L. Altshuler, P.A. Lee, R.A. Webb. 1991. Mesoscopic Phenomena in Solids, *Elsevier*, Amsterdam.
- Deep Karan. 2006. Simulation and E-beam patterning of single-electron transistor, *M.S.Thesis in electrical engineering*, Univ. of Texas at Arlington.
- Dubejsky, Gregory S., 2007. Fabrication and DC characterization of Single electron transfers at low temperature, *M.S.Thesis*, Queen's Univ. Kingston, Ontario, Canada.
- Grabert H., M.H. Devoret. 1992. Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures, *Plenum Press*, New York.
- Kumar Om, M. Kaur. 2010. Single electron transistor: Applications and Problems, *International journal of VLSI design and communication system (VLSICS)* Vol.1, №4.
- Likharev, Konstantin K. 1999. Single-electron device and their applications, *Proc. IEEE* Vol.87, 606-632.
- Scholze, Andreas. 2000. Simulation of single-electron devices. *Ph.D. Dissertation*, Univ. of Jena, Germany.
- Yen L.J., Ahmad Radzi Mat Isa, Karsono Ahmad Dasuki, 2005. Modeling and Simulation of single-electron transistor, *Journal of Fundamental Science* 1, 1-6.
- Yu Qiaoyan. 2006. Single-electron devices, *Student-member IEEE Manuscript*.

ФАКТОРИ, ХАРАКТЕРИЗИРАЩИ ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕЦИ

Стефан Чобанов¹, Менто Ментешев²

¹ СМС-С ЕООД, Пирдоп, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

² СМС-С ЕООД, Пирдоп, e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ. В доклада са анализирани количествено основните фактори, които определят енергийната ефективност на електрическите пещи в режимите на първоначалното загряване, охлаждане, повторно загряване и квазистационарен режим. Селективно е изследвано влиянието на нагревателните мощности, продължителността на включване, хистерезиса на регулатора, поддържащ квазистационарният режим на пещта, и отдалечеността на средната работна температура на пещта от установената температура на съоръжението.

FACTORS WHICH CHARACTERIZE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ELECTRIC OVENS

Stefan Chobanov¹, Mento Monteshev²

¹ CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

² CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

ABSTRACT. The report analyzed quantitatively the main factors that determine the energy efficiency of the electric ovens in the regimes of the initial heating, cooling, re-heating and quasimode. The influence of the heating power, the duration of switching, the hysteresis of controller that supports the quasimode of the oven and the remoteness of the average operating temperature of the furnace from the established temperature of the equipment are selectively studied.

Предисловие

Фактор за повишаване на специфичния разход на енергия в електрическите пещи е намаления брой на работещите нагреватели. Това е потвърдено експериментално (Доклад за обследване на енергийната ефективност в завод за Абразивни инструменти) и по-късно доказано, и с теоретичен анализ (Чобанов и др., 2012). Оказва се, че върху енергийната ефективност на електрическите пещи влияят и настройките на регулатора: температурата на изключване на нагревателите, температурата при която отново се включват и съотношението между тях.

Нашият анализ е опит да се даде количествена оценка за относителното влияние на посочените фактори върху потребената електрическа енергия и съответно върху специфичния разход на енергия при термична обработка на продукция в електрически пещи. Основните им топло-технически параметри, свързани с конструкцията на пещите, са априорно възприети за константни. В този смисъл, количествените оценки имат относително значение.

Режими на работа на електрическите пещи

Режимите на работа на електрическите пещи и сушилни, свързани с консумацията на енергия са два: първоначално загряване при което, след включване, пещта достига до технологично необходимата температура и поддържането и чрез периодично изключване и включ-

ване на нагревателите. Режимът на първоначалното загряване на пещта има характер на преходен процес, а режимът поддържащ температурата за технологичното време за термичната обработка е възприет като квазистационарен.

При анализите пещта се разглежда като хомогенно тяло, с топлинната време константа $T = T_{\text{нагр}} = T_{\text{охла}}$, загрявано с мощност P_p по-малка или равна на обявената (номинална) P_n .

Режим на първоначално загряване

В този период температурата на пещта нараства експоненциално, достигайки максимално допустимата работна температура θ_{max}^p за време t_1 . Консумираната енергия за този период е:

$$W_1 = P_p \cdot t_1 = k_n \cdot P_n \cdot T \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\text{max}}^p}{k_n \cdot \theta_{\text{уст}}}} = k_n \cdot P_n \cdot T \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta_{\text{max}}}{k_n}} \quad (1)$$

където:

k_n е коефициентът характеризиращ, каква част от номиналната мощност се използва, т.е. от общия брой на нагреватели (n), каква част (m) работят. $k_n = \frac{m}{n} = \frac{P_p}{P_n}$.

$\theta_{уст}$ - установената температура, която се достига от пещта, загрявана с обявената (номиналната) мощност P_H за време $t \rightarrow \infty$ (теоретично), а практически $t = (3 - 4)T$;

$K_{\theta_{max}} = \frac{\theta_{max}^p}{\theta_{уст}}$ - коефициентът характеризира каква част представлява работната температура (θ_{max}^p) от установената ($\theta_{уст}$).

От (1) следва, че за пещ с фиксирани параметри – обявена мощност P_H и топлинна константа T , консумираната енергия за преходния процес (първоначално загряване) ще бъде функция на израза:

$$k_H \ln \frac{1}{1 - \frac{K_{\theta_{max}}}{k_H}} \leq 1 \quad (2)$$

т.е. зависи от коефициентите $k_H \leq 1$, $K_{\theta_{max}} < 1$ и тяхното съотношение.

Изчисления по израза (2) са дадени в таблица 1, за реални диапазони на изменение на двата коефициента:

$$k_H \in (0,6 \div 1),$$

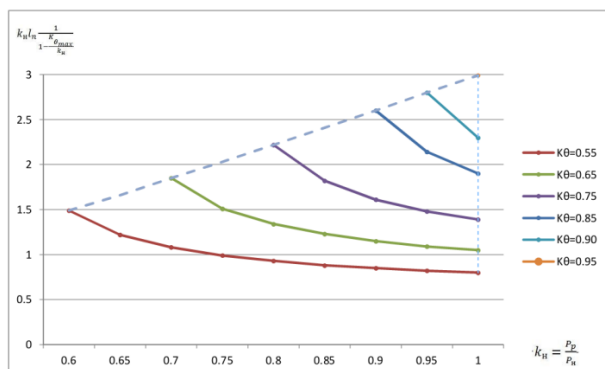
$$K_{\theta_{max}} \in (0,55 \div 0,95).$$

Таблица 1

$k_H = \frac{P_p}{P}$	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$K_{\theta_{max}} = \frac{\theta_{max}^p}{\theta_{уст}}$									
0,55	86% 1,49	52% 1,22	35% 1,08	24% 0,99	16% 0,93	10% 0,88	6% 0,85	2% 0,82	0% 0,80
0,60	-	80% 1,66	48% 1,36	31% 1,21	21% 1,11	13% 1,04	8% 0,99	3% 0,95	0% 0,92
0,65	-	-	76% 1,85	44% 1,51	28% 1,34	17% 1,23	9% 1,15	4% 1,09	0% 1,05
0,70	-	-	-	69% 2,03	38% 1,66	22% 1,47	12% 1,35	6% 1,27	0% 1,20
0,75	-	-	-	-	60% 2,22	31% 1,82	16% 1,61	6% 1,48	0% 1,39
0,80	-	-	-	-	-	50% 2,41	23% 1,98	9% 1,75	0% 1,61
0,85	-	-	-	-	-	-	70% 2,60	13% 2,14	0% 1,90
0,90	-	-	-	-	-	-	-	22% 2,80	0% 2,30
0,95	-	-	-	-	-	-	-	-	0% 2,99

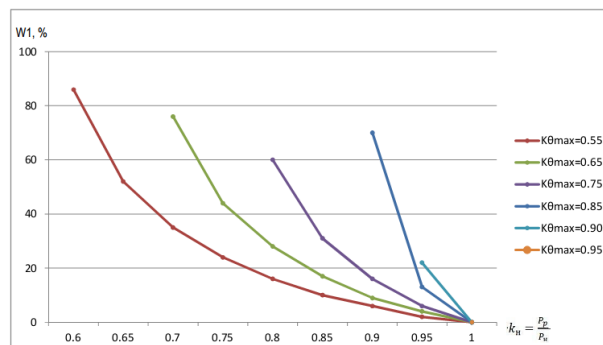
В таблица 1 на всеки хоризонтален ред отгоре е показано процентното нарастване на разхода на енергия с намаляване на работната мощност.

Част от данните в табл.1 са показани графично на фиг.1.



Фиг.1

Анализирайки резултатите, могат да се направят интересни заключения, характеризиращи преходния период до първоначалното достигане на работната температура. Консумираната енергия нараства с намаляване на k_H . Това е най-силно изразено при ниска стойност на $K_{\theta_{max}}$, т.е. когато работната максимална температура $\theta_{max}^p \ll \theta_{уст}$ (за $K_{\theta_{max}} = 0,55$ и $0,60$). При еднакви стойности на k_H , енергията нараства с увеличаване на работната температура до установената и може да достигне до 3-кратна стойност. При намаляване на k_H , се наблюдава нарастване на консумираната енергия, която достига до 86%, спрямо случая когато пещта работи с $k_H = 1$ (фиг.2). Отсъствието на стойности в табл.1 и извън очертания сегмент във фиг.1. показват, че работната температура θ_{max}^p не може да бъде достигната с работна мощност $P_p = k_H \cdot P_H$.



Фиг.2

При достигане на технологично необходимата температура θ_{max}^p , регулаторът подава команда за изключване на напрежението. Пещта преминава в режим на охлаждане.

Режим на охлаждане

При този режим след време t_2 , температурата на пещта достига до θ_{min}^p .

$$t_2 = T \cdot \ln \frac{\theta_{max}^p}{\theta_{min}^p} \quad (3)$$

Въвеждайки $\theta_{уст}$, (3) може да се запише като:

$$t_2 = T \cdot \ln \frac{K_{\theta_{max}}}{K_{\theta_{min}}}, \quad (4)$$

където $K_{\theta_{max}} = \frac{\theta_{max}^p}{\theta_{уст}}$, е коефициент, характеризиращ кратността минималната температура θ_{min}^p , зададена от регулатора, спрямо установената температура $\theta_{уст}$.

В този период не се консумира енергия - $W_2 = 0$, тъй като $P_p = 0$ (нагревателите са изключени).

Достигайки θ_{min}^p , регулаторът дава команда за включване на напрежението към пещта и се преминава в режим на повторно нагряване.

Режим на повторно нагряване

Нарастването на температурата следва закона

$$\theta = k_H \cdot \theta_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_{min}^p \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$$

и за време $t=t_3$ достига максималната температура θ_{max}^p , при което регулаторът отново изключва напрежението.

$$\theta_{max}^p = k_H \cdot \theta_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T}}\right) + \theta_{min}^p \cdot e^{-\frac{t_3}{T}} \quad (6)$$

От (6) определяме времето

$$t_3 = T \ln \frac{\theta_{min}^p - k_H \theta_{уст}}{\theta_{max}^p - k_H \theta_{уст}} \quad (7)$$

Включвайки въведените вече коефициенти на кратност на θ_{max}^p и θ_{min}^p спрямо установената температура $\theta_{уст}$ - $K_{\theta max}$ и $K_{\theta min}$, уравнение (7) придобива вида:

$$t_3 = T \cdot \ln \frac{K_{\theta min} - K_H}{K_{\theta max} - K_H} \quad (8)$$

Консумираната енергия в този режим на повторно нагряване, в съответствие с (8) е:

$$W_3 = K_H \cdot P_H \cdot t_3 = K_H \cdot P_H \cdot T \cdot \ln \frac{K_{\theta min} - K_H}{K_{\theta max} - K_H} \quad (9)$$

Като се има в предвид, че $K_{\theta max} > K_{\theta min}$, енергията ще има винаги реална стойност, когато:

$$K_{\theta max} > K_{\theta min} \leq K_H \quad (10)$$

Анализът на израза за енергията (9), приемайки, че P_H и T са константни величини за дадена пещ, се свежда до оценки на стойностите от:

$$K_H \ln \frac{K_{\theta min} - K_H}{K_{\theta max} - K_H} \quad (11)$$

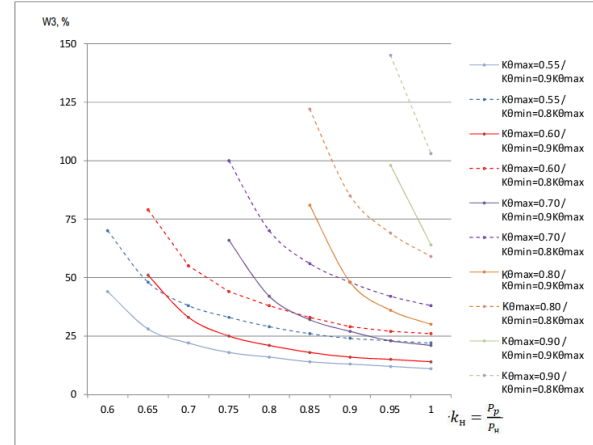
Изчислена стойност на (11) за $K_H \in (0,6 \div 1)$ и $K_{\theta max} \in (0,55 \div 0,9)$ при фиксирани съотношения между θ_{max}^p и θ_{min}^p зададени при хистерезис в настройката на регулатора 10% и 20% са дадени в таблица 2 и графично представени на фиг.3.

Режимът на работа при повторно нагряване от θ_{min}^p до θ_{max}^p се характеризира със следните закономерности:

- при намаляване на работната мощност на пещта ($K_H < 1$) енергията винаги нараства. Количествено нарастването на енергията при $K_H < 1$ се увеличава при нарастване на хистерезиса в настройките на регулатора;
- при хистерезис в настройката на регулатора 10%, енергията нараства четирикратно при $K_{\theta max} = 0,55$ и $K_H = 0,6$, а при хистерезис 20% за същите стойности на $K_{\theta max} = 0,55$ и $K_H = 0,6$ – енергията нараства трикратно (табл.2);
- с „приближаване“ степента на повторното нагряване - θ_{max}^p към установената температура $\theta_{уст}$ - загубата на енергия се увеличава, при това с нарастваща скорост, с намаляване на K_H (табл.2, фиг.3).

Таблица 2

$K_{\theta max}$	$K_{\theta min}$	K_H								
		0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0.9	0.55	0.44	0.28	0.22	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11
	0.60	-	0.51	0.33	0.25	0.21	0.18	0.16	0.15	0.14
	0.70	-	-	-	0.66	0.42	0.32	0.27	0.23	0.21
	0.80	-	-	-	-	-	0.81	0.48	0.36	0.30
	0.90	-	-	-	-	-	-	-	0.98	0.64
0.8	0.55	0.70	0.48	0.38	0.33	0.29	0.26	0.24	0.23	0.22
	0.60	-	0.79	0.55	0.44	0.38	0.33	0.29	0.28	0.26
	0.70	-	-	-	1.00	0.70	0.56	0.48	0.42	0.38
	0.80	-	-	-	-	-	1.22	0.85	0.69	0.59
	0.90	-	-	-	-	-	-	-	1.45	1.03



Фиг.3

Редувайки се периодически, времената за охлаждане t_2 и за повторно заграване t_3 , пещта се оказва в циклически квазистационарен режим.

Квазистационарен режим

Той се характеризира с параметъра „Продължителност на Включване“ (ПВ):

$$ПВ = \frac{t_3}{t_2 + t_3} = \frac{t_3}{t_{\Sigma}}, \quad (12)$$

където $t_{\Sigma} = t_2 + t_3$.

Включвайки (4) и (8) в (12) и след преобразуване се получава:

$$ПВ = \frac{\ln \frac{K_{\theta min} - K_H}{K_{\theta max} - K_H}}{\ln \left(\frac{K_{\theta min} - K_{\theta min}^p}{K_{\theta max} - K_{\theta max}^p} \right)}. \quad (13)$$

Тази зависимост показва, че параметърът ПВ зависи от зададените температури θ_{max}^p и θ_{min}^p , от тяхната отдалеченост от $\theta_{уст}$ и от коефициента на натоварване по мощност K_H .

Така при продължителност на термообработка в квазистационарен режим $t_{стац}$, консумираната енергия ще бъде:

$$W_{стац} = K_H \cdot P_H \cdot ПВ \cdot t_{стац} \quad (14)$$

След заместване с (13):

$$W_{\text{стац}} = K_H \cdot P_H \frac{\ln \frac{K_{\theta \min} - K_H}{K_{\theta \max} - K_H}}{\ln \left(\frac{K_{\theta \min} K_{\theta \min} - K_H}{K_{\theta \max} K_{\theta \max} - K_H} \right)} t_{\text{стац}} \cdot \quad (15)$$

Изведените зависимости позволяват да се оцени относителния принос на преходния и квазистационарния режим на пещта в потребената енергия. Те са функция от натоварването по мощност (K_H), максималната работна температура $\theta_{\max}^p$ хистерезиса на регулатора, лимитиращ $\theta_{\min}^p$ и отдалечеността на последните от установената температура $\theta_{\text{уст}}$, която се достига при работа с обявената (номинална) мощност на електрическата пещ за време $4T$.

Изчисленията за характерни и реални стойности на посочените параметри са дадени в табл.3. Като база за сравнение квазистационарния процес е приет с продължителност 1 час ($t_{\text{стац}} = 1$), а данните за множителя са дадени в колона 6.

Колона 7 показва, че тази енергия се променя (при приетия диапазон на изменение на параметрите) от 32 до 47%, като в този интервал се наблюдава намаление при стойности $K_H < 1$. За разглежданите примери, консумираната енергия в преходния и квазистационарния режим се изравняват при продължителност на последния в порядъка на 2,1 до 3,1 часа (колона 8).

Данните от таблица 3 потвърждават направените заключения относно консумираната енергия. Тя се увеличава при нарастване на K_H , при нарастване $\theta_{\max}^p$ ($K_{\theta \max}$) и при намаляване на хистерезиса в настройката на регулатора и в двата основни температурни режима.

Таблица 3

№	Параметри			Изчислени множители		$\frac{W_{\text{стац}}}{W_1} \cdot 100, \%$	Време в часове на квазистационарен процес при $W_1 = W_{\text{стац}}$
	K_H	$K_{\theta \max}$	$K_{\theta \min} = 0,9 K_{\theta \max}$	Преходен процес W_1 по (2)	Квазистационарен процес $W_{\text{стац}}$ по (15)		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.0	0.80	0.72	1.61	0.76	47	2.10
2	0.85	0.70	0.63	1.45	0.66	45	2.20
3	0.75	0.60	0.54	1.65	0.57	34	2.90
4	0.75	0.70	0.63	2.03	0.66	32	3.10
5	0.65	0.60	0.54	1.64	0.57	34	2.90
6	1.00	0.6	0.54	0.92	0.37	40	2.50

Специфичен разход на електрическа енергия

Общата електрическа енергия, която се консумира от електрическата пещ представлява сума от енергиите в преходния и квазистационарните процеси. От (1) и (15) следва:

$$W = W_1 + W_{\text{стац}} = k_H \cdot P_H \left[T \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{K_{\theta \max}}{K_H}} + \frac{\ln \frac{K_{\theta \min} - K_H}{K_{\theta \max} - K_H}}{\ln \left(\frac{K_{\theta \max} K_{\theta \min} - K_H}{K_{\theta \min} K_{\theta \max} - K_H} \right)} t_{\text{стац}} \right] \quad (16)$$

Ако подложената на термична обработка продукция е с количество Q (kg, t) специфичният разход на електрическа енергия е:

$$w = \frac{W}{Q} = k_H \frac{P_H}{Q} \left[T \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{K_{\theta \max}}{K_H}} + \frac{\ln \frac{K_{\theta \min} - K_H}{K_{\theta \max} - K_H}}{\ln \left(\frac{K_{\theta \max} K_{\theta \min} - K_H}{K_{\theta \min} K_{\theta \max} - K_H} \right)} t_{\text{стац}} \right] \quad (17)$$

Очевидно, специфичният разход на ел.енергия ще следва характера и изменения на енергията W и нейните компоненти W_1 и $W_{\text{стац}}$, тъй като Q е условно постоянно (за всеки термообработващ цикъл). Така специфичният разход на електрическа енергия се оказва зависим и нараства при $K_H < 1$ при изгорели нагреватели и при програмиране на по-голям хистеризис на регулатора, т.е. на съотношението $\theta_{\max}^p / \theta_{\min}^p$ (при спазен технологичен режим за термична обработка).

Тези заключения са потвърдени и при експерименталното определяне на потреблението и специфичния разход на електрическа енергия на пещи работещи с пълен и номинален брой нагреватели и с различни настройки на регулаторите (Доклад за обследване на енергийната ефективност в завод за Абразивни инструменти).

Заключение

Анализът на количествените зависимости доказват по категоричен начин, че определящо значение за увеличаване на специфичният разход на енергия при термообработка в електрическите пещи е работата в режим на намалена работна мощност спрямо обявената (номиналната).

От гледна точка на енергийната ефективност, за да бъде тя максимална, електрическите пещи трябва да работят само с номиналната си нагревателна мощност, регулаторите трябва да са настроени с минимален хистерезис, при максимална работна температура съобразена с технологичните изисквания и по възможност „отдалечена“ от установената (максимална) температура, която може да развие пещта.

Като се има предвид значителната мощност на електрическите пещи за термообработка (изпичане и сушене) и непрекъснатия им режим на работа, намаляването на специфичния разход на енергия до 2-2,5 пъти ще доведе до повишаване на енергийната ефективност, до намаляване на разхода на електрическа енергия, което рефлектира върху ограничаването на емисиите от въглероден диоксид.

Литература:

- Доклад за обследване на енергийната ефективност в завод за Абразивни инструменти (ЗАИ) гр.Берковица. Архив СМС-С, реф.№ 962, 2009.
- Чобанов Ст., К. Джустров, М. Ментешев. 2012. Относно енергийната ефективност на електрически пещи, работещи с намален брой нагреватели. Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“ т.55, св. „Механизация, електрификация и автоматизация.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ВИСШИТЕ ХАРМОНИЦИ В РУДНИЧНА МРЕЖА НН С ЧЕСТОТНО УПРАВЛЯЕМИ ДВИГАТЕЛИ

Стефан Чобанов¹, Милен Дренков², Менто Ментешев³

¹ CMC-C ЕООД, Пирдоп, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

² CMC-C ЕООД, Пирдоп, e-mail: milen.drenkov@cmc-c.com

³ CMC-C ЕООД, Пирдоп, e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ. Отрадени са резултати от експериментални изследвания и анализи на руднична мрежа, съдържаща честотни регулатори за управление на сравнително мощни задвижвания, с единична мощност на двигателите 200kW, 45kW и 18kW, при напрежение 380V. Измерванията са проведени на поточна линия с гумено-транспортни ленти (ГТЛ), изпълнена в подземен рудник „Челопеч“ през 2012-2013 г., с приложени двудвигателни задвижвания 2x200kW. Получени са данни за амплитудно-честотния спектър на висшите хармоници в напрежението и тока. С количествени анализи е доказана необходимостта от съобразяване с висшите хармоници, независимо от апаратната и софтуерната им дискриминация. Акцентирани са последствията за електробезопасността и се налага изводът, че апаратите, свързани с нея трябва да бъдат универсални и приложими във всички руднични мрежи НН, с и без висши хармоници.

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF HIGH HARMONICS IN THE LV MINE NETWORK WITH FREQUENCY-CONTROLLED MOTORS

Stefan Chobanov¹, Milen Drenkov², Mento Monteshev³

¹ CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

² CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: milen.drenkov@cmc-c.com

³ CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: mento.menteshev@cmc-c.com

ABSTRACT. It reflects the results of the experimental study and analysis of the mine networks, containing frequency controllers for control of powerful drivers with a single engine power of 200kW, 45kW and 18kW at voltage of 380V. The measurements were carried out on a flow line with installed rubber- conveyor belt, (RCB), performed in an underground mine "Chelopech" in 2012-2013, with attached two-engined drives 2x200kW. Data have been obtained for the amplitude-frequency spectrum of harmonics in voltage and current. With quantitative analysis is proved the necessary to comply with the high harmonics, regardless of hardware and software discrimination. It is accented f electrical safety and the conclusion is that the equipment, connected with it should be universal and applicable in all mine networks LV, without high harmonics. The consequences for electric safety were stressed and a suggestion is set that devices connected to it must be universal and applicable to all mine low voltage networks with and without high harmonics.

При нарастващото приложение на честотно управление на електрозадвижванията в мините, висшите хармоници в тока и напрежението присъстват все по-забележимо и създават проблеми свързани с повишени загуби в трансформаторите, двигателите и мрежите, с точността на електрическите измервания, с настройките и работата на защитите и не на последно място с електробезопасността, особено в мрежите с изолирана неутрала (IT) (Жежеленко, 1984; БДС EN 50160:2007, БДС EN6100-2-4:2004, БДС EN 6100-3:2004; Monteshev, 1996; Дренков, 2009). Пример за приложение на съвременно честотно управляемо електрозадвижване е проектирането и изпълнението на непрекъснат (поточен) транспорт с ГТЛ в рудник Челопеч на Челопеч Майнинг ЕАД. Интересът за експерименталното изследване и анализ на висшите хармоници в напрежението и тока е провокиран от сравнително големите единични инсталирани мощности на двигателите с честотно управление – 200kW и съизмеримостта им с мощността на хранящите ги трансформатори.

Обект на изследването

Изследванията са проведени¹ на ГТЛ, управлявана от MCC2703, задвижвана от два двигателя по 200kW с честотни регулатори тип ATV71HC20N4D. От MCC2703 се управляват честотно още двигатели с мощност 45kW (за задвижване на къса лента) с ATV71HD45N4, за регулиране на натегателния механизъм с мощност 18kW на следващата ГТЛ и мощност 140 kW с релейно контакторно управление. Сумарната инсталирана мощност е 603kW, в която честотно управляемата е 463kW. Тези мощности са прикачени към трансформатор 6/0,4kV и мощност 1000kVA.

Измерванията са осъществени с анализатор на хармоници MAVOWATT-50.

¹ Със съдействието и активното участие на специалистите от Челопеч Майнинг инж.Пламен Пеев и инж.Филип Нинов.

Измерените стойности са осреднени през 0,2s, а при обработката на данните и графичното им изображение са изчислени средните стойности за 1s.

Измерени са трите фазни напрежения, хармониците в тока (от 1 до 49) и в двете линейни напрежения (от 1 до 31).

Изследванията и анализите са насочени към проблемите на електробезопасността, към нарастването на токовете утечки в мрежата под действие на висшите хармоници в напрежението и произтичащите от това специфични изисквания към схемите и настройките на апаратите за защита от токови утечки и на апаратите, контролиращи съпротивлението на заземителния контур на подвижните минни машини, за които е невъзможно да се използват локални (местни заземители).

Фазни напрежения. Симетрия

На фиг.1 са представени измененията в осреднените за 1s моментни ефективни стойности на трите фазни напрежения U_A , U_B и U_C , в мащаб избран за подчертаване на асиметрията и размаха в измененията им. От данните посочени в таблица 1 следват интересни заключения по отношение на фазните напрежения:

- с изменение на натоварването на ГТЛ, при нормална работа, фазните напрежения остават сравнително постоянни. Разликите в моментните ефективни стойности на напрежението на фаза А - U_A не надвишават 1,1 V, което представлява 0,48% спрямо обявеното фазно напрежение $U_e = 230V$. Тази разлика е незначително по-малка за фази В и С, където не надвишава 1,00V и представлява 0,43%;

Таблица 1

Фаза	Измерена стойност на фазните напрежения, V				Отклонения на фазните напрежения, %	
	Максимални	Минимални	ΔU	$\Delta U, \%$	Минимални	Максимални
A	229,35	228,25	1,1	0,48	-0,28	-0,76
B	228,30	227,30	1,0	0,43	-0,74	-1,17
C	228,30	227,30	1,0	0,43	-0,74	-1,17

- разликата между максималните стойности на фазните напрежения U_A , U_B и U_C , е по-малка от 0,75% и не надвишава 1,2% за минималните, изчислени спрямо обявеното напрежение (230V).

Следва изводът, че за технологичен режим, типичен за измерването, фазните напрежения на мрежата остават сравнително постоянни и практически симетрични.

Висши хармоници в междуфазни напрежения

Хармониците в линейните напрежения, които са измерени, са нечетни – от 1 до 31 – кратни на промишлената честота 50Hz. Всички хармоници кратни на 3 (3, 9, 15, 21 и 27) имат практически нулева стойност, тъй

като рудничната мрежа е трипроводна с изолирана неутрала (IT).

Хармониците в двете линейни напрежения между фази А-В и А-С са дадени на фиг.2 до фиг.6. Количествената оценка за тяхното присъствие е извършено по следните известни зависимости (Жежеленко, 1984; Monteshev, 1996).

- Коефициент на деформация

$$K_{DU} = \frac{U_1}{U} = \frac{U_{1cp}}{U_{cp}}, \quad (1)$$

характеризиращ отклонението на несинусоидалното напрежение U от първия хармоник U_1 ;

- Коефициенти на хармониците в %

$$K_{Ui} = \frac{U_i}{U_1} 100, \quad (2)$$

които показват отношението на ефективните стойности на напрежението за съответния i -ти хармоник U_i , спрямо ефективната стойност на първия хармоник U_1 ;

- Коефициент на несинусоидалност на напрежението $K_{н.с.U} (THD)_U$, %

$$K_{н.с.U} (THD)_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=5}^{31} U_i^2}}{U_1} 100, \quad (3)$$

характеризиращ относителното участие на съществуващите хармоници спрямо първия хармоник и деформацията на синусоидалното напрежение в случая с честота 50Hz.

- Ефективната стойност на несинусоидалното напрежение U (средна) за двете линейни напрежения

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{31} U_i^2. \quad (4)$$

Първите хармоници (U_1) в напрежението имат преобладаващи стойности в несинусоидалното напрежение. Техните средни за 1s стойности се колебаят в рамките на 2V, което представлява 0,5%.

Минималните изменения във фазните мрежови напрежения и в симетрията им (фиг.1), характеризират и тренда на двете линейни напрежения на първия хармоник (фиг.2): за U_1^{AC} – от 392,3V до 395V ($\Delta U_{max} = 2,7V$); за U_1^{BC} – от 391,1V до 394,2V ($\Delta U_{max} = 3,1V$).

Запазването на характера на синусоидалното напрежение се доказва с високата стойност на коефициента на деформация (1), който за осреднените стойности има стойност 0,999.

Петите хармоници U_5 , в линейните напрежения (фиг.3) достигат максимални стойности $U_5^{AC} = 14,00V$ и $U_5^{BC} = 13,16V$. Това означава, че коефициента на хармониците (2) за двете линейни напрежения имат стойности $K_{U_5}^{AC} = 3,47\%$ и $K_{U_5}^{BC} = 3,25\%$.

Седмите и единадесети хармоници U_7 , U_{11} са дадени на фиг.4. Осреднените стойности за периода на измерване и изчислените коефициенти на хармониците K_{U_7} и $K_{U_{11}}$ са представени в таблица 2.

Таблица 2

Хармоник, в напрежението, №		7	11
Осреднени стойности на измерените напрежения, V	U^{AC}	5,80	5,54
	U^{BC}	5,82	5,69
Коефициент на хармониците, %	K_U^{AC}	1,47	1,41
	K_U^{BC}	1,47	1,45

Хармониците с поредни номера 13, 17, 19 и 23 са показани на фиг.5, а коефициента на хармониците, изчислени по измерените осреднени стойности на съответните хармоници спрямо първия хармоник са представени в таблица 3.

Таблица 3

Хармоник, в напрежението, №		13	17	19	23
Осреднени стойности на измерените напрежения, V	U^{AC}	3,08	2,58	2,35	1,65
	U^{BC}	2,62	2,94	1,92	1,99
Коефициент на хармониците, %	K_U^{AC}	0,78	0,65	0,60	0,42
	K_U^{BC}	0,67	0,75	0,49	0,51

На фиг.6 са показани измененията на хармониците с пореден № 25, 29, и 31.

Хармониците с пореден №25 правят изключение от показаните по своята динамика. Напрежението U_{25}^{AC} се изменя в границите от 1,33 до 3,33V, а U_{25}^{BC} – от 0,90V до 2,90V. От цитираните стойности следва, че и за двата хармоника размахът на моментните стойности е 2V, докато в другите хармоници той не надвишава 1V.

При 29 и 31 хармоник, на които максималните моментни стойности не надхвърлят 1,3V, размахът е и значително по-малък от 0,5V.

Осреднените стойности (по модул) и изчислените коефициенти на хармониците 25, 29 и 31 са дадени в таблица 4.

