

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

Том **57**
СВИТЪК III: МЕХАНИЗАЦИЯ,
ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА МИНИТЕ

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

Volume **57**
PART III: MECHANIZATION, ELECTRIFICATION AND
AUTOMATIZATION IN MINE



Издателска къща “Св. Иван Рилски”
Publishing House “St. Ivan Rilski”
София, 2014
Sofia, 2014

ISSN 1312-1820

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

доц. д-р Павел Павлов – главен редактор
доц. д-р Вяра Пожидаева – зам. главен редактор
доц. д-р Антоанета Янева – председател на редакционен съвет
проф. д-р Венцислав Иванов – председател на редакционен съвет
проф. д-р Йордан Кортенски – председател на редакционен съвет
проф. д-р Десислава Костова – председател на редакционен съвет
Кристияна Пенкова – секретар

РЕДАКЦИОНЕН СЪВЕТ

на Свитък III – Механизация, електрификация и автоматизация на мините

доц. д-р Антоанета Янева – председател
проф. д-р Васил Ангелов
доц. д-р Ангел Зъбчев
доц. д-р Здравко Илиев
проф. д-р Иван Стоилов
доц. д-р Николай Янев

СЪДЪРЖАНИЕ

Иван Минин	Методика за определяне коефициента на устойчивост на хидравлични еднокочови багери по време на движение	7
Симеон Савов Петко Недялков	Динамично моделиране на задвижващата система на конусна инерционна трошачка тип КИД-300	11
Симеон Савов Петко Недялков	Методика за експериментално измерване на вибрационните параметри на конусна инерционна трошачка тип КИД-300	15
Кристина Илиева- Стойчева	Изчислителен метод за определяне на износването на пробивен инструмент	19
Кристина Илиева- Стойчева Тихомир Иванов	Математически модел с променливи параметри на ударно взаимодействие на пробивен инструмент от минната механизация	21
Любен Тасев Кристиян Цветков Венелин Тасев	Изследване на износването на бандажните гривни при рудничните локомотиви за подземен извоз	24
Захари Динчев Михаил Михайлов Елена Влашева Александър Крилчев	Система за мониторинг на атмосферата в открит рудник	27
Николай Переновски Живко Илиев	Симулационно изследване на аеродинамичните параметри на осов вентилатор	35
Стефан Чобанов	Параметри на индиректен допир в IT мрежи НН, съдържащи висши хармоници	38
Стефан Чобанов	Режими на натоварване на мощни трансформатори със стъпално регулиране на напрежението	43
Стефан Стефанов Иван Проданов	Заместваща схема на трифазна мрежа с изолирана неутрала при изчисляване на тока, протичащ през тялото на човека, при докосване до една от фазите при големи стойности на проводимостта на изолацията	47
Стефан Стефанов Иван Проданов	Аналитичен метод за изчисляване несиметрията на напреженията в трифазните електрически системи	51
Мила Илиева- Обретенова	Методи за увеличаване на стръмността на транзистора	54
Красимир Велинов Росен Стефанов Владимир Василев	Състояние и перспективи за развитие на светодиодното осветление в България	58

Владимир Василев Красимир Велинов	Влияние на ограничителните условия при оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители	63
Теодора Христова	Превенция, избор на модел, методи и технически средства за измерване на вътрешната корозия в подземни тръбопроводи	69
Теодора Христова Веселин Христов Иван Минин	Прогнозиране чрез невронна мрежа на натоварването на двигател, задвижващ полуавтогенна мелница	74
Владимир Перпелицев Иван Стоилов	Анализ на рудничните електрически мрежи средно напрежение с изолирана неутрала	79
Симеон Сезонов	Движение на частица по вертикален цилиндричен кожух на центробежно-ролкова мелница в цилиндрична координатна система	85
Асен Стоянов	Изследване равновесието на система от три тела с MathCAD	89
Стефан Пулев	Динамика на вибрационни машини с ексцентриков вибровъзбудител	92
Пламен Савов Майя Вацкичева	Термодинамични особености при естествена вентилация на кариерите	96
Ангел Зъбчев Ромео Александров Петър Петров Венко Войводов	Изследване на работните режими на променливотокова електрическа машина с двойно захранване	100

CONTENTS

Ivan Minin	Methodology for determination the coefficient of resistance of hydraulic shovels during movement	7
Simeon Savov Petko Nedyalkov	Dynamical modeling of driver system of cone inertial crusher (KID-300)	11
Simeon Savov Petko Nedyalkov	Experimental measurement methodic for vibration parameters of cone inertial crusher (KID-300)	15
Kristina Ilieva- Stoycheva	Computing method for determining the wear of the drilling tool	19
Kristina Ilieva- Stoycheva Tihomir Ivanov	Mathematical model with the variables parameters from the shock interaction in the drilling tool from mining equipment	21
Lyuben Tasev Kristian Cvetkov Venelin Tasev	Wear of the traction bracelets of the mine locomotives for underground transportation	24
Zahari Dinchev Michael Michaylov Elena Vlasseva Alexander Krilchev	Open pit mine atmosphere remote control system	27
Nikolay Perenovski Zhivko Iliev	Simulation study of aerodynamic parameters of an axial fan	35
Stefan Chobanov	Parameters of indirect contact in LV IT networks, with high harmonics	38
Stefan Chobanov	Loading modes of powerful transformers with stepped regulating voltage	43
Stefan Stefanov Ivan Prodanov	Equivalent scheme of a three-phase circuit with an insulated neutral, when calculating the current flowing through the human body at the touch of one of the phases, at large conductivity rates of the insulation	47
Stefan Stefanov Ivan Prodanov	Analytical methodology for calculating asymmetry of currents in three-phase electrical systems	51
Mila Ilieva-Obretenova	Transistor nonlinearity augmentation methods	54
Krasimir Velinov Rosen Stefanov Vladimir Vasilev	Status and prospects of the led lighting in Bulgaria	58
Vladimir Vasilev Krasimir Velinov	Influence of limitative conditions in optimizing the light distribution of street lighting	63
Teodora Hristova	Prevention, model selection, methods and technical means for measuring internal corrosion of underground pipelines	69

Teodora Hristova Veselin Christov Ivan Minin	Forecasting the load through neural network engine that power sag mill	74
Vladimir Perpelitsev Ivan Stoilov	Analysis of middle voltage electrical grids with isolated neutral grounding in mines	79
Simeon Sezonov	Mouvement of particle in a vertical cylindrical housing of centrifugal-roller mill in the cylindrical coordinate system	85
Asen Stoyanov	Study of equilibrium system of three units with a MathCAD	89
Stefan Pulev	Dynamics of vibration machines with an eccentric vibration generator	92
Plamen Savov Maya Vatzkitcheva	Thermodynamic peculiarity of the natural ventilation of open pit mines	96
Angel Zabchev Romeo Aleksandrov Petar Petrov Venko Voivodov	Researching of operating modes of doubly fed ac electric machine	100

МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ КОЕФИЦИЕНТА НА УСТОЙЧИВОСТ НА ХИДРАВЛИЧНИ ЕДНОКОФОВИ БАГЕРИ ПО ВРЕМЕ НА ДВИЖЕНИЕ

Иван Минин

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

РЕЗЮМЕ. Създадена е методика за определяне на коефициента на устойчивост на хидравличните еднокочови багери. Разгледани са най-опасните положения на багера по време на движение нагоре и надолу. Изведени са зависимости за определяне на коефициента на устойчивост. За създаване на методиката са използвани конструкциите на хидравличните еднокочови багери тип O&K RH 200 C и ЭО-6124.

METHODOLOGY FOR DETERMINATION THE COEFFICIENT OF RESISTANCE OF HYDRAULIC SHOVELS DURING MOVEMENT

Ivan Minin

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

ABSTRACT. It was designed a methodology for the determination of the coefficient of resistance of hydraulic one bucket excavators, "shovel" type. The most dangerous positions of the shovel while moving upwards and downwards were examined. The relations to determine the coefficient of resistance were derived. For the methodology design were used the constructions of the hydraulic shovels, 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 $\sum M_O$.

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

1. Статична устойчивост на хидравличните еднокочови багери през време на движение нагоре

Технологията на работа на хидравличните багери изисква честото им преместване, дори в границата на един забой, което налага осигуряването на висока мобилност чрез повишена тяговъоръженост на гъсеничния ходов механизъм. Това, в съчетание с по-малката в сравнение с въженомеханичните багери маса, позволява преодоляване

на по-големи наклони. Всичко това създава предпоставки за възникване на различни критични ситуации, при които е възможна загуба на устойчивост и обръщане на багера при движение. Двете най-опасни ситуации, характеризирани се с минимална стойност на коефициента на устойчивост са при движение нагоре и надолу.