Таблица 4

Хармоник, в напрежението, №		25	29	31
Осреднени стойности на измерените напрежения, V	U^{AC}	2,63	1,06	1,27
	U^{BC}	2,24	1,21	1,08
Коефициент на хармониците, %	K_U^{AC}	0,67	0,27	0,32
	K_U^{BC}	0,57	0,31	0,27

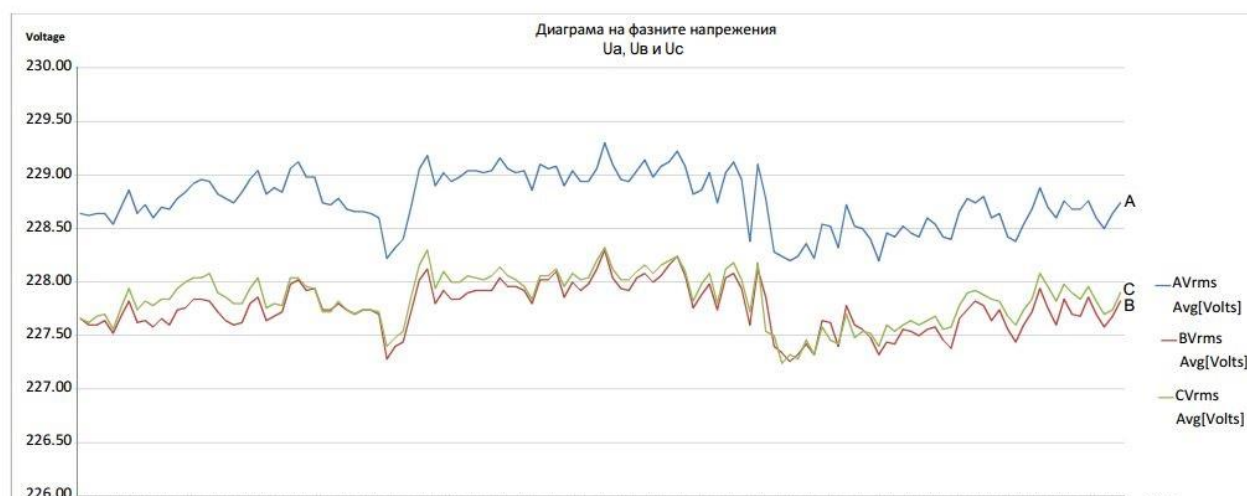
Ефективната стойност на средното несинусоидално напрежение (4) е 393.55 V, а измененията на моментните му стойности са показани на фиг.7.

Средната стойност на коефициента на несинусоидалност, характеризиращ висшите хармоници в линейните напрежения (3) е 4.20%.

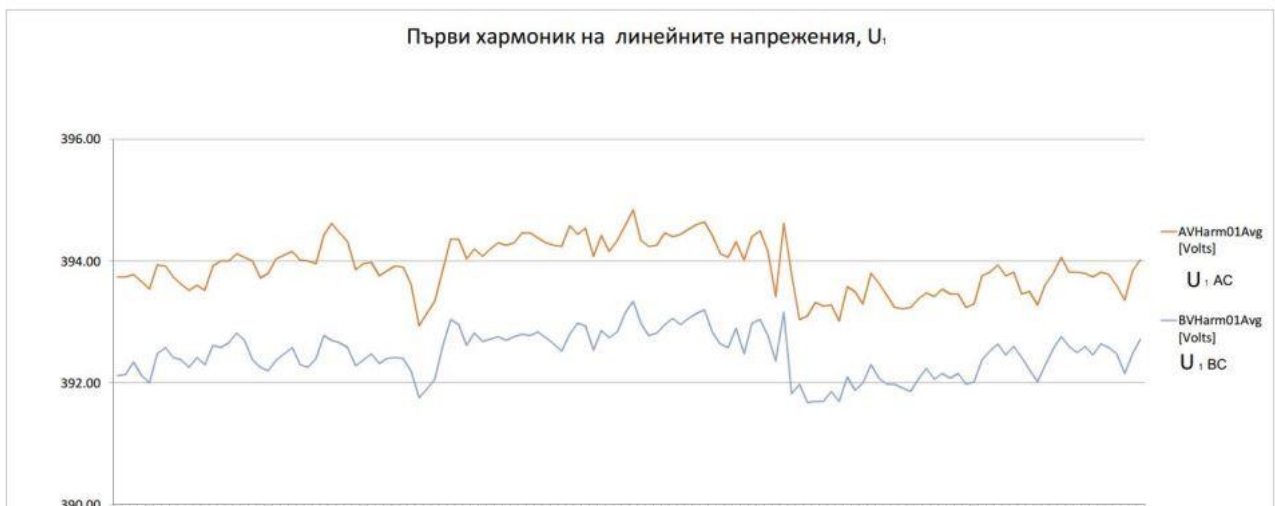
Моментните му стойности, които се изменят в границата от 4,12 до 4,29 са показани на фиг.8. Отклоненията от изчислената средна стойност на $K_{н.с.У}(THD)_U = 4,20$, варират от -1,90% до +2,14%.

На практика се доказва, че използваните в Челопеч Майнинг честотни регулатори за управление, с въведените апаратни и софтуерни възможности за настройката им, гарантират изискванията на стандартите за допустимо присъствие на висши хармоници в напрежението с $K_{н.с.У}(THD) \leq 5\%$ (за линии НН) (БДС EN 50160:2007, БДС EN6100-2-4:2004, БДС EN 6100-3:2004).

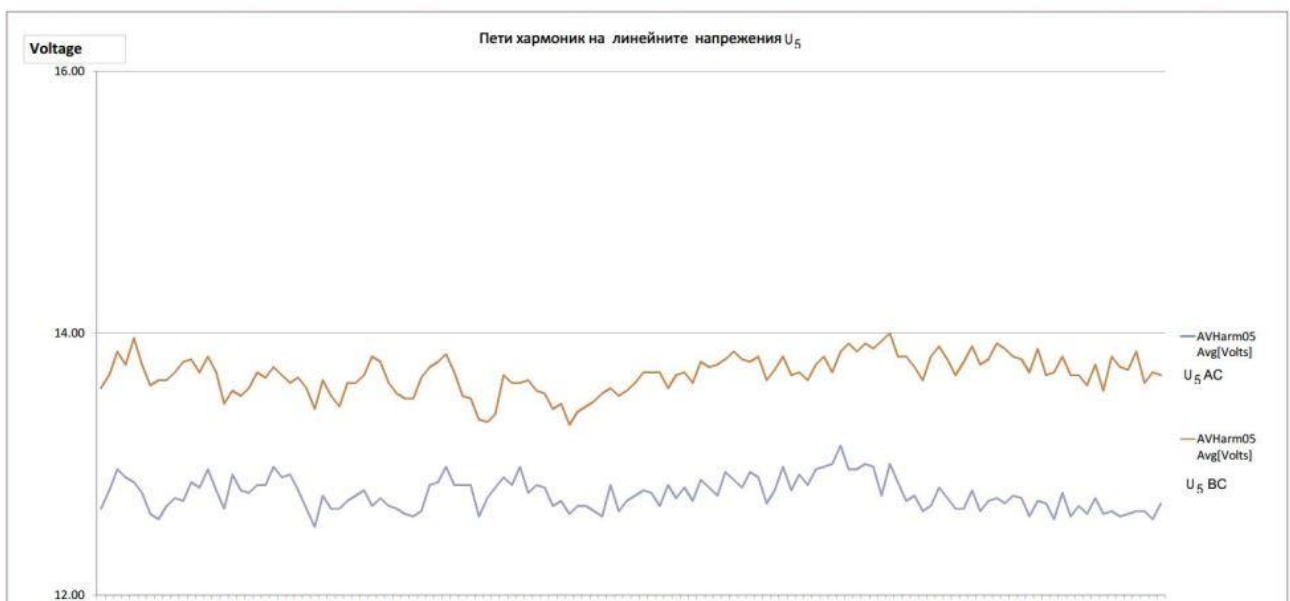
Нормата е възприета в преобладаващия брой международни и национални стандарти в Европа, Америка, Австралия, Китай. Единствено в Швеция, националният стандарт за мрежи 250/430V AC допустимата $K_{н.с.У}(THD)$ и в напрежението е до 4%. В Русия и Германия се допускат максимални стойности до 10% за коефициент на несинусоидалност (THD).



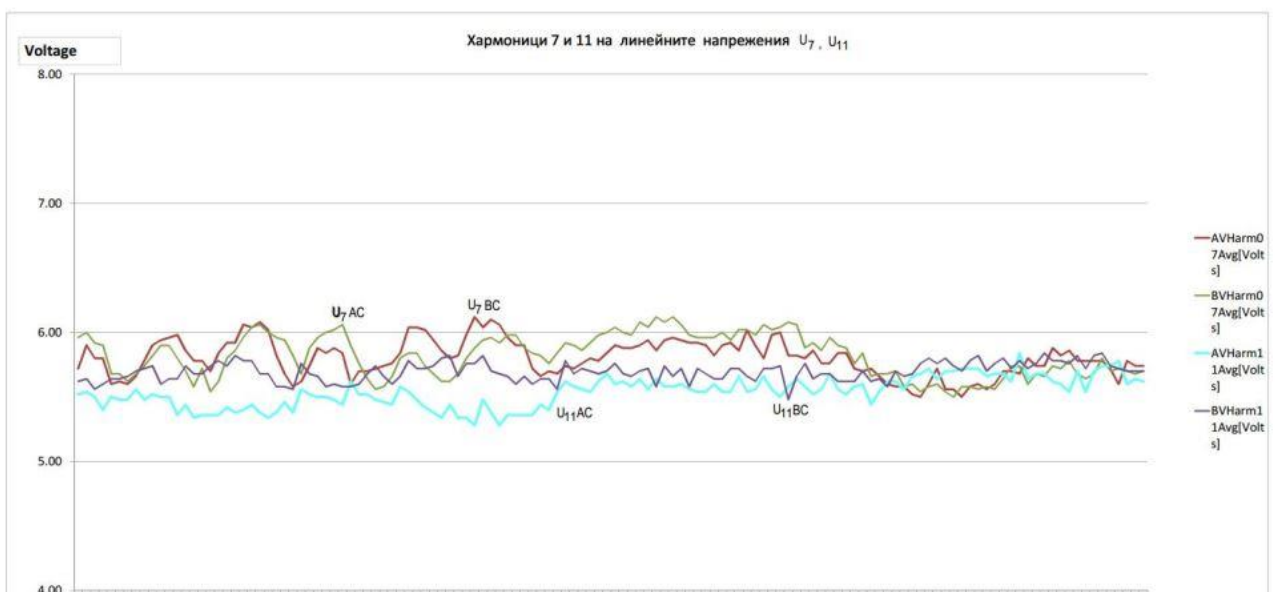
Фиг. 1. Диаграма на фазните напрежения



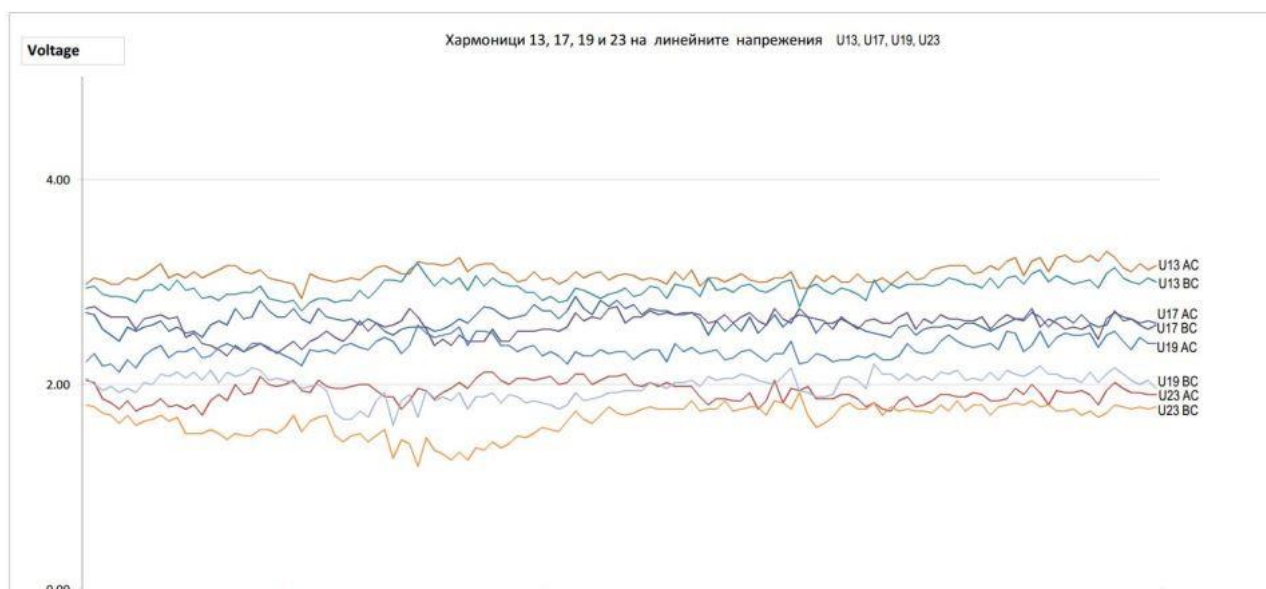
Фиг. 2. Първи хармоник на линейните напрежения



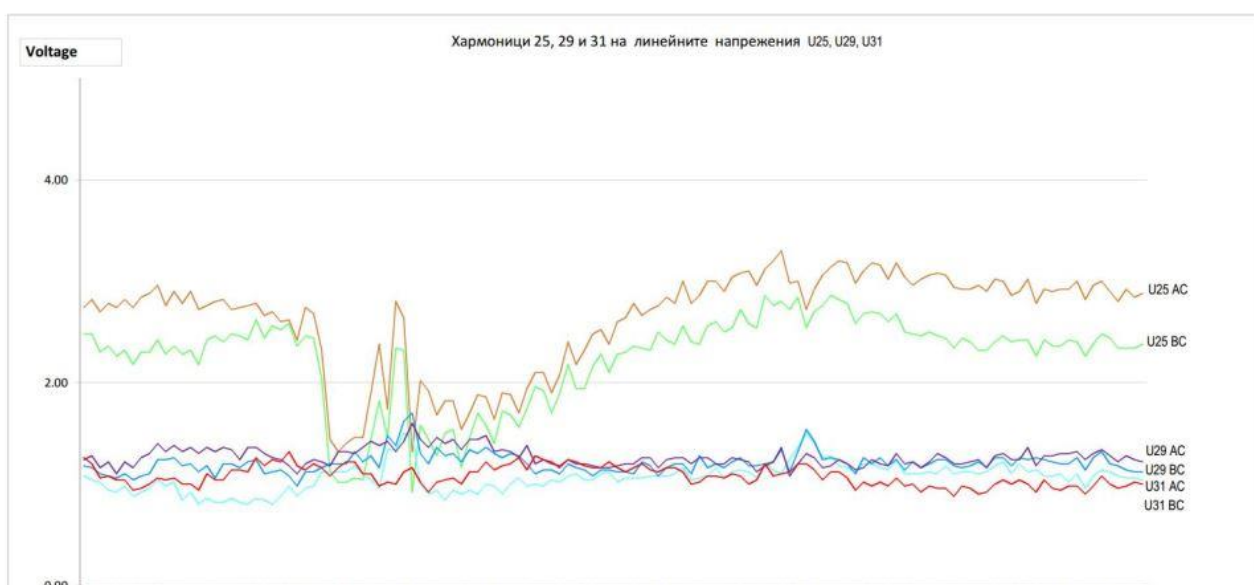
Фиг. 3. Пети хармоник на линейните напрежения



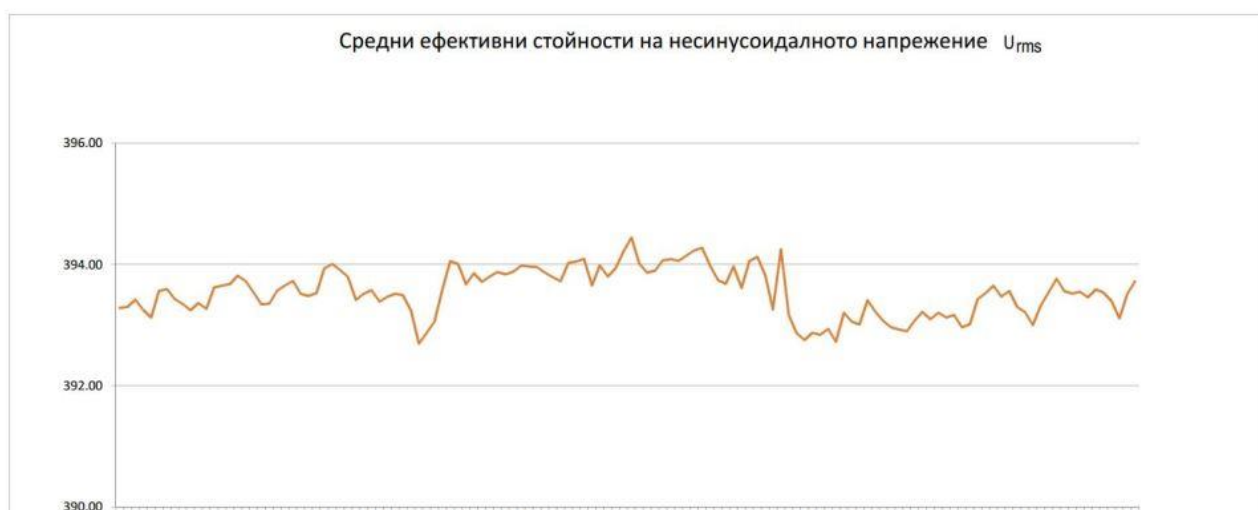
Фиг. 4. Хармоници 7 и 11 на линейните напрежения



Фиг. 5. Хармоници 13, 17, 19 и 23 на линейните напрежения



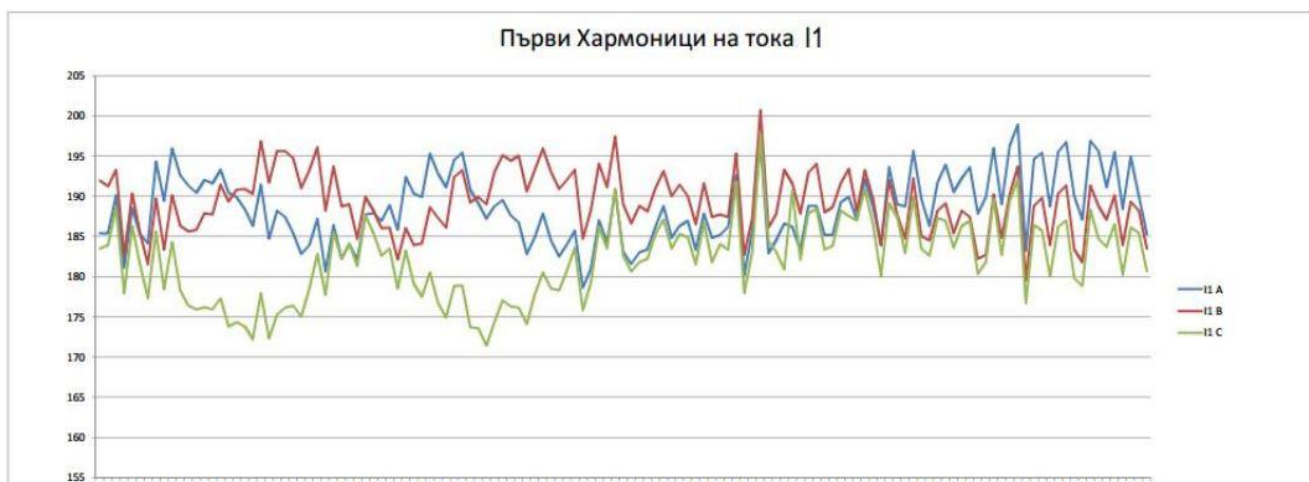
Фиг. 6. Хармоници 25, 29 и 31 на линейните напрежения



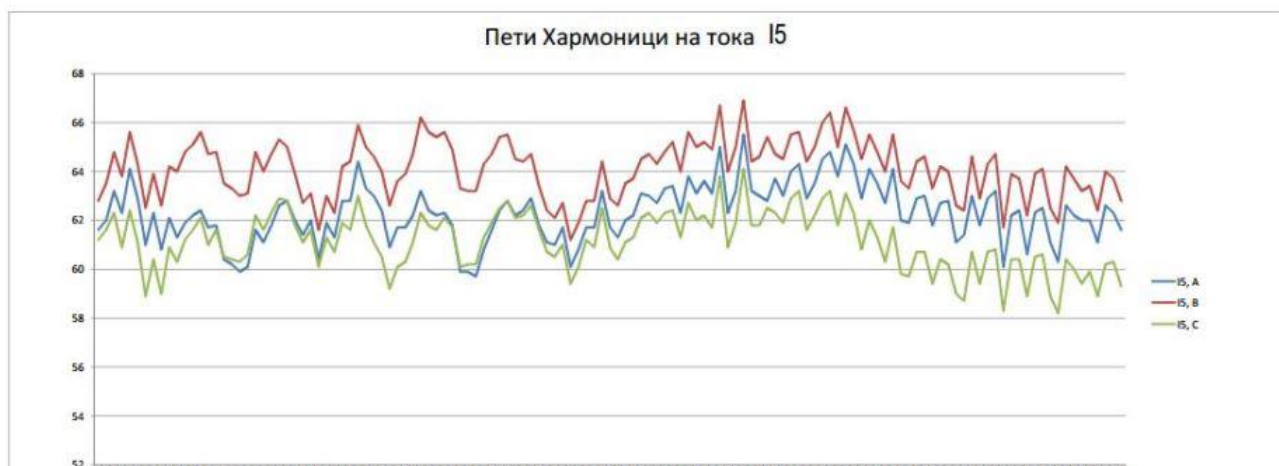
Фиг. 7. Средни ефективни стойности на несинусоидалното напрежение



Фиг. 8. Средни стойности на коефициента на несинусоидалност (THD)



Фиг. 9. Първи хармоници на тока



Фиг. 10. Пети хармоници на тока

Висши хармоници в тока

Симетрията на тока във функция от времето генерира само нечетни хармоници. Измерени са стойности до 49 хармоник на трите тока, съотношението на които се променя непрекъснато при честотна регулация. Осреднени за 1s ефективни стойности на първия хармоник на тока са показани на фиг.9. За периода на измерване средните стойности на токовете в трите фази са съответно 188.48А, 189.26А, и 182,11А. При средна стойност за трите фази $I_{ср.1} = 186.62A$, отклоненията от тази стойност са: за фаза А (+1%), за фаза В (+1,4%) и за фаза С – (-2,4%). Отклоненията както по абсолютна, така и по относителна стойност не са съществени.

Най-изявен е петият хармоник на тока със средни стойности на трите фази съответно 62.32А, 64.13А и 61.15А (фиг.10). Относителното му участие, оценено по (2), е със стойности 33.06%, 33.82%, и 33.58%. Освен 5-тия хармоник, изявени забележимо са 3, 7 и 11 хармоници на тока с осреднени стойности (за трите фази): 5.78А, 18.25А и 13.31А. Данните за висшите хармоници с осреднена ефективна стойност над 5А са дадени в таблица 5.

Таблица 5

Хармоник	Ефективни осреднени стойности на тока, А			Коефициент на хармониците, %		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	188,48	189,26	182,11	-	-	-
3	6,46	6,80	6,09	3,42	3,59	3,34
5	62,32	64,13	61,15	33,06	33,82	33,58
7	18,64	18,00	18,12	9,89	9,51	9,95
11	12,78	13,914	13,23	6,78	7,35	7,26
17	5,22	5,95	5,71	2,77	3,14	3,13

Коефициентът на деформация на тока е

$$K_{di} = \frac{I_1}{I} = \frac{186,62}{343,89} = 0,54, \quad (5)$$

където $I_1 = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3} = 186,62A$ е усреднената за трите фази стойност на първия хармоник. $I = 343,89A$ – усреднената за трите фази ефективна стойност на несинусоидалния ток.

Коефициента за несинусоидалност за тока е

$$K_{н.с. I} (THD)_I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=3}^{49} I_i^2}}{I_1} 100 = 63\% \quad (6)$$

Тази стойност се отнася към мрежите силно замърсени от хармоници ($K_{н.с.} > 50\%$) (БДС EN 50160:2007, БДС EN6100-2-4:2004, БДС EN 6100-3:2004).

Сравнението на коефициентите на деформация по напрежение ($K_{дU} = 0,999$) и по ток ($K_{дI} = 0,54$) показват почти два пъти по-осезателно присъствие на висшите хармоници в тока. Последното количество, определено с коефициентите на несинусоидалност показва, че хармониците в тока имат 15 пъти по-осезаемо присъствие ($K_{н.с. I} = 63\%$) в сравнение с влиянието им върху напрежението ($K_{н.с. U} = 4,2\%$). Този факт се дължи на избраната с порядъчен резерв трансформаторна мощност, която е над три пъти по-голяма спрямо измереното натоварване.

Заклучение

1. Приложението на честотното управление в електрозадвижванията, въпреки използваните апаратни и софтуерни средства за дискриминация на висши хармоници в тока (респективно напрежението), на практика оказва осезателно влияние върху качеството на електроенергията. Това трябва да се отчита при проектиране и експлоатация на електрическите уредби.

2. В аспект електробезопасност са необходими корекции в стандартите и нормативните изисквания за рудничните IT мрежи, в зависимост от относителния дял на висши хармоници в напрежението, по отношение на токове на утечка, допирни напрежения и съпротивленията на заземяване.

3. Апаратите за защита от утечки и апаратите за контролиране на съпротивлението на заземителните мрежи трябва да притежават универсални възможности за приложение в мрежи с и без висши хармоници.

Литература

- Жежеленко, Ив. 1984. Висши гармоник в системите на електрозадвижванията промпредприятиях. М. БДС EN 50160:2007, БДС EN6100-2-4:2004, БДС EN 6100-3:2004.
- Glenney, J. 2012. Electrical Protection from Worker Safety Rock Products.
- Menteshev, M. 1996. Safety in Mine Electric Circuits with Higher Harmonics in the voltage. Deva.
- Дренков, М. 2009. Параметри на заземителния контур за подвижни минни машини в IT системи, съдържащи висши хармоници в напрежението. Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“ т.52.

ДЪЛГОСРОЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ЗАЗЕМИТЕЛИ С ЕЛЕКТРОПРОВОДИМА БЕТОННА ОБМАЗКА

Петър Петров¹, Георги Велев¹, Красимир Иванов¹, Ангел Зъбчев², Ромео Александров²

¹ Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, petrov_p_tu@abv.bg

² Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата статия е естествено продължение на изследванията на съвместно разработени в ТУ – Габрово и МГУ "Св. Иван Рилски" електропроводящи бетони, използвани за намаляване на съпротивлението на заземяване и електрокорозионна защита на заземителите в проблемни райони. На базата на текущи измервания на съпротивлението на заземяване за реални физически модели на такива заземители и тяхното сравняване със стойности, измерени при монтажа на образците от преди почти 5 години, са направени заключения относно устойчивостта на техните параметри във времето.

LONG TERM RESEARCH ON THE STABILITY OF PARAMETERS OF CONDUCTIVE CONCRETE ENCASED GROUNDING ELECTRODES

Petar Petrov¹, Georgi Velevev¹, Krasimir Ivanov¹, Angel Zabchev², Romeo Aleksandrov²

¹ Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, petrov_p_tu@abv.bg

² University of mining and geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The paper presented inhere is a natural sequel of the studies being done in co-operation between TU – Gabrovo and UMG "St. Ivan Rilski" for the development of conductive concretes, used for decreasing the resistance to ground and electrical corrosion protection of grounding electrodes in problematic areas. Conclusions have been made regarding the stability of grounding electrodes' parameters with time, on the base of present grounding resistance measurements for real physical models of concrete encased electrodes buried before almost 5 years and comparing the present measurements results with those measured immediately after their installation.

Въведение

Изграждането на заземителни уредби с ниско нормирано съпротивление на заземяване в райони с недопустимо високи стойности на специфичното съпротивление на почвата е несъмнено голямо предизвикателство пред проектантите. Проблемът се утежнява значително и от факта, че за осигуряване на високо ниво на електро-безопасност и гарантиране на ефективната работа на системите за мълниезащита е необходимо целогодишно, независимо от метеорологичните условия, да се поддържа съпротивление на заземяване със стойност под нормираната от стандарта за съответния енергиен обект.

Специфичното съпротивление на почвените слоеве в планински райони с камениста и пясъчлива почва се променя в зависимост от влагосъдържанието и температурата в широк диапазон – от 500 до 19000 $\Omega \cdot m$ (Adegboyega and Odeyemi, 2011; Венков и Петров, 2002).

За намаляване на разхода на метал и поддържане на устойчиви стойности на съпротивлението на заземяване, в световната практика са намерили приложение материали с голяма специфична електропроводимост за подобряване на съпротивлението на заземяване (Grounding Enhancing

Materials - GEM), които се поставят около електрода в предварително изкопани канали при хоризонталните заземители или в предварително пробити отвори в почвата при вертикалните заземители (Петров и Велев, 2007).

На територията на Технически университет – Габрово преди близо 5 години са монтирани реални физически образци на вертикални и хоризонтални заземители, положени в слой електропроводящ материал, разработен специално за целта в следствие на сътрудничество между Технически университет - Габрово и МГУ „Св. Иван Рилски“ (Петров и Велев, 2007; Велев, 2009).

Настоящият доклад има за цел да установи устойчивостта на експлоатационните параметри на монтираните физически образци на заземители, положени в електропроводящ материал, на базата на извършени измервания на съпротивлението им на заземяване и сравняването им със стойности, измерени при тяхното монтиране. Резултатите от сравнителния анализ са меродавни и относно дългосрочните качества на разработения материал за подобряване на съпротивлението на заземяване.

Тенденции при използването на материали за подобряване на съпротивлението на заземяване

Приложението на материали за подобряване на съпротивлението на заземяване е най-голямо в развитите страни – САЩ, Япония, Канада и др. В Европа приложението на такива материали е все още ограничено.

В нашата страна, нормативната уредба имаща отношение към защитното заземяване, изобщо не засяга въпроса за използване на материали за намаляване на съпротивлението на заземяване. Съществен пропуск в българската нормативна база е и липсата на каквото и да било цялостен стандарт за оразмеряване на заземителни уредби. Някои насоки и технически предписания са посочени единствено в НАРЕДБА № 3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии и НАРЕДБА № 4 за мълниезащитата на сгради, външни съоръжения и открити пространства.

Някои от най-големите разработчици и производители на материали за подобряване на съпротивлението на заземяване са:

- Американско-японската компания Sankosha, която разработва и предлага на пазара подобрител за заземяване с търговската марка San-Earth M5C под формата на високо електропроводима пръст, втвърдяваща се от влагата в самата почва;
- Международната компания ERICO, предлагаща от 1992 г. прахообразен подобрител за заземяване със специфично обемно съпротивление около $10 \Omega \cdot m$ и търговска марка ERITECH GEM25A;
- Harger – Ultrafill earth;

Въпреки, че в нашата страна използването на подобрители за заземяване не е обхванато от нормативната уредба, има няколко разработки на такива материали, един от които е сертифициран и се предлага на пазара:

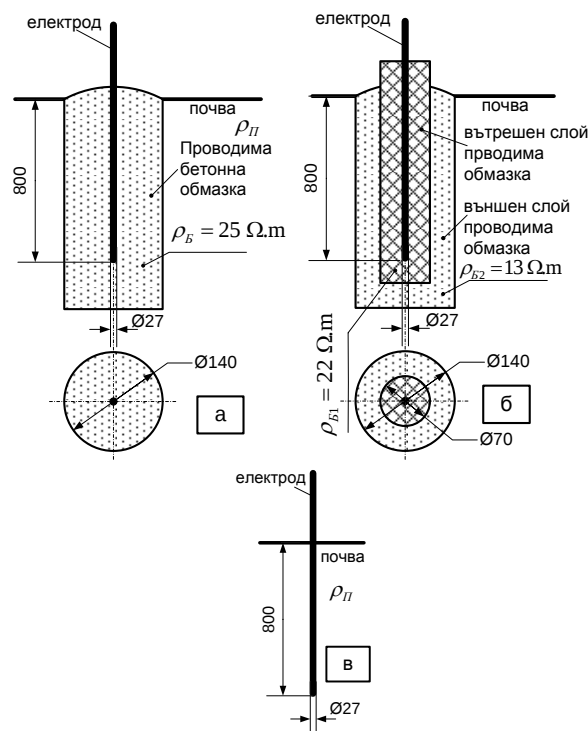
- През 2007 г. екип от ТУ – Габрово и МГУ „Св. Иван Рилски“ разработиха материал за подобряване на съпротивлението на заземяване на базата на цимент, графит и пясък, който не е сертифициран и патентован (Петров и Велев, 2007);
- Българската фирма Парадайз Електрик консулт ЕООД предлага на пазара сертифициран прахообразен подобрител за заземяване с търговската марка „Зевс“.

От направеното проучване проличава, че несъмнено използването на материали за подобряване на съпротивлението на заземяване в българската инженерна практика е целесъобразно и предстои да навлиза все повече при проектирането и изграждането на заземителни уредби на енергийни обекти в страната.

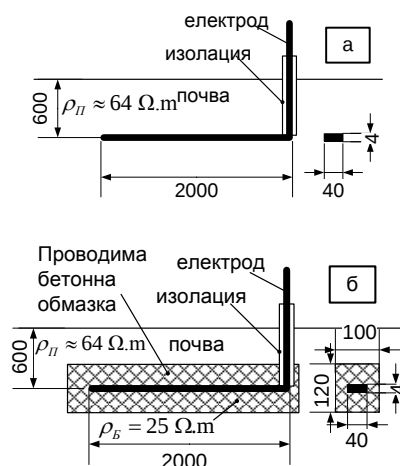
Дългосрочно изследване на параметрите на заземители положени в електропроводящ материал

Във Велев (2009) са публикувани статистически резултати от ежемесечни измервания на съпротивлението на заземяване на хоризонтални и вертикални заземители положени в един или два слоя електропроводящ бетон.

Четири години по-късно измерванията са повторени с цел да се установи устойчивостта на параметрите на заземителите, а също така и на използвания подобрител за заземяване във времето. Геометрията и параметрите на използваните физически образци съгласно Велев (2009) е представена на фиг. 1 за вертикалните заземители и на фиг. 2 за хоризонталните.



Фиг. 1. Скици на физически образци на вертикалните електроди; а) вертикален заземител с еднослойна проводима обmazка; б) вертикален заземител с двуслойна проводима обmazка; в) конвенционален вертикален заземител без обmazка



Фиг. 2. Скици на физически образци на хоризонтални заземители; а) конвенционален хоризонтален лентов заземител без обmazка; б) хоризонтален заземител с еднослойна обmazка.

Резултатите от полеви измервания на съпротивлението на заземяване за електродите от фиг. 1 и фиг. 2, обхващащи един и същ период от годината след монтажа на заземителите и съответно четири години по-късно, са представени в табл. 1.

Таблица 1

Резултати от измерванията за вертикалните заземители по дати

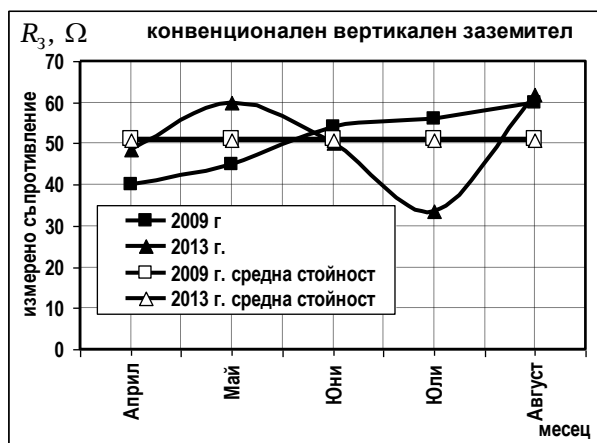
Дата	сезон	Съпротивление на заземяване			Дата	сезон	Съпротивление на заземяване		
		R_B	R_{B1}	R_{B2}			R_B	R_{B1}	R_{B2}
		Ω	Ω	Ω			Ω	Ω	Ω
28.04.09	В	40	29,5	23,5	30.04.13	В	48,5	32	23,5
29.05.09	С	45	36	29	17.05.13	С	60	49	32,5
17.06.09	С	54	38,5	35,2	06.06.13	С	50	38,5	31
21.07.09	С	56	40	36,1	10.07.13	В	33,5	31	19
19.08.09	С	59	41,5	37,8	08.08.13	С	62	60	38
средно		51	37,1	32,3	средно		50,8	42,1	28,8

Таблица 2

Резултати от измерванията за хоризонталните заземители по дати

Дата	сезон	Съпротивление на заземяване		Дата	сезон	Съпротивление на заземяване	
		R_X	R_{X1}			R_X	R_{X1}
		Ω	Ω			Ω	Ω
28.04.09	В	21	14,8	30.04.13	В	23,25	14,7
29.05.09	С	30,5	17,5	17.05.13	С	36	21
17.06.09	С	37,5	20,5	06.06.13	С	29,5	19,5
21.07.09	С	34	21,5	10.07.13	В	16,5	12
19.08.09	С	35,6	23	08.08.13	С	36	30,5
средно		31,7	19,46	средно		28,3	19,5

Информацията от табл. 1 и табл. 2 е представена за по-голяма прегледност в графичен вид и са направени съответните разсъждения:

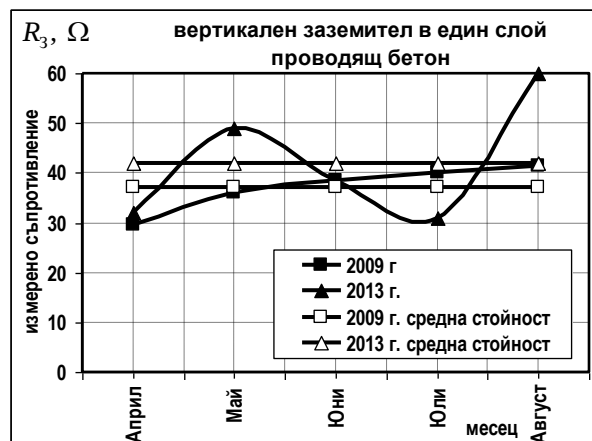


Фиг. 3. Съпротивление на заземяване на конвенционален вертикален заземител измервано през 2009 и 2013 г.

За вертикален конвенционален заземител (съгласно фиг. 3):

- Съпротивлението на заземяване се изменя в един и същи диапазон, като през 2013 г., поради силно променливите метеорологични условия, измерените стойности през различните месеци се различават значително;

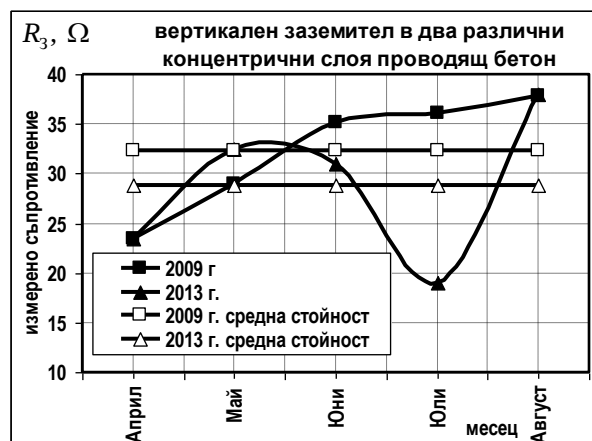
- Средната стойност на съпротивлението на заземяване през 2009 и 2013 г. приблизително съпада, което е индикация, че състоянието на заземителя не се променя с времето;



Фиг. 4. Съпротивление на заземяване на вертикален заземител, положен в един слой проводящ бетон, измервано през 2009 и 2013 г.

За вертикален заземител, положен в един слой проводящ бетон (съгласно фиг. 4):

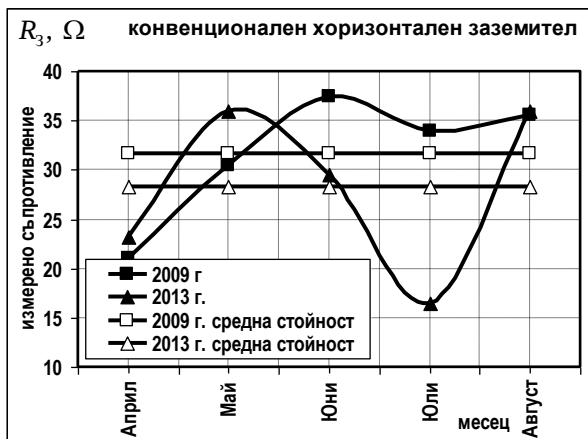
- Измерените стойности за съпротивлението на заземяване през 2013 г. са видимо по-големи от тези през 2009 г.;
- По средна стойност също се забелязва, че след 4 годишен период, съпротивлението се е увеличило средно с 5 Ω (+13,5%).



Фиг. 5. Съпротивление на заземяване на вертикален заземител, положен в два различни концентрични слоя проводящ бетон, измервано през 2009 и 2013 г.

За вертикален заземител, положен в два различни концентрични слоя проводим бетон съгласно фиг. 5:

- Поради по-голямата електропроводимост на вътрешния слой проводим бетон, контактуващ с електрода се забелязва, че съпротивлението на заземяване през 2013 г. е значително по-ниско от това измервано през 2009 г.;
- След период от четири години съпротивлението на заземителя е намаляло средно с 3,5 Ω (-10,8 %);



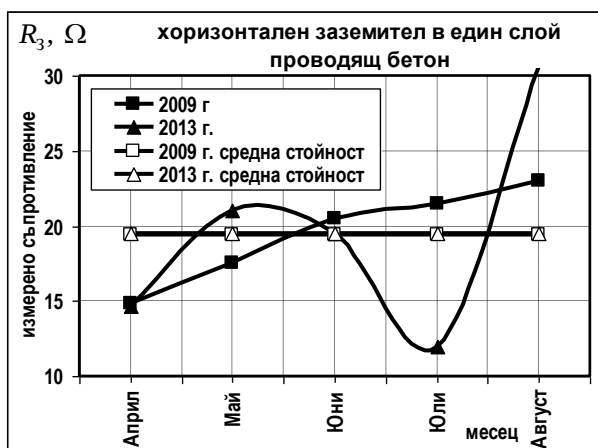
Фиг. 6. Съпротивление на заземяване на конвенционален хоризонтален заземител измервано през 2009 и 2013 г.

За конвенционален хоризонтален заземител (съгласно фиг. 6):

- Има тенденция към намаляване на съпротивлението на заземяване, която се дължи най-вероятно на интензивните валежи през месец юни и юли 2013 г. Освен това, цялата заземителната шина е положена на дълбочина 60 см под нивото на почвата, където изсъхването на почвения слой е по-ограничено. За сравнение, горната част на всички изследвани вертикални заземители е на нивото на земната повърхност.

За хоризонтален заземител положен в един слой проводящ бетон (съгласно фиг. 7):

- Средната стойност на съпротивлението на заземяване през 2009 и 2013 г. е приблизително една и съща. Състоянието на заземителя следователно не се променя с течение на времето.



Фиг. 7. Съпротивление на заземяване на хоризонтален заземител положен в един слой проводящ бетон, измервано през 2009 и 2013 г.

- През месец август 2013 г., съпротивлението на заземяване достига най-голямата си измерена стойност 30,5 Ω, което е с 5,5 Ω (-15,3%) по малко от стойността за конвенционалния хоризонтален заземител със същите размери.

Изводи

- При вертикалния заземител с един слой електропроводима обmazка се наблюдава влошаване на параметрите на проводимия бетон за изследвания период от 4 години. Най-вероятната причина за този ефект е контактът на проводимия бетон със заобикалящата околна среда и относително високото съдържание на цимент и пясък в този подобрител (фиг. 8). В горещите летни дни влагата се изпарява интензивно от горната повърхност на бетона. Поради силно хигроскопичната си същност долната част на бетоновата обmazка абсорбира от заобикалящата почва наличната влага, която се изпарява интензивно в горната част на заземителя. По този начин, в най-сухите периоди на годината, параметрите на заземителят се изравняват с тези на конвенционалния;



Фиг. 8. Монтаж на вертикалния заземител в един слой проводим бетон на нивото на земната повърхност.

- При вертикалния заземител положен в два различни концентрични слоя проводящ бетон параметрите на подобрителят остават непроменени. Това се обяснява с по-голямата електропроводимост на вътрешния слой бетон, контактуващ с електрода, където процентното съдържание на графит и цимент е 50/50 %;
- При хоризонталния заземител положен в един слой проводящ бетон се наблюдава подобрение на параметрите поради липсата на контакт на бетона с околната среда (заземителната шина и заобикалящата я проводима бетонна обmazка са на 60 см под нивото на повърхността, което ограничава в голяма степен външното негативно влияние на околната среда през сухите летни месеци);
- Препоръчва се при използване на електропроводими бетони с графит, като електропроводящ агент, да не се използва пясък, или неговото съдържание да бъде ограничено до минимум;
- Извършените експерименти доказват, че при използване на подобрители за заземяване на циментова основа е абсолютно недопустимо проводимата бетонова обmazка да бъде изложена пряко на атмосферните условия, т.е. да бъде изнесена на повърхността на почвата;
- При монтажа е препоръчително целият обем на използвания подобрител за заземяване да бъде под повърхността на земята на дълбочина минимум 50 – 60 см. Това ще гарантира устойчиви стойности на съпротивлението на заземяване целогодишно, независимо от атмосферните условия и сезона.

Литература

- Adegboyega G. A., O. Odeyemi K., 2011. Assessment of Soil Resistivity on Grounding of Electrical Systems, *Journal of Academic and Applied Studies Vol. 1(3)*, 28-38.
- Венков Г. И., П. К. Петров, 2002. Техническа безопасност, *Габрово Принт*.
- Петров, П. К., Г. Ц. Велев. 2007. Подобряване съпротивлението на заземители чрез използване на проводима обмазка - *Списание „Безопасност на труда и трудова медицина“*, ЕСКАРГО – София, брой 4
- Петров П. К., Г. Ц. Велев. 2007. Изследване на вертикален заземител с проводима обмазка - *Известия на ТУ-Габрово*, Том 34, Габрово, ISSN 1310-6686;
- Петров П. К., Г. Ц. Велев. 2007. Изследване на проводими обмазки, допринасящи за намаляване съпротивлението на заземители – *Международна научна конференция UNITECH'07*, Габрово, ISSN 1313-230X
- Велев, Г. Ц., 2009. Физическо моделиране и статистически анализ на експлоатационните параметри на заземители с проводима бетонна обмазка за приложение в минната индустрия, *Годишник на Минно-геоложкия Университет „Св. Иван Рилски“ – София, Свитък III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините*, ISSN 1312-1820.
- Sankosha Corporation, *San-earth technical review – Practical measures for lowering resistance to ground*.
- http://www.paradise-electric.eu/images/stories/products/zeus_application.pdf

ИЗСЛЕДВАНЕ СТЕПЕНТА НА КОРОЗИЯ НА ЗАЗЕМИТЕЛНИ ЕЛЕКТРОДИ С ПОМОЩТА НА ТРАНСФОРМАТОРЕН ДАТЧИК

Петър Петров

Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, petrov_p_tu@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Корозията на заземителните електроди в разпределителните уредби на електроцентралите и подстанциите е предпоставка за влошаване на съпротивлението на заземяване на територията на обекта, а от там и за неправилната работа на средствата за защита от пренапрежения, релейните защиты, режима на работа на мрежата и най-вече води до опасност за обслужващия персонал при експлоатация на електрооборудването. В тази връзка е разработен математически модел на трансформаторен датчик, с помощта на който в реално време може да се следи степента на корозия на стоманените заземители и по този начин да се реагира своевременно, преди заземителната уредба да стане опасна.

CORROSION RATE STUDY OF GROUNDING ELECTRODES BY MEANS OF A TRANSFORMER SENSOR

Petar Petrov

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, petrov_p_tu@abv.bg

ABSTRACT. The corrosion of grounding electrodes in outdoor switch gear of electrical power stations and substations is a prerequisite for an increase of the resistance to ground at the site's grounding installation. As a result the proper operation of the over voltage protection, the protection systems and the work of the overall power network are disturbed. Also there is an electrical safety hazard for the personnel working with electrical power equipment. In that scope, a mathematical model of a transformer sensor for real time measurements has been developed in order to monitor continuously the rate of corrosion of steel grounding electrodes and respond timely before the grounding installation gets unsafe.

Въведение

Основните цели на заземителните уредби са осигуряване на електробезопасност на хората, надеждност при работа на електрооборудването, осигуряване на отлично контактно съпротивление и връзка между елементите на заземителната инсталация и заобикалящата почва при протичане на аварийни токове през земята и за ограничаване на импулсни пренапрежения от атмосферен и комутационен характер.

За подсибяване на горните изисквания в дългосрочен план трябва да бъде отчитана корозията на металните заземители и елементи, осъществяващи електрическа връзка със земята. Корозията на металните електроди по своята същност представлява разрушаването и последващата загуба на метал, поради нежелано химическо или електрохимическо разяждане на електрода от средата, където е положен. Това от своя страна води до намаляване на активната площ на заземителите, влошаване на контактното им съпротивление с почвата и от там увеличаване съпротивлението на заземяване (Ray et al., 1999; Глазов и Сторожевский, 1978).

Очевидно е, че за отговорни електроенергийни обекти степента на корозия на заземителните електроди в процеса на експлоатация на заземителната уредба трябва да се отчита периодично.

В настоящата публикация е разработен математически модел на трансформаторен датчик за непрекъснат контрол на степента на корозия на цинковани стоманени заземители в състава на заземителните уредби.

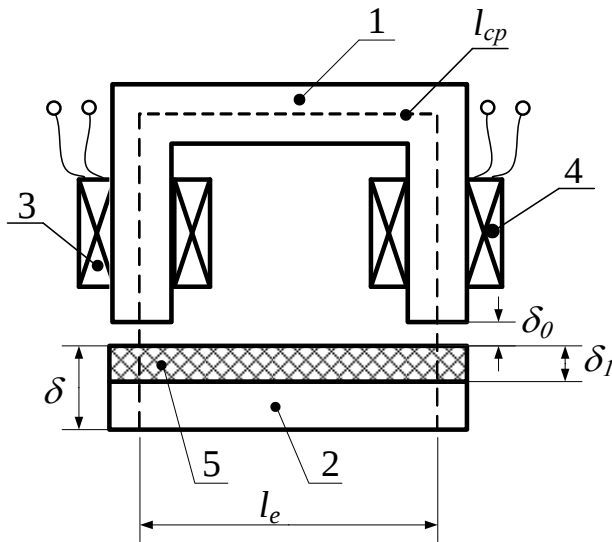
Приложението на такъв датчик в практиката би спомогнало за повишаване на нивото на електробезопасност на електроенергийните обекти и по-устойчива и надеждна работа на електрооборудването.

Принцип на действие на трансформаторния преобразувател

Трансформаторният преобразувател има конструкция, аналогична на индуктивния преобразувател. Отличава се от него по наличието на вторична намотка. Той представлява всъщност трансформатор, на който се подава сигнал на първичната намотка, а промяната на въздушната междина води до изменение на взаимната индуктивност и от там промяна на изходния сигнал във вторичната намотка. Промяната на въздушната междина се дължи на намаляване на сечението на металния електрод в следствие на образуването на корозионен слой.

На фиг. 1 е показана принципната схема на трансформаторен преобразувател, предназначен за констатиране степента на корозия в метални стоманени електроди,

използвани като заземители или свързващите ги метални шини.



Фиг. 1. Принципно схема на трансформаторен преобразувател за контрол на степента на корозия

Трансформаторният преобразувател от фиг. 1 се състои от П - образен магнитопровод 1, на който са монтирани входящата намотка 3 и изходящата намотка 4. Котвата представлява металния електрод на заземителя или металната свързваща шина между електродите. С 5 е показан образувалият се корозионен слой с дебелина δ_1 при начална дебелина на стената на електрода δ . При това изменение на въздушната междина се изменя магнитното съпротивление R_M и взаимната индуктивност M , което от своя страна води до промяна на вторичното напрежение на намотка 4.

Изменението на вторичното напрежение се дава с връзката:

$$\dot{E}_2 = j\omega M \cdot \dot{I}_1, \quad (1)$$

където:

$\dot{E}_2$ - комплексна ефективна стойност на изходното напрежение;

$\dot{I}_1$ - комплексна ефективна стойност на тока в първичната намотка 3.

Известно е, че коефициентът на взаимна индуктивност представлява коефициент, който е пропорционален на отношението между пълният поток на вторичната намотка $w_2 \cdot \Phi_2$ и тока, който протича през първичната намотка:

$$M = \frac{w_2 \cdot \Phi_2}{\dot{I}_1}, \quad (2)$$

където: w_2 - брой навивки на вторичната намотка

Токът, който протича през първичната намотка $\dot{I}_1$ е свързан с магнитодвижещото напрежение F_1 със закона за пълния ток:

$$I_1 = \frac{F_1}{w_1}, \quad (3)$$

където: w_1 - брой навивки на първичната намотка.

От равенство (2), след заместване, може да се получи следния израз:

$$M = \frac{w_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_2}{F_1} = \frac{w_1 \cdot w_2}{R'_M}, \quad (4)$$

където: $R'_M = \frac{F_1}{\Phi_2}$ - взаимно магнитно съпротивление.

Допускаме, че разсейването на магнитния поток е малко, при което може да се приеме следното равенство:

$$\Phi_1 = \Phi_2 \text{ и следователно } R'_M = R_M. \quad (5)$$

Като се вземе в предвид (1) и (4) може да се получи израз за комплексната ефективна стойност на вторичното напрежение $\dot{E}_2$:

$$\dot{E}_2 = \frac{j\omega \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \dot{I}_1}{R_M}. \quad (6)$$

Магнитната верига на трансформаторния преобразувател е аналогична на тази на индуктивния датчик от (Петров и Велев, 2011):

$$R_M = R_{CT} + R_{\delta_0} + R_{\delta_1} + R_e, \quad (7)$$

където: R_{CT} - магнитно съпротивление на П-образния магнитопровод;

R_{δ_0} - магнитно съпротивление на въздушната междина;

R_{δ_1} - магнитно съпротивление на корозирания слой метал; взаимно магнитно съпротивление.

R_e - магнитно съпротивление на резултантното сечение от заземителния електрод (шина).

$$R_{CT} = \frac{l_{CP}}{\mu_{r1} \cdot \mu_0 \cdot S}; R_{\delta_0} = \frac{2\delta_0}{\mu_0 \cdot S}; R_{\delta_1} = \frac{2\delta_1}{\mu_{r2} \cdot \mu_0 \cdot S} \quad (8)$$

$$R_e = \frac{l_e}{\mu_{r3} \cdot \mu_0 \cdot S_1}; S_1 = (\delta - \delta_1) \cdot a, \quad \text{където:}$$

a - ширина на профила на П - образния магнитопровод.

След заместване на стойностите на магнитните съпротивления от (8) в (6) се получава:

$$\dot{E}_2 = \frac{j\omega \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \dot{I}_1 \cdot \mu_0}{\frac{l_{CP}}{\mu_{r1} \cdot S} + \frac{2\delta_0}{S} + \frac{2\delta_1}{\mu_{r2} \cdot S} + \frac{l_e}{\mu_{r3} \cdot S_1}} \quad (9)$$

Магнитните съпротивления в стоманените участъци са много по-малки от тези във въздушната междина и в корозирания слой. Това дава основание те да бъдат пренебрегнати от получения израз (9):

$$\dot{E}_2 = \frac{j\omega \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \dot{I}_1}{2\delta_0 + \frac{2\delta_1}{\mu_{r2}}} \quad (10)$$

Полученият израз (10) е валиден за стойността на $\dot{E}_2$ при наличие на корозионен слой. При отсъствие на такъв (при първоначален монтаж на електрода), изразът ще има вида:

$$\dot{E}_2 = \frac{j\omega \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \dot{I}_1}{2\delta_0} \quad (11)$$

Ако се направи отношението на (10) и (11) се получава:

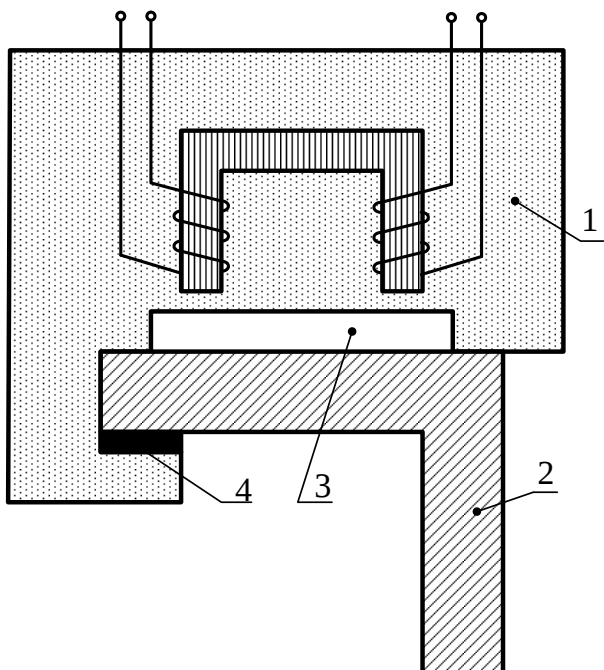
$$\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{2\delta_0}{2\delta_0 + \frac{2\delta_1}{\mu_{r2}}} = K \quad (12)$$

След преработване на (12) може да се получи израз за дебелината на корозирания слой δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{2\delta_0 \cdot (1 - K \cdot \mu_{r2})}{2K} \quad (13)$$

За практическо реализиране може да се построи функционалната зависимост $\delta_1 = f(K)$, което позволява без изчисления да се определи степента на корозия на стоманения електрод.

Практическа реализация на трансформаторен преобразувател за отчитане на степента на корозия



Фиг. 2. Конструкция на трансформаторен преобразувател

Практическата реализация е показана на фиг. 2. Трансформаторният преобразувател се изработва в пластмасова заливка или в заливка от епоксидна смола 1. Оставят се достатъчно дълги изводи към двете намотки. Задължително трябва да има светъл отвор 3 за да не се възпрепятства допира на метала с агресивната почва. С 2 е показан винкелов стоманен електрод. Като такъв може да се използва и стоманена лентова шина. Диелектричната подложка 4 служи за уплътняване и стабилно закрепване на трансформаторния датчик върху стоманения електрод.

Заклучение

- Предложеният трансформаторен преобразувател е лесен за практическа реализация;
- При свързването на такъв датчик към специално проектирана към него микропроцесорна система може да се следи в реално време степента на корозия на стоманените електроди и съединителни шини на заземителни уредби;
- Трансформаторният преобразувател има значително по-добра чувствителност в сравнение с предложения индуктивен датчик в (Петров и Велев, 2011);
- Работата на преобразувателя може да се оптимизира при изменение на честотата f и големината на приложеното върху първичната му намотка входно напрежение U .

Литература

- Ray, G.V., R. Ganesan, S. K. Das. 1999. *The chemistry behind grounding*, 2-nd Crass Road CIT Campus, SAMEER-Centre of Electromagnetics, Taramani, Chennai 113, India.
- Глазов, М. П., И. В. Сторожевский. 1978. *Методы контроля и измерения при защите подземных сооружений от коррозии*, М.
- Галимов, Р.К., А. В. Изосимов et. al. 2003. *Методологические аспекты, стохастической динамики коррозионных процессов*, Защита металов, Том 39, №2, С.200-206.
- Евтихийев Н. Н., Я. А. Кунергимид и др. 1990. *Измерение электрических и неэлектрических величин*. М., Энергоатомиздат.
- Манойлов, В.Е. 1986. *Основы электробезопасности*, Ленинград, Энергия.
- Петров, П. К., Г. Ц. Велев. 2011. *Нов метод за определяне степента на корозия на стоманени заземители чрез използване на индуктивни датчици* – Годишник на Минно-геоложкия Университет „Св. Иван Рилски“ – София, Свитък III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините.

ПРЕДИМСТВА И НЕДОСТАТЪЦИ НА ИЗВЕСТНИТЕ ИЗОЛАЦИИ. КРИТЕРИИ И КЛАСИФИКАЦИЯ ЗА ИЗБОР НА ИЗОЛАЦИЯ СПОРЕД РИСКА ЗА ВЪЗНИКВАНЕ НА КОРОЗИЯ

Теодора Христова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, teodora@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В статията са разгледани различни методи и критерии за избор на изолация. Критериите са класифицирани по важност на базата на теоретични и експериментални данни. Приложени са гранични стойности за прилагане за всеки вид покритие. Въз основа на направената класификация на критериите, с цел постигане на оптимални резултати на защита, е установена необходимостта от изработване на точкова система за избор на изолация в зависимост от скоростта на стареене, почвените условия и материала, от който е изработено съоръжението.

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF KNOWN INSULATIONS. CRITERIA AND CLASSIFICATION FOR SELECTION OF THE INSULATION IN ACCORDANCE TO RISK ASSESSMENT FOR OCCURRENCE OF CORROSION TITLE

Teodora Hristova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: teodora@mgu.bg

ABSTRACT. The article discusses different methods and criteria for selection of insulation. Criteria are classified by importance based on theoretical and experimental data. The limits at application of each type of coatings are enclosed. Having in mind classification of criteria, and in order to achieve optimal results of protection, it is grounded the need for development of a scoring system for selection of insulation in accordance to the speed of aging, soil conditions and the material from which it is constructed facility.

Въведение

Мрежата от подземни комуникационни структури, чрез която се доставят суровини като вода, газ, нефт и други, непрекъснато се разраства. Безаварийната работа на подземните тръбопроводи е свързана с ефективна защита, като тя може да е активна или пасивна. Пасивната защита е изолация, а активната е катодна или протекторна защита.

Първо се избира изолацията, след което при нужда се имплементира и електрохимическа защита. Изборът на покритие зависи от материала на тръбопровода, вида на транспортирания флуид, вида на почвата, през която минава структурата. Това е ключов момент, за да се гарантира живота на инсталираните тръбопроводи, независимо че облицовката представлява само 5% от общата стойност.

Определяне на критерии за избор на изолация

Разнообразието от защитни покрития е огромно и специалистите са затруднени в избора на най-подходящото и затова се ръководят от държавните стандарти. По БДС 15704-83 и БДС 15705-83 се обобщават основните критерии за избор, които са:

1. Механична якост, която осигурява запазване на покритието по време на монтажа (при превозване и полагане на тръбите в изкопите) и от натоварването на почвата при експлоатацията на газопровода.
2. Пластичност, която осигурява поемане на деформациите при въздействието на ниски или високи температури, по време на монтажа и в процеса на експлоатация.
3. Добра адхезия към метала.
4. Изолация срещу провеждане на електрически ток.
5. Устойчивост на биологични въздействия.

Подобни са критериите, действащи и в други държави. Те дават допустими граници, в които трябва да се вмести избраният за облицоване материал, но с тях не може да се направи оценка за избор между две различни алтернативи. В тях не е посочена комбинацията от фактори, които са подходящи за определени почвени и експлоатационни условия. Така например в една глинеста, влажна почва, в която липсват остри предмети и големи камъни са необходими качества като влагонепропускливост, пластичност, биологична устойчивост и добра адхезия. Не се изисква отлична утойчивост на износване. Затова се поражда необходимостта от критерии, според които да се оценят характеристиките на покритията в зависимост от риска от аварии.

Оценка на характеристиките могат да се заимстват от класациите според честотата на възникване на аварии и

причините за това. Те могат да се използват за определяне на тежестта на влияние на факторите при сравняване на няколко алтернативи (Sankara):

1. Съвместимост с катодна защита.
2. Наличие и размер на дупки.
3. Дисбондмент.
4. Образуване на мехури.
5. Адхезия.
6. Кохезия (загуба на сближаване).
7. Просмукване на вода.
8. Проникването на газове.

Според цитираната класация, най-големият дял за авария се пада на проблеми в катодната защита, като рискът се повишава в следния ред на изследваните материали: синтезирана епоксидна смола (FBE), емайл на основа въглищен катран, асфалт емайл, полиетиленова лента, мастик асфалт и уретанови покрития. Недостатък на метода е, че има случаи в практиката, когато не се налага активна защита. Освен това процентът на дефектите е докладван общо, без да се вземат предвид специални условия на средата или на работа, като пренасяне на флуид с висока температура, хлорирана вода, почви с висока корозионна активност, голям диаметър на тръбопровода. Така например промяната на рН на средата води до намаляване на ефективността на катрананата и епоксидната изолации. В почви с високо рН и високо съдържание на въглероден диоксид под тях се развива крекинг корозия т.е. дори с отлични показатели по останалите критерии, то те са несъвместими в такава среда.

Според друго изследване е установено (Vincent, 1999), че най-голям процент на аварии в газопроводите се дължи на загубата на адхезия и кохезия - 48,8%; поява на мехури 26,8%; загуба на покривни механични свойства - 9,7%, преминаване на газове и флуиди - 9,7%, поява на дупчици 9,7%. Цитираните проценти надхвърлят 100%, тъй като в някои от случаите е наблюдавана появата на няколко дефекта едновременно. Според тази класация основни фактори за избор са качества като кохезията и адхезията.

Ясно е, че класацията на аварии не дава еднозначна оценка за важността на всеки фактор и приложимостта на определена изолация. Приложимостта трябва да се определя според конкретни почвени условия. В класациите не се определя съвместимостта на вида на материала на тръбопровода с облицовката. Като цяло класациите на аварии могат да се обединят под общата оценка „скорост на стареене на изолацията на тръбопровода“. При стареенето се променят нейните защитни функции и специфично съпротивление, при което трябва се преизчислява стойността на защитния ток, подаван към комуникацията, но те не са определящи за избор на покритие.

В практиката се използват лабораторни изследвания за прогнозиране на стареенето на облицовките, но повечето са краткосрочни, защото липсват наблюдения и модели за предсказване в дългосрочен план (Shiwei, 2011).

Ето защо е необходима единна система от фактори за класиране на покритията, според целите на всеки проект. В такава система трябва да се включат изискванията по стандарт, наблюденията относно аварииите, резултати от лабораторни тестове, обособени в следните групи:

1. Критериите обосновани от стандарта – съвместимост с материала на тръбата, механична якост, добра адхезия, високо съпротивление, работна температура, пластичност и биологична устойчивост.
2. Инфраструктурни критерии - работа при специални условия, корозионна активност на почвата, диаметър на тръбата, пористост на изолационния материал.
3. Критерии, определящи съвместимостта с електрохимична защита и защита от блуждаещ ток.
4. Цена.
5. История на аварииите.

Стойности на параметрите на изолационните покрития според критериите за избор

Различни специалисти биха имали различни мнения при определяне на подходящата облицовка според тези пет групи от критерии, защото задачата е много трудна поради многофакторността и съвместното въздействие на отделните компоненти от една страна, а от друга припокриването на критериите в отделните групи. Затова е нужно според всеки от критериите, подредени по важност, да се класират органичните материали, като най-често прилагани за подземни тръбопроводи.