При движение нагоре най-опасна за устойчивостта на багера е следната ситуация (Фиг. 1):

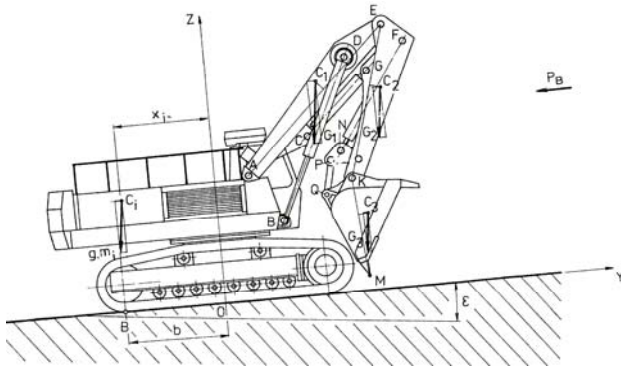
- багерът се движи нагоре по терен с максимален наклон, лимитиран от мощността на двигателите на гъсеничния ходов механизъм;
- горният строеж е разположен надлъжно на гъсеничната ходова платформа по посока на движението;
- работният орган е по посока на движение и е максимално прибран към горния строеж, при което създаваният от него задържащ момент е максимален;
- максимално допустимото ветрово натоварване действа по посока на нисходящия наклон.

Пълният задържащ момент $\sum M_Z$ се създава от косинусовите компоненти на теглата на всички елементи на горния строеж и гъсеничната ходова платформа, разположени пред линията на обръщане от страна на работния орган, и косинусовата компонента на теглото на работния орган.

Пълният обръщащ момент $\sum M_O$ се създава от косинусовите компоненти на теглата на всички елементи на горния строеж и гъсеничната ходова платформа, разположени зад линията на обръщане от страната на

противотежестта, от синусовите компоненти на теглата на всички елементи на горния строеж, ходовата платформа и работния орган и от ветровото натоварване.

Линията на обръщане минава през точката на контакт на опъващото (задно по посока на движение) колело с терена (т. В на фиг.1)



Фиг. 1. Сили действащи на багера при движение нагоре

1.1. Обръщач момент и задържач момент, създавани от гъсеничната ходова платформа

Спрямо линията на обръщане, успоредна на ос Ox и отстояща от нея на разстояние b , преобръщачият и задържачият моменти могат да се пресметнат по формулите:

$$M_{O1} = g \left[\sum_{i=1}^{n_1} m_i (|y_i| - b) \cdot \cos \varepsilon + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} m_i \cdot z_i \cdot \sin \varepsilon \right] + P_D F_H \cdot z_H, Nm. \quad (2)$$

$$M_{Z1} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (y_i + b) \cos \varepsilon, Nm \quad (3)$$

където: n_1 е броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i < -b$;

- n_2 - броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i > -b$;

- F_H, m^2 - площ на гъсеничната ходова платформа при поглед отпред;

- z_H, m - апликата на геометричния център на F_H ;

- P_D, Pa - динамично налягане на вятъра.

1.2. Обръщач момент и задържач момент, създавани от горният строеж на багера

Пълният обръщач и задържач момент могат да бъдат определени от формулите:

$$M_{O2} = g \left[\sum_{i=1}^{n_1} m_i (|y_i| - b) \cdot \cos \varepsilon + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} m_i \cdot z_i \cdot \sin \varepsilon \right] + P_D F_{GC} \cdot z_{GC}, Nm. \quad (4)$$

$$M_{Z2} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (y_i + b) \cos \varepsilon, Nm \quad (5)$$

където: n_1 е броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i < -b$;

- n_2 - броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i > -b$;

- F_{GC}, m^2 - площ на горния строеж при поглед отпред;

- z_{GC}, m - апликата на геометричния център на F_{GC} ;

- P_D, Pa - динамично налягане на вятъра.

1.3. Обръщач момент и задържач момент, създавани от теглото на работния орган на багера

Задържачият момент от теглото на стрелата е най-малък, когато тя е максимално приближена към оста на въртене. Това условие е изпълнено при напълно изваден бутален прът на цилиндър $Ц_2$ или когато $BD = L_{1MAX}$.

Положението на ръката се определя също спрямо описаното положение. При така определеното положение на работния орган задържачият момент, създаван от него, може да бъде определен съгласно израза:

$$M_{ZPO} = G_1 (x_{C1} + b) \cos \varepsilon + G_2 (x_{C2} + b) \cos \varepsilon + G_3 (x_{C3} + b) \cos \varepsilon, Nm. \quad (6)$$

Обръщачият момент се определя от израза:

$$M_{OPO} = \sin \varepsilon [G_1 \cdot z_{C1} + G_2 \cdot z_{C2} + G_3 \cdot z_{C3}] + P_D \cdot F \cdot z_{PO}, Nm \quad (7)$$

където: F, m^2 - площ на работния орган в описаното състояние при поглед отпред;

- z_H, m - апликата на геометричния център на F ;

- P_D, Pa - динамично налягане на вятъра.

1.4. Пълни обръщач и задържач моменти. Коефициент на устойчивост на багера при движение нагоре

Пълният обръщач момент може да бъде определен съгласно израза:

$$\sum M_O = M_{O1} + M_{O2} + M_{OPO}, Nm \quad (8)$$

Пълният задържач момент се определя от израза:

$$\sum M_Z = M_{Z1} + M_{Z2} + M_{ZPO}, Nm \quad (9)$$

Коефициентът на сигурност на багера при движение нагоре се определя съгласно израза:

$$k_{y3} = \frac{\sum M_Z}{\sum M_O} \geq 1,15 \quad (10)$$

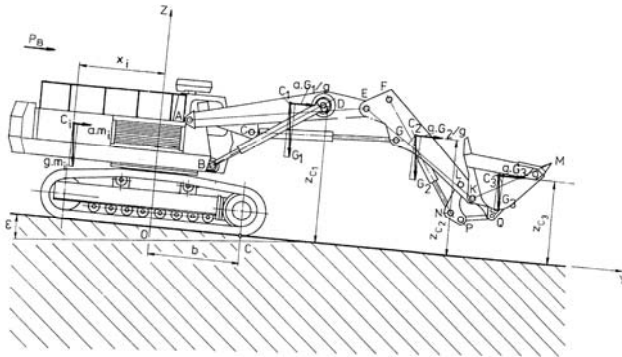
2. Статична устойчивост на хидравличните еднокофови багери през време на движение надолу.

При движение надолу най-опасна за устойчивостта на багера е следната ситуация (Фиг. 2):

- багерът се движи надолу по терен с максимален наклон и се разглежда момент, в който започва спиране от движение;
- горният строеж е разположен надлъжно на гъсеничната ходова платформа по посока на движението;
- работният орган е по посока на движение и е максимално изнесен напред, при което създаваният от него обръщач момент е максимален;
- максимално допустимото ветрово натоварване действа по посока на низходящия наклон.

Пълният задържащ момент $\sum M_Z$ се създава от косинусовите компоненти на теглата на всички елементи на горния строеж и гъсеничната ходова платформа, разположени зад линията на обръщане от страна на противотезжестта.

Пълният обръщач момент $\sum M_O$ се създава от косинусовите компоненти на теглата на всички елементи на горния строеж и гъсеничната ходова платформа, разположени пред линията на обръщане от страната на работния орган, от синусовите компоненти на теглата на всички елементи на горния строеж, ходовата платформа и работния орган и от ветровото натоварване.



Фиг. 2. Сили действащи на багера при движение надолу

Линията на обръщане минава през точката на контакт на задвижващите (предни по посока на движение) колела с терена (т. С на фиг. 2).

2.1. Обръщач момент и задържащ момент, създавани от гъсеничната ходова платформа

Спрямо линията на обръщане, успоредна на ос OX и отстояща от нея на разстояние b , преобръщачият и задържащият моменти могат да се определят по формулите:

$$M_{O1} = g \left[\sum_{i=1}^{n_1} m_i (b - |y_i|) \cdot \cos \varepsilon + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} m_i \cdot z_i \cdot \sin \varepsilon \right] + P_D F_H \cdot z_H, Nm. \quad (11)$$

$$M_{Z1} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (b - y_i) \cos \varepsilon, Nm \quad (12)$$

където: n_1 е броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i < -b$;

- n_2 - броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i > -b$;

- F_H, m^2 - площта на гъсеничната ходова платформа при поглед отпред;

- z_H, m - аплика на геометричния център на F_H ;

- P_D, Pa - динамично налягане на вятъра.

2.2. Обръщач момент и задържащ момент, създавани от горния строеж на багера

Пълният обръщач и задържащ момент се определят:

$$M_{O2} = g \left[\sum_{i=1}^{n_1} m_i (b - |y_i|) \cdot \cos \varepsilon + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} m_i \cdot z_i \cdot \sin \varepsilon \right] + P_D F_{GC} \cdot z_{GC}, Nm. \quad (13)$$

$$M_{Z2} = g \sum_{i=1}^{n_1} m_i (b - y_i) \cos \varepsilon, Nm \quad (14)$$

където: n_1 е броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i < -b$;

- n_2 - броят на елементите на ходовата платформа, за чиито ординати е изпълнено условието $y_i > -b$;

- F_{GC}, m^2 - площ на горния строеж при поглед отпред;

- z_{GC}, m - аплика на геометричния център на F_{GC} ;

- P_D, Pa - динамично налягане на вятъра.

2.3. Обръщач момент и задържащ момент, създавани от теглото на работния орган на багера

Обръщачият момент от теглото на стрелата е най-голям, когато тя е максимално отдалечена от оста на въртене.