1. Резистентност на почвата. Това е най-важният фактор, според който се проектира електрохимическата защита и се избира изолация. Според съпротивлението на почвата се препоръчват следните алтернативи: 0-1000 Ω/m^3 - епоксидно, полимер три слоя от хибриден тип, 1,001-3,000 Ω/m^3 - епоксидно, полимер три слоя от хибриден тип, 3,001-10,000 епоксидно, полимер, полиуретан, >10,001 Ω/m^3 - всички видове покритие, няма нужда от КЗ.

2. Съвместимост с катодна защита. Критериите за съвместимост с катодна защита са:

- липса на екраниращ ефект спрямо защитния ток, според електрическото съпротивление на изолацията [Ωm^2];
- защитна плътност на тока [mA/m^2] за различни периоди от експлоатацията на тръбопроводите [год];
- площ на дефектите спрямо общата площ [mm^2/m^2];
- липсата на отслояване на покритието при действие на катодната защита (дисбондинг);
- максимален (по абсолютно стойност) защитен потенциал в дренажната точка и входно съпротивление на тръбопровода.

За да се оцени нивото на съвместимост на отделните изолации с катодната защита, те трябва да се класират според дисбондинг и стойността на необходимия защитен ток.

Дисбондинг е намаляването на адхезията при действие на катодната защита т.е. по този критерий може да се извърши класация на съвместимите с катодна защита

покрития в следния ред – Емайл (Coal Tar Enamel), Полиетилен, Полиуретан, Епоксидни, 3 слоен полиетилен (3 Layer PE) (Malik; Alan J. Kehr; Shiwei, 2002). При другите материали също може да се използва катодна защита, но при тях по-рано се появява отлепване. Пористата структура на облицовката води до възникването на катодна или анодна деполяризация в резултат на действие

на блуждаещ ток. Най-добра защита от блуждаещ ток има полиетиленът.

По втория критерий от съвместимостта с катодната защита в таблица 1 са дадени стойностите на необходимия защитен ток или потенциал.

Таблица 1

Вид покритие	Дисбондинг	Необходим защитен ток или потенциал
Епоксидно покритие	3,75-4,50 mm	50 $\mu\text{A}/\text{m}^2$
Полимер 2 слоя	6-11 mm	200 μA
Полимер три слоя с мистик лепило	6-11 mm	200 μA
Полимер 3 слоя с кополимер	4-9 mm	200 μA
Полимер 3 слоя нов хибриден тип	7-9 mm	200 μA
Асфалт	Съществува отслояване	250 μA
Катран	Съществува отслояване	Няма КЗ
Емайл - Coal Tar Enamel	2,50 mm - 3.25 mm	100 $\mu\text{A}/\text{m}^2$
Винил	Съществува отслояване	Няма КЗ
Polyether urethanes	Наблюдава се отслояване при $t > 50^\circ\text{C}$ Течен 10-35 mm Твърд 3-15 mm	250 μA
Phenolic resin	Съществува отслояване	Няма КЗ

3. Температура на работа. Това е един от най-важните инфраструктурни критерии за избор, който може да бъде и ограничаващ фактор, защото в практиката съществуват примери за работа при много ниски (-20°C) или много високи температури (над 160°C), при които материалът трябва да издържа продължително време без да се напука. Ето и работните температурни диапазони на някои от често прилаганите органични покрития: епоксидни (FBE) $100-120^\circ\text{C}$, Полимер 2 слоя – до -20°C за долна граница, полимер с мистик лепило – до 40°C за горна граница, полимер с кополимерно лепило над 140°C (препоръчва се за топлопроводи), полимер 3 слоя с хибриден тип – до 110°C , асфалт – до -40°C (препоръчва се за зони на север), катран 60°C (над тази температура започва да пропуска вода), емайл 30°C , винил - в малък температурен диапазон до 30°C , Polyether urethanes 120°C , Phenolic resin над 200°C (Malik, Kuruvila, S. Guan).

4. Образуване на мехури. При наличие на дупки, катодната защита увеличава техния размер и брой. Тъй като образуването на дупки зависи и от комплекс от фактори на средата, не могат да се дадат точни стойности за дефектиране на различните видове изолации.

5. Адхезия е загуба на сцепление. Силата на адхезията е сума от няколко компонента – механично сцепление, полярно сцепление и най-силната компонента е химично сцепление. Механично сцепление е силата на притегляне на покритието към металната основа, полярното е силата на привличане между положителните и отрицателните полюси на субстратите, а химическото е силата на връзките между молекулите. Причините за загуба на адхезия могат да са различни – недобре

обработена повърхност, несъвместимост на материал на тръбопровода с покритието, неспазване на технологията на поставяне и транспорт. Запазването на адхезията намалява в следния ред (разпределението е за стомана): FBE, 3-слоен полимер с ново хибридна свързка, винил, 3 слоен полимер с кополимер, Полиуретан, катран, асфалт, тал, 3-слоен полимер с мистик лепило (Kehr).

6. Кохезия е загуба на сближаване. При много силна адхезия и при слаби връзки в субстрата е възможно той да започне да се цепи на слоеве. Ефектът е по-силно изразен при многослойните изолации и в такива случаи защитата на съоръжението е частична.

Предвид факта, че кохезионната здравина зависи от стойността на адхезионната в повечето изследвания стойностите за кохезията не се дават, а се отбелязва успешното преминаване на теста. Правилото за адхезионната и кохезионната здравина е, че адхезионната трябва да е по-голяма от кохезионната. При изследвания е установено, че когато има отлична кохезия, тръбопроводът е покрит идеално и ниските стойности на защитния ток не достигат до съоръжението, т.е. то е „екранирано“. При дефекти в резултат на загуба на кохезия, защитният ток достига до съоръжението и то е по-добре защитено. Поради такива причини питинг корозия е причинила 40% загуби на тръбопроводи, защитавани с полиетиленови ленти на въглищна основа в Близкия изток, които се отличават с отлична кохезия (Kuruvila, 1993).

7. Просмукването на вода през покритието създава електрохимични клетки, улесняващи условията за корозия. Възниква във водни условия или влажна среда.

Лабораторно се правят различни тестове с вариране на времето за изследване и според едно от тях (Buddhadeb) пропускливостта се повишава в следния ред: 3 слойни полиетелинови ленти - 2.90 g/mm², въглищна лента - 2.96 g/mm², емайл - 3.02 g/mm², епоксидно - 5.84 g/mm², полиуретан - 8.77 g/mm², усилен епоксидни - 9.08 g/mm², полиетиленови ленти - 21.33 g/mm². Изпитанитанията за влагонепропускливост се правят и при добавяне на агресивни вещества като хлор, натриев сулфат и други.

8. Проникването на газове има ограничен ефект върху цялостното разрушаване на облицовките. То възниква при наличие на определени видове газове. В зависимост от експлоатационните условия се прилагат различни тестове. По принцип материалите с по-сложна структура пропускат по-малко газове, т.е. тенденцията е подобна като водопротекливостта (Shiwei, 2002).

9. Издръжливост на механични въздействия и пластичност. Устойчивостта на износване е най-ниска при течните FBE - от 0,38 mm до 0,55 mm, а за полиетилен е 1,10 mm (Malik; Kehr; Kuruvila, 2002; Guan).

10. Специални условия:

- Киселинност. Областите на приложимост според pH са следните: емайл (издържа на всякакво pH, също и на фосфорна киселина); асфалт, винилуретан 2-13 pH; катран – в областта 5-8 pH; полиетилен за всички видове 6-8 pH; епоксидни – под 8 pH; Phenolic resin – над 8 pH (Malik; Kehr; Guan).

- Съдържание на нитрати. Съдържанието на нитрати в почвите се повишава в резултат на наторяването. Редът на издръжливост е: емайл, винил, полетилен, полиуретан.

- Вид на почвата. За всеки материал са дадени особеностите на прилагане: FBE – за засолени, абразивни, влажни почви; полимер – за мергели, глина; тал – за каменна и глинеста; асфалт – за глина; катран – за глина; емайл – не издържа на органични замърсители, глинеста и засолена почва; винилът и Phenolic resin са подходящи при глинеста, приливо-отливна зона, сладководни; полиуретан не издържа на засолени почви.

- Съдържание на бактерии, редуциращи сулфатите до сулфи. На бактерии издържат: емайл, полиетилен, катран, асфалт, FBE, а не издържат - винил и полиуретан.

- Соленост. Хлорид, съдържащият разтвор в почвата има високото осмотично налягане, което допринася за проникване на влага, загуба на сцепление, поява на мехури и дисбондинг. Ето защо максимално допустимото ниво на хлориди е 2 µg/cm² според NACE стандарти. Солеността се изследва съвместно с други показатели като температура на работа или влажност на средата, ето защо липсват конкретни данни в литературата.

11. Инфраструктурни фактори

- Диаметър на тръбата. Катран, емайл, епоксидно покритие и полимер с кополимер са подходящи за тръби над 660 mm в диаметър, в диапазона 660-100 mm в диаметър се избират винил, асфалт, и полимер с мистик лепила, а за по-малки тръби - полимер 2 слоя, тал (Kehr).
- Материал на тръбата - чугун или стомана. За стомана повечето органични материали имат

отлични защитни свойства, но за чугун се препоръчва полиетилен (Maillard, 1985).

- Експлоатационен период. Повечето разгледани изолации издържат до 30 години, а винилът 20 години.
- Тестване и поставяне. Асфалт, катран, Phenolic resin, полиуретан и полимер се поправят лесно, епоксидното покритие и винилът имат по-трудоемка поправка, а емайлът се реновира най-трудно.

12. Цена на облицовките. Независимо, че представлява само 5% от цената на тръбопровода, при не добре избрано покритие разходите за поддръжка и ремонт могат да са много високи. При оценка на две близки по всички други характеристики алтернативи, въз основа на фактор цена се избира икономически изгодното предложение. Цената се формира от три основни компонента – поставяне, обслужване на съоръжението (разход за електроенергия, ремонти), експлоатационен период. Ниска цена имат катран и полимер от хибриден тип, средна – асфалт, емайл. Останалите имат висока цена.

13. История на аварияте. По този показател безспорен фаворит е полиетиленът.

Ако по предложените критерии се сравнят FBE (екструдирана епоксидна смола), полиетилен и полиуретан (работят в близък температурен диапазон и са съвместими с КЗ), може да се стигне до следните изводи: полиуретанът има максимално сцепление, докато полиетиленът има минимални себестойности. По издръжливост на катодна защита най-добър е FBE, а най-лоши показатели има полиуретанът. Полиуретанът пропуска вода, а в някои модификации като Aqualine 600 A се наблюдава образуване на мехури (Guan). При пропускливост на газ полиуретанът издържа най-малко. FBE изисква най-ниска стойност на защитния ток, а най-висока – полиуретанът. От друга страна е установено, че във влажна среда се наблюдава катодно отлепване между епоксидната и полиетиленовата част за трислоен полиетилен при температури много по-ниски от работните (60°C) по спецификации (Melot, 2009), което показва, че при съвместното действие на няколко фактора се променя устойчивостта на съответния материал.

Въз основа на направения анализ и дадените примери трудно може да се избере покритие, дори ако се включат диференциращи фактори като цена и диаметър на тръбопровода. Освен това на пазара непрекъснато се въвеждат новости като производството на тръбопровода от специални стомани, което позволява стените да са по-тънки. Това налага нови изисквания при полагането на защита, защото при нагряване на стоманата с висока температура над 230°C (каквато е температурата на полагане на FBE), се нарушават нейните якостните качества. Затова е разработено ново епоксидно покритие - НРСС, което се полага при температура от 174°C т.е. по-ниска от стандартната (Vincent, 1999). Друга тенденция е за отдалечени райони производство на тръби с голям диаметър, което създава предизвикателства при поставянето на трислойни ленти над заваръчните шевове. (Vincent, 1999).

Наличието на толкова много критерии прави трудна оценката на приложимостта на всяка изолация. Във всяка среда има различни фактори, които действат синергично и предложените примери не винаги могат да се използват за получаване на реална представа за защитните свойства на разглежданите материали. Съществуват и специфики при полагането като например епоксидните изолации могат да се полагат твърди (на прах) или течни (да се облива тръбопровода). В зависимост от метода на нанасяне се придобива различна адхезия, кохезия, катодно отлепване, екраниране на защитния ток, пластичност и други. За постигане на реална представа за предимствата и недостатъците на определено покритие спрямо друго са необходими допълнителни тестове съобразно конкретните условия на експлоатация.

Извод

Изброените критерии дори и подредени по важност не са единна система, според която да се направи избор на пасивна защита. Ето защо се налага да се изработи точкова система, в която всеки фактор участва в предложеният модел с определена тежест на влияние, според който се определя ефективността на разглежданата изолация за конкретния случай. В крайна сметка, в зависимост от влиянието си, всеки фактор получава определен брой точки. Степента на пригодност (ефективност) на покритието се определя от сбора на точките на отделните компоненти.

При създаването на такава точкова система тежестта на влияние на всеки фактор ще намалява в реда, който е описан в статията. Предложената подредба е насочваща. Отделните критерии могат да променят реда си или посочените гранични стойности в зависимост от стандарта, условията на проекта или преценката на специалиста. Предимство на тези модели е, не само комплексната оценка на няколко фактора, но и възможността за количествена оценка на всеки фактор според експлоатационните и инфраструктурни особености.

Литература

- Anees U. M., Shahreer Ahmad, Ismail Andijani Fahad Al-Muaili, T.L. Prakash and John O'Hara. CORROSION PROTECTION EVALUATION OF SOME ORGANIC COATINGS IN WATER TRANSMISSION LINES¹. Research & Development Center, Saline Water Conversion Corporation, P.O. Box # 8328, Al-Jubail 31951, Kingdom of Saudi Arabia.
- Alan J. Kehr and David G. Enos. FBE, a Foundation for Pipeline Corrosion Coatings, 3M Company Corrosion Protection Products, Department 6801 River Place Blvd. Austin, TX.
- Buddhadeb Duari. Mr. Buddhadeb Duari, Effect of Water Vapour Permeability on Cathodic Disbondment of Pipeline Coating Materials file:///D:/st_2013/JCSE%20Volume%2013%20Preprint%2045.htm
- Kuruwila Varughese „Coatings and Cathodic Protection for Underground Pipelines - What a Corrosion Engineer Should Know.” Engineering & Product Manager DuPont Powder Coatings, Abstract U.S.A. 9800 Genard Rd. Houston, TX 77041.
- Kuruwila Varughese, 1993. In Situ pipeline Rehabilitation techniques, equipment improved, Al-Qahtani pipe coating terminal Dammam, Saudi Arabia, Oil & Gas Journal, June, 21.
- Mailliard J., 1985. Polyurethane Resin Base External Coating for the Protection of Buried Ductile Iron Mains, Proceedings of the 6th International Conference on the Internal and External protection of Pipes, Nice, France, November, Paper F1.
- <http://committees.api.org/pipeline/ppts/docs/decadefinal.pdf>
- Melot D., G. Paugam, and M. Roche, Total SA, France Disbondments of Pipeline Coatings and Their Effects on Corrosion Risks, J P C L S e p t e m b e r 2 0 0 9, 18-31.
- Sankara Papavinasam, Michael Atiaro, R. Winston. External Polymeric Pipeline coating Failure Modes, *Materials Technology Laboratory*.
- S. Guan, P. Mayes; A. Andrenacci, D. Wong. ADVANCED TWO LAYER POLYETHYLENE COATING TECHNOLOGY FOR PIPELINE PROTECTION, Bredero Shaw & Shaw Cor.
- Shiwei William Guan. 2002. 100% Solid Polyurethane and polyurea coatings technology: chemistry, selection and application, The 2th China International Corrosion Control Conference, Beijing, R.P China, Nov 4-8.
- Shiwei William Guan. 2011. Challenges and New Developments in Pipeline Coating Technology, PetroMin pipeliner, oct-dec, 36-47.
- Vincent, L.D., 1999. Failure Modes of Protective Coating – Who is at Fault, *Materials Performance*, 38, (4), 38.

СЪБИРАНЕ И ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ЕНЕРГИЯ ЧРЕЗ АВТОНОМНИ МИНИАТЮРНИ ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНИЯ

Станко Нешев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: stneo@xars.eu

РЕЗЮМЕ. Изчерпването на природните енергийни ресурси, замърсяването на околната среда, увеличаването на енергийните потребности в ежедневието и промишлеността налагат използването на автономни възобновяеми източници на енергия. В резултат на природни явления и човешка дейност се отделят неголеми количества различна енергия, която би могла да бъде преобразувана в електрическа и използвана за захранване на устройства с ниска консумация. Основните принципи на преобразуване на енергията използвани в Energy harvesting са електромагнитни, термоелектрични, пиезоелектрични, електростатични и фотоволтаични. Неоспорими области на приложение са всички електрични консуматори използващи батерии и акумулатори.

COLLECTION AND ENERGY CONVERSION THROUGH AUTONOMOUS MINIATURE POWER SUPPLIES

Stanko Neshev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, E-mail: stneo@xars.eu

ABSTRACT. Depletion of natural energy resources, environmental pollution and increasing energy needs in daily life and industry require the use of autonomous renewable energy. As a result of natural phenomena and human activities are released small amounts of different energy that could be converted into electricity and used to power devices with low consumption. Main principles of energy conversion are electromagnetic, thermoelectric, piezoelectric, electrostatic and photovoltaic. Compelling application areas are all electric consumers using batteries.

Въведение

В резултат на природни явления и човешка дейност се отделят неголеми количества различна енергия, която би могла да бъде преобразувана в електрическа и използвана за захранване на устройства с ниска консумация. Този процес на улавяне или събиране на енергия е популярен с термина Energy Harvesting. Основната цел на тези технологии е захранване на малки безжични автономни устройства работещи в специфична среда и условия (Mitcheson, P., 2008; Roundy, S., 2004; Williams, C., 1995; Joon Kim, 2010; <http://venividiviki.ee.virginia.edu>).

Тази група консуматори се нуждае от много малко електроенергия, а осигуряването и чрез конвенционалната електрическа мрежа е в някакъв аспект неудобно или дори невъзможно. Характерен пример на приложение в минно-добивния отрасъл са безжичните сензори и модули работещи в комуникационните системи. Класическата алтернатива за тях е захранване с батерии или акумулатори, при което се генерират значителни разходи и се замърсява околната среда. Необходимата им енергия може да се извлича и от естествени източници като: светлина, топлина, вятър, вода, кинетична енергия и др. Получената от едно Energy Harvester устройство енергия е с ограничен капацитет но прилагани в система, съществуват технологии посредством които се генерират мощности от няколко вата.

Използването на подобни устройства в миннодобивната промишленост и геологията е ефективно при сензори за контрол на състоянието на статични конструкции и съоръжения, машини и превозни средства, както и за получаване на постоянна информация за околната среда.

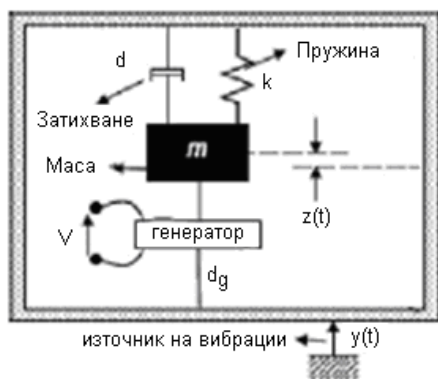
Предвид пространствената разсретеност на производството в отрасъла и потребността от постоянно проследяване и измерване на редица параметри в реално време, Energy Harvesting технологиите безспорно биха били ефективен заместител на използваните в момента батерии.

Класификация на автономните миниатюрни източници на енергия

Електромагнитни източници

Електромагнитните Energy Harvesters преобразуват механичното движение на постоянен магнит спрямо фиксирана бобина в променливо напрежение. Движението може да е в резултат на машинни вибрации и механични въздействия от всякакъв тип.

На фигура 1 е представена принципната схема на подобен електромеханичен източник на енергия (<http://www.nipslab.org>).



Фиг.1. Електромеханичен източник на енергия

Движението се описва с диференциалното уравнение :

$$m\ddot{z} + (d + d_g)\dot{z} + kz = m\ddot{y} \quad (1)$$

$$m \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + (d + d_g) \cdot \frac{dz(t)}{dt} + k \cdot z(t) = m \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (2)$$

където:

m – подвижната маса;

z – движението на масата;

d – съпротивлението на въздуха и триенето на плъзгащите повърхности;

d_g – съпротивлението, което се създава при преобразуване на механичната енергия в електрическа;

k – константата на пружината;

y – амплитудата на входните вибрации.

Мощността P_{rez} , разсейвана в съпротивлението, което се създава при преобразуване на механичната енергия в електрическа е пропорционална на електрическата енергия на генератора.

$$P_{rez} = \frac{m \cdot \omega_{rez} \cdot g_g |Y|^2}{4 \cdot (g + g_g)^2} \quad (3)$$

където: $g = d/2m\omega$ и $g_g = d_g/2m\omega$ са коефициенти на затихване, а Y е амплитудата на входните вибрации.

Максимална мощност P_{rez} се постига, когато отместването Z е максимално.

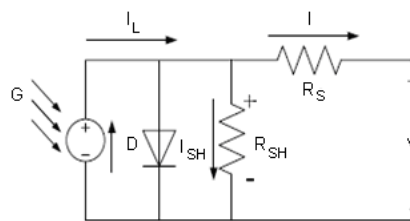
Този вид електромагнитни източници генерират мощност от порядъка на 1 mW/cm^2 .

Фотоволтаични източници

Фотоволтаичната енергия е практически неизчерпаем източник с малко или липсващи неблагоприятни въздействия върху околната среда. Обикновено електрическите характеристики на фотоволтаичната клетка са отношение между напрежение и ток, и напрежение и мощност.

Еквивалентна схема на една слънчева клетка е показана на фигура 2, (<http://www.dateconference.com>, M. Ferri, 2009) и представлява източник на ток, свързан паралелно с диод. Енергията, произведена от източника на ток, е

пропорционална на светлината, падаща върху клетката. Когато е тъмно, слънчевата клетка не е активно устройство и работи като диод.



Фиг.2. Заместваща електронна схема на фотоволтаична клетка

Основните зависимости, пряко свързани с работата на слънчевата клетка са: температурната зависимост от наситеността на диода, температурната зависимост на тока и съпротивлението R_s , ограничаващо входния и изходен ток.

Този вид фотоволтаични източници генерират мощност от порядъка на 100 mW/cm^2 .

Пиезоелектрични източници

Наименованието им (Piezoelectric EH) се дължи на използването на пиезоефекта, представляващ създаване на електрическо напрежение вследствие на механични деформации. Най-често се използват вибрациите, характерни за всички машини.

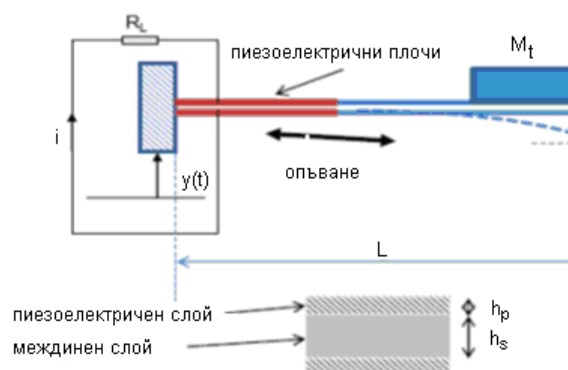
Еквивалентна схема на пиезоелектричен генератор е показана на фигура 3.



Фиг. 3. Пиезоелектричен генератор

Генерираната мощност варира от няколко стотици микровата до няколко десетки миливата и практически зависи линейно от амплитудата и честотата на вибрациите.

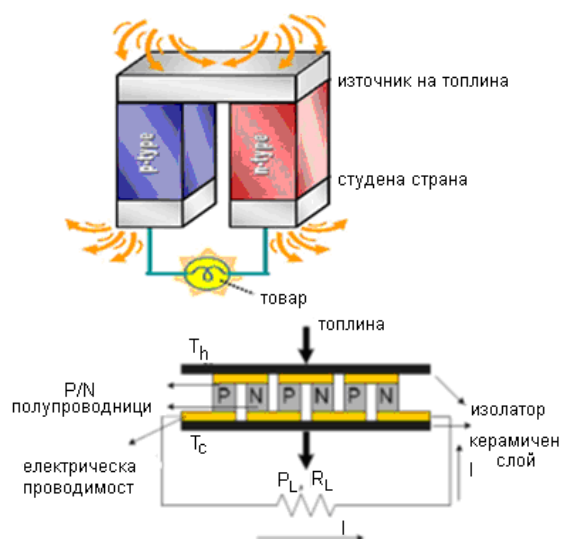
Принципното устройство на пиезоелектричния наногенератор е изобразено на фигура 4 (Poulin G, 2004, Beeby, S., 2006, Zhu D, 2010, <http://www.nipslab.org>).



Фиг.4. Принципно устройство на пиезоелектричен генератор

Термоелектрически източници

Термоелектричните източници (TEG) се основават на ефекта на Зеебек, който представлява появата на електрическо напрежение между два различни проводника с температурна разлика между тях (фиг.5) (R.J.M. Vullers 2009). Те преобразуват топлинната в електрическа енергия, чиято големина е пропорционална на температурната разлика и коефициента на Зеебек на проводниците. При големи негови стойности може да се получи значителна енергия при малка температурна разлика, като засега най-добри са p- и n-полупроводниците от бисмутов телурид. Напрежението върху прехода между тях е около 0,7 V, а за по-големи стойности се свързват последователно повече преходи, които конструктивно се поставят между две керамични пластинки.



Фиг.5. Принципи на TEG

Предимствата на TEG са липсата на движещи се части, високата надеждност и дългия експлоатационен срок (около 20 години), към които се прибавя и възможността за обратно преобразуване на електрическа в топлинна енергия и съответно работа като нагреватели.

Основен недостатък е малкият к. п. д. с типични стойности около 10%, който намалява дори под 5% при малка температурна разлика. За неговото повишаване се търсят материали с малко електрическо и голямо топлинно съпротивление, които да могат да работят при голяма температурна разлика.

Спрямо галваничните елементи TEG позволяват добиване на по-голяма енергия от единица обем за по-дълъг експлоатационен срок.

Разработват се и миниатюрни TEG (Micro-TEG) с много малка мощност, приложими за ръчни електронни часовници с напрежение около 0,2 V и мощност между няколко и няколко десетки mW, както и тънкослойни с мощност 1,5 mW при площ 0,5 cm².

Електростатични (капацитивни) източници

Електростатичните източници ЕН (Electrostatic EN, Electrostatic Generator) използват промяната на количеството електричество и съответно натрупаната

енергия в кондензатор при движение на една от неговите пластини.

Понастоящем са известни експериментални модели главно на основата на MEMS технология. Един от тях осигурява 100 mW при вибрации с амплитуда 20 mm и честота 1,2 kHz, а друг - 0,12 mW при амплитуда 1 mm и честота 45 Hz.

Специфична особеност на тези ЕН е необходимостта от захранващ източник (обикновено батерия) с напрежение няколко V, който да осигури първоначалния заряд на кондензатора. На фигура 6 е представен принципът на действие на електростатичните микрогенератори (Beeby, S. P, 2006).



Фиг. 6. Принцип на действие на електростатичните микрогенератори

Електростатичната енергия, съхранявана в кондензатор, се изразява с уравнението:

$$E = \frac{1}{2} Q \cdot V = \frac{1}{2} C \cdot V^2, \quad (5)$$

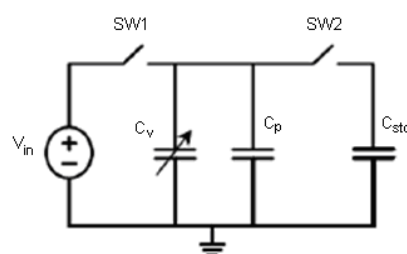
където: Q е зарядът, а V — потенциалът.

Капацитетът от своя страна е равен на

$$C = \epsilon_r \epsilon_o \frac{A}{d} \quad (6)$$

където: A - площта на припокриване на пластините;
 d - разстоянието между пластините;
 ϵ_o - диелектричната проникваемост на вакуума;
 ϵ_r - относителна диелектрична проникваемост на диелектрика.

На фигура 7 е показана заместващата схема на електростатичен генератор.



Фиг. 7. Заместващата схема на електростатичен генератор

Максималната потенциална енергия за един цикъл, която може да бъде добита, се определя по формулата.

$$E = \frac{1}{2} V_{max} V_{in} \Delta C \quad (7)$$

където $\Delta C = V_{max} - V_{min}$, а V_{max} представлява максимално допустимото напрежение.

Съвременни приложения на Energy Harvesting технологиите

Съществуващите и очакваните приложения на TEG са твърде разнообразни. Все по-често те се използват в самолети, където температурната разлика между кабината и околния въздух може да надхвърли 50°C. В някои космически апарати TEG осигуряват мощност до няколко киловата, като топлината се получава от радиоактивен източник на основата на полоний-238. На същия принцип, но с използване на тритий, е реализиран и се предлага TEG с 125 mW/cm³ и експлоатационен срок над 12 години.

Пиезоелектричните системи се използват при контрол на състоянието на статични конструкции, като мостове, сгради, железопътни линии и други подобни съоръжения.

Увеличаването на вибрациите над определена граница означава наличие на предпоставка за повреда. Същевременно тези ЕН генерират енергия за захранване на комуникационните модули, които осъществяват връзка с управляващите терминали.

ЕН се използва за контрол на състоянието на пациенти. Основното чрез тях се захранват монтирани на кожата имплантирани сензори за следене на жизнените функции на възрастни и рискови пациенти. ЕН могат да се използват и за захранване на слухови апарати.

Не трябва да се пренебрегва и приложението на ЕН за наблюдение на околната среда. В предприятията с опасни производствени процеси се налага чрез сензори да се следи за наличието на вредни вещества във въздуха и водата. В земеделските стопанства се контролират параметрите на почвата - влажност, соленост и др.

ЕН могат да се използват и в битови устройства с малка консумация като например Bluetooth устройства, електронни часовници, радиоприемници и калкулатори. Инсталирането на електрически и комуникационни инсталации също може да бъде облекчено чрез безжични задаващи и изпълнителни модули.

Специфични особености на ЕН са малкото количество произвеждана енергия и генерирането и само в определени моменти от време. За осигуряване на непрекъснато захранване те трябва да съдържат подходящ елемент за съхранение на енергията.

Приложение в областта на миннодобивния отрасъл

Безспорни области на приложение на Energy Harvesting технологиите са случаите когато има трудности при реализиране на захранването на консуматори, намиращи се в структурата на разсредоточени системи за

мониторинг. Това е често срещано явление в областта на минно-добивното производство.

Друга възможна област на приложение са транспортните системи, които са основно звено на съвременните рудници. Те изискват сравнително сложна организация на движението, което успешно се компенсира с усъвършенстването на средствата за сигнализация. Тази сигнализация може да се захранва от пиезоелектрични източници, които преобразуват вибрациите в електрическа енергия.

Сензорите, които регистрират наличието на взривни газове, могат да се захранват от термоелектрични генератори, като информацията се предава чрез безжична връзка. По този начин се намалява опасността от възникване на искра и улеснява инсталацията и проектирането на сигналната система.

Отчитането на налягането в газопроводи, намиращи се на отдалечени и труднодостъпни места, може да се подsigури с датчик за налягане, свързан към GPRS модул, който изпраща информацията на определени интервали от време, като захранването на тази система се осигурява от соларен панел.

Друг пример на приложение е отчитането на нивото на водата в сондажи при черпене на определени количества и възстановяването и от природните ресурси. Най-често тези сондажи се извършват на отдалечени места, където няма електричество и се налага използването на алтернативни източници на енергия.

Монтирането на TEG на ауспуха на дизелови двигатели може да осигури значителни мощности. Такива експериментални TEG са с мощност между няколко десетки вата до малко над 1 kW. С това се намалява разходът на гориво и се очертава възможност за замяна на алтернатора с TEG.

По подобен начин работят TEG, монтирани върху тръба с топла вода. При обем 10 cm³ и температурна разлика от 30 °C те осигуряват мощност до десетки mW.

Заклучение

Като цяло концепцията на настоящата статия е свързана с анализ на основните принципи на преобразуване на енергията от автономни миниатюрни преобразуватели. Разгледани са основните принципи на автономните миниатюрни преобразуватели - енергоизточници от гледна точка на необходимостта от повишаване на ефективността на енергозахранването и търсенето на алтернативни източници на икономически изгодна за минно добивния отрасъл енергия. За съжаление количествената оценка на ефективността им се явява сложна задача и за постигане на реален ефект предстои да се извършат още редица научни и приложни изследвания.

Очаква се автономните миниатюрни захранващи източници в бъдеще да удовлетворяват информационните потребности на мобилните системи с което да увеличат и

ефективността на контролно диагностичните системи в разсредоточените производства.

Литература

- Mitcheson, P. D., E. M. Yeatman, et al., 2008. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices" *Proceedings of the IEEE* 96(9): 1457-1486.
- Roundy, S., P. K. Wright, et al., 2004, *Energy Scavenging For Wireless Sensor Networks with special focus on Vibrations*, Kluwer Academic Publisher.
- Williams, C. B. and R. B. Yates, 1995. Analysis Of A Micro-electric Generator For Microsystems. *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX. Transducers' 95. The 8th International Conference on* 1.
- Beeby, S. P., M. J. Tudor, et al., 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* 17(12): R175-R195.
- Zhu, D., M. J. Tudor, et al., 2010. Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review. *Measurement Science and Technology* 21: 022001.
- Joon Kim, K., F. Cottone, et al., 2010. Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications. *Bell Labs Technical Journal* 15(2): 7-29.
- M. Ferri, D. Pinna, E. Dallago, and P. Malcovati, Integrated micro-solar cell structures for harvesting supplied microsystems in 0.35- μm CMOS technology in *Proceedings of IEEE International Conference on Sensors*, pp. 542-545, October 2009.
- R.J.M. Vullers et al. Micropower energy harvesting, *Solid-State Electronics* 53, 2009.
- http://venividiwiki.ee.virginia.edu/mediawiki/images/4/4f/E-Harv_Documentation_v1.1.pdf
- <http://www.nipslab.org/files/file/nips%20summer%20school%202011/Cottone%20Introduction%20to%20vibration%20harvesting.pdf>

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПРОМИШЛЕНА СИСТЕМА ОБОГАТИТЕЛНА ФАБРИКА НА "ГОРУБСО-КЪРДЖАЛИ" АД НА БАЗА СТАТИСТИЧЕСКИ ДАННИ И ИЗПОЛЗВАНЕТО ѝ ПРИ ПРОГНОЗИРАНЕ НА СПЕЦИФИЧНИЯ РАЗХОД

Владимир Петков

Филиал -Кърджали на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски" - София, 6600 Кърджали

РЕЗЮМЕ. Предлага се извеждане на аналитичен израз на енергийната характеристика на промишлена система преработваща златосъдържаща руда. Методиката се основава върху апроксимация със степенен полином на реални данни за консумираната електроенергия и количествата преработена руда, регистрирани по месеци за 18 месечен период. Аналитично се извежда постоянния разход на електроенергия и се анализира сезонното влияние върху разходната норма.

DEFINING THE POWER CHARACTERISTIC OF THE INDUSTRIAL SYSTEM ENRICHMENT PLANT "GORUBSO-KARDZHALI" PLC BASED ON STATISTICAL DATA AND ITS USE IN PREDICTING THE SPECIFIC COST

Vladimir Petkov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" – Sofia, Branch of Kardzhali; 6600 Kardzhali

ABSTRACT. It is offered derive an analytical expression of the power characteristic of industrial system processing gold ore. The methodology is basen on a polynomial approximation to the extent of actual data on electricity consumption and quantities of processed ore registered monthly for 18 month period. Analytical output constant energy consumption and analyze the seasonal influence on the consumption rate.

Въведение

Необходимостта от правилно планиране на разхода на електроенергия и рационалното и използване в предприятия, преработващи полиметални руди, възниква поради наличие на множество енергоемки процеси. С оглед увеличаване на икономическата конкурентно-способност и намаляване на негативния ефект на индустриалната дейност върху околната среда, от европейското законодателство е приета Директива 2012/27/ЕО за енергийна ефективност която задължава всяка държава член на ЕО да представи национални индикативни цели за енергийни спестявания за големи сгради и промишлени системи. Енергийната интензивност е основен индикатор за ефективността на използване на енергията и представлява потребената енергия отнесена към единица брутен продукт. За въздействие върху показателя енергийна интензивност в рамките на една промишлена система се планират норми за разход на енергия.

В обогатителната фабрика на "Горубсо-Кърджали" АД се преработва полиметална златосъдържаща руда до гравитационен концентрат и сплав "Доре", като в процеса на преработка не се консумира друга енергия освен електрическа. Промислената система освен инсталация за преработка на руда включва и административно-битов

комплекс, сграда на химическа лаборатория, складово стопанство и машинна работилница.

Процеса на обогатяване започва с двустадийно трошене с пресяване и последващо смилане на рудата. След достигане на нужния зърнометричен състав, рудата се подава на машина за гравитационно обогатяване тип "Knelson koncentrator KC-XD30". Обогадената от концентратора руда представлява златен концентрат, който се реализира на пазара като промпродукт. Гравитационният отпадък отива в инсталация за цианидно доизвличане на златото, като крайния етап е електроекстракция и индукционно топене на златносребърна сплав "Доре". В процеса на излугване участват реактори с бъркачни механизми, сита, трансферни помпи и въздуходувка. Отпадъкът от цианидното излугване преминава през химическа деструкция на цианидите и посредством центробежни помпи се транспортира до хвостохранилище.

Нормирането на разхода на електроенергия става на месечна база, като се утвърждават две отделни норми съответно за есеннозимен и пролетнолетен сезон. При нормирането на специфичния разход, за базов продукт се използва количеството преработена руда.

В предприятия от добивната и преработвателна промишленост могат да се дефинират три вида специфичен разход: технологичен, цехов и общо заводски.

Технологичният разход включва само потребената електроенергия непосредствено за технологичния процес, като задвижване на работни машини, електролиза, енергия за топене на метали и транспорт на технологични разтвори. Към технологичния разход се отнасят и загубите свързани с механично триене, топлинни загуби в пещите и електрохимични загуби в електролизните уредби.

Цеховият разход, освен разхода на електроенергия за основния технологичен процес, включва и разходите за всички спомагателни нужди, като цехово осветление и отопление, вентилация, подежни съоръжения, компресорни уредби и електротранспорт.

Общозаводският разход се формира от разходите за технологичния процес, спомагателните разходи по цехове, разходите за административно-битови нужди, ремонтни работилници, лаборатории. Включва също и загубите в заводската електроразпределителна мрежа.

Възможно най-точното определяне на прогнозния специфичен разход на електроенергия за разглежданата промишлена система е удобно чрез извеждане аналитичния израз на енергийната характеристика.

Енергийните характеристики представляват зависимостта на подадената към консуматора мощност P (или специфичния разход на електроенергия w) от произведената за определено време продукция A , т.е.

$$P = bA^q + P_{ном} \quad (1)$$

където b и q са постоянни при определени условия величини, характеризиращи параметрите на енергийната характеристика;
 $P_{ном}$ – постоянните загуби на мощност (загубите на празен ход).

В зависимост от стойността на степенния показател q , енергийните характеристики могат да бъдат: праволинейни, вдлъбнати и изпъкнали.

Като се разделят двете части на уравнение (1) на произведената продукция A , се получава уравнението на енергийната характеристика за специфичния разход на електроенергия:

$$W = \frac{P}{A} = bA^{q-1} + \frac{P_{ном}}{A} \quad (2)$$

Извеждането на аналитичния израз на енергийната характеристика за група консуматори или цяла промишлена система може да стане по изчислителен или експериментален метод.

При изчислителния метод по теоретични формули, изразяващи зависимостта на консумираната мощност от производителността, се определя енергийната характеристика на всеки агрегат участващ в производствения процес и чрез последващо сумиране на ординатите на всяка характеристика се получава общата характеристика

на предприятието. В този случай постоянната съставка на потребената мощност също се определя аналитично.

При експерименталния метод енергийната характеристика се получава чрез математическа обработка на данни от проведени измервания на разхода на електроенергия и произведената продукция за определен период от време. Не са редки случаите, когато се използва и комбинация от двата метода за построяване на енергийната характеристика.

За Обогастителна фабрика "Горубсо-Кърджали" чисто изчислителен метод не е приложим поради променливия характер на физикохимичните свойства на постъпващата руда. След детайлна статистическа обработка на данни за потребената електроенергия и количествата преработена руда за 18 поредни месеца и използване методите на апроксимацията е предложено решение на задачата за извеждане на аналитичния израз на енергийните характеристики за цялата промишлена система и само за производствената част (изключени са енергийните разходи за административно-битова част и спомагателни дейности).

Решение на основната задача

В таблица 1 е дадена функцията $P = P(A)$ в емпиричен вид. В колона 2 и колона 3 са приведени съответно средночасовата производителност по преработена руда и средночасовата активна електрическа мощност, консумирана от цялата промишлена система.

Таблица 1

Месец, година	A, t/час	P, MW
1	2	3
Януари, 2012 г.	6,788	0,832
Февруари, 2012 г.	7,734	0,941
Март, 2012 г.	4,739	0,586
Април, 2012 г.	8,632	0,684
Май, 2012 г.	7,210	0,738
Юни, 2012 г.	8,413	0,786
Юли, 2012 г.	8,856	0,736
Август, 2012 г.	8,801	0,724
Септември, 2012 г.	9,094	0,737
Октомври, 2012 г.	7,910	0,629
Ноември, 2012 г.	8,135	0,722
Декември, 2012 г.	6,653	0,725
Януари, 2013 г.	7,120	0,808
Февруари, 2013 г.	8,009	0,904
Март, 2013 г.	7,809	0,848
Април, 2013 г.	7,278	0,827
Май, 2013 г.	6,605	0,787
Юни, 2013 г.	8,401	0,785

Поставя се задачата да се определи такава апроксимираща крива, която да минава по възможност най-близко до емпирично определените точки с посочените координати (A_i , P_i). За да определим

коэффициентите b и $P_{\text{пост}}$ в уравнение (1) може да се използва метода на най-малките квадрати.

Ако изберем апроксимиращ полином от втора степен т.е. $q=2$, ще получим функцията:

$$P(A) = 0,041A^2 - 0,594A + 2,896 \quad (3)$$

Ако апроксимираме с линейна функция, $q=1$, получаваме:

$$P(A) = 0,01536A + 0,6486 \quad (4)$$

За разглежданата промишлена система средночасовата производителност се изменя в интервала от 4,739 до 9,094 t/час. Ще изчислим средноквадратичното отклонение S на P_i реално спрямо P_i прогнозно за съответните стойности на аргумента A_i в интервала (4,739; 9,094) по формула:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{i \text{ реално}} - P_{i \text{ прогн}})^2} \quad (5)$$

При апроксимиране с функция (3), $S=0,1357$, а при апроксимиране с функция (4), $S=0,0845$

Ако от таблица 1 разделим данните на сезонен принцип и изведем аналитичните функции за двата периода, за есенно-зимен период ще получим:

$$\text{При } q=2, P(A) = -0,128A^2 - 1,922A - 6,320, S=0,2455; \quad (6)$$

$$\text{при } q=1, P(A) = 0,077A + 0,2472, S=0,0706, \quad (7)$$

а за пролетно-летен период:

$$\text{при } q=2, P(A) = -0,02949A^2 + 0,656A - 2,652, S=0,1805; \quad (8)$$

$$\text{при } q=1, P(A) = -0,022A + 0,922, S=0,0514. \quad (9)$$

От получените данни за средноквадратичните отклонения на реалните стойности P_i от прогнозните стойности стигаме до заключение, че може с достатъчно голяма точност да използваме апроксимация с линейна функция.

Съществуването на линейна връзка и степента на линейна свързаност между P_i и A_i може да се покаже чрез коефициента на корелация на Пирсън:

$$r_{AP} = \frac{COV_{AP}}{\sigma_A \sigma_P} \quad (10)$$

където:

$$COV_{AP} = \frac{\sum (A_i - A_{cp})(P_i - P_{cp})}{\sqrt{\sum (A_i - A_{cp})^2 \sum (P_i - P_{cp})^2}} \quad (11)$$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - A_{cp})^2} \quad (12)$$

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2} \quad (13)$$

След заместване на данните от таблица 1 във формули (11), (12) и (13) получаваме следните коефициенти на корелация:

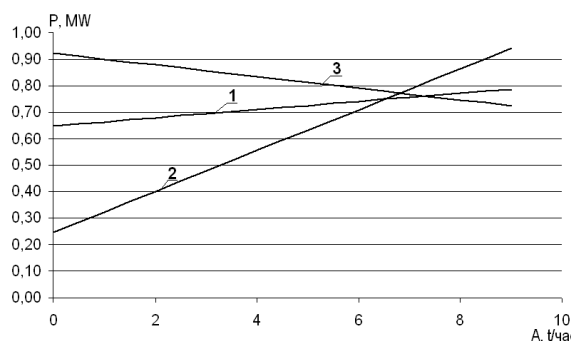
$$r_{AP} = 0,75 \text{ – за есенно-зимен период}$$

$$r_{AP} = -0,32 \text{ – за пролетно-летен период}$$

$$r_{AP} = 0,19 \text{ – общо за целия 18 месечен период}$$

Вижда се, че коефициентите на линейна корелация особено при апроксимация на сезонните данни се отличават значително от 0.

На фиг. 1 са показани графиките на апроксимиращите линейни функции зададени с формулите (4), (7) и (9).



Фиг.1 Графики на апроксимиращите функции $P=P(A)$, за цялата промишлена система по сезони и общо за 18 месечен период

Графика 1 изразява зависимостта $P(A)$ за 18 месечен изследван период, графика 2 – за есенно-зимен период, а графика 3 – за пролетно-летен период.

За прогнозиране на общозаводския специфичен разход на електроенергия трябва да бъде известна зависимостта $W = W(A)$. Тази зависимост се получава, като двете страни на уравненията (4), (7) и (9) разделим на средночасовата производителност A . При което получаваме аналитичния вид на енергийните характеристики на разглежданата промишлена система за специфичния разход.

За 18 месечен период:

$$W(A) = 0,01536 + 0,6486/A \quad (14)$$

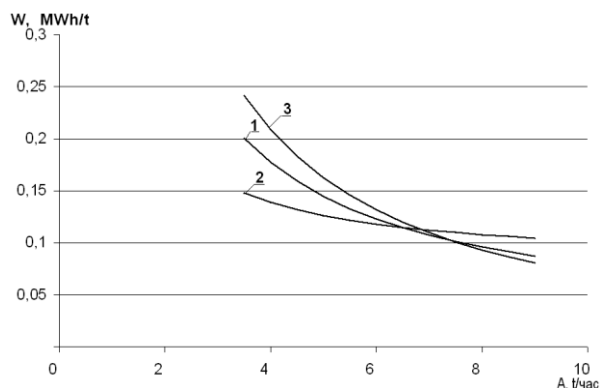
За есенно-зимен период:

$$W(A) = 0,077 + 0,2472/A \quad (15)$$

За пролетно-летен период:

$$W(A) = -0,022 + 0,922/A \quad (16)$$

На фиг. 2 са показани графиките на уравненията (14), (15) и (16).



Фиг.2 Графики на енергийните функции $W=W(A)$, за цялата промишлена система по сезони и общо за 18 месечен период

Графика 1 изразява зависимостта $W(A)$ за 18 месечен изследван период, графика 2 – за есенно-зимен период, а графика 3 – за пролетно-летен период.

Прогнозирането на разходната норма за даден месец от есенно-зимния период става, като количеството преработена руда, зададено по план, разделим на броя на часовете в месеца и получената средночасова планова производителност заместим в уравнение (15).

Аналогично за пролетно-летния период използваме уравнение (16). Уравнение (14) и съответно графика 1 ни дават осреднена представа за специфичния разход в MWh/t в зависимост от изменението на средночасовата производителност за цялата промишлена система. Прогнозирането по уравнение (14) би довело до по-голяма неточност, тъй като данните са статистически изгладени и не отразяват коректно тежестта на влиянието на всеки сезон.

Използвайки гореописаната методика може да се изведат и аналитичните изрази на $W(A)$ за цеховия специфичен разход.

В таблица 2 е дадена функцията $P = P(A)$ в емпиричен вид, като в колона 2 и колона 3 са приведени съответно средночасовата производителност по преработена руда и средночасовата активна електрическа мощност потребявана само от производствената част на промишлената система.

За 18 месечен период получаваме следните уравнения:

$$P(A) = 0,025A + 0,529 \quad (17)$$

$$W(A) = 0,025 + 0,529/A \quad (18)$$

Таблица 2

Месец, година	A, t/час	P, MW
1	2	3
Януари, 2012 г.	6,788	0,750
Февруари, 2012 г.	7,734	0,858
Март, 2012 г.	4,739	0,531
Април, 2012 г.	8,632	0,652
Май, 2012 г.	7,210	0,716
Юни, 2012 г.	8,413	0,766
Юли, 2012 г.	8,856	0,717
Август, 2012 г.	8,801	0,704
Септември, 2012 г.	9,094	0,718
Октомври, 2012 г.	7,910	0,606
Ноември, 2012 г.	8,135	0,667
Декември, 2012 г.	6,653	0,648
Януари, 2013 г.	7,120	0,734
Февруари, 2013 г.	8,009	0,824
Март, 2013 г.	7,809	0,784
Април, 2013 г.	7,278	0,793
Май, 2013 г.	6,605	0,767
Юни, 2013 г.	8,401	0,754

За есенно-зимен период:

$$P(A) = 0,074A + 0,198 \quad (19)$$

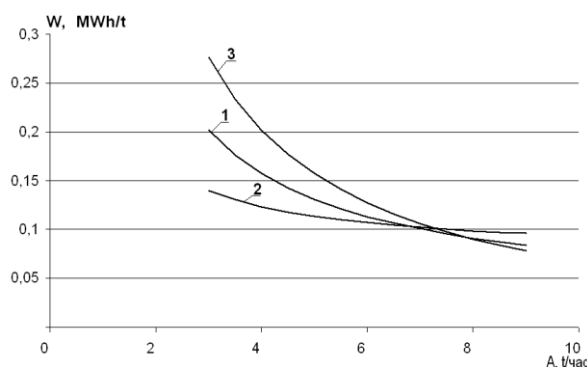
$$W(A) = 0,074 + 0,198/A \quad (20)$$

За пролетно-летен период:

$$P(A) = -0,0212A + 0,89 \quad (21)$$

$$W(A) = -0,0212 + 0,89/A \quad (22)$$

На фиг. 3 са показани графиките на уравненията (18), (20) и (22).



Фиг.3 Графики на енергийните функции $W=W(A)$, за производствената част на промишлената система по сезони и общо за 18 месечен период

Графика 1 изразява зависимостта $W(A)$ за 18 месечен изследван период, графика 2 – за есенно-зимен период, а графика 3 – за пролетно-летен период.

Сравнявайки графиките от фиг. 2 с тези от фиг. 3 се вижда, че зависимостта на специфичния разход от производителността в интервала е по-силно изразена при графиките за цеховия разход в сравнение с общо заводския. Това се дължи на факта, че общо заводският разход включва и съставка, зависеща силно от температурата на околната среда, а именно потребяваната електроенергия за отопление на всички спомагателни звена. Този факт може нагледно да се покаже, като се сравнят средномесечните температури за гр. Кърджали и средночасовата потребявана активна мощност от спомагателните звена за разглеждания 18 месечен период. Данните са показани в таблица 3.

Таблица 3

Месец, година	Тср. °C	P, MW
1	2	3
Януари, 2012 г.	-0,3	0,082
Февруари, 2012 г.	-0,7	0,083
Март, 2012 г.	7,1	0,055
Април, 2012 г.	13,2	0,033
Май, 2012 г.	16,2	0,022
Юни, 2012 г.	22,7	0,020
Юли, 2012 г.	26,6	0,019
Август, 2012 г.	25	0,020
Септември, 2012 г.	20,6	0,019
Октомври, 2012 г.	16,4	0,023
Ноември, 2012 г.	9,5	0,056
Декември, 2012 г.	2,5	0,077
Януари, 2013 г.	3,1	0,074
Февруари, 2013 г.	5,4	0,080
Март, 2013 г.	8,1	0,063
Април, 2013 г.	13,3	0,034
Май, 2013 г.	18,8	0,019
Юни, 2013 г.	20,4	0,031

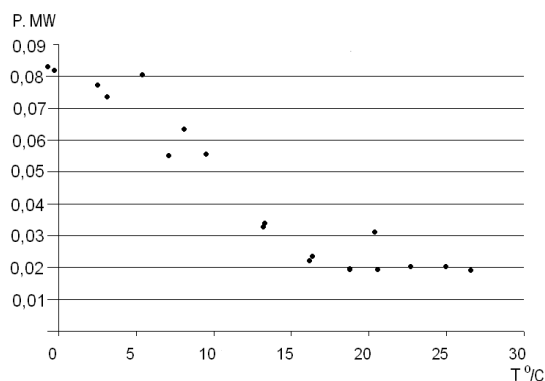
На фиг. 4 в декартова координатна система са нанесени точките с координати $T_{ср.i}$, P_i , от където се вижда, че приблизително при средна температура на околната среда от 17°C, средночасовата консумирана мощност започва да остава постоянна. По тази причина стойностите от таблица 3 могат да се разделят на два интервала. Първият интервал обхваща всички точки с абсциси по-малки от 17°C, а вторият – с абсциси над 17°C. Двата интервала се апроксимират със следните линейни функции:

За интервал до 17°C

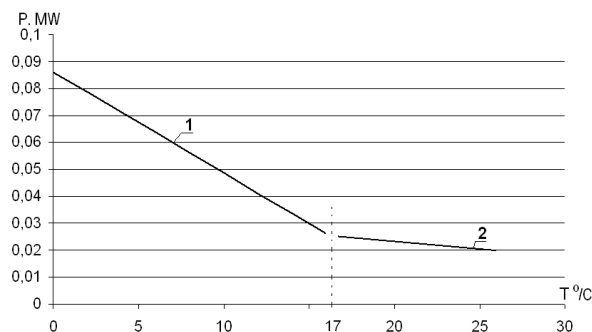
$$P(T) = -0,00375T + 0,086 \quad (23)$$

За интервал над 17°C

$$P(T) = -0,0005T + 0,0327 \quad (24)$$



Фиг.4 График на емпирично зададената функция $P=P(T)$



Фиг.5 График на апроксимиращите функции $P=P(T)$

По формули (23) и (24) може, според очакваната средномесечна температура за регион Кърджали, да се изчисли ориентировъчно консумацията на електроенергия от спомагателните стопанства.

След заместване на $T=17^\circ C$ в уравнение (24), за средночасовия електрически товар получаваме:

$$P(17)=0,0242MW \quad (25)$$

За един месец консумираната активна енергия ще бъде:

$$E=0,0242MW \times 744h=18,0048MWh \quad (26)$$

В спомагателните стопанства не се използва електрическа енергия за охлаждане на работните помещения, по тази причина може да приемем, че уравнение (26) дава стойността на абсолютна постоянна съставка на консумираната активна електрическа енергия, която е независима от месеца в годината.

Литература

- Данков Е.Е., 1991. Електроснабдяване на минните предприятия, С., Техника.
 Мишов П.П., 1992. Електроснабдяване на минното производство, С.
 Белых Б.П., 1971. Электрические нагрузки и электропотребление на горнорудных предприятиях, М., Недра.
 Кудрин Б.И. Електроснабжение, оперативное и планируемое нормирование расхода электроэнергии, энергосбережение, Московский энергетический университет.

MINIMAL COMMUTATIVITY OF COMPOSITIONS OF OPERATORS OF MIXED TYPE - I

Miriyana Hristova

University of National and World Economy, Department of Mathematics, Studentski grad, 1700 Sofia, Bulgaria
E-mail: miriyana_hristova@abv.bg

ABSTRACT. The operators $Hf(z) = H_{p,q}f(z) = \frac{d^p}{dz^p} \left(z^q \int_0^z f(\zeta) d\zeta \right)$ are considered with non-negative integer parameters $p, q \in \mathbb{Z}_+$ in the case when $p \leq q+1$ in the space A_0 of the functions analytic in neighbourhoods of the origin $z=0$ of the complex plane $\mathbb{C}$. Using the power series descriptions of the commutants of compositions of operators of the type $H_{p,q}$ with different parameters p and q from previous author's papers, here the question about the minimal commutativity (in the sense of (Raichinov 1979)) of compositions is considered.

МИНИМАЛНА КОМУТАТИВНОСТ НА КОМПОЗИЦИИ ОТ ОПЕРАТОРИ ОТ СМЕСЕН ТИП

Миряна Христова

Университет за национално и световно стопанство, Катедра Математика, Студентски град, 1700 София, България

РЕЗЮМЕ. Операторите $Hf(z) = H_{p,q}f(z) = \frac{d^p}{dz^p} \left(z^q \int_0^z f(\zeta) d\zeta \right)$ са разглеждани с неотрицателни цели параметри $p, q \in \mathbb{Z}_+$ в случая, когато $p \leq q+1$, в пространството A_0 на функциите аналитични в околности на координатното начало $z=0$ на комплексната равнина $\mathbb{C}$. Използвайки описанието чрез степенни редове на комутантите на композиции на оператори от вида $H_{p,q}$ с различни параметри p и q от предишни свои статии, авторът разглежда тук въпроса за минималната комутативност (в смисъл на (Райчинов 1979)).

Introduction

Let A_0 be the space of functions analytic in (possibly different) neighbourhoods of the origin $z=0$ in the complex plane $\mathbb{C}$ or its subspace S of the polynomials of the complex variable z . We want to consider a generalization of the usual

operator of integration $\int_0^z f(\zeta) d\zeta$ multiplying it by a non-negative power z^q and then differentiating p times, i.e. we consider the operators of mixed type

$$H_{p,q}f(z) = \frac{d^p}{dz^p} \left(z^q \int_0^z f(\zeta) d\zeta \right), \quad p, q \in \mathbb{Z}_+. \quad (1)$$

In (Hristova 2012) the commutational properties of a single operator $H_{p,q}$ in the case $p < q+1$ were investigated, and in (Hristova 2013a, 2013b) the case $p = q+1$ is presented. Here we will combine the results from these papers to describe

the commutants of compositions of operators of the type $H_{p,q}$ with different parameters p and q when they increase or preserve the powers. We will discuss also the question about the minimal commutativity of compositions (in the sense of (Raichinov 1979)).

Let us represent first the action of only one operator $H_{p,q}$ on a single power z^k :

$$H_{p,q}z^k = \frac{1}{k+1} (k+q+1)((k+q+1)-1) \dots ((k+q+1)-p+1) z^{(k+q+1)-p}. \quad (2)$$

Denoting $q-p+1$ by α , we have $\alpha \geq 0$ and can write shortly

$$H_{p,q}z^k = a_k z^{k+\alpha}; \quad a_k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{k+1} \cdot \frac{(k+q+1)!}{(k+\alpha)!} \neq 0, \quad (3)$$

$$\alpha \stackrel{\text{def}}{=} q-p+1 \geq 0.$$

Now an arbitrary power $H_{p,q}^r$ of $H_{p,q}$ acts on z^k as

$$H_{p,q}^r z^k = a_k a_{k+\alpha} \dots a_{k+(r-1)\alpha} z^{k+r\alpha}, \quad a_l = \frac{1}{l+1} \cdot \frac{(l+q+1)!}{(l+\alpha)!} \neq 0. \quad (4)$$

In order to avoid writing the long products in (4) we will use again a short representation denoting them by one letter:

$$\stackrel{\text{def}}{\beta}_k = a_k a_{k+\alpha} \dots a_{k+(r-1)\alpha}, \quad a_l = \frac{1}{l+1} \cdot \frac{(l+q+1)!}{(l+\alpha)!} \neq 0. \quad (5)$$

and then we can write simply

$$H_{p,q}^r z^k = \beta_k z^{k+r\alpha}, \quad \beta_k = \prod_{t=0}^{r-1} a_{k+t\alpha}, \quad (6)$$

$$a_l = \frac{1}{l+1} \cdot \frac{(l+q+1)!}{(l+\alpha)!} \neq 0.$$

In fact, if $y(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ is an analytic function from A_0

with coefficients $\stackrel{\text{def}}{c}_k = \frac{y^{(k)}(0)}{k!}$, then we have the short representation

$$H_{p,q}^r y(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \beta_k z^{k+r\alpha} \quad (7)$$

with β_k from (5) and (6) and α from (3).

Let us give some definitions:

Definition 1. It is said that a continuous linear operator L commutes with a fixed operator M , if $LM = ML$. The set of all such operators is called the *commutant* of M and will be denoted by C_M .

Definition 2. It is said that a continuous linear operator T is *generated* by an operator M , if T is a polynomial of M

with complex coefficients, i.e. $T = \sum_{n=0}^{\infty} d_n M^n$, $d_n \in \mathbb{C}$. The

set of all operators generated by M will be denoted by G_M .

Obviously every operator T , which is generated by M , i.e. $T \in G_M$, also commutes with M , i.e. $T \in C_M$, and hence $G_M \subset C_M$. The opposite inclusion $G_M \supset C_M$ is, in general, not true. Therefore the following definition is natural:

Definition 3. (Raichinov 1979) An operator M is called *minimally commutative* if $G_M \supset C_M$, i.e. if the commutant C_M consists only of operators T generated by M and hence if $C_M = G_M$.

In general we can consider compositions

$$H^r = H_1^{r_1} H_2^{r_2} \dots H_s^{r_s}, \quad (8)$$

where $H_1 = H_{p_1, q_1}, H_2 = H_{p_2, q_2}, \dots, H_s = H_{p_s, q_s}$ are operators of the form (1), $r_1, r_2, \dots, r_s$ are nonnegative integers, and $r = (r_1, r_2, \dots, r_s)$ is considered as a multipower.

In the papers (Hristova 2013c -2013f) the author considers for the sake of simplicity only compositions of two operators

$$H^r = H_1^{r_1} H_2^{r_2}, \quad r = (r_1, r_2). \quad (9)$$

The description of the commutants of compositions is given there in different cases: when the powers are preserved or increased by both operators and also in the mixed cases when one of the operators increases, while the other one preserves the powers. It is convenient to define the numbers

$$\stackrel{\text{def}}{\alpha}_j = q_j - p_j + 1 \geq 0, \quad j = 1, 2, \quad (10)$$

which show how each of the operators in the composition changes the powers of the complex variable $z \in \mathbb{C}$.

In the general case of composition of more than two operators the reasonings are the same but the written form of the results becomes more complicated.

Let us note that descriptions of commutants are made by many mathematicians. In the references of this paper we have included only a very small part of the publications related to the commutants of operators similar to the one considered here, see all references. Additional huge number of publications related to commutants can be found in the bibliographies of the cited monographs.

The case of preserving the powers

Description of the commutant

The description of the commutant in the case of composition of operators preserving the powers is proved in another paper (Hristova 2013c). The interesting fact is that it remains the same as the one for a single operator given in paper (Hristova 2013a).

Theorem 1.

Let the operators H_1 and H_2 be of the type (1) with $\alpha_j = q_j - p_j + 1 = 0$, $j = 1, 2$. We can fix $q_1 \neq q_2$ and then to express $p_j = q_j + 1$, $j = 1, 2$, writing

$$H_j y(z) = H_{q_j} y(z) = H_{q_j+1, q_j} y(z) = \frac{d^{q_j+1}}{dz^{q_j+1}} \left(z_j^q \int_0^z y(\zeta) d\zeta \right), \quad j = 1, 2. \quad (11)$$

Then a linear operator $L : A_0 \rightarrow A_0$ commutes with the composition operator $H^r = H_1^{r_1} H_2^{r_2}$, $r_j \geq 1$, $j = 1, 2$, if and only if it has the form

$$Ly(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{y^{(k)}(0)}{k!} d_k z^k, \quad (12)$$

where $\{d_k\}_{k=0}^{\infty}$ is an arbitrary sequence of complex numbers, but such that the series in (12) converges.

For the sake of completeness we will give here only a

Sketch of the proof

A short expression of the action of either of the two operators H_j , $j = 1, 2$, on an arbitrarily fixed single power z^k of the complex variable z is

$$H_j z^k = \beta_{j,k} z^k = (k + q_j + 1)(k + q_j) \dots (k + 2) z^k. \quad (13)$$

Then the action of the composition $H^r = H_1^{r_1} H_2^{r_2}$ on z^k can be written as

$$\begin{aligned} H^r z^k &= (H_1^{r_1} H_2^{r_2}) z^k = H_1^{r_1} (H_2^{r_2} z^k) = \\ &H_1^{r_1} (\beta_{2,k}^{r_2} z^k) = \beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2} z^k. \end{aligned} \quad (14)$$

If $L : A_0 \rightarrow A_0$ is an operator from the commutant $C_{H^r} = C_{H_1^{r_1} H_2^{r_2}}$, we suppose that its action on an arbitrary power z^k has the form

$$Lz^k = \sum_{n=0}^{\infty} b_{k,n} z^n \quad (15)$$

with unknown coefficients $b_{k,n}$. Then the expressions of $LH^r z^k$ and $H^r Lz^k$ are

$$\begin{aligned} LH^r z^k &= L(\beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2} z^k) = \\ &= \beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2} Lz^k = \beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2} \sum_{n=0}^{\infty} b_{k,n} z^n \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} H^r Lz^k &= H^r \left(\sum_{n=0}^{\infty} b_{k,n} z^n \right) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} b_{k,n} H^r z^n = \sum_{n=0}^{\infty} b_{k,n} \beta_{1,n}^{r_1} \beta_{2,n}^{r_2} z^n. \end{aligned} \quad (17)$$

If we equate the coefficients of the equal powers in (16) and (17), then

$$\beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2} b_{k,n} = \beta_{1,n}^{r_1} \beta_{2,n}^{r_2} b_{k,n}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

Taking into account that $q_1 \neq q_2$ and the form of the coefficients in (13) and (14), we have that $\beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2} \neq \beta_{1,n}^{r_1} \beta_{2,n}^{r_2}$ and then it follows that

$$b_{k,n} = \begin{cases} d_k - \text{arbitrary,} & \text{for } n = k \\ 0, & \text{for } n \neq k \end{cases} \quad (19)$$

This reduces the series in (15) to only one term:

$$Lz^k = d_k z^k, \quad d_k - \text{arbitrary.} \quad (20)$$

Finally, if an arbitrary analytic function $y \in A_0$ has a power

series expansion $y(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k$ with coefficients

$$c_k = \frac{y^{(k)}(0)}{k!}, \text{ then}$$

$$Ly(z) = L \left(\sum_{k=0}^{\infty} c_k z^k \right) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k Lz^k = \sum_{k=0}^{\infty} c_k d_k z^k, \quad (21)$$

which is the desired representation (12).