При така определеното положение на работния орган задържащият момент създаван от него може да бъде определен съгласно израза:

$$M_{ZPO} = g \left[\sum_{i=1}^{n_1} m_i (y_{Ci} - b) \cos \varepsilon + z_{Ci} \sin \varepsilon \right], Nm \quad (15)$$

Обръщачият момент се определя от израза:

$$M_{OPO} = g \sum_{i=1}^{n_2} m_i \cdot y_i \cdot z_i \sin \varepsilon, Nm \quad (16)$$

2.4. Пълни обръщач и задържащ моменти. Коефициент на устойчивост на багера при движение надолу

Пълният обръщач момент може да бъде определен съгласно израза:

$$\sum M_O = M_{O1} + M_{O2} + M_{OPO} + M_B + z_{IN} \cdot P_{IN}, Nm \quad (17)$$

Пълният задържащ момент се определя от израза:

$$\sum M_Z = M_{Z1} + M_{Z2}, Nm \quad (18)$$

където $P_{IN} = m \cdot a, N$ е инерционната сила при спиране.

Коефициентът на сигурност на багера при движение на долу се определя съгласно израза:

$$k_{y4} = \frac{\sum M_Z}{\sum M_O} \geq 1,15 \quad (19)$$

Изводи

В методиката са разгледани две от най – опасните положения на багера по време на движение. Положението на работния орган на багера зависи от положението на буталните пръти на трите двойки хидравлични цилиндри,

задвижващи стрелата, ръката и кофата. Следователно положението на работния орган на багера при движение може да бъде различно от разгледаните. Използвайки методиката, може да бъде създадена компютърна програма, която да изчислява коефициента на устойчивост при различни положения на работния орган и да определя най-критичната ситуация.

Литература

- Гаврилов Н. И. и др. 1980. *Гидравлический экскаватор ЭО-4121*, Москва, Машиностроение.
- Гоберман Л. А., 1988. *Основы теории, расчета и проектирования строительных и дорожных машин*, Москва, Машиностроение.
- Technisches Handbuch Erdbewegung*. Ausgabe 1985, Liebherr-Internatinal AG.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Механизация на мините“.

ДИНАМИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА ЗАДВИЖВАЩАТА СИСТЕМА НА КОНУСНА ИНЕРЦИОННА ТРОШАЧКА ТИП КИД-300

Симеон Савов¹, Петко Недялков²

¹ Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София, ss.ss@abv.bg

² Технически университет – София, 1756 София, nedpetko@tu-sofia.bg

РЕЗЮМЕ. Целта на настоящата разработка е създаването на динамичен (механо-математичен) модел на задвижващата система на конусна инерционна трошачка тип КИД-300. За целите на симулационното изследване на работния режим на трошачката е създаден ротационен тримасов модел с три степени на свобода на задвижващата система на машината. Този модел представлява теоретично приближение към натурния модел на задвижващата система на машината и същевременно описва динамиката на тази многомасова система. За създаването на динамичния модел са направени нужните идеализации и постановки, както и последващо параметриране на модела. Получена е амплитудно-честотната характеристика на системата при единично въздействие и максимални стойности на инерционните параметри на системата, както и времето за развъртане на системата при най-тежкия пусков режим на машината.

DYNAMICAL MODELING OF DRIVER SYSTEM OF CONE INERTIAL CRUSHER (KID-300)

Simeon Savov¹, Petko Nedyalkov²

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, ss.ss@abv.bg

² Technical University – Sofia, 1756 Sofia, nedpetko@tu-sofia.bg

ABSTRACT. The paper describes a synthesis of dynamical model for a driver system of one cone inertial crusher (KID-300). The first step of dynamical modeling is synthesis of three mass rotational model with three degrees of freedom. This model is theoretical approximation to the natural model and driver system of the crusher. The paper presents idealization way, schemes and parameters of the system. One of results presented amplitude – frequency characteristic of the system, when the heaviest parameters are used. Also there is analyzed the starting process of the machine and there is resulted the time of the starting process witch is very important for electrical driver check and calculation choice.

Въведение

Динамичното моделиране представлява етап от създаването на теоретична основа за определянето на работните параметри на активните части на КИД-300. С цел изследване на взаимовръзките между динамичните и технологичните параметри на КИД-300 е необходимо да бъдат създадени динамични (механо-математични) модели. Поради свързаността на динамичните и технологичните параметри на КИД-300 създаването на адекватни динамични модели е важен етап от цялостното описание на работните процеси на машината. За целите на симулационното изследване на работния режим на КИД-300 е създаден ротационен тримасов модел с три степени на свобода на задвижващата система на машината. Ротационният модел описва динамиката на многомасовата система, но при ротационно движение на телата само около една ос. Ротационният многомасов модел е теоретично приближение към натурния модел на задвижващата система на вътрешния конус на КИД-300 при спазване на следните постановки:

– разглеждане на движението на модела само около една ос;

– налагане на ограничения в степените на свобода на системата.

Идеализации и приемания

Динамичният модел се изгражда, като тримерните тела се представят само с инерционните си моменти. За опростяване на теоретичното изследване на ротационния модел се използват следните идеализации:

– системата извършва само ротационно движение около една ос (ротация около вертикалната ос z);

– кинетичната енергия на системата има само ротационни съставляващи;

– разглеждат се само линейни съпротивителни сили, представени чрез дисипативната функция на Релей, пренебрегват се силите на Кулоново триене и съпротивленията от по-висока от първа степен на скоростта;

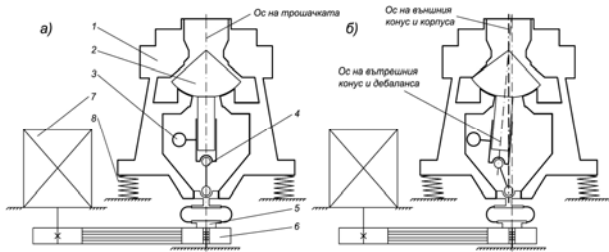
– разглеждат се само малки завъртания на системата, около оста на ротация;

– направено е обединяване на някои елементи от задвижването на вътрешния конус (въртящи се с еднаква ъглова скорост) в цели тела, а именно: 1. ротора на задвижващия електродвигател заедно със задвижващата

ремъчна шайба; 2. въртящите се части на опорния блок заедно с карданния вал и с дебалансния вибратор;
 – съпротивленията от триене в лагерите не се моделират, а се представят с един общ съпротивителен момент.

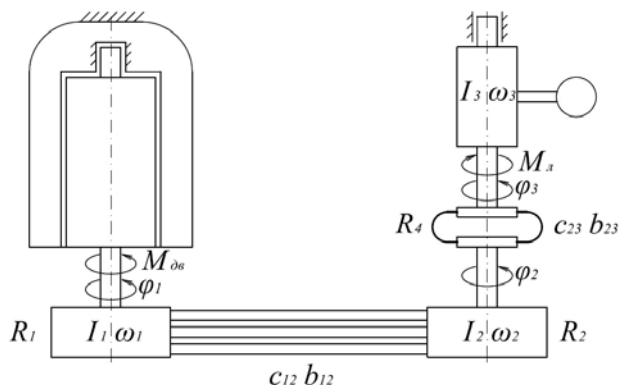
Постановка на динамичното моделиране

На фигура 1 е представена кинематичната схема на задвижването на конусната инерционна трошачка КИД-300, като на фиг. 1. а) трошачката е в статично положение, а на фиг. 1. б) е в динамично (работно) състояние. Задвижването на вътрешния конус (2) става посредством задвижващ асинхронен електродвигател (7), клиноремъчна предавка (6), еластичен гумен съединител (5), карданен вал (4) и регулируем дебалансен вибратор (3). Външният конус е монтиран неподвижно в корпуса на машината (1), който е поставен върху четири гумени тампона (8). В статично състояние на машината осите на симетрия на трошачката, на външния конус и корпуса и на вътрешния конус и дебаланса съвпадат, докато в работен режим това не е така.



Фиг. 1. Кинематична схема на задвижващата система на КИД-300

Въз основа на направените идеализации и приемания, системата представена на фигура 2 може да се приеме за напълно линеаризирана.



Фиг. 2. Линеаризиран ротационен динамичен модел – тримасова схема на взаимодействие между отделните тела на задвижването на вътрешния конус на КИД-300

Означенията на фигура 2 представляват съответно:

I_1 – инерционен момент на тяло №1 (ротор на задвижващия електродвигател заедно със задвижващата ремъчна шайба);

I_2 – инерционен момент на тяло №2 (задвижвана ремъчна шайба);

I_3 – инерционен момент на тяло №3 (опорен блок заедно с карданен вал и дебалансен вибратор);

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – ъглови скорости на трите тела;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – ъгли на ротация на трите тела;

c_{12} – еластична връзка между тяло №1 и №2 (еластична връзка между ремъчните шайби на клиноремъчната предавка – ремъци);

c_{23} – еластична връзка между тяло №2 и №3 (еластична връзка между задвижваната ремъчна шайба и опорния блок – еластичен съединител);

b_{12} – дисипативна връзка между тяло №1 и №2, моделираща дисипативните свойства на клиноремъчната предавка;

b_{23} – дисипативна връзка между тяло №2 и №3, моделираща дисипативните свойства на еластичния съединител;

$M_{дв}$ – задвижващ въртящ момент на електродвигателя;

$M_{л}$ – общ съпротивителен момент от плъзгащите и търкалящите лагери;

R_1 – радиус на задвижващата ремъчна шайба;

R_2 – радиус на задвижваната ремъчна шайба;

R_4 – радиус на еластичния съединител;

$k_R = R_2/R_1$ – коефициент на пропорционалност.