Minimal commutativity

First we have to describe the operators generated by H^r and then this description will be compared with the one of the commutant C_{H^r} given in Theorem 1.

Theorem 2:

Let us denote for simplicity of the writing the composition (14) and the coefficient in it by one letter

$$\begin{aligned} Hz^k &= H^r z^k = H_1^{r_1} H_2^{r_2} z^k = \beta_k z^k, \\ \beta_k &= \beta_{1,k}^{r_1} \beta_{2,k}^{r_2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Then the operators $Ay(z) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j H^j y(z)$ generated by

the operator $H : A_0 \rightarrow A_0$ have the form

$$Ay(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{y^{(k)}(0)}{k!} a_j \beta_k^j z^k. \quad (23)$$

Proof: This follows immediately from the representation the action of the powers H^j of H on functions $y \in A_0$:

$$\begin{aligned} H^j y(z) &= H^j \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{y^{(k)}(0)}{k!} z^k \right) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{y^{(k)}(0)}{k!} H^j z^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{y^{(k)}(0)}{k!} \beta_k^j z^k. \end{aligned} \quad (24)$$

Let us make the definition of the minimal commutativity more precise. One can use two different variants of the definition, namely *finite* and *infinite* minimal commutativity

If in an algebra K of operators the notion convergence of sequences $H_n \rightarrow H$ is defined and it is compatible with the algebraic operations at least so that $H_n \rightarrow H$ and $A_n \rightarrow A$ imply $HA_n \rightarrow HA$, $A_nL \rightarrow AL$, and $H_n + A_n \rightarrow H + A$, then the element H is called (*infinitely*) minimally commutative if its commutant C_H consists only of elements of the form

$$A = \sum_{j=0}^{\infty} a_j H^j = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=0}^n a_j H^j = \lim_{n \rightarrow \infty} A_n, \quad a_j \in \mathbb{C}. \quad (25)$$

If the commutant C_H contains only elements of the form

$$A_n = \sum_{j=0}^n a_j H^j, \quad a_j \in \mathbb{C}, \quad (26)$$

with finite sum, then H is called *finitely* minimally commutative.

Theorem 3.

If the operator H defined by (22) is considered in the subspace $S \subset A_0$ of the polynomials, then it is finitely minimally commutative.

Proof: Let $y(z) = \sum_{k=0}^r c_k z^k \in S$ be an arbitrary polynomial.

Then by (6) any operator L from the (finite) commutant C_H in S must have a polynomial form

$$Ly(z) = \sum_{k=0}^q c_k d_k z^k \quad (27)$$

with zero coefficients c_k of the highest degrees if $q > r$.

From (26) the action of an arbitrary operator $A \in G_H$ generated by H on y is

$$\begin{aligned} Ay(z) &= \sum_{j=0}^n a_j H^j y(z) = \sum_{j=0}^n a_j \sum_{k=0}^q c_k H^j z^k = \\ &= \sum_{j=0}^n a_j \sum_{k=0}^q c_k b_k^j z^k = \sum_{k=0}^q c_k \sum_{j=0}^n a_j b_k^j z^k, \end{aligned} \quad (28)$$

i.e. $Ay(z)$ is also a polynomial of degree at most q .

Now, equating the coefficients of the equal powers in (27) and (28), we have to solve the linear system with unknowns a_j :

$$\sum_{j=0}^n a_j b_k^j = d_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, q. \quad (29)$$

We can suppose that $n = q$ since if $n > q$, we can take $a_{q+1} = \dots = a_n = 0$ and the system (29) becomes with equal number of equations and unknowns:

$$\sum_{j=0}^q b_k^j a_j = d_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, q. \quad (30)$$

The determinant of the system is the non-vanishing Vandermonde's one

$$W(b_0, b_1, \dots, b_q) = \begin{vmatrix} 1 & b_0 & \dots & b_0^q \\ 1 & b_1 & \dots & b_1^q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & b_q & \dots & b_q^q \end{vmatrix} = \prod_{0 \leq \mu < \nu \leq q} (b_\mu - b_\nu) \neq 0, \quad (31)$$

since $b_\mu \neq b_\nu$ for $\mu \neq \nu$ by the definition of H . Hence the system (30) has an unique solution $(a_0, a_1, \dots, a_q)$ and the operator H is finitely minimally commutative.

Remark:

We proved Theorem 2 for the subspace $S \in A_0$ of the polynomials. If we consider the whole space A_0 , then it is natural to try to prove the infinite minimal commutativity of H , but then a linear system like (29) with infinitely many equations and infinitely many unknowns has to be solved. We cannot give a positive or negative result, but it is at least clear that a representation of the operators of the commutant with finite sum as (26) is impossible in the general case when infinitely many d_k are chosen different from zero. Indeed, if we suppose that the operator $H : A_0 \rightarrow A_0$ is finitely minimally commutative, then

$$\sum_{j=0}^q b_k^j a_j = d_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (32)$$

The first $q+1$ equations have an unique solution $(a_0, a_1, \dots, a_q)$ depending on $d_0, d_1, \dots, d_q$ as in Theorem 2. But from the next equations for $k \geq q+1$ we see that

$$d_k = \sum_{j=0}^q b_k^j a_j(d_0, d_1, \dots, d_q), \quad (17)$$

i.e. all d_k , $k \geq q+1$, depend on the first d_k , $0 \leq k \leq q$, and cannot be arbitrarily chosen. This contradicts the description of the commutant C_H .

The case of increasing the powers

Due to the lack of space we are not able to consider here the case of *increasing* the powers by the operators in the composition (9) and also in the mixed cases. Let us only mention that the result which will be proved in **Part II** (Hristova 2013d) of this paper states that

The composition $H^r = H_1^{r_1} H_2^{r_2}$ is minimally commutative if and only if the total change of the powers is exactly one.

References

- Райчинов, И. 1979. Върху някои комутационни свойства на алгебри от линейни оператори, действащи в пространства от аналитични функции, I, *Год. ВУЗ, Прил. мат.*, 15, 3, 27-40.
- Райчинов, И. 1981. Върху някои комутационни свойства на алгебри от линейни оператори, действащи в пространства от аналитични функции, II, *Год. ВУЗ, Прил. мат.*, 17, 1, 61-71.
- Фаре, М. К., Н. И. Нагнибида. 1987. *Проблема эквивалентности обыкновенных линейных дифференциальных операторов*, Новосибирск, Издательство Наука, Сибирское отделение.
- Христова, М. С. 1979. Върху един клас минимално комутиращи оператори в пространството на полиномите над полето $\mathbb{C}$ на комплексните числа, *Год. ВУЗ, Прил. мат.*, 15, 3, 55-68.
- Христова, М. С. 1982. Върху някои изоморфизми, осъществявани от оператори, действащи в пространства от аналитични функции, *Год. ВУЗ, Прил. мат.*, 18, 2, 63-72.
- Христова, М. С. 1984. Общ вид на линейните оператори, дефинирани в пространства от аналитични функции и комутиращи с обобщения оператор на Харди-Литълвуд, *Год. ВУЗ, Прил. мат.*, 20, 2, 67-74.
- Христова, М. С. 1986а. Някои аналитични характеристики на оператори, комутиращи с фиксирана степен на обобщения оператор на Харди-Литълвуд, *Научни трудове ВИИ Карл Маркс*, 1, 149-159.
- Bozhinov, N. 1988. *Convolutional representations of commutants and multipliers*, Sofia, Publishing House of the Bulgarian Academy of Sciences.
- Dimovski, I. H. 1990. *Convolutional Calculus*, Dordrecht, Kluwer, Bulgarian 1st Ed.: In Ser. "Az Buki, Bulg. Math. Monographs", 2, Sofia, Publ. House of Bulg. Acad. Sci., 1982.
- Dimovski, I. H., V. Z. Hristov, M. Sifi. 2006. Commutants of the Dunkl operators in $C(\mathbf{R})$, *Fractional Calculus & Applied Analysis*, 9, 3, 195-213.
- Hristov, V. H. 2009. Description of the commutant of compositions of Dunkl operators, *Mathematical Sciences Research Journal*, 13, 9, 213-219.
- Hristova, M. S. 1986b. On the generalized Hardy-Littlewood operator, In: *Юбилеен сборник „100 години от рождението на академик Л. Чакалов“*, София, 143-149.
- Hristova, M. S. 2012. Commutational properties of an operator of mixed type increasing the powers, *AIP Conf. Proc.*, 1497, 334-341. In: *Applications of Mathematics in Engineering and Economics - AMEE '12, Sozopol, Bulgaria*. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4766802>
- Hristova, M. S. 2013a. Commutational properties of operators of mixed type preserving the powers - I, to appear
- Hristova M. S. 2013b. Commutational properties of operators of mixed type preserving the powers - II, to appear
- Hristova M. S. 2013c. Commutational properties of compositions of operators of mixed type preserving the powers - I, to appear.
- Hristova M. S. 2013d. Minimal commutativity of compositions of operators of mixed type not decreasing the powers - II, to appear.
- Linchuk, Y. S. 2012. Commutants of composition operators induced by a parabolic linear fractional automorphisms of the unit disk, *Fract. Calc. Appl. Anal.*, 15, 1, 25-33, DOI: 10.2478/s13540-012-0003-6.
- Raichinov, I. 1978. Linear operators defined in spaces of complex functions of many variables and commuting with the operators of integration, *Serdica, Bulgaricae mathematicae publications*, 4, 4, 316-323.
- Samko, S. G., A. A. Kilbas, O. I. Marichev 1993. *Fractional integrals and derivatives: Theory and applications*, Switzerland and Philadelphia, Pa., USA, Gordon and Breach Science Publishers.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОЛОЖЕНИЕТО И СТЬПКАТА НА ПРИДВИЖВАНЕ НА ПОДВИЖНИ РУДНИЧНИ ПОДСТАНЦИИ

Тодор Върбев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, vat@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В статията е направено предложение за определяне центъра на електрическите товари и стъпката на преместване на подвижни подстанции в мини „Марица изток“ ЕАД.

DETERMINATION OF LOCATION AND SHIFTING PHASE OF MOBILE SUBSTATION

Todor Varbev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, vat@mgu.bg

ABSTRACT. The article makes a suggestion of determining the center of electrical charges /loads/ and the shifting phase of mobile substation in Maritza-East Mines.

Въведение

Най-голямото предприятие за добив на въглища по открит начин е „Мини Марица изток“ ЕАД. То обединява три административно обособени открити мини: „Трояново - 1“, „Трояново - север“, „Трояново - 3“. Във всяка една от тях съществуват от 4 до 5 откритни и 2 добивни хоризонта. Откритните и добивните работи в тях се извършват с високопроизводителни машини:

- ✓ верижни многокофови багери тип KR-710;
- ✓ роторни многокофови багери тип ER-1200, ER-2000, ER-4000 (1 бр.).

В зависимост от дължината на фронта добивните и откритни работи се извършват с посочените по-горе типове багери, като броят им варира от 1 до 3. Дължината на фронта на минните работи е различна и се изменя от 2,5 до 3,5 km. Добитата скална маса или въглища се извозват от забоя с помощта на гумено-лентови транспортёри (ГЛТ) с ширина на лентата 1600 и 2250 mm.

Задвижващите станции на ГЛТ – 1600 са съоръжени с три двигателя с номинална мощност 560 kW всеки един от тях, а ГЛТ - 2250 - с четири двигателя с номинална мощност 1000 kW всеки един от тях. Броят на забойните задвижващи станции е от две до три в участък „Добив“ и от три до четири в участък „Откривка“.

Захранването с електрическа енергия на добивните машини и транспортните ленти се осъществява от стационарни подстанции, съоръжени с няколко броя силови трансформатори (от 2 до 4) с мощност 10 или 25 MVA. Подстанциите са с първично напрежение 110 kV. Преобразуват го на 6 или 20 kV за захранване на електрическите консуматори в „Мини Марица изток“ ЕАД.

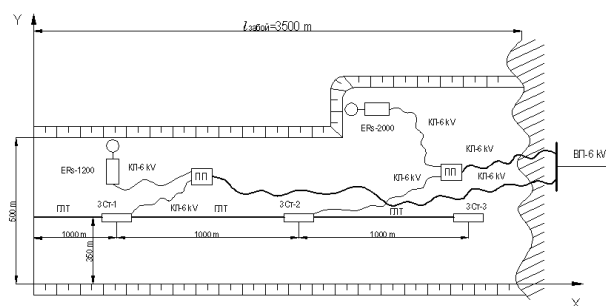
С напредване на откритните и добивни работи, електрическите консуматори се отдалечават от стационарните подстанции. Това води до удължаване на кабелните мрежи, увеличаване на загубите в тях и затрудняване на пускането на мощните електрически консуматори. За намаляване на загубите в мрежата и облекчаване на пусковите процеси на консуматорите може да се използва схемата на електроснабдяване „дълбок въвод“. По тази схема електроенергията се доставя близо до консуматорите с високо преносно напрежение, след което то се преобразува до стойности съответстващи на захранващото им напрежение. Този начин отдавна се използва в откритите рудници и кариери в Русия, Украйна и други държави в Европа (Голубев и др., 1986; Дегярева, 1988).

В последните 5-6 години в „Мини Марица изток“ ЕАД започва изграждането и внедряването на подвижни подстанции. До сега изработените подвижни подстанции са съоръжени най-често с маслени трансформатори с мощност от 10 MVA и напрежения 20/6 kV. В последната година започна монтирането и на сухи трансформатори с мощност 12 MVA. Силите трансформатори са монтирани върху рама от стоманени профили, която е поставена върху гъсеничен ходов механизъм на задвижваща станция на ГЛТ. Една от подвижните подстанции е с монтирани два трансформатора с мощност от 10 MVA.

Важна задача при проектиране на електроснабдяването на рудниците и минните предприятия е определянето на условия център на електрическите товари и местоположението на рудничните подстанции. Ако разположението на подстанцията съвпада с условия център е ясно, че електроснабдяването ще се реализира като оптимално, а годишните приведени разходи ще бъдат минимални.

В миннодобивните предприятия по технологични причини е невъзможно подстанцията да се намира в центъра или около центъра на електрическите товари. Дали е една или са няколко, те най-често са разположени далеч от него, по борда на рудника. Освен това в тези предприятия електрическите товари се изменят по големина, както във времето така и в пространството (непрекъснато се местят консуматорите). Това се обуславя от постоянното придвижване на минните работи, от различните минно-геоложки условия, неравномерното натоварване на минните машини и от голямата разсредоточеност на консуматорите по територията на предприятието.

При използване на подвижни подстанции, поради ограничената им мощност, е възможно максимално да се доближим около центъра на електрическите товари на даден участък - добивен (откритен) хоризонт. На фигура 1 е показана стандартна схема на електрическото захранване на откритен хоризонт от участък "Откривка" в „Мини Марица изток“ ЕАД.



Фиг. 1. Електрозахранване на откритен хоризонт

Електрическите консуматори, показани на фигура 1, се захранват от стационарна подстанция чрез въздушна линия (ВЛ), която достига до борда на рудника. От там чрез кабелна линия (КЛ) се стига до превключвателните пунктове (ПП), към които се свързват захранващите кабели на роторните багери и изтеглените кабели, захранващи задвижващите станции.

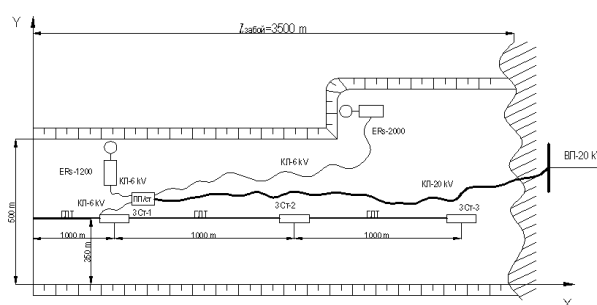
Съществуват различни математически методи за определяне на центъра на електрическите товари (ЦЕТ) в промишлените предприятия (Анев, 1991; Федоров и др., 1980; Василев и др., 1991). Един от тях допуска аналогия между масата на твърдо тяло и мощността (P_i) на активните товари. При неравномерно разпределяне на товарите, координатите X_0 , Y_0 и Z_0 на ЦЕТ може да се пресметнат по формулите [1,2,3]:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad ; \quad Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad ; \quad Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

където: x_i , y_i и z_i са координатите на i -тия потребител. Третата координата z_0 може да се пренебрегне, ако е изпълнено условието: $l \geq 1,5h$, където l е разстоянието между центровете на електрическите товари на цеха (промишленото предприятие), а h е разликата между котите им.

На фигура 1 е показана дължината на забоя $l_{\text{забой}}$ за различните мини ("Трояново - 1", "Трояново - север", "Трояново - 3"). Както за добивните така и за откривните хоризонти тя е различна. За случая е прието дължина $l_{\text{забой}} = 3,5 \text{ km}$. Широчината на хоризонта (стъпалото) е от 300 до 900 m. Приета е широчина 500 m. Разположението на ГЛТ зависи от габаритните размер на добивните машини. Можем да приемем, че е разположен на 350 m от началото на хоризонта, като разстоянието между задвижващите станции е 1000 m. Роторните багери могат да заемат различни позиции на откривния хоризонт: двата близо един до друг в ляво и дясно на забоя, един до друг в средата на забоя, единият в ляво а другият в дясно на забоя, единият в края на забоя, а другият в неговото начало. Освен това те напредват непрекъснато и по посока на хоризонта. Независимо от това, тяхно движение по дължината на забоя и широчината на хоризонта, не оказва влияние върху положението на ЦЕТ. Това е така, защото на всеки един от багерите KR-710, ER-1200, ER-2000, ER-4000 върху кабелен барабан е навит захранващ кабел с дължина от 1,5 до 2,5 km т.е. загубата на напрежение и мощност в захранващия кабел на багера е винаги постоянна, без значение на положението му по дължината и широчината на участъка. Следователно центъра на електрическите товари ще зависи единствено от стационарно разположените задвижващи станции на ГЛТ в дадения участък.

От посочените данни в (Върбев, 2010) за инсталираните мощности на електрическите консуматори използвани в „Мини Марица изток“ ЕАД се вижда, че подвижните трансформаторни подстанции с мощност на силовия трансформатор от 10 MVA, могат да захранват два роторни багера ERs – 1200 и една задвижваща станция на ГЛТ - 2250 (4000 kW). Възможни са и други комбинации. За да бъдат минимални загубите на мощност и електроенергия в електрическата мрежа и да се облекчи пускането на най-мощният консуматор, е необходимо подвижната подстанция да е възможно най-близо до задвижващата станция на ГЛТ, която тя захранва. Такава ситуация е показана на фигура 2. В случая това е задвижваща станция 1.



Фиг. 2. Електрозахранване на откритен хоризонт по схемата “дълбок въвод”

В редактирания от Дагряева справочник (1988) е показана методика за определяне на стъпката на придвижване на подвижни трансформаторни подстанции по минимални приведени разходи. Поради липса на данни за различни икономически показатели, използвани в тази методика, стъпката на преместване на подвижната подстанция ще определим в зависимост от напредването

на добивните или откривните работи. С напредването на забоя, от технологична гледна точка, е необходимо да бъде преместен и ГЛТ. Това ще наложи със същата стъпка да бъде преместена и подстанцията. Месечно приблизително забоя напредва с от 25 до 30 m., т.е. с толкова ще се премества и подстанцията. За една година стъпката на преместване на подстанцията ще бъде от 250 до 350 m.

Заклучение

В заключение може да се каже, че ЦЕТ за откритите мини на „Мини Марица изток“ ЕАД зависи от стационарните електрически товари. За да са минимални загубите на мощност и електроенергия е необходимо подвижната подстанция да е по-близо до задвижващата станция, която се захранва от нея. Поставянето на подвижната подстанция на борда на мината довежда до нарастване на загубите. Стъпката на преместване на подстанцията

зависи от напредването на добивните или откривните работи.

Литература

- Анев. Г. 1991. Електрически подстанции и релейни защиты, София, ПБ МНП.
- Федорова А. А., Г. В. Сербиновского. 1980. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. М. Энергия.
- Василев. Н., С. Т. Сидеров. 1991. Електроснабдяване на промишлени предприятия. С., Техника.
- Справочник энэргетика карьера. Галубев. В. А., и др. 1986. М., Недраг.
- Справочник по електроустановкам угольных предприятий. под общей ред. На В. В. Дегярева. М. Недра, 1988.
- Върбев. Т. 2010. Захранване на електрически консуматори в „Мини Марица изток“ ЕАД с подвижни подстанции. Гдишник на МГУ, том III.

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА АЕРОДИНАМИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ В ИЗПРАВЯЩ АПАРАТ НА ДИАГОНАЛЕН ВЕНТИЛАТОР

Николай Переновски, Антоанета Янева, Кристиан Цветков, Любен Тасев

Минно-Геоложки Университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; perenovski@mgu.bg, antoaneta.yaneva@gmail.com, khc1@abv.bg

РЕЗЮМЕ. В доклада е разгледан математически модел на аеродинамичните процеси в изправящия апарат на диагонален вентилатор за местно проветряване на подземни рудници.

MATHEMATICAL MODEL OF FLOW PROCESSES IN OUTLET VANES OF MIXED FLOW FAN

Nikolay Perenovski, Antoaneta Yaneva, Kristian Tzvetkov, Luben Tasev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; perenovski@mgu.bg, antoaneta.yaneva@gmail.com, khc1@abv.bg,

ABSTRACT. A mathematical model of aerodynamic processes in outlet vanes of mixed fan for local ventilation of underground mines is considered in the paper.

Въведение

Въздушният поток, излизащ от изхода на работното колело на диагонален вентилатора, е засукан. За разсукването му се използва изправящ апарат. В него кинетичната енергия на засукания поток се преобразува в статично налягане на вентилатора. При липса на изправящ апарат, в проточната част на вентилатора практически има пълна загуба на статично налягане. Пресмятането на параметрите при процеса на разсукване на потока в изправящия апарат се прави аналогично на пресмятането на параметрите на засукване на потока в работното колело т.е. разглежда се стъпково намаляване на скоростта на засукване на потока в процеса на динамично му взаимодействие с лопатките на изправящия апарат.

Процесът на разсукване на въздушния поток има някои разлики, обусловени от принципни различия в сравнение с процесите на засукване. Например постепенното намаляване на ъгъла на атаката, а следователно и силите на взаимодействие между елементарната частица, намираща се в потока и повърхността на лопатката на изправящия апарат. Друга отличителна особеност на лопатките на изправящия апарат в сравнение с лопатките на работното колело е тази, че лопатките на изправящия апарат при повечето вентилатори са изпълнени от листов профил с вдлъбната форма. Тази форма влияе на ъгъла на взаимодействие на потока с лопатката в различни интервали от време.

Аналитични изследвания

Основен входен изчислителен параметър за пресмятани на геометрията на изправящия апарат е скоростта на засукване на потока на изхода на работното колело. Начално условие за пресмятане на параметрите на процеса на разсукване ще бъде изразът

$$C_{u_{ua}} = C_u, \quad (1)$$

където $C_{u_{ua}}$ е периферната скорост на потока в изправящия апарат;

C_u - периферната скорост на потока в работното колело.

Пълното време $T_{\Sigma ua}$ за взаимодействие на частицата с елементарен обем с лопатката на изправящия апарат се определя по формулата

$$T_{\Sigma ua} = \frac{B_{ua} \cdot \sin \theta_{ua}}{C_a}, \quad (2)$$

където:

B_{ua} е широчината на лопатката на изправящия апарат, m;

θ_{ua} – ъгълът на ориентация на лопатката на изправящия апарат (фиг.1) ,градуси;

C_a – осовата скорост на движение на въздуха през вентилатора, m/s.

Текущото време за динамично взаимодействие на потока с лопатката на изправящия апарат се определя по формулата:

$$T_{ua} = \int_{T=0}^{T=T_{\Sigma ua}} (dt)_{ua} , \quad (3)$$

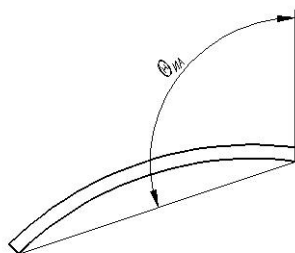
където $(dt)_{ua}$ – безкрайно малък интервал от време (за пресмятането на изправящия апарат), s.

Интервалът от време при пресмятане на скоростта на разсукване може да се определи от израза

$$(dt)_{ua} = \frac{T_{\Sigma ua}}{\Delta_{ua}} , \quad (4)$$

където:

Δ_{ua} – брой на стъпките на интегрирането и се задава от порядъка на $1000 \div 1000000$.



Фиг. 1. Ъгъл на ориентация на лопатките на изправящия апарат

Пресмятането на размера на частицата, намираща се в междуплатковото пространство на изправящия апарат се прави по формулата

$$l_{ua} = \frac{\pi \cdot D_2}{z_{ua}} \cdot \sin(\theta_{ua} - 90) - b_{ua} , \quad (5)$$

където:

z_{ua} – броят лопатки на изправящия апарат, бр.;

b_{ua} – дебелината на лопатката на изправящия апарат, m;

D_2 – диаметърът на изхода на изправящия апарат, m.

Масата на елементарната частица въздух, затворена в междуплатковото пространство на изправящия апарат може да се определи от израза

$$m_{ua} = \rho \cdot l_{ua} \cdot dS , \quad (6)$$

където l_{ua} – дължината на лопатката на изправящия апарат;

ρ – плътността на въздуха;

dS – елементарна площ от лопатката.

Изразът за стъпково определяне на скоростта на разсукване на потока при динамичното му взаимодействие

с лопатката на работното колело е представен с формулата

$$c_{uia} = c_{uia} - \frac{c_{uia}^2}{2 \cdot l_{ua}} \cdot \sin(\Delta\theta) \cdot K_{\text{вп}} \cdot dt , \quad (7)$$

където $K_{\text{вп}}$ е коефициентът на влияние между лопатките, а $\Delta\theta$ е ъгълът между вектора на скоростта на протичане на потока и повърхността на лопатката на изправящия апарат в текущия безкрайно малък интервал от време (фиг.2). За различните безкрайно малки участъци от лопатките на изправящия апарат (dS) този ъгъл има различна стойност. Това е обусловено от два фактора:

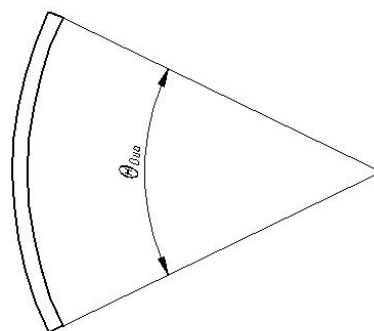
- листовите лопатки имат вдлъбнат профил, поради което в следващия безкрайно малък интервал от време в сравнение с предишния се увеличава ъгълът $\Delta\theta$, а следователно и силата на динамично взаимодействие на въздушния поток с лопатката;
- въздушният поток, преминавайки през изправящия апарат постепенно загубва скоростта си на засукване, в резултат на което постепенно намалява ъгълът между вектора на скоростта и повърхността на лопатката на изправящия апарат, поради което силата на динамично взаимодействие намалява.

За определянето на ъгъл $\Delta\theta$ е необходимо да се направят ред допълнителни пресмятания.

Използува се линеализиран ъгъл на ориентация на лопатката т.е. средната линия на лопатката на изправящия апарат е права, свързваща краищата на хордата на лопатката.

Началният ъгъл на ориентация на лопатката на изправящия апарат в началото на първия безкрайно малък участък от време с отчитане на вдлъбнатостта може да се определи по израза

$$\theta_{uia} = \theta_{ua} + \frac{\theta_{0ua}}{2} . \quad (8)$$



Фиг. 2. Ъгъл на обхват на лопатката

Текущият ъгъл на ориентация на лопатката на изправящия апарат се определя от израза

$$\theta_{uia} = \theta_{uia} - d\theta_{0ua} , \quad (9)$$

където $d\theta_{0ua}$ е стъпка на изменение на централния ъгъл на лопатката за всеки безкрайно малък интервал от време, градуси. Тази стъпка може да се изчисли от израза:

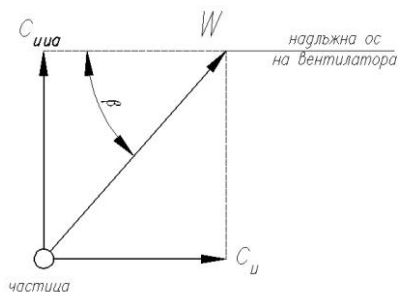
$$d\theta_{0ua} = \frac{\theta_{0ua}}{\Delta t_{ua}}, \quad (10)$$

θ_{0ua} - централен ъгъл на обхвата на лопатката на изправящия апарат, градуси (фиг.2).

Ъгълът между надлъжната ос и направлението на движение на елементарната частица се означава с β . За произволен момент от време той може да бъде определен по формулата

$$\beta = \arctg \frac{C_{uua}}{C_a}, \quad (11)$$

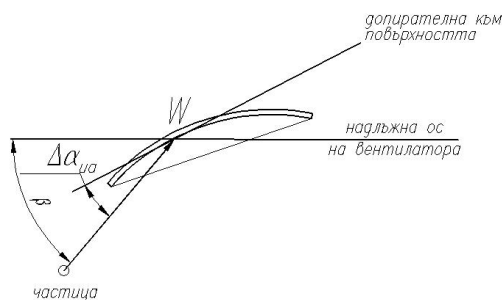
където C_{uua} и C_a са съответно радиалната и осовата скорости на елементарната частица (фиг.3).



Фиг.3. Скоростен триъгълник

Ъгълът между вектора на скоростта на протичане на потока и допирателната към повърхността на лопатката на изправящия апарат за произволен какъв да е момент от време (фиг.4) може да се пресметне по израза:

$$\Delta\alpha_{ua} = \beta - (\theta_{0ua} - 90) \quad (12)$$



Фиг. 4. Траектория на движение на частицата

Условието за приключване на изчисленията е

$$T_{кр ua} \leq T_{ua} + dt_{ua}. \quad (13)$$

Така предложеният математически модел може да послужи за база за създаване на компютърна програма за определяне на геометричните параметри на направляващ апарат на диагонален вентилатор за местно проветряване.

Литература

- Ушаков К.А., И.В. Брусиловский, А.Р. Бушель 1960. *Аеродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций* М. - Гортехиздат.
- Lewis R.I., E.H. Fisher, A. Saviolakus 1972. *Analysis of mixed-flow rotor cascades*, Dept. of mechanical engineering University of Newcastle - London, Her majesty's stationary office.
- Stepanov A.J. 1980. *Turboblowers - Theory, design and application of centrifugal and axial flow compressors and fans* N. Y. John Wiley & Son, inc.

ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА МЕТОДИКА ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА РАБОТНО КОЛЕЛО НА ДИАГОНАЛЕН ВЕНТИЛАТОР ЗА МЕСТНО ПРОВЕТРЯВАНЕ

Николай Переновски

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; perenovski@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В доклада са разгледани теоретичните основи за оразмеряването на работно колело на диагонален вентилатор за местно проветряване, чрез използване на метода на крайните елементи.

THEORETICAL METHOD FOR SIZING A DIAGONAL FAN'S IMPELLER FOR LOCAL VENTILATION

Nikolay Perenovski

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; perenovski@mgu.bg

ABSTRACT. A theoretical method for sizing a diagonal fan's impeller for local ventilation using the finite element method is laid in this paper.

Въведение

За оптимизиране на конструкцията на геометричната форма на колелото и корпуса на вентилатора и изправящия апарат е необходимо да се определи закона за движение на въздушния поток в радиално направление, който пък от своя страна зависи от текущата стойност на скоростта на засукване на потока в различни моменти от преминаването му през лопатките на работното колело и изправящия апарат.

При изчисляване на сложни динамични системи с нелинейни закони за изменение на параметри в машиностроенето, в последните години все по-широко приложение намира т.н. стъпков метод, наречен още метод на крайните елементи. Същността на метода се състои в следното – разделя се сложният динамичен процес на достатъчно голям брой прости, а след това се разглежда процесът на преобразуване на търсения параметър за всеки един от тези процеси, съответстващи на достатъчно малки интервали. В такъв случай процесът на промяна на параметъра за всеки един от тези интервали се разглежда като равномерен и е възможно достатъчно просто да се опише с математически уравнения, съответстващи на равномерно движение на физическо тяло.

Специфична особеност на този метод е достатъчно голямото количество изчисления – пълен комплекс от всички необходими изчисления за всеки един от интервалите. За достатъчна точност на пресмятанятия е необходимо да се изберат голям брой участъци – обикновено от 1000 до 1000000, затова подобни методики за изчисление се реализират само с помощта на компютърна техника.

Аналитични изследвания

В резултат на реализиране на гореизложения подход можем да разгледаме стъпково преобразуването на аеродинамичните параметри на вентилатора при динамичното взаимодействие на работното колело и изправящия апарат с въздушния поток. За целта процесът на взаимодействие на колелото с потока се разделя на безкрайно малки интервали от време и се разглежда по участъци изменението на аеродинамичните параметри. При това се разглежда движеща се в потока частица въздух с елементарен обем.

За оптимизиране на конструкцията на работното колело и корпусът на вентилатора в зоната на работното колело и изправящия апарат е необходимо да се определи законът за движение на въздушния поток в радиално направление, който от своя страна зависи от текущото значение на радиалната скорост на преместване на потока. Схемата на взаимодействие на лопатката с потока е показана на фиг.1.

Законът за движение на въздушния поток в радиално направление ще бъде:

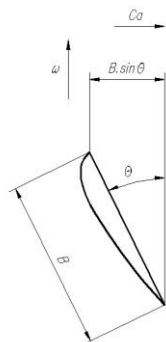
$$Y_{ri+1} = Y_{ri} + c_{ri} \cdot dt, \quad (1)$$

където:

Y_{ri+1} - големината на радиалното преместване на потока в текущия момент за безкрайно малък отрязък от време dt ;
 Y_{ri} - големината на радиалното преместване на потока за интервала от време от началото на взаимодействието до разглеждания момент от време t ;

C_{ri} - текуща стойност на радиалната скорост на преместване на потока ,m/s;

dt - безкрайно малък интервал от време ,s.



Фиг. 1. Ориентация на лопатката

Интервалът от време при изчисляване на големината на радиалното преместване на потока може да се определи от израза:

$$dt = \frac{T_{\Sigma}}{\Delta}, \quad (2)$$

където:

Δ – брой на стъпките на интегрирането по време от 1000 ÷ 1000000;

T_{Σ} – пълното време за взаимодействие на частицата елементарен обем въздух с лопатката на работното колело ,s.

Пълното време за взаимодействие се определя по формулата

$$T_{\Sigma} = \frac{B \cdot \sin(\theta + \theta_b)}{C_a}, \quad (3)$$

където:

B е широчината на лопатката на работното колело, m;

θ – монтажният ъгъл на лопатката на работното колело, градуси;

θ_b – ъгълът на усукване на лопатката на работното колело на изчислителния радиус ,градуси;

C_a – осовата скорост на въздушния поток, m/s.

Текущото време за динамично взаимодействие на потока с лопатката на работното колело се определя по формулата

$$T = \int_{T=0}^{T=T_{\Sigma}} dt, \quad (4)$$

При използване на израза за определяне на големината на радиалното преместване на потока в резултат на засукването му е необходимо да се приеме начално условие

$$Y_r = 0. \quad (5)$$

Големината на радиалната скорост на преместване на потока за безкрайно малък интервал от време зависи от текущата стойност на центробежната сила, действаща на въздушния поток в междупатъчния канал. Тя може да се пресметне по израза

$$c_{ri} = \frac{F_u}{\rho \cdot V_{\text{възд}}} \cdot dt, \quad (6)$$

където:

F_u е текущата стойност на центробежната сила, действаща върху въздушния поток в междупатъчния канал, N;

ρ – плътността на въздуха, kg/m³;

$V_{\text{възд}}$ – обемът на въздуха в работното колело, m³.

Обемът въздух в междупатъчния канал може да се определи от израза

$$V_{\text{възд}} = \frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)}{4} \cdot B_{\text{cp}} \cdot \sin(\theta + \theta_b) \cdot K_{\text{з.ср}}, \quad (7)$$

където:

D_2 е диаметърът на изхода на работното колело, m;

D_1 – диаметърът на входа на работното колело, m;

$B_{\text{ср}}$ – широчината на лопатките на средния радиус на работното колело, m;

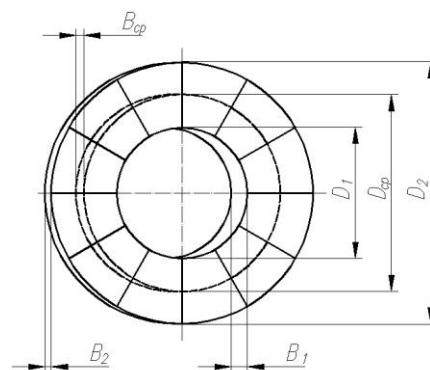
$K_{\text{з.ср}}$ – средният коефициент на запълване в средата на работната част на работното колело.

Отношението на диаметрите на входа и изхода на работното колело може да се представи с коефициента

$$K = \frac{D_1}{D_2}. \quad (8)$$

Тогава

$$V_{\text{възд}} = \frac{\pi \cdot (D_2^2 - (K \cdot D_2)^2)}{4} \cdot B_{\text{ср}} \cdot \sin(\theta + \theta_b) \cdot K_{\text{з.ср}}. \quad (9)$$



Фиг. 2. Схема за определяне на обема на въздуха в работното колело

Средният коефициент на запълване на проточната част на работното колело може да се пресметне по формулата

$$K_{з.ср} = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot k_p - 0,765 \cdot z \cdot c}{\pi \cdot D_2 \cdot k_p}, \quad (10)$$

където:

k_p е коефициентът на радиуса ($k_p = 0,55$ на входа на работното колело или $k_p = 1$ на изхода на работното колело);
 z – броят на лопатките на работното колело, броя;
 c – максималната широчина на напречното сечение на лопатката, m.

За определяне на геометричните размери на формата на корпуса и работното колело на машината е необходимо да се направи пресмятане за съответните радиуси на работното колело (фиг.2), като при това се използват геометричните параметри на профила на лопатката за съответните сечения.

Големината на центробежната сила, действаща на въздушния поток в междуплатковото пространство може да се изчисли по изрази

$$F_u = \frac{\rho \cdot V_{свз\partial} \cdot c_u^2}{R_{ср}}, \quad (11)$$

където:

c_u – скорост на засукване на потока, m/s;
 $R_{ср}$ – среден радиус на работното колело, m.

Средният радиус може да се пресметне по изрази

$$R_{ср} = \frac{D_2 \cdot k_{р.ср}}{2}, \quad (12)$$

където $k_{р.ср}$ е коефициентът на радиуса на средната линия на лопатката.

След заместване за центробежната сила се получава

$$F_u = \frac{\rho \cdot \pi \cdot (D_2^2 - (K \cdot D_2)^2) B_{ср} \cdot \sin(\theta + \theta_b) K_{з.ср} \cdot c_u^2}{2 \cdot D_2 \cdot k_{р.ср}}. \quad (13)$$

Ако заместим (2.11) в (2.6) ще получим уравнение за определяне на текуща големина на радиалната скорост на преместване на въздушния поток

$$c_r = \frac{c_u^2}{R_{ср}} \cdot dt. \quad (14)$$

Ако заместим (14) в (1) ще получим израз за текущото преместване на потока в зависимост от големината на скоростта на засукване

$$Y_{ri+1} = Y_{ri} + \frac{c_u^2}{R_{ср}} \cdot dt^2, \quad (15)$$

където:

Y_{ri+1} е големината на радиалното преместване на потока в текущия момент за безкрайно малък интервал от време;
 Y_{ri} – големината на радиалното преместване на потока във времеви интервал от началото на взаимодействието на частицата до разглеждания момент от време.

Големината на статичното налягане, получено от действието на центробежната сила в канала между лопатките в текущия момент от време може да се опише с уравнението

$$p_{st,i} = \frac{F_u}{S_i} \cdot \sin \varphi, \quad (16)$$

където:

S_i е площта на повърхността, на която действа налягането, създавано от центробежната сила, m²;
 φ – ъгълът на наклона на конуса на корпуса и на работното колело, градуси.

Площта на повърхността, на която действа налягането, създавано от центробежната сила се пресмята по изрази

$$S_i = \pi \cdot D_2 \cdot B_i \cdot \sin(\theta + \theta_b), \quad (17)$$

където B_i е широчината на лопатката на работното колело, определена на съответен радиус, m.

При пресмятането на (16) и (17) е необходимо да се определи широчината на лопатката за поне 6 – 7 сечения.

При определяне на големината на налягането, създавано от центробежната сила в диагонално работно колело се използва стойност на ъгъл φ за последния безкрайно малък участък (на изхода на работното колело).

Текущите стойности на ъгъла на конусност може да се определят от

$$\varphi_i = \arctg \left[\frac{\frac{c_u^2}{R} \cdot dt^2}{\frac{B_i \cdot \sin(\theta + \theta_b)}{\Delta}} \right]. \quad (18)$$

Горният израз може да се запише и така

$$\varphi_i = \arctg \left(\frac{c_u^2 \cdot dt^2 \cdot \Delta}{R \cdot B_i \cdot \sin(\theta + \theta_b)} \right), \quad (19)$$

или

$$\varphi_i = \arctg \left(\frac{c_r \cdot dt \cdot \Delta}{B_i \cdot \sin(\theta + \theta_b)} \right), \quad (20)$$

където R е радиусът, за който се прави пресмятането.

Заклучение

Посочената методика може да послужи за оразмеряване на параметрите на работното колело на диагонални вентилатори за местно проветряване.

Литература

- Брусиловский И.В. 1984. *Аэродинамика осевых вентиляторов*. М. Машиностроение.
Верещагин В.П. 1974. *Шахтные вентиляционные установки местного проветривания*. М. Недра.

ARCHIMEDES AND ARCHIMEDES' CONSTANT

Katarina D. Zhivkovich

Mathematical High School, Belgrade, zivkkev@drenik.net

ABSTRACT. Archimedes' constant, the number Pi (π) has fascinated mathematicians since ancient times and has since been the subject of their research. This paper shows a short history of the number Pi (π) to the appearance of the Greek mathematician Archimedes. This paper also considers Archimedes' contribution with regard to the definition of Archimedes' constant, the number Pi (π).

Keywords: Mathematics, Archimedes constant, number Pi, Archimedes.

АРХИМЕД И АРХИМЕДОВАТА КОНСТАНТА

Катарина Д. Живкович

Математическа гимназия, Белград, zivkkev@drenik.net

РЕЗЮМЕ. Константата на Архимед, числото π очарова математиците от древни времена и оттогава е обект на техните изследвания. Докладът представя накратко историята на числото π и появата на гръцкия математик Архимед. Разгледан е също приносът на Архимед при определяне на Архимедовата константа, числото π .

Ключови думи: Математика, Архимедова константа, числото π , Архимед.

Introduction

"The number Pi has been known since ancient times and it shows the ratio of the circumference and the diameter of a circle, and is usually written down as 3,14. The role of this number was specially highlighted 1706, in British mathematician William Jones' (1675-1749) work called Synopsis Palmariorum Matheseos. The number Pi was probably inspired by the Greek work for circumference, $\pi\epsilon\rho\iota\phi\epsilon\rho\iota\alpha$ (periphery). This designation was gradually popularized in the works of mathematician Leonhard Euler. In literature on the History of mathematics, Pi is also known as Archimedes' constant, but also as Ludolfs' number. In 1761, Johann Heinrich Lambert (1728-1777) was the first to prove that Pi is an irrational value. Adrien-Marie Legendre (1752-1833) also produced a proof in 1794, that Pi raised to the square is an irrational constant. But it was only in 1882 that Ferdinand von Lindemann (1852-1939) managed to prove that Archimedes' constant also is a transcendental number, which means that it cannot be the root of integer polynomials. This result showed that one of the best known mathematical problems in history, i.e. squaring the circle, cannot be solved rationally."¹

The history of the number Pi before Archimedes

The first known calculations of the number Pi originate from ancient Egypt, approx. 2500 BC. These calculations have not been documented anywhere, but it is believed that they were used to build the Great Pyramid in Gizeh, because the pyramid has a base that measures 1760 cubits and a height of 280 cubits, and if we calculate the ratio of these two values, we obtain the following:

$$\frac{1760}{280} \approx 6.285714285714286 \approx 2\pi, \\ \pi \approx 3.142$$

And this calculation is one of the most precise in ancient History, the error is only 0.04%.

The first known record of number Pi was made by Egyptian writer Ahmosis, approx. 1750 BC in the Rhind papyrus. In that record it has the value 3.16. This value is much more inaccurate than the value originating from Egypt, with an error of 0.6%. In the 19th century BC, Babylonian mathematician used Pi with a value of approx. $25/8$, where the error was 0.5%. In the ninth century BC, Indian mathematician Yajñavalkya calculates the value of Pi as 3.13888... with an error of only 0.09%. Later, Chinese mathematician Liu Hui, in the third century BC, gives a very accurate value of Pi, using a method similar to that of Archimedes. He determines Pi

¹Letić Dušan, Cakić Nenad, Davidović Branko, Matematičke konstante, Beograd, 2010.

between 3.141024 and 3.142708, which on average is 3.141864, with an error of less than 0.01%. Later, he gives an even more accurate approximation: $\pi \approx \frac{3927}{1250} = 3.1416$.

Archimedes life (287 BC-212 BC)

Archimedes (Fig. 1) was a Greek mathematician, physicist, engineer, inventor and astronomer from Syracuse in Sicily. The year of his birth is based on the claims of historian John Tzetzes that Archimedes lived 75 years. Archimedes' biography was written by his friend Heracleides, but this work has been lost, leaving the details of his life unclear. For example, it is not known whether he was ever married or had children. Archimedes' father was mathematician and astronomer Phidias (not the sculptor Phidias). When Archimedes was born, Phidias was a relatively poor citizen, one of many in Syracuse. But he was not poor for very long, as their relative Hierobecame ruler of the city. Phidias taught his son everything he knew. From early childhood, he developed in him the love for mathematics, mechanics and astronomy.

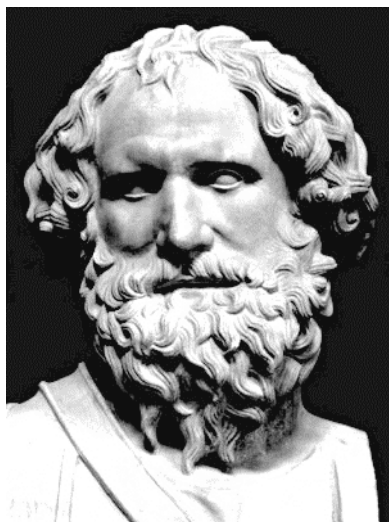


Fig. 1. Archimedes from Syracuse (287-212 BC)

Archimedes' father Phidias had the following idea: he would give his son all of his knowledge, who should later do with it as he pleases. Archimedes quickly adopted his father's knowledge, which for him was only the beginning of his learning. His spirit was looking for more knowledge and learning, which he could not find in Syracuse. Therefore he went to Alexandria, which was ruled by the Ptolemaic dynasty, who had founded the famous Library of Alexandria. At that time, Alexandria was the centre of natural sciences, which then included astronomy, mathematics, medicine and philology. In Alexandria, Archimedes did not achieve what he probably could, - he did not become a member of the court, whose works would praise the ruling dynasty. He was only interested in mathematics.

Many talented mathematicians worked at the Library of Alexandria. The most versatile of them was the brilliant Eratosthenes, a future friend of Archimedes. An unwritten rule was that any discovery, prior to publication, has to be sent to another mathematician to be checked. And so, Archimedes and Eratosthenes exchanged numerous letters until

Archimedes' death, and these letters contained almost all discoveries of the two. After coming back to Syracuse, Archimedes was into astronomy in the beginning.

During the siege of Syracuse, Archimedes invented numerous weapons which were used against the Roman fleet that attacked Syracuse in 215 BC. Neither Archimedes' genius, nor the defense of the citizens of Syracuse did prevent the Romans from Syracuse in 212 BC, when Archimedes died.

"It is also believed that Archimedes designed a huge burning mirror in the shape of a paraboloid, which was used to put enemy vessels on fire. With a little knowledge in physics and mathematics it is possible to calculate that the length of the *latus rectum* (a straight line going through the focal point normally to the axis) is equal to parameter p in the parabolic equation $y^2 = px$. As the focal point of the parabola $y^2 = px$ is in the point $(p/4, 0)$, and assumed that an enemy ship is at a distance of 50 meters from the city wall and that it is placed in the focal point of Archimedes' mirror, at $p/4 = 50$ meters, brings us to the conclusion that its diameter must have been $p = 200$ meters. It is clear that in those times (neither is it today) it was not possible to build a mirror of this size."²

Archimedes' death

Archimedes died in 212 BC during the second Punic war, when Roman forces under general Marcus Claudius Marcellus took Syracuse after two years of siege (Fig. 2). It is told that his last words were "*Noli turbare circulos meos!*" (Do not touch my circles!) (Greek: μη μου τους κυκλους ταραπτε).

Archimedes' death during the siege of Syracuse, is known to us because of Plutarch's biography of general Marcellus. Plutarch tells the following: "*Marcellus was mostly shaken by the unfortunate death of Archimedes. He was studying a geometric shape alone. And, focused on his thoughts and with his eyes fixed to the subject of his study, he neither did notice the Roman breakthrough, nor the fall of the city, when a soldier suddenly approached him and ordered Archimedes to follow him to meet Marcellus, but Archimedes would not to go until he solved the problem and proved the solution. Others tell that the Roman approached him with the intention to kill him immediately with his sword but that Archimedes, seeing him, kindly asked him to wait a little, so that he would not be unfinished and incomplete, but the soldier did not listen and killed him. There is also a third version that Archimedes was killed by soldiers who thought that he was carrying gold, when he was taking his mathematical devices, sun dials, balls and angle meters which makes it possible to measure the size of the sun, to show them to Marcellus. However, all historians agree that Marcellus was very sad and that he turned his head away from his killer, and instead rewarded Archimedes' relatives.*"³

²Petković Miodrag, Petković Ljiljana, *Matematički vremeplov – prilozi za istoriju matematike*, Zmaj, Novi Sad, 2006. (str.2.).

³Plutarh, *Uporedni životopisi knjiga II* (Život Marcelov), (strana 443), August Cesarac, Zagreb, 1988



Fig. 2. Archimedes' death –painted by Edouard Vimont (1846-1930)



Fig. 3. Remains of Archimedes' tomb in Syracuse

It is not rare that appropriate words or images are engraved on gravestones of famous people. These engravings usually describe the greatest achievements, life style or part of the characters of these people. An example is Archimedes' monument in Sicily. Roman statesman and orator Cicero, served as a quaestor in Sicily, 75 BC, 137 years after Archimedes' death. He heard the stories about Archimedes' death and wanted to visit his grave, but none of the locals was able to show the location of Archimedes' tomb. At last he found the tomb near the Agrigata gate in Syracuse, in a ruined state and recognized it by the "small pillar which was showing behind a bus hand on which ball and a cylinder were shown"⁴. Cicero restored the tomb (Fig. 3).

Archimedes contribution to the development of science

Archimedes was one of the leading scientists of Antiquity. Besides Newton and Gauss, he is considered one of the greatest mathematicians. Archimedes has also significant contributions in mechanics and astronomy. He was the first to clearly understand the term of specific weight and in his work "About floating bodies" established the principles of hydrostatics. He gained fame because of great achievements in the field of mechanics, which helped Syracuse to withstand the Roman siege. Archimedes was also an astronomer, thus he found out that one year has $365 \frac{1}{4}$ days.

His works „On the equilibrium of planes" (two books), "Squaring of the parabola", "On the sphere and the cylinder" (two Books), "On spirals", "On Conoids and Spheroids", "On floating bodies" (two Books), "On the Measurement of the Circle", "The Sand Reckoner" and "The Method of mechanical theorems".

By discovering the following principle: when a body entirely or partially immersed in a fluid, it is subject to a force acting up, which has the effect of a temporary weight loss, equal to the weight of the displaced fluid Archimedes laid the foundations for hydrostatics.

Among his practical inventions from the field of hydraulics, the Archimedes screw should be mentioned, which makes possible to transport water from a lower to a higher-level; this device was used for irrigation. (Fig. 4).



Fig. 4. Archimedes-painted 1629 by Domenico Fetti

Archimedes developed the well-known stereometry theorem, which can be obtained from the equilibrium property and incorporated it in his famous work "On the sphere and the cylinder", which states:

The ratio of the volume of the rectangular circular cylinder, the height of which is equal to its diameter and the diameter of the sphere inscribed in that cylinder, is 3:2, which also is equal to the ratio of its surface areas.

This was one of Archimedes' favorite theorems, and following his request, it was engraved on his tombstone. Besides these words, a drawing with three geometrical bodies was also engraved. The figure shows a cone and a sphere inscribed in the cylinder, the height of which is equal to the diameter of the base. It is known that the ratio of the volume of the cone, sphere and cylinder of these dimensions is 1:2:3. This figure symbolizes Archimedes' work in the field of geometry, which he considered his greatest success (Fig. 5). Archimedes discovered the correct formulae for calculating the surfaces of many flat shapes and volumes of geometrical bodies.

⁴Lučić Zoran, Ogleđi iz istorije Antičke geometrije, Službeni glasnik, 2009 (str.281)

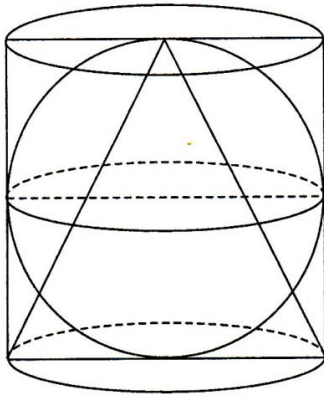


Fig. 5. Archimedes' cone and sphere inscribed in a cylinder, the height of which is equal to the diameter of the base

Archimedes' contribution to the definition of π

Archimedes' calculation of the ratio between the circumference and the diameter of a circle and placing the value of that ratio in a range between $22/7$ and $223/71$ significantly contributed to the development of geometry. This ratio was explained and calculated in the treatise "*On the measuring of circle*". However, he did not name this ratio, nor did he give it a different symbol. After his death, mathematicians named this number Archimedes' constant and started calling it Ludolfs' number in the 17th century, after mathematician Ludolf van Ceulen, who calculated thirty-five decimals of this ratio. In 1706, English mathematician William Jones designated this ratio, or Archimedes' constant, or Ludolfs' number, with the Greek letter " π ", since when it has been called the number π .

Discovering the circumference of a polygon with $2n$ sides, is not Archimedes' direct discovery: this circumference was calculated by Antiphon. But Archimedes simplified and rationalized the figure and, seemingly, obtained a result through simpler and more accurate calculation. Instead of drawing many circumscribed polygons, he aligns the half-sides of polygons with one and the same key (Fig. 6). Indeed, if AB is half of a side of a circumscribed n -polygon; one should only split in half the angle BOA and draw a bisector OC , to obtain the segment AC , equal to a half-side of a circumscribed $2n$ polygon. By then dividing angle COA in half and drawing bisector OD , we obtain segment AD which is equal to the half-side of the circumscribed $4n$ polygon, and so on.

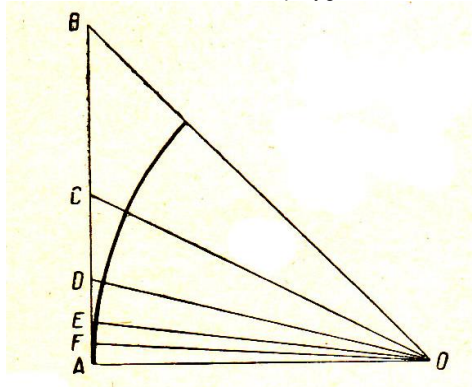


Fig. 6. Alignment of half-sides of circumscribed polygons with one and the same key

If AB is the half-side of a circumscribed hexagon, and accordingly angle BOA is equal to a third of a right angle, then

$$OA:AB = \sqrt{3} : 1 > 265:153 \quad (1)$$

$$OB:AB = 2:1 = 306:153 \quad (2)$$

How Archimedes had the idea to use the approximate value $265:153$ for $\sqrt{3}$, we do not know: it was either already calculated by his predecessors, or he made this calculation himself in one of his lost works on Arithmetic; Archimedes just gives us the result without any explanation.

To determine the length of the half-side AC of a 12-sided polygon, or AD of a 24-sided polygon, etc., Archimedes uses the following theorem: the bisector divides the base line into parts that are proportional to the sides:

$$\begin{aligned} OB:OA &= BC:CA \\ (OB+OA):OA &= (BC+CA):CA \\ (OB+OA):OA &= BA:CA \\ (OB+OA):BA &= OA:CA \end{aligned}$$

But adding (1) to (2), we obtain

$$(OB+OA):BA = (265+306):153 = 571:153$$

Therefore, we have

$$OA:CA = 571:153 \quad (3)$$

or

$$OA = 571 \text{ part, } CA = 153 \text{ parts.}$$

To determine the $OC:CA$ ratio, take into consideration that OC is the hypotenuse of triangle OAC , the legs of which are CA and OA , and therefore we have

$$OC^2 = CA^2 + OA^2$$

But from (3) we have

$$\begin{aligned} OA^2 + CA^2 &= (571^2 + 153^2) \text{ parts.} \\ OC^2 &= (571^2 + 153^2) \text{ parts} \\ OC^2:CA^2 &= (571^2 + 153^2):153^2 = 349450:23409, \end{aligned}$$

Base on that Archimedes writes

$$OC:CA > 591 \frac{1}{3} : 153$$

How Archimedes found the square root of 349450 , is not known.

Continuing to apply the same method in the further side-doubling procedure, he obtains the following value for the half-side of a 24-sided polygon

$$OA:DA > 1162 \frac{1}{8} : 153,$$

$$OD:DA > 1172 \frac{1}{8} : 153$$

Where $1172 \frac{1}{8}$ is the square root of $1373943 \frac{33}{64}$; In this case, Archimedes does not explain either how this square root was calculated.

Continuing with the half-side AE of a 48-sided polygon, Archimedes obtains the following

$$OA:EA > 2334 \frac{1}{4} : 153$$

$$OE:EA > 2339 \frac{1}{4} : 153,$$

And for the half-side OF of a 96-sided polygon:

$$OA:AF > 4673 \frac{1}{2} : 153.$$

But the ratio of radius OA and the half-side of a 96-sided polygon is equal to the ratio between the diameter and whole side of a 96-sided polygon; which means that the ratio of the diameter and the whole circumference is

$$> 4673 \frac{1}{2} : (153 \times 96) > 4673 \frac{1}{2} : 14688$$

Therefore, the ratio between the circumference of the 96-sided polygon and the diameter is

$$< 14688 : 4673 \frac{1}{2} < 3 + \frac{667 \frac{1}{2}}{4673 \frac{1}{2}} < 3 \frac{1}{7}.$$

It is easy to see in the figure that Archimedes here establishes a rule for gradually calculating

$$\text{ctg } \alpha, \text{ctg } \frac{\alpha}{2}, \text{ctg } \frac{\alpha}{4}, \dots$$

To determine the lower boundary (Fig. 7) Archimedes begins with the side of the inscribed n-sided polygon AB. If point B is connected with the opposite end A₁ of diameter AA₁ we obtain a right angled triangle. If we split angle AOB in half and draw a bisector OC, then side AC will obviously be the side of a 2n-sided polygon. However, by drawing CA₁, we can see that in this case, angle AA₁B will be divided in half (based on $\angle AA_1B = \frac{1}{2} \angle AOB$, a $\frac{1}{2} \angle AA_1C = \frac{1}{2} \angle AOC$); Therefore, even when we split the angle in half at A₁ we always get a side of a polygon with a doubled number of sides.

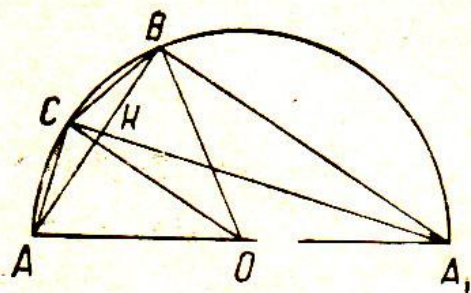


Fig. 7. Sides of an inscribed n-sided polygon AB

Triangles ACA₁ and ACK are similar, based on $\angle CAK = \angle BA_1C$, because they lie on the same arc CB, a $\angle BAC = \angle CA_1A$ and therefore it is $\angle CAK = \angle CA_1A$; where $\angle ACA_1$ as the common angle. Therefore, we have

$$CA_1:AC = AC:CK = AA_1:AK \quad (4)$$

But A₁C is the bisector $\angle BA_1A$; and so we have (per mutando).

$$AA_1:AK = A_1B:BK; \quad (5)$$

From (1) and (2) utomnes ad omnes, ita unus ad unum:

$$CA_1:AC = (AA_1+A_1B):(AK+BK),$$

$$CA_1:AC = (AA_1+A_1B):AB,$$

Where, in the case of a hexagon

$$CA_1:AC = (2 + \sqrt{3}):1$$

etc.

In the same way as in the case with the circumscribed 96-sided polygon, for the inscribed 96-sided polygon we obtain the following ratio of circumference and diameter

$$> (66 \times 96) : 2017 \frac{1}{4} > 6336 : 2017 \frac{1}{4} > 3 \frac{10}{71}.$$

And here it is also necessary to take the square root of very large numbers, but Archimedes gave no explanation how he did that.

It is easy to see that the values he gradually obtained, are

$$\text{cosec } \alpha, \text{cosec } \frac{\alpha}{2}, \text{cosec } \frac{\alpha}{4}, \dots$$

The deviation margin is obviously the same⁵

$$3 \frac{1}{7} - 3 \frac{10}{71} = \frac{1}{497} \approx 0.002.$$

Instead of a conclusion

The fame of Archimedes' work was maintained by the Arabs: Ishak Ibn Hunan, the translator of Archimedes' masterpiece: «On the sphere and the cylinder», Tabit Ibn Kurah, the translator of the treatise: «Measurement of the circle», Almohtasoabil Hasan, al-Jalil as Sijzi, al-Kuhi, al Mahani, al-Biruni, and especially Omar Hajjam, the famous poet Rubaije, and the greatest Arab mathematician Muhamed Ben-Musa al-Khwarizmi⁶.



Fig. 8. The monument of Archimedes, built in 1972, in front of Berlin observatory (by Gerhard Thieme)

⁵Lurje S. J., Arhimed, Prosveta, Beograd 1952 (str. 172, 173, 174, 175, 176)

⁶Risojević Ranko, Veliki matematičari, Nolit, 1981. (str. 22.)

Reference

- Бородин, А.И., Бугай, А.С. *Биографический словарь деятелей в области математики*. КИЕВ, „Радянська школа“, 1979.
- Моћник, Spilman, *Geometrija za više razrede gimnazije i realke*. Državna Štamparija Kraljevine Srbije, Beograd, 1909.
- Кымпан, Ф. *Историја числа π* . Издательство Наука главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1971.
- Lučić Zoran, *Ogledi iz istorije Antičke geometrije*. Službeni glasnik, 2009 (str.281).
- Lurje S. J. *Arhimed*, Prosveta, Beograd 1952.
- Petković Miodrag, Petković Ljiljana. *Matematički vremeplov - prilozi za istoriju matematike*, Zmaj, Novi Sad, 2006.
- Plutarh. *Uporednizi vtopisi knjiga II* (Zivot Marcelov), (strana 443), August Cesarac, Zagreb, 1988.
- Stipančić Ernest. *Putevima razvitka matematike*, Vuk Karadžić, Beograd, 1988.
- Strojk Dirk, *Kratak pregled istorije matematike*. Zavod za udžbenike i nastavna sedstva, Beograd, 1991.
- Risojević Ranko. *Veliki matematičari*, Nolit, 1981. (str.22).
- Жуков. А.В., *О числе π* . Издательство Московского центра непрерывного математического образования, Москва, 2002.
- Živković, D. Katarina, Van Ceulenand His Contribution to the Calculation of the Number π (pi), 11th International Conference „RaDMI 2011“, Sokobanja, Serbia, 2011.

INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF MINE VENTILATION SYSTEMS VIA MULTIPURPOSE CONTROL OF A MAIN FAN ADJUSTABLE SPEED ELECTRIC DRIVE

Oleg B. Shonin, Vladimir S. Pronko

National University of Mineral Resources Engineering "Gornyy", St. Petersburg, Russia

ABSTRACT: The paper focuses on substantiation of a multipurpose control system for a fan frequency variable drive aimed at providing required amount of fresh air on one hand and diminishing energy losses in the system "mains – electrical drive – main fan – ventilation network" on the other hand.

Introduction

The power required to operate a ventilation system can be 25% to 50% of the total power requirements of the mine which results in a remarkable portion of ventilation energy cost (up to 30%) in overall cost of the production. Annual ventilation energy cost can reach 40% of the ventilation system cost. Under current tendency of deep mining and energy cost escalating, the impact of energy-intensive ventilation system on sustainability of mining enterprises is of great importance. So, identifying and capturing energy saving opportunities is essential for cutting down the cost of mine production and achieving the overall optimum profitability of the mine.

It is common that ventilation fans are controlled manually and operated 24 hours per day at maximum capacity of the current day set point. High level of energy consumption is due to a relatively low operational efficiency of fans, exceeded air-flow in comparison with real-time requirements according to a current stage of mining, energy losses in an electrical drive system which depends on fan modes of operation, energy quality in the mine power distribution system etc. Opportunity exists for a decrease in energy consumption by managing the ventilation system to provide only the air required which depends on fresh air-flow demand after blasting, non production time between shifts, travel time to work place, Diesel machinery "off" or "on", non operating time for maintenance or holiday and so on. Implementation of ventilation on demand (VOD) concept [1] requires usage of a mine control system which focuses on using minimal amounts of energy and resources. The system is expected to implement real-time tracking and monitoring of personnel and diesel equipment location and status, control and optimization of ventilation equipment including all fans and air regulators/vent doors, monitoring of air quality and air quantity, real-time evaluation of mine ventilation network, air mass flow and heat balance.