Създаване на динамичния модел

Целта на създаването на динамичен модел (механоматематичен) е да се използват възможностите за теоретично изследване на динамичните параметри на системата с математически средства, като за улеснение се ползват компютърни приложения (Лазов, 2008; Недялков, 2009). Динамичният ротационен многомасов модел може да се изгради, съгласно принципа на Даламбер или чрез използване на диференциалните уравнения на Лагранж. Този модел е изграден на база диференциалните уравнения на Лагранж от втори род при използване на следните формулировки:

Диференциални уравнения на Лагранж от втори род:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial(E_k - E_p)}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial(E_k - E_p)}{\partial \varphi_i} = Q_i - \frac{\partial E_d}{\partial \dot{\varphi}_i}, \quad i = 1 \div s \quad (1)$$

където:

$E_k = E_k(\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dots, \dot{\varphi}_s)$ – кинетична енергия на системата;

$E_p = E_p(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_s)$ – потенциална енергия на системата;

$E_d = E_d(\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dots, \dot{\varphi}_s)$ – дисипативна енергия на системата.

Линеаризираната система диференциални уравнения се опростява до:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{\varphi}_i} = Q_i, \quad i = 1 \div s \quad (2)$$

Кинетичната енергия на системата ще бъде:

$$E_k = \frac{1}{2} I_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} I_3 \dot{\varphi}_3^2 \quad (3)$$

Потенциалната енергия на системата ще бъде:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot c_{12} \cdot R_1^2 \cdot (\varphi_1 - k_R \cdot \varphi_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot c_{23} \cdot R_4^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3)^2 \quad (4)$$

Дисипативната енергия на системата ще бъде:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot b_{12} \cdot R_1^2 \cdot (\dot{\varphi}_1 - k_R \cdot \dot{\varphi}_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot b_{23} \cdot R_4^2 \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)^2 \quad (5)$$

Системата диференциални уравнения за движението на тримасовия ротационен модел, съответно се получава:

$$\begin{cases} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + c_{12} \cdot R_1^2 \cdot (\varphi_1 - k_R \cdot \varphi_2) + b_{12} \cdot R_1^2 \cdot (\dot{\varphi}_1 - k_R \cdot \dot{\varphi}_2) = M_{\text{дв}} \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 - k_R \cdot c_{12} \cdot R_1^2 \cdot (\varphi_1 - k_R \cdot \varphi_2) + c_{23} \cdot R_4^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - \\ - k_R \cdot b_{12} \cdot R_1^2 \cdot (\dot{\varphi}_1 - k_R \cdot \dot{\varphi}_2) + b_{23} \cdot R_4^2 \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = 0 \\ I_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 - c_{23} \cdot R_4^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - b_{23} \cdot R_4^2 \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = -M_{\text{л}} \end{cases} \quad (6)$$

Матричният запис на тази система диференциални уравнения, съответно се получава:

$$\begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{12} \cdot R_1^2 & -k_R \cdot b_{12} \cdot R_1^2 & 0 \\ -k_R \cdot b_{12} \cdot R_1^2 & k_R^2 \cdot b_{12} \cdot R_1^2 + b_{23} \cdot R_4^2 & -b_{23} \cdot R_4^2 \\ 0 & -b_{23} \cdot R_4^2 & b_{23} \cdot R_4^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\varphi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{12} \cdot R_1^2 & -k_R \cdot c_{12} \cdot R_1^2 & 0 \\ -k_R \cdot c_{12} \cdot R_1^2 & k_R^2 \cdot c_{12} \cdot R_1^2 + c_{23} \cdot R_4^2 & -c_{23} \cdot R_4^2 \\ 0 & -c_{23} \cdot R_4^2 & c_{23} \cdot R_4^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\text{дв}} \\ 0 \\ -M_{\text{л}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Параметриране на динамичния модел

Инерционните и дисипативните параметри на модела, както и параметрите на еластичните елементи са представени в таблица 1 заедно с техните размерности.

Таблица 1. Параметри на динамичния модел

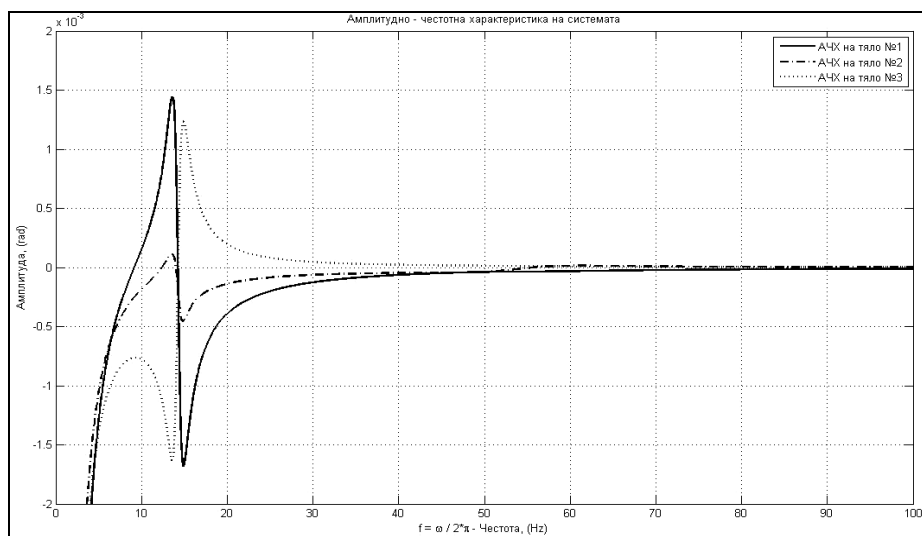
Инерционни параметри на модела		
Параметър	Стойност	Размерност
I_1 ($D_{\text{рш}}=156$ mm)	0,0597	kg.m ²
I_1 ($D_{\text{рш}}=208$ mm)	0,1116	kg.m ²
I_1 ($D_{\text{рш}}=260$ mm)	0,1874	kg.m ²
I_1 ($D_{\text{рш}}=300$ mm)	0,2411	kg.m ²
I_2	0,0781	kg.m ²
I_3	0,4109	kg.m ²
Дисипативни параметри на модела		
Параметър	Стойност	Размерност
b_{12}	150,2	N.s/m
b_{23}	523,06	N.s/m
Параметри на еластичните елементи		
Параметър	Стойност	Размерност
c_{12}	277357,8	N/m
c_{23}	426137,4	N/m
Геометрични параметри на модела		
Параметър	Стойност	Размерност
R_1	0,098	m
R_4	0,08	m
k_R ($D_{\text{рш}}=156$ mm)	0,735	–
k_R ($D_{\text{рш}}=208$ mm)	1	–
k_R ($D_{\text{рш}}=260$ mm)	1,265	–
k_R ($D_{\text{рш}}=300$ mm)	1,47	–

При изследване на режима на развъртане на дебалансния вибратор $M_{\text{дв}}$ има смисла на пусков въртящ момент. Максималният пусков въртящ момент съответно е $M_{\text{п}}^{\text{max}} = 159,37$ Nm. Стойността на общия съпротивителен момент от плъзгащите и търкалящите лагери в задвижващата система, съответно е $M_{\text{л}} = 58,31$ Nm.

Резултати от симулационното изследване на развъртането на дебалансния вибратор на КИД-300

С помощта на така създадения ротационен тримасов модел е извършено симулационно изследване на развъртането на дебалансния вибратор в програмна среда на MatLab. Разгледан е най-тежкия случай на развъртане на вибратора, а именно:

- температура на работния флуид $t=15$ °C (максимални съпротивления в лагерите);

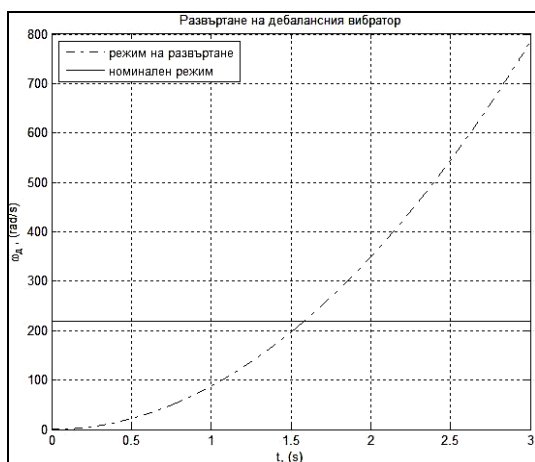


Фиг. 3. АЧХ на ротационния тримасов модел получена при максимални инерционни параметри

- максимален статичен инерционен момент на дебалансния вибратор $S_0 = 1,2947 \text{ kgm}$;
- максимална номинална честота на въртене на дебалансния вибратор $n_0 = 2088 \text{ об/мин}$ ($D_{рш} = 300 \text{ mm}$ и съответно предавателно число на ремъчната предавка $i = 1,44$).

На фигура 3 е представена амплитудно-честотната характеристика (АЧХ) на системата от три ротационни тела получена при единично въздействие в програмна среда на MatLab, получена съответно при максимални стойности на инерционните параметри и на честотата на въртене на тримасовата система ($I_T = 0,2411 \text{ kgm}^2$, $n_0 = 2088 \text{ об/мин}$, $S_0 = 1,2947 \text{ kgm}$ и $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$).

На фигура 4 са представени в графичен вид резултатите от направената симулация за развъртането на дебалансния вибратор при най-тежкия пусков режим на машината. От пресечната точка на двете характеристики на фиг. 4 може да се отчете времето, необходимо за развъртане на дебалансния вибратор от момента на пуска на задвижващия електродвигател до достигане на номинална ъглова скорост на дебалансния вибратор.



Фиг. 4. Определяне на времето за развъртане на дебалансния вибратор

Съгласно фигура 4 за най-тежкия пусков режим на машината необходимото време за развъртане на дебалансния вибратор (до номинална ъглова скорост $\omega_0 = 218,7 \text{ rad/s}$) се получава $t = 1,584 \text{ s}$.

Изводи от получените резултати

Въз основа на получените резултати от динамичното моделиране на задвижващата система на вътрешния конус на КИД-300 могат да се формулират следните изводи:

- Създаденият динамичен модел предоставя възможности за изследване на процеса на развъртане на дебалансния вибратор.
- Този модел може да се използва за динамично оразмеряване на задвижващата система при проектиране и конструиране на трошачки тип КИД.
- Моделът дава възможност да се симулира и изследва режима на развъртане на дебалансния вибратор при:
 - различни настройки на трошачката;
 - различни геометрични параметри и температурни режими на работа на плъзгащите лагери;
 - различни параметри на еластичните елементи (ремъци и еластичен съединител);
 - различни пускови характеристики на задвижващия електродвигател.

Крайният резултат от така създадения динамичен модел се явява възможността за оптимизация на избора на задвижващ електродвигател и намаляване на разхода на електроенергия.

Литература

- Лазов Л. Н. 2008. *Изследване на работния процес и параметри на ударно-отражателна трошачка*. Дисертация, ТУ-София.
- Недялков П. Н. 2009. *Динамично моделиране и изследване на работния процес и параметри на вертикална вибро-импулсна мелница*. Дисертация, ТУ-София.
- Craig J. J. 1989. *Introduction to robotics, mechanics and control*. Addison-Wesley Longman, Boston, Second edition, USA.
- De Silva C. W. 2000. *Vibration: fundamentals and practice*. CRC Press Boca Raton, London New York Washington, USA.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Механизация на мините“.

МЕТОДИКА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗМЕРВАНЕ НА ВИБРАЦИОННИТЕ ПАРАМЕТРИ НА КОНУСНА ИНЕРЦИОННА ТРОШАЧКА ТИП КИД-300

Симеон Савов¹, Петко Недялков²

¹ Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София, ss.ss@abv.bg

² Технически университет – София, 1756 София, nedpetko@tu-sofia.bg

РЕЗЮМЕ. В настоящата работа е представена разработената методика и са представени техническите средства за измерване на вибрационни параметри на конусна инерционна трошачка тип КИД-300. Създадената методика и алгоритъмът за обработка и анализ на резултатите се основават на съвременни софтуерни продукти. Компютърният анализ е базиран на Бързото Преобразуване на Фурие (БПФ, FFT). С помощта на създадената методика за експериментално измерване на вибрационни параметри са получени резултати за амплитудата на вибропреместването на корпуса на трошачката при различни работни режими и настройки на машината. За някои от получените резултати са представени амплитудните спектри на трансляционните и ротационните ускорения на корпуса на машината. Получените резултати служат за оптимизация на работните режими и пренастройване на работните параметри на машината.

EXPERIMENTAL MEASUREMENT METHODIC FOR VIBRATION PARAMETERS OF CONE INERTIAL CRUSHER (KID-300)

Simeon Savov¹, Petko Nedyalkov²

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, ss.ss@abv.bg

² Technical University – Sofia, 1756 Sofia, nedpetko@tu-sofia.bg

ABSTRACT. In this paper is presented the methodic and technical resources for measurement of vibrational parameters of one cone inertial crusher /КИД - 300/. Methodic and algorithm for processing the data used modern software products - OriginPro. Computer analysis is based on Fast Fourier Transform /FFT/. According to the methodic there are achieved result for amplitude of vibrational movement for crusher housing due to different parameters and adjustments of the crusher working regime. A few amplitude spectrums for translational and rotational degrees of freedom are presented. Presented results are used for choosing and optimization of working regime parameters and readjustments of the machine.

Въведение

Изследването на пространствени вибрационни параметри на механични системи е сложен проблем (Ганиев, 1976; Недялков, 2009; De Silva, 2000), за решаването на който няма общовалиден и утвърден метод. Поради тази причина при различните случаи (на механични системи) се подхожда различно в зависимост от конкретната машина или система. Основните аспекти на този проблем са свързани с измерването на кинематичните параметри на трептенията, със записването на получените резултати, с обработката на данните и анализ на резултатите.

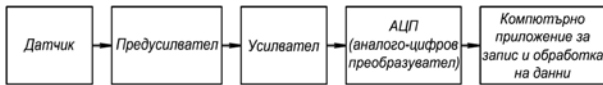
Целта на експерименталното изследване на вибрационните параметри е разкриването на: реални (натурни) показатели на машината, механични характеристики на работния процес на машината, процеси и възникващи взаимодействия между определени параметри в машината, работни зони и работни ускорения за характерни елементи или точки от машината. Записът на данните, получени от измервателната система, се извършва чрез аналого-цифров преобразувател (АЦП), който е свързан със записващ преносим персонален компютър. Основното удобство на компютърните записи е

улеснената обработка на данните и възможността за решаване на нетипични изследователски задачи, каквито възможности не са вградени в повечето универсални виброизмервателни апаратури. Най-голямата трудност при експерименталното изследване на вибрационни параметри е отнасянето на измерваните параметри към конкретна машина (обект на изследване), която в случая е конусна инерционна трошачка тип КИД-300. Устройството и принципът на действие на КИД-300 са описани в предходящи разработки (Савов, 2012; Savov et al., 2013).

Измервателна система за вибросигнали

Измервателната система за вибросигнали (Недялков, 2009), използвана при изследването на вибрационните параметри на КИД-300, е изградена от едноосови пиезоелектрични преобразуватели (датчици) KD35, предусилватели (в конкретния случай заряден усилвател Charge Amp) и усилвателно стъпало от инструментални усилватели Inst Amp. Тази постановка може да се определи като класическа схема (De Silva, 2000) за измерване на вибрационни параметри, чрез едни от най-разпространените датчици за измерване на виброускорения, а именно - пиезоелектричните акселерометри. Собствената им честота е в порядъка на 5÷20 kHz,

което ги прави подходящи за измерването на вибрации с честоти в границите на $5 \div 5000$ Hz. За целите на настоящото изследване е използвана многоканална измервателна система, блок схемата на която е показана на фигура 1.

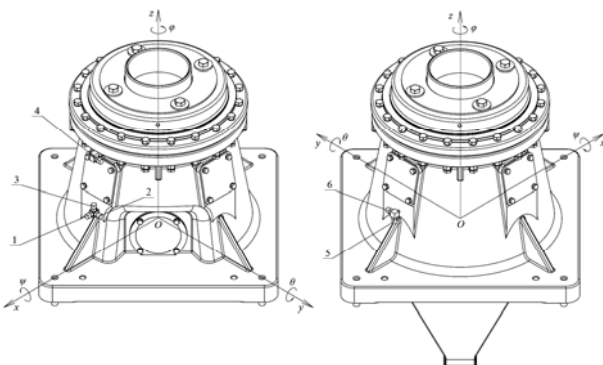


Фиг. 1. Блок схема на свързване на измервателна система към компютър за запис и обработка на данните

За да се осигури точност на измерването, системата е тарирана при ускорение $1g$ и честота 80 Hz с помощта на тарировъчна маса за датчици KD35. След това са получени тарировъчни сигнали от шестте канала на измервателната уредба и са определени съответните тарировъчни коефициенти, които са: канал №1 – $k_1=17,06$ m/s².V; канал №2 – $k_2=15,29$ m/s².V; канал №3 – $k_3=24,61$ m/s².V; канал №4 – $k_4=19,73$ m/s².V; канал №5 – $k_5=22,15$ m/s².V; канал №6 – $k_6=17,37$ m/s².V.

Постановка за измерване на пространствени вибрационни параметри

Пространствените вибрационни параметри на КИД-300 се представят чрез разделяне на движението на съставните му компоненти – съответно три транслационни премествания x , y , z по съответните три оси на Декартовата координатна система $Oxyz$ и съответстващите им три завъртания спрямо осите $Ox \rightarrow \psi$, $Oy \rightarrow \theta$, $Oz \rightarrow \varphi$. Ъгловите координати са приети като „Фиксирани ъгли“ на завъртане на Декартовата координатна система (Вражилски, 2009; Лазов, 2008) спрямо трите оси. Това представяне е идейно най-близко до реалната работа на КИД-300. Проблем при пространственото измерване на вибрации е измерването на ъглите на завъртане в системата. Пиезо-акселерометрите са датчици за линейно преместване, като измерваният сигнал се взема от надлъжната им ос. Чувствителността в напречната ос е каталоген параметър и за целите на инженерните изследвания може да се пренебрегне. Схемата на разположение на датчиците върху КИД-300 е представена на фигура 2.