Central role in optimization of air-flow distribution at different levels of a mine plays a control system of a main fan variable

frequency drive (VFD), which is considered as subsystem integrated into overall mining process control system. Without the technology application of using motor speed to control fan output, the VOD design would not be as efficient or have the flexibility as required for a safe and robust system. The paper presents a complex systems approach for development of energy efficient mine ventilation system which is intended to minimize energy losses at cross-sections of energy flow in the system "mine supply grid – electric drive – main mine fan – mine ventilation network" via multipurpose control of main fan adjustable speed drive (Fig1). The paper focuses on speed control of main fan productivity, interaction of electrical drive system and power supply grid, minimization of energy losses in electrical drive system on the basis of a search algorithm and optimal start-up control law applications.

Mechanical, speed and combined control of a main mine fan

Fans are classified into two main categories: centrifugal and axial-flow. Fan selection depends on physical constraints of the site, especially depth of the mine. Analysis of energy consumption and energy savings potentials has been fulfilled on the basis of centrifugal and axial-flow fan performance curves which were approximated as follows

$$\begin{aligned} H(Q) &= a_0 Q^2 + a_1 Q + a_2, \\ P(Q) &= b_0 Q^2 + b_1 Q + b_2, \quad \eta = H \cdot Q / P, \end{aligned} \quad (1)$$

where H – pressure, Q – air flow, P – shaft power, $P_a = H \cdot Q$ – fluid power, η – fan efficiency, a_k, b_k – polynomial coefficients depending on a variable vane angle α , which for a centrifugal fan varies in the range $\alpha = 0, 10 \dots 70^\circ$.

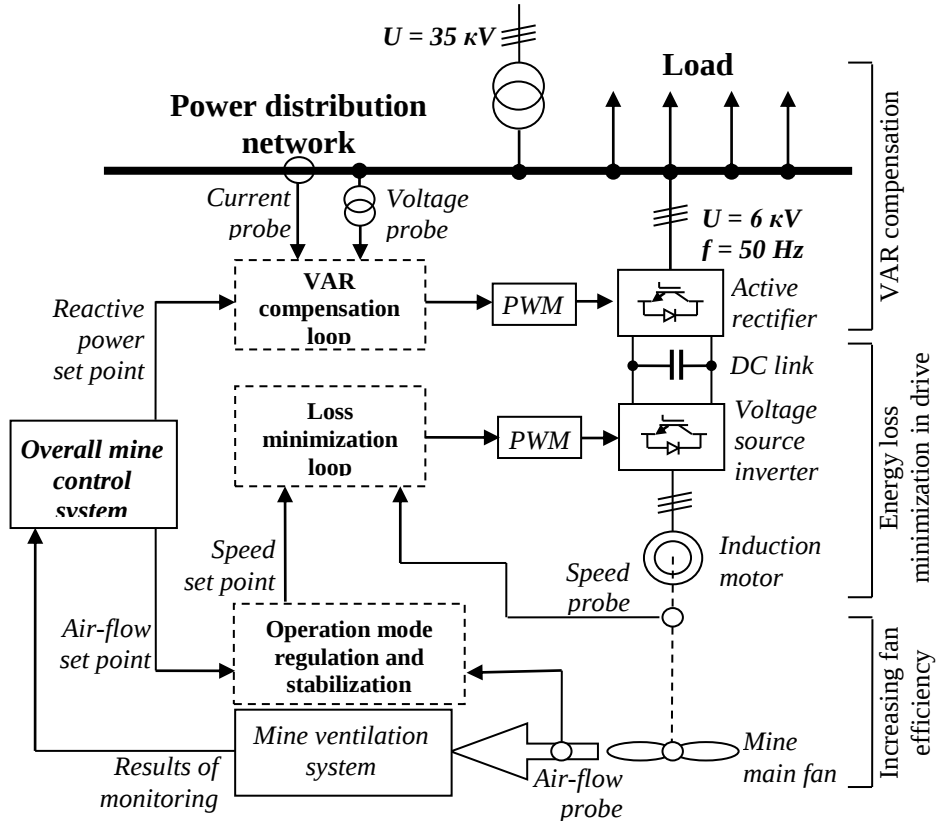


Fig.1. Structure of frequency variable drive and control system of a main mine fan

Using affinity laws

$$Q = Q_0 \cdot \hat{\omega}, \quad H = H_0 \cdot \hat{\omega}^2, \quad P = P_0 \cdot \hat{\omega}^3 \quad (2)$$

and expressions (1) we can write speed-controlled performance characteristics:

$$\begin{aligned} H(Q, \hat{\omega}) &= a_0 Q^2 + a_1 Q \cdot \hat{\omega} + a_2 \cdot \hat{\omega}^2, \\ P(Q, \hat{\omega}) &= b_0 Q^2 + b_1 Q \cdot \hat{\omega} + b_2 \cdot \hat{\omega}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

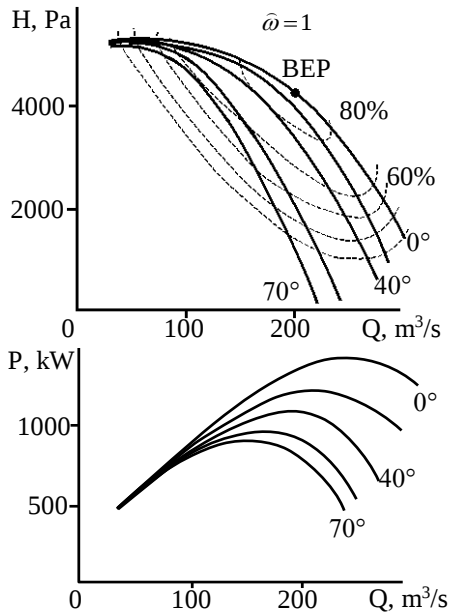


Fig.2. Centrifugal fan curves at a nominal speed $\omega_0=750$ rpm controlled by changing the vane angle α

where $\hat{\omega} = \omega / \omega_0$, ω_0 - nominal speed value, P_0 , Q_0 , H_0 - rated operation mode characteristics.

For vane angle $\alpha = 0^\circ$ and best efficiency point (BEP) coordinates ($H_0 = 4700$ Pa, $Q_0 = 200$ m³/s, $P_0 = 1.6$ MW, $\eta_0 = 84\%$) polynomial coefficients a_k, b_k are as follows: $a_0 = -0.08$, $a_1 = 13.3$, $a_2 = 4920$, and $b_0 = -9.42 \cdot 10^{-3}$, $b_1 = 4.64$, $b_2 = 487.5$.

Centrifugal fan performance curves for aero-dynamical and shaft speed control methods are presented in Fig. 2 and Fig.3. Fig.3 also comprises a set of yearly operating points over a 10-year cycle of the fan life.

Operating points are defined as intersections of fan and system curves or from equations $H(Q, \alpha) = R \cdot Q^2$, $\omega = \omega_0 = \text{const}$, $\alpha = \text{var}$ for an aero-dynamically controlled fan and $H(Q, \hat{\omega}) = R \cdot Q^2$, $\hat{\omega} = \text{var}$, $\alpha = \text{const}$ for a speed-controlled fan, where R - equivalent resistance of the airway. At regulating the fan under constant airway resistance, operating point moves along the system curve $H(Q) = R \cdot Q^2$. If the system resistance fluctuates $R = R_a \pm \Delta R$ and the air-flow should be kept at a constant value $Q = Q_a = Q_{ref}$ (Fig.4) stabilization can be achieved by the shaft speed correction within the range $\omega = \omega_a \pm \Delta \omega$, where speed increment $\Delta \omega$ is found from the equation:

$$a_2 \cdot \Delta \hat{\omega}^2 + \Delta \hat{\omega} \cdot (2 \cdot \omega_a \cdot a_2 + a_1 \cdot Q_a) - \Delta R \cdot Q_a^2 = 0 \quad (4)$$

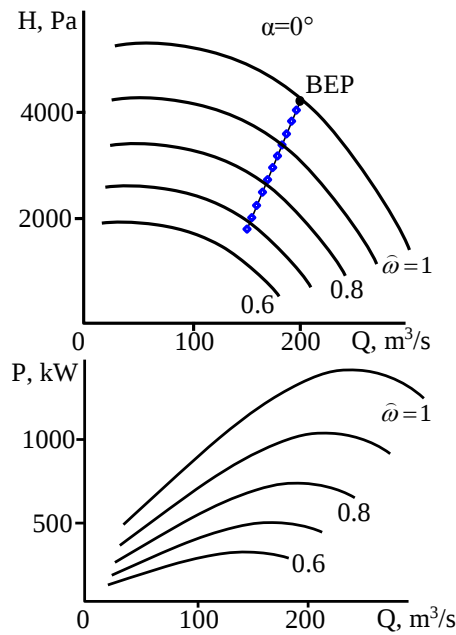


Fig.3. Speed-controlled centrifugal fan at the vane angle $\alpha=0^\circ$ with a set of yearly operating points over 10-year period

A mine can take years to be fully developed. In the beginning of life-time the fan may be substantially oversized and initial operating points may be far from the fan best efficiency point (BEP). Variations of shaft power P and fan efficiency η due to changing of yearly operating points over 10-year fan (see Fig.2) are presented in Fig.5. The graphs have been obtained under conditions that terminal operating points for both control methods coincide with BEP. Analysis of curves obtained indicates that usage of speed control fans gives substantial energy savings due its bigger efficiency as compared to vane angle-controlled fans. Total energy savings over 10-year operational cycle amount to $18 \cdot 10^6$ kWh.

Figure 6a demonstrates lines of constant efficiency η at decreasing the reduced speed values from the original fan speed. The lines are the parametric representation of function $H(Q)$ where $H = H_{\eta,\alpha} \cdot \hat{\omega}^2$, $Q = Q_{\eta,\alpha} \cdot \hat{\omega}$ and $\hat{\omega} = \text{var}$. Analyzing the graphs we can state that maximum effect of speed control application can be achieved if yearly operating points lies in zone "A" where $0.8 \leq \eta \leq 0.84$.

For an axial-flow fan, BEP is located approximately in the centre of performance characteristic curves $H(Q, \alpha)$, $\alpha = \text{var} = 30, 35, \dots, 65^\circ$. In this case, application of both aerodynamical and speed control methods may provide better efficiency than application of only speed control. Fig 6b represents a set of axial fan curves used for an assessment of possible effect from combined control applications. Yearly operating points are plotted together with constant efficiency zones and performance characteristics obtained at different pitches angles $\alpha = 30, 35, \dots, 65$.

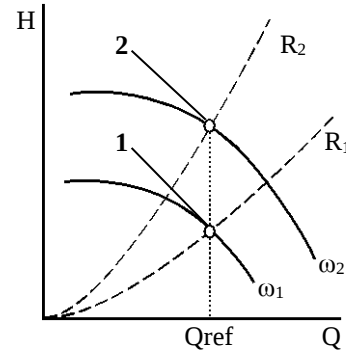


Fig.4. Speed-based air-flow stabilization under variations of the system resistance $\Delta R = R_1 - R_2$

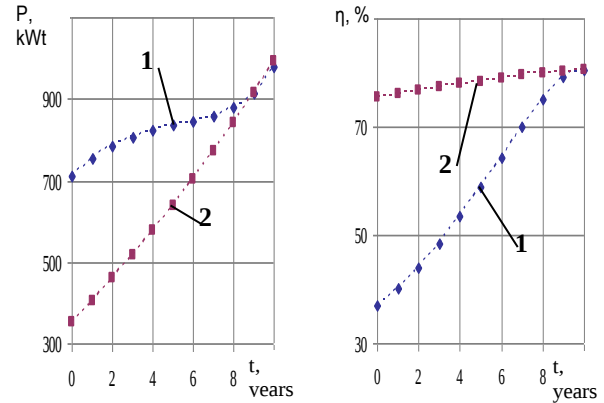


Fig.5. Influence of control methods applied (1 – aero-dynamical, 2 – speed) on shaft power and efficiency of a centrifugal fan during the fan life-time under condition that terminal operating points in both cases coincide with BEP

Results of programmed calculations are summarized in Table1. The data obtained refer to cases of speed control with constant pitch angle $\alpha = 50^\circ$ and combined control based on both angle and speed variations in the range $50^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$ and $0.44 \leq \hat{\omega} \leq 1$. As it is seen from Table 1, the combined method gives the most noticeable advantage of 9.2% at the initial operating point.

Fig.7 illustrates displacement of fan curves in relation to operating point 5 (see table1) by changing both pitch angle and shaft speed. In case of speed control ($\hat{\omega} = 0.8, \alpha = 50^\circ$, Fig.7a) fan efficiency is of $\eta_1 = 77\%$. In case of combined control, efficiency has been increased up to $\eta_2 = 80\%$ by changing both shaft speed $\hat{\omega} = 0.64$ and pitch angle $\alpha = 60^\circ$ (Fig 7b).

Results of analysis obtained allow us to state that fan correct selection and its proper sizing along with application of the fan optimum control can lead to significant energy savings.

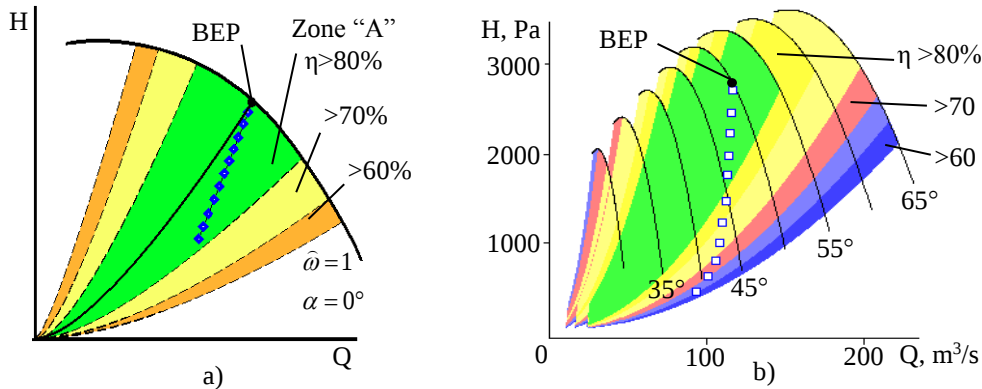


Fig.6. Constant efficiency zones for centrifugal – a) and axial-flow fan – b)

Table 1

Comparison of speed and combined methods of the fan control

Operating Point	Speed control, $\alpha = 50^\circ$		Combined control			Efficiency difference	
	$\eta_1, \%$	Speed, p.u.	$\eta_2, \%$	Pitch angle, α	Speed, p.u.	Absolute	Relative
1	57.6	0.64	66.8	65	0.44	+9.2	+16.0
2	62.9	0.69	71.0	65	0.48	+8.1	+12.9
3	67.4	0.73	74.2	65	0.52	+6.8	+10.1
4	72.5	0.76	77.3	65	0.55	+4.8	+6.6
5	77.1	0.80	80.1	60	0.64	+3.0	+3.9
6	80.1	0.84	82.0	55	0.74	+1.9	+2.4
7	83.3	0.88	84.2	55	0.79	+0.9	+1.1
8	84.8	0.91	85.0	55	0.82	+0.2	+0.2
9	86.0	0.94	86.0	50	0.94	0	0.0
10	86.6	0.97	86.6	50	0.97	0	0.0
11	87.0	0.99	87.0	50	0.99	0	0.0

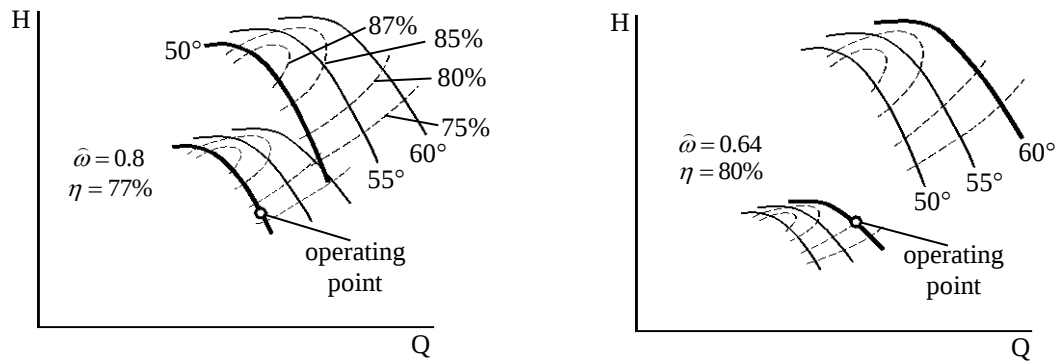


Fig.7. Maximum efficiency search at a given operating point by changing a pitch angle and a shaft speed

Energy loss minimization in a frequency variable drive system

Steady state mode of operation

Additional energy savings in the ventilation system can be realized on the basis of extremum control algorithms which are capable to provide required mode of fan operation along with simultaneous minimization of steel and copper energy losses in a motor which dependence on flux linkage is featured with explicit minimum. Optimum drive control may be implemented with different methods [2, 3, 4], for instance with loss model-based method which however is vulnerable to uncertainty and no stability of the motor parameters. The paper deals with on-line iterative method of searching the minimum of overall

energy losses which is insensitive to fluctuations of the motor parameters and is capable to minimize total drive energy losses.

Loss minimization problem has been studied with assistance of mathematical and computer model of an induction machine (IM) in the form of differential equations, which took into account separate impacts of eddy current and hysteresis phenomena on nonlinear magnetization processes [5]. Simulation has been carried out in Matlab Simulink environment using parameters of the induction motor of $P = 315 \text{ kW}$, $U = 660 \text{ V}$, $R_1 = 0,012 \Omega$, $R_2 = 0,014 \Omega$, $L_1\sigma = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ H}$, $L_2\sigma = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ H}$, $R_p = 280 \Omega$, $L_p = 0,018 \text{ H}$. Drive mechanical load is defined by a ventilator-related characteristics for which torque M and power P are

varied as follows: $M = M_0 \cdot \hat{\omega}^2$ and $P = P_0 \cdot \hat{\omega}^3$. In this case of scalar control, voltage U and frequency f of VSI vary due to the law: $(U / f^2) = const$. In order to find the function extremum, a set of curves "energy losses P_t versus flux linkage Ψ_m " has been obtained within the motor angular velocity range $0.5 \leq \hat{\omega} \leq 1$. Typical graph $P_t(\Psi_m)$ (fig.5a) shows that at $\hat{\omega} = 0.8$ minimum of energy losses takes place at $\Psi_m = 0.52 \cdot \Psi_{m0}$, where Ψ_{m0} is a rated value. Optimal control law corresponds to line 1 (Fig 5.b), which connects extremum points of curves $P_t(\Psi_m)$ for different values of the motor speed. Line 2 reflects energy losses according to the scalar drive control law: $(U / f^2) = const$.

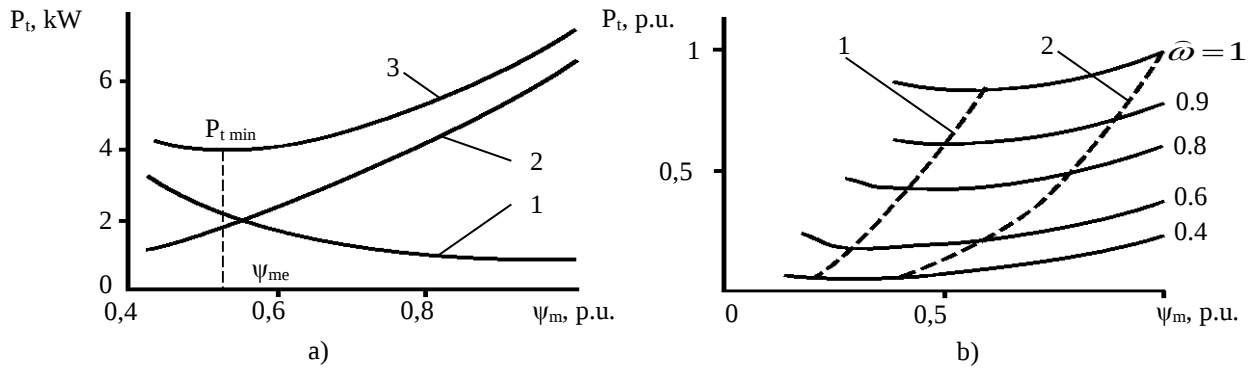


Fig.8. Variations of steel loss (1), copper loss (2) and total losses (3) versus flux linkage – a) and total losses variation under optimal control (1) and traditional scalar control (2) – b)

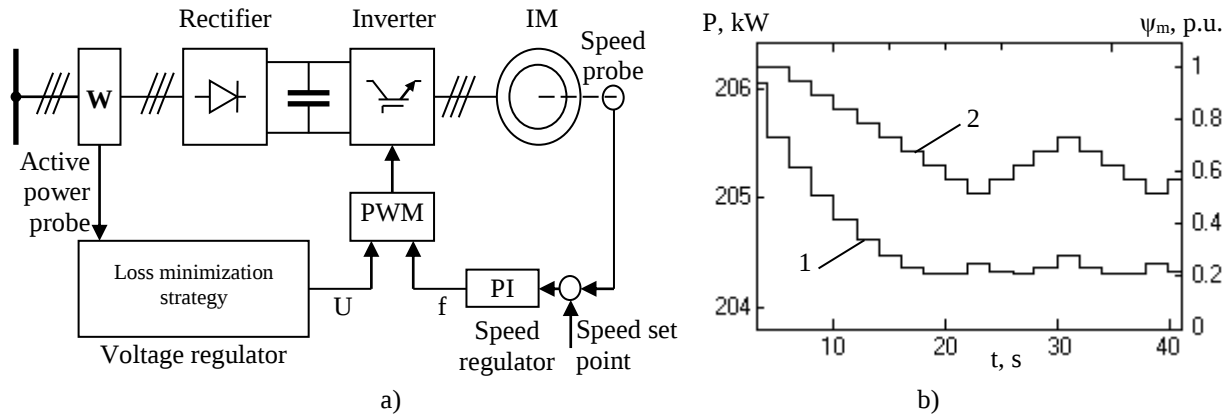


Fig.9. Structure of the control system based on a searching algorithm – a) and variations of power consumption (1) under changing the motor flux linkage (2) – b)

Energy savings on improvement of drive-mains compatibility

Energy loss and voltage drop minimization while starting up the motor

When a fan motor is started using across-the-line technology, inrush current (up to six times the rated value) is created causing voltage drops and additional energy losses in lines. To avert brown out conditions, soft starters and VFD technology is used to reduce an extreme peak of current draw. Minimization of energy and voltage losses under start-up conditions may be achieved through finding start-up motor control law meeting following requirements [6]:

Usage of the optimal control law allows for decreasing in total energy losses by 5-10% as compared to traditional scalar drive control algorithm. Structure of the control system minimizing total drive energy losses is presented in Fig.9a. The control system is to keep the motor speed constant, to monitor the input power and to search for a function extremum through changing VSI output voltage due to formula: $\Delta U(i+1) = U(i) + k \cdot \Delta U$, $k = 1$, if $\Delta P_i < 0$ and $k = -1$, if $\Delta P_i > 0$, where ΔP_i and ΔU_i are increments of power and voltage at step i of extremum search process.

As it is seen from results of simulation (Fig.9.b), interval of time 20 s to find the extremum is significantly less than time span between two possible changes of the drive mechanical load.

$$W_{st-l} = \int_0^{t_s} P_t(t) dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$J_{\Delta u} = \int_0^{t_s} (|E| - |U_{dr}|)^2 dt \rightarrow \min$$

where $P_t(t)$ – variation of power loss while starting up the motor, W_{st-l} – start-up energy losses, E – no loaded mains voltage, U_{dr} – current voltage value.

On the basis of optimization methods and Matlab tools the relationship between frequency vector $\hat{f} = [0, 0.05, 0.1, \dots, 1]^T$ and motor voltage vector

$\hat{U} = [0, \hat{U}_1, \hat{U}_2, \dots, U_{20}]^T$ has been established using conditions (5). Here $\hat{f} = f / f_0$, $\hat{U} = U / U_0$, f_0 and U_0 are rated values of frequency and voltage.

Graph representation of obtained start-up control laws is given in Fig.10a. It is seen that meeting requirements (5) to minimize energy losses and voltage drop results in deriving similar control laws 2 and 3 which are however different from commonly used linear control law 1.

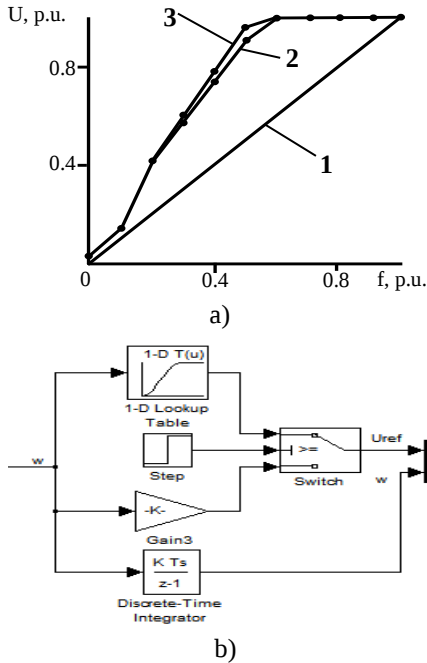


Fig.10. Graphs of optimized (curves 2,3) and traditional start-up control laws – a) and their MATLAB realization –b)

Optimal start-up control law was realized with a look-up table block which implements linear interpolation of discrete set of points. After termination of start-up mode of operation, optimal steady-state loss minimization control law is applied.

As it seen from simulation results (Fig.11) application of optimal start-up control law ensures less voltage drop and less values of active and reactive power consumption than traditional linear control law. Decrease in energy consumption is of 30%, in voltage drop – 7%.

Energy savings on mine reactive power compensation by active rectifier as a fan VFD component

Application of active front end technology [8] in building-up the frequency variable drive submits a lot of benefits for controlling both motor-related and grid-related processes. Depending on control algorithms applied and current capacity an active rectifier can stands for such devices as VAR compensator, voltage regulator, active power filter and three-phase voltage asymmetry compensator [9].

It was shown earlier that mine fan and VFD is normally oversized at initial stages of fan operational cycle. So, there is opportunity to use drive active rectifier for generating reactive power to compensate for inductive reactive power of the mine power station load. Potential of reactive power Q_{VAR} that could be generated by AR under conditions that apparent power S is kept constant is determined as

follows $Q_{VAR}(t) = \sqrt{S^2 - P(t)^2}$. Potential of AR as a VAR compensator over operational cycle of centrifugal fan with VFD of $S = 2 \text{ MVA}$ is shown in Fig. 12.

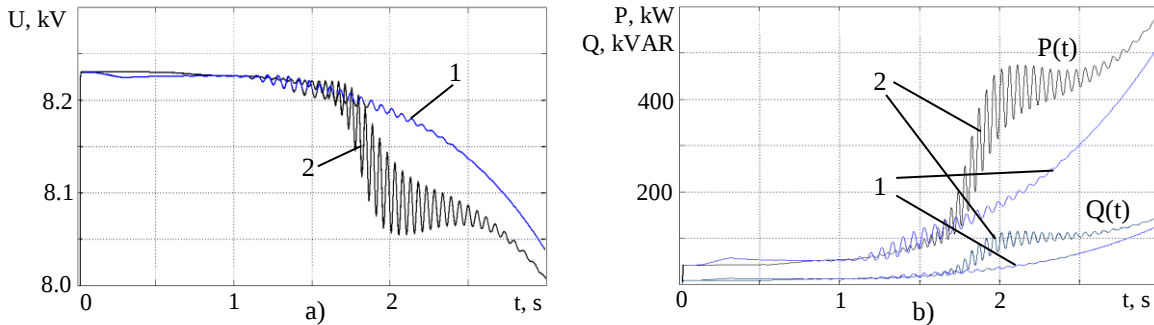


Fig.11. Voltage – a), active $P(t)$ and reactive power $Q(t)$ – b) transients for optimal (1) and linear start-up control law (2)

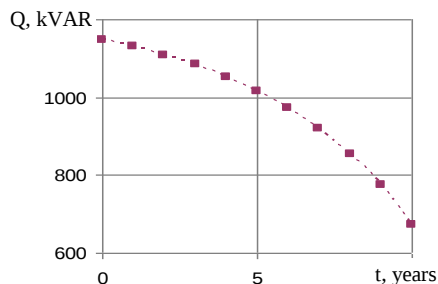


Fig.12. Potential of the drive reactive power over tan 10-year operational cycle

Topology of AR is similar to that of VSI and control algorithms are practically the same. An analogue of the drive vector control algorithm (Fig. 13a) comprises $abc \leftrightarrow dq0$ transformations, separate regulation of DC-link voltage and reactive power via producing u_{dm} , u_{qm} and then u_{am} , u_{bm} , u_{cm} PWM modulating voltages by means of PI-regulators under conditions that I_d – component coincides with a generalized voltage vector.

Operation of AR as VAR compensator has been simulated by means of SimPower BlockSet elements which were used to create a model of the system “mains – mine power distribution network with loads - active rectifier as an input component of the mine fan VFD”. Load reactive power profile of one of the “Vorcuta-ugol” company” mines is presented in Fig. 13b. The problem was to ensure constant value of reactive power at level of $Q_{VAR} = 200 \text{ kVAR}$. Results of simulation (Fig 13b) show that under keeping the drive active power constant

(curve 4) the AR generates variable in time amount of reactive power (3) that is enough to compensate for inductive reactive power of the mine load (1) and keep the resultant VAR power at a set value. Fluctuations of reactive power (2) are due idealized step-wise form of curve 1. It should be noted that multilevel implementation of AR and VSI allows eliminating the need of isolation transformers in medium voltage drives and providing related savings on capital and site construction costs.

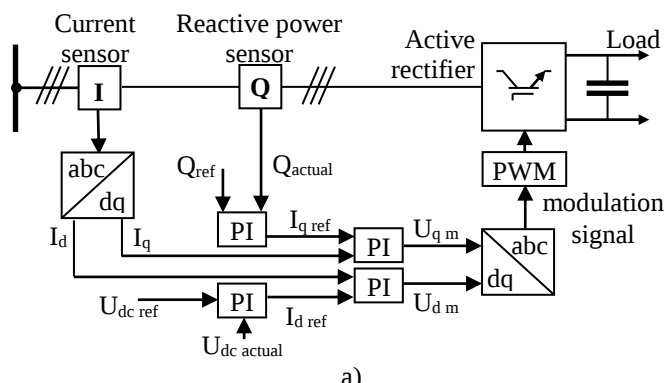


Fig.13. AR vector control algorithm – a) and compensation of mine power station load reactive power (curves 1 and 2) by means of AR (curve 3) at keeping the drive active power constant (curve 4) – b)

Conclusion

1. Systems approach has been applied to reveal and capture opportunities of energy savings in mine ventilation systems. Basic potential in the ventilation system efficiency increase is connected with realization of VOD concept via application of VFD for a main mine fan with multipurpose control subsystem integrated in an overall mine process control system. VFD control system is designed to minimize energy losses at different points of energy flow from the mains to working places of the mine.
2. On the basis of performance characteristics of centrifugal and axial-flow fans, various modes of operation have been investigated to substantiate high efficiency speed control and combined control methods for providing sufficient air flow on both a day demand and fan operational cycle demand.
3. On the basis of drive simulation it was shown that minimization of total drive energy losses in steady state mode of operation can be achieved through application of on-line iterative method of searching an extremum of the energy loss function. This gives benefits of 5-10% energy savings as to traditional scalar controlled drive. In a start-up operational mode energy savings are shown to be due to application of optimal control law which simultaneously ensures minimization of voltage drops.
4. Results of drive simulation have proved the functionality of active rectifier in capacity of VAR compensator of reactive power of mine distribution network. In case of multilevel implementation of the drive frequency converters, additional benefits come from exclusion of isolation step-down transformer from power supply circuit.

References

- Erik Bartsch, Mark Laine, Mark Andersen. The Application and Implementation of Optimized Mine Ventilation on Demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario //Proceedings of 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium, 2010.
- Thanga Raj, C., Srivastava, S. P. and Pramod Agarwal. Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - A Review // International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 1 – 2009. – №1.
- Kioskeridis I., Margaris N. Loss Minimization in induction motor adjustable speed drives // IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. 43. – 1996. – №1. – pp. 226–231.
- Kioskeridis I., Margaris N. Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers // IEEE Trans. Power Elect., vol. 11. – 1996. – №2. – pp. 213–220.
- Vinogradov A.B. Influence of steel loss, saturation and skin-effect on dynamical processes in asynchronous frequency variable drive. // Russian Electrical Engineering, № 5 – 2005, pp 57–61.
- Braslavskiy I. Ya., Kostylev A. B., Tsibanov D. V. Optimization of start-up processes in the system “power supply line-frequency converter- asynchronous motor”. // Proceedings of 15-th conference “Adjustable speed drives” .Ecaternburg, 2012.
- José R. Rodríguez, Juan W. Dixon, Jorge Pontt, Pablo Lezana. PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art// IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 1, february 2005 pp 5-22.
- N. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, New York: IEEE Press, 2000.