Фиг. 2. Схематично разположение на акселерометрите върху корпуса на КИД-300

За изследването на вибрационните параметри на КИД-300 е необходимо да се изпълни многоточкова измервателна система, като броят на измервателните канали трябва да бъде равен на броя на измервателните

точки, които са изпълнени съгласно фиг. 2. Вибрационните параметри на КИД-300 са изследвани по шестточкова измервателна система (фиг. 2), при която има шест измервателни канала, съответно с шест датчика. За определянето на вибрационните параметри на КИД-300 са използвани следните зависимости:

$$\ddot{x} = s_1, \quad m/s^2 \text{ и } \ddot{\psi} = \frac{s_2 - s_4}{l_{1-4}}, \quad rad/s^2 \quad (1)$$

$$\ddot{y} = \frac{s_2 + s_6}{2}, \quad m/s^2 \text{ и } \ddot{\theta} = \frac{s_3 + s_5}{l_{1-6}}, \quad rad/s^2 \quad (2)$$

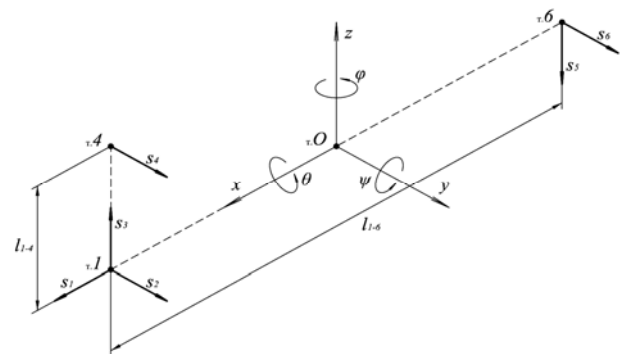
$$\ddot{z} = \frac{s_3 - s_5}{2}, \quad m/s^2 \text{ и } \ddot{\varphi} = \frac{s_2 - s_6}{l_{1-6}}, \quad rad/s^2 \quad (3)$$

където:

s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 и s_6 , m/s² – сигнали от датчик №1, №2, №3, №4, №5 и №6 (фиг. 2 и фиг. 3);

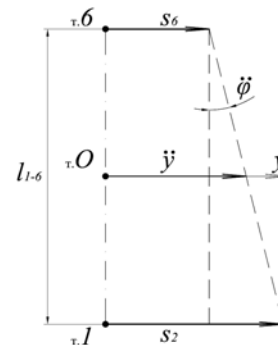
$l_{1-4} = 0,212$ m и $l_{1-6} = 0,615$ m – разстояния между точките на монтиране на групите датчици (фиг. 3).

На фигура 3 са представени схематично направлението на вибросигналите както и разстоянията на монтиране на групите датчици.



Фиг. 3. Направления на вибросигналите

Сигналите на датчиците, поставени по схемата на фиг. 3, са смесени, т.е. в сигнала от един датчик има компонента от линейното преместване и компонента от ъгловото завъртане на точката на окачване на датчика, както е показано на фигура 4.



Фиг. 4. Компоненти на вибросигнала за виброускорението по ос y на тръшката

Условието, при което гореизложените зависимости се приемат за верни, е когато ъгловите завъртания са в границите до 5 deg – фиг. 4. Тогава е в сила следната зависимост:

$$\ddot{\varphi} = \arctg\left(\frac{s_2 - s_6}{l_{1-6}}\right), \text{ rad} / s^2 \text{ се свежда до}$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{s_2 - s_6}{l_{1-6}}, \text{ rad} / s^2 \quad (4)$$

Запис и обработка на данните

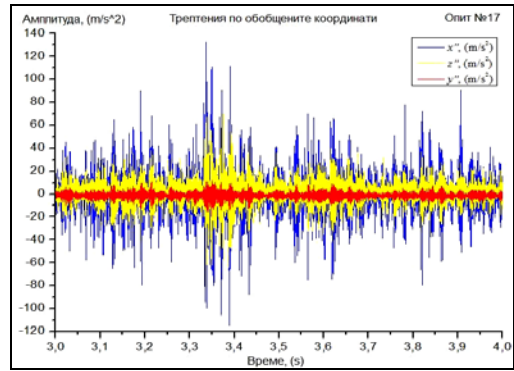
Блок схемата на измервателната уредба, с помощта на която са регистрирани резултатите, е представена на фиг. 1. Усилвателната група на измервателната уредба е свързана към компютърната система с помощта на аналого-цифров преобразувател (АЦП) на фирмата National Instruments NI USB 6210, който е с компютърен USB интерфейс. Потокът от данните след АЦП се получава в цифров вид, като записът на данните във вид на файл е направен с компютърното приложение DASYLab®. На фигура 5 е показана измервателната уредба в завършен вид заедно с КИД-300.



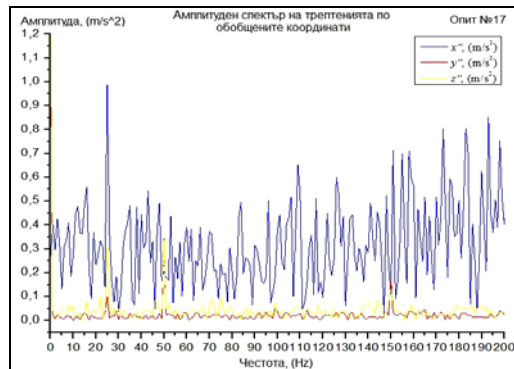
Фиг. 5. Измервателна уредба на вибропараметри 1 – КИД-300; 2 – акселерометри; 3 – захранващ блок; 4 – АЦП; 5 – преносим компютър

Съгласно изложената постановка за измерване на принудени трептения е направена серия от експериментални измервания на вибрационните параметри на КИД-300 при различни настройки на машината. Параметрите, които са променяни по време на експеримента, оказващи пряко влияние върху вибрационните параметри на машината, са: честотата на въртене на дебалансния вибратор, статичен инерционен момент на дебалансния вибратор и широчина на статичния разтоварен отвор на трощачката. Направени са общо 40 броя опита при различни настройки на трощачката, като тук са представени в графичен вид само някои от получените резултати (с помощта на програмния продукт OriginPro 8.5).

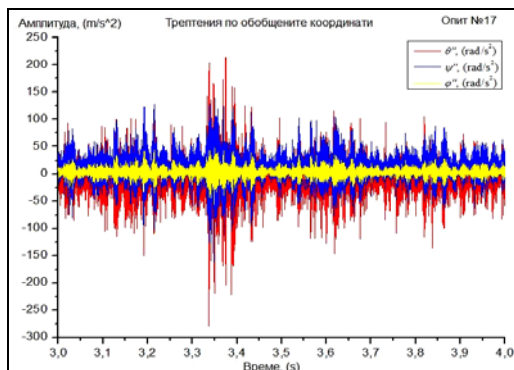
Компютърно записаният сигнал се нуждае от обработка за извличане на необходимата информация. На фигури 6, 8 и фигури 10, 12 са показани записите на сигналите, получени от шестте измервателни канала. Амплитудният спектър (фигури 7, 9 и фигури 11, 13) е получен чрез използване на Бързото Преобразуване на Фурие (БПФ) за записаните сигнали. Спектърът на виброускоренията е показан до честота 200 Hz, поради факта че трептенията с по-високи честоти са с много малки амплитуди на вибропреместването.



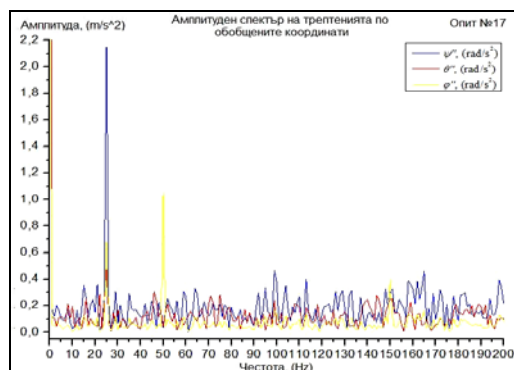
Фиг. 6. Амплитуда на транслационните ускорения при $f=24,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=0,095$ kg.m



Фиг. 7. Амплитуден спектър на транслационните ускорения при $f=24,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=0,095$ kg.m



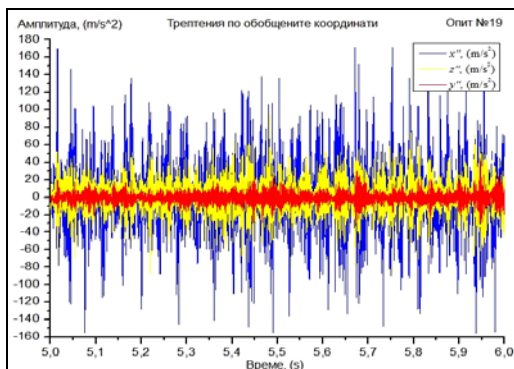
Фиг. 8. Амплитуда на ротационните ускорения при $f=24,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=0,095$ kg.m



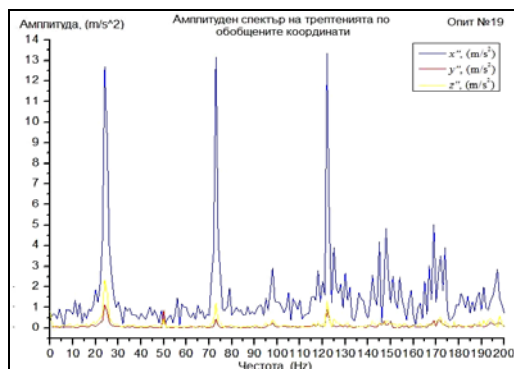
Фиг. 9. Амплитуден спектър на ротационните ускорения при $f=24,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=0,095$ kg.m

На фигури 6 и 7 са представени амплитудата и амплитудният спектър на транслационните ускорения на корпуса на машината съответно при номинална честота на въртене на дебалансния вибратор, среден размер на

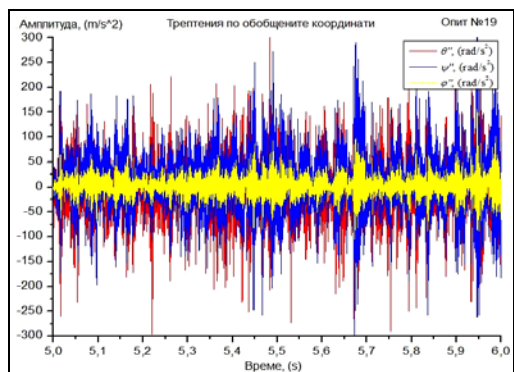
широчината на статичния разтоварен отвор и минимален статичен инерционен момент на дебалансния вибратор. На фигури 8 и 9 са представени амплитудата и амплитудният спектър на ротационните ускорения на корпуса на машината при същите настройки на трошачката.



Фиг. 10. Амплитуда на транслационните ускорения при $f=23,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=1,295$ kg.m

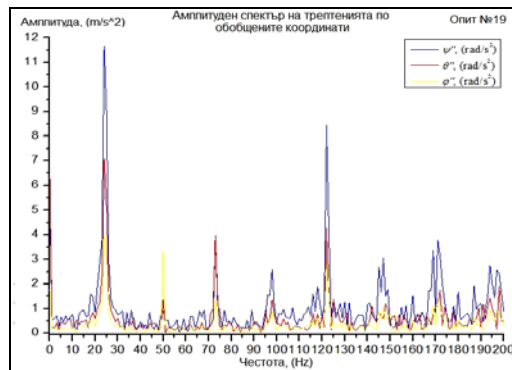


Фиг. 11. Амплитуден спектър на транслационните ускорения при $f=23,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=1,295$ kg.m



Фиг. 12. Амплитуда на ротационните ускорения при $f=23,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=1,295$ kg.m

На фигури 10 и 11 са представени амплитудата и амплитудният спектър на транслационните ускорения на корпуса на машината съответно при номинална честота на въртене на дебалансния вибратор, среден размер на широчината на статичния разтоварен отвор и максимален статичен инерционен момент на дебалансния вибратор. На фигури 12 и 13 са представени амплитудата и амплитудният спектър на ротационните ускорения на корпуса на машината при същите настройки на трошачката.



Фиг. 13. Амплитуден спектър на ротационните ускорения при $f=23,997$ Hz, $b=6$ mm и $S_d=1,295$ kg.m

Изводи

- Експерименталните изследвания на вибрационните параметри на КИД-300 дават възможност да бъде направен анализ на ускоренията на машината в пространството по време на работа при различни настройки на трошачката (честота на въртене на дебалансния вибратор, статичен инерционен момент на дебалансния вибратор и широчина на статичния разтоварен отвор).

- Разработена е методика за определяне на предаваното вибровъздействие от дебалансния вибратор през вътрешния конус и през разтрошавания материал до външния конус с корпуса и неговите опорни тампони, чрез използване на прецизна виброизмервателна апаратура.

- Този подход може да послужи като основа при определянето на силата (енергията), необходима за деформирането (трошенето) на материала в слой, и съпоставянето на тази енергия с вложената в системата енергия с цел определяне на загубите на енергия за трошене и оптимизация на задвижващата система на трошачката.

Литература

- Вражилски Др. Ц. 2009. *Изследване на работния процес и параметри на вибрационен сепаратор*. Дисертация, ТУ-София.
- Ганиев Р. Ф., В. О. Кононенко. 1976. *Колемания твърдых тел*. Москва, Наука.
- Лазов Л. Н. 2008. *Изследване на работния процес и параметри на ударно-отражателна трошачка*. Дисертация, ТУ-София.
- Недялков П. Н. 2009. *Динамично моделиране и изследване на работния процес и параметри на вертикална вибро-импулсна мелница*. Дисертация, ТУ-София.
- Савов С. 2012. Конструктивно-механичен обзор на конусно инерционни трошачки (КИД). – *Българско списание за инженерно проектиране*, септември, брой 15, 23÷28.
- De Silva C. W. 2000. *Vibration: fundamentals and practice*. CRC Press Boca Raton, London New York Washington, USA.
- Savov S., P. Nedyalkov, D. Mochev. 2013. Particle size distributions of one cone inertial crusher (KID-300) products. – *Proceedings of XV Balkan mineral processing congress*, June, Sozopol, Bulgaria, Vol. I, 150÷153.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Механизация на мините“.

ИЗЧИСЛИТЕЛЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИЗНОСВАНЕТО НА ПРОБИВЕН ИНСТРУМЕНТ

Кристина Илиева-Стойчева

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

РЕЗЮМЕ. В практиката се прилагат аналитични методи за прогнозиране на износването на инструменти. Прогнозирането на износването в случая е обособено в два етапа: разработване на физически модел и на модел за пресмятане по аналогия. Емпирични модели като математически приближения до експерименталните резултати намират практическо приложение.

В настоящата статия е представен изчислителен метод за определяне на износването на пробивен инструмент във функция от скоростта на износване и скоростта на пробиване.

COMPUTING METHOD FOR DETERMINING THE WEAR OF THE DRILLING TOOL

Kristina Ilieva-Stoycheva

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

ABSTRACT. In the practice, the analytical methods are used for predicting the wear of the tool. Predicting the wear is divided into two phases: the development of physical models and calculation by analogy. Empirical models such as mathematical approximations to the experimental results found practical application. This paper presents a calculation method to determine the wear of drills as a function of the rate of wear and drilling speed.

Увод

Износването е отделяне на материал от повърхността на триене в резултат на разрушаване, което се проявява в постепенно изменение на формата и размерите на взаимодействащи си тела [1]. Отчитането на износването в математическата постановка на контактните задачи позволява да се определят кинетиката на изменение на формата на износената повърхност, разпределението на налягането в площадката на контакта и взаимното положение на контактните тела.

Необратимото изменение на формата на контактните тела в зоната на контакта е по направление, перпендикулярно към повърхността на триене и се отчита с величината на износване $w = w(x, y, t)$.

Законът на износването изразява зависимостта на скоростта на износване от контактното налягане, скоростта на приплъзване в контакта, микрогеометричните характеристики на контактните повърхности, трифрикционните параметри на контакта, температурата и др. В общ вид законът се дава с израза:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = F(\sigma, V). \quad (1)$$

В контактните задачи с отчитане на изменението на формата на повърхността при износване се допуска предположението за съизмеримост на износването с

нормалните еластични премествания на контактните тела. Граничните условия се отнасят към неизносената повърхност и контактното налягане е свързано с еластичното преместване в произволен момент от време. Определя се границата на областта на контакта и се отчита наличието на допълнителни условия /например условие за непрекъснатост на контактното налягане/.

Метод за определяне на износването

Настоящият метод се отнася за удар на пробивен инструмент моноблок в технологична среда /скала/.

Нестационарната динамична контактна задача се състои във внедряване на инструмента със скорост в еластична среда /скала/. Законът за внедряване на моноблока се изразява като функция $f(h, t)$ и се приема, че в началния момент от време еластичната среда се намира в покой.

Работната контактна площ в $[m^2]$ на инструмента е:

$$S = a * b \quad (2)$$

където:

a – широчина на работния резец $[m]$;

b – дължина на работния резец $[m]$.

Допустимата стойност на напрежението на материала в [N/m²] е според вида на материала $\sigma_{к материал}$

Критичната стойност на натисковата сила в [N] в контакта е:

$$F_{материал} = S \cdot \sigma_{к материал} \quad (3)$$

За ударно-абразивното износване критичната площ на износване на материала в [m²] е:

$$S = \frac{F_{материал}}{\sigma_{к материал}} \quad (4)$$

Времето за пълното износване на материала в [s] е:

$$t_{материал} = \frac{\rho_{материал} \cdot h \cdot S}{V_{изн.}} \quad (5)$$

където:

$\rho_{материал}$ - плътност на материала [kg/m³];

h - дълбочина на внедряване на резеца [m];

$V_{изн.}$ - скоростта на износване на материала [m/s].

От теорията на удара [2] дълбочината на внедряване на инструмента в [m] е:

$$h = \frac{F_y}{2 \cdot \sigma_{см} \cdot d \cdot (\operatorname{tg}(\alpha / 2) + \mu) \cdot \eta} \quad (6)$$

където:

F_y - сила на удара, [N]

$\sigma_{см}$ - допустимо съпротивление на смачкване на скалата, [N/m²];

d - диаметър на резеца, [m];

α - ъгъл на заостряне на резеца, [rad];

μ - коефициент на триене на стомана по скала;

η - коефициент, отчитащ затъпяването на резеца, $\eta = 1.2 \div 1.3$.

Средната работа в [J] на пробиване на резеца е:

$$A = \frac{F_y \cdot h}{2} \quad (7)$$

След съвместно решаване на (6) и (7) се получава:

$$h = \frac{2 \cdot A}{h \cdot 2 \cdot \sigma_{см} \cdot d \cdot (\operatorname{tg}(\alpha / 2) + \mu) \cdot \eta} \quad (8)$$

След преобразуване на (8) за дълбочината на внедряване на инструмента се получава:

$$h = \sqrt{\frac{A}{\sigma_{см} \cdot d \cdot (\operatorname{tg}(\alpha / 2) + \mu) \cdot \eta}} \quad (9)$$

Напрежението на едноосно срязване на скали, изразено чрез коефициента на Протодяконов f , в [MN/m²] е:

$$\sigma_{с} = 10 \cdot f \quad (10)$$

Напрежението на смачкване е:

$$\sigma_{см} = (2 \div 3) \cdot \sigma_{с} \quad (11)$$

Теоретичната скорост на пробиване в [m/s] е:

$$V_{пр} = h \cdot n_1 \quad (12)$$

където:

n_1 - честота на въртене на бургията, [s⁻¹].

Работният ресурс на пробивния инструмент се изчерпва при достигане на дължина на пробиване L в [m].

$$t^f = \frac{L}{V} \quad (13)$$

Интензивността на износване за материала на резеца може да бъде определена като отношение на скоростта на износване на съответния материал и скоростта на пробиване.

$$i_e = \frac{V_{изн.}}{V_{пр}} \quad (14)$$

Изводи

1. Анализирани са параметрите на износването на пробивен инструмент, работещ при условията на ударно натоварване.
2. На базата на направения анализ е разработен изчислителен метод за определяне на износването на пробивния инструмент във функция от скоростта на износване и скоростта на пробиване.

Литература

Гаркунов Д., 1985, Триботехника, Машиностроене, Москва.
Шейретов К., 1987, Минни машини, ДИ Техника, София.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Машинознание“.

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ С ПРОМЕНЛИВИ ПАРАМЕТРИ НА УДАРНО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ПРОБИВЕН ИНСТРУМЕНТ ОТ МИННАТА МЕХАНИЗАЦИЯ

Кристина Илиева-Стойчева¹, Тихомир Иванов²

¹ Филиал на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски"-София, 6600 Кърджали, ilievakrisi@gmail.com

² Институт по математика и информатика, Българска академия на науките, tihomir_ivanov@ymail.com

РЕЗЮМЕ. Ударът, като сложен динамичен процес, намира място в различни технически системи. В зависимост от търсения ефект ударът може да е работен процес или допълнителен, изискващ защита на системата. Ударното пробиване се използва при пробивни инструменти в минната механизация за разрушаване на скали.

В настоящата статия е предложен модел, описващ взаимодействието между пробивен инструмент моноблок и скали с различна твърдост.

MATHEMATICAL MODEL WITH THE VARIABLES PARAMETERS FROM THE SHOCK INTERACTION IN THE DRILLING TOOL FROM MINING EQUIPMENT

Kristina Ilieva-Stoycheva¹, Tihomir Ivanov²

¹ Branch of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"-Sofia, 6600 Kardzhali, ilievakrisi@gmail.com

² Institute of Mathematics and Informatics, Bulgarian Academy of Sciences, tihomir_ivanov@ymail.com

ABSTRACT. The shot interaction is a complex dynamic process that is used in various technical systems. Depending on the desired effect, shot can be work process or additional process, requiring protection of system. The drilling by shot is used to tools from the mining machinery to breaking the rocks. In this article is proposed a model describing the interaction between the drilling tool monoblock and rocks with different hardness.

Увод

Ударът като сложен динамичен процес намира място в различни технически системи. Задачата за надлъжен удар често възниква при решаване на проблеми с проектирането на ударни машини и технологии. При ударното пробиване с пробивни чукове работният процес протича с предаване на импулс от бутало ударник върху инструмент бургия и, вследствие на предаване на енергията, в зоната на контакта скалата се разрушава.

Изследванията по проблемите на надлъжния удар показват, че ударът между тела е съпроводен с възбуждане на вълни на деформация. Тези вълни се разпространяват с определена скорост и пренасят енергия, а вълновият процес е състояние, зависещо от времето и пространствените променливи.

В моделирането на удар с цяла бургия моноблок инструментът е вълновод във вълновия процес.

Модел

Създаването на математически модел на ударно взаимодействие на пробивен инструмент моноблок с технологична среда /скала/ се състои в избор на теория за нормалните вълни, избор на модел на работа на инструмента

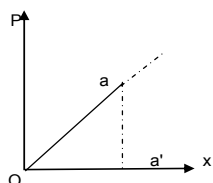
със скалата, избор на модел на съпро-тивление на скалата и решаване на вълново уравнение.

В настоящия модел е избрана класическата теория на Даниел Бернули за нормалните вълни, за която са валидни следните хипотези [2]:

- хипотеза на плоските сечения – всички точки, лежащи в перпендикулярната на оста на пръта плоскост, са с еднакви премествания;
- изпълнени са условията за едноосно деформирано състояние;
- напречните напрежения са равни на нула;
- допуска се, че кинетичната енергия на напречното движение на частиците е пренебрежимо малка;
- пренебрегват се допирателните напрежения и вследствие на това потенциалната енергия на преместващите деформации е приблизително равна на нула.

За модела се приема, че резецът работи като клин в скала. В практиката условията са по-сложни – разрушаването на скалата е по повърхностите на плъзгане. Моментът на разрушаване при ударното пробиване настъпва след няколко предварителни удара. Скалата се разрушава по линията на минималните тангенциални напрежения и при статичното и динамичното натоварване [3].

Съпротивлението на технологичната среда е избрано по модела на Лисовски-Дворников – внедряването на инструмента се представя линейно (фиг. 1) и се описва с уравнение (1) [1].



Фиг. 1. Модел на взаимодействие на инструмент с технологична среда на Лисовски-Дворников

$$P(x) = k \cdot x, \quad (1)$$

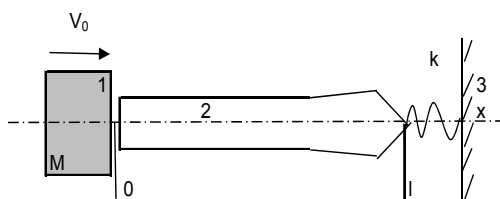
където:

$P(x)$ – сила на съпротивление на средата, [N];

x – внедряване на инструмента, [m];

k – коефициент на твърдост на системата „инструмент-среда“, [N/m²].

При моделирането се разглежда схема на удар по прът, който си взаимодейства в сечението $x = l$ с технологична среда (фиг. 2). По хоризонталната ос x тяло 1 с маса M се движи със скорост V_0 и в момент $t = 0$ нанася удар по прът 2, взаимодействащ с технологичната среда 3 [1].



Фиг. 2. Базова схема на ударната система

За описване на надлъжната вълна, която възниква вследствие на удара, използваме едномерното вълново уравнение:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad (2)$$

където:

$u(x,t)$ – надлъжно преместване на напречното сечение на пръта;

a – скорост на разпространение на вълната на деформация в материала на пръта; [m/s];

x – координата на сечението, [m];

t – време, [s].

Диференциалното уравнение се допълва със съответстващи на конкретния случай начални и гранични условия.

За пробивния инструмент 2 при $t = 0$ се допуска, че няма надлъжна деформация, и се намира в състояние на покой. Началните условия са:

$$u(x,0) = 0, \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = \begin{cases} V_0, & x = 0 \\ 0, & 0 < x \leq l \end{cases}. \quad (3)$$

Граничните условия са:

$$\text{ако } x = 0, \quad \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} < 0 \text{ следва:} \quad (4)$$

$$M \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} = EA \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} \quad (5)$$

$$V_M = \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} \quad (6)$$

$$x_M = u(0,t) \quad (7)$$

ако $x_M \leq u(0,t)$ следва:

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$V_M = \text{const} \quad (9)$$

$$x_M = x_M(t_0) + v_M(t - t_0); \quad (10)$$

ако $x = l$ следва:

$$u(l,t) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial u(l,t)}{\partial t} = 0, \quad (12)$$

където:

x_M – координата, определяща положението на ударната маса M , [m];

v_M – скорост на ударната маса, [m/s];

t_0 – времето, в което се отделя ударната маса от ударното сечение, [s].

Граничните условия за сечение $x = l$ между 2 и 3 определят характера на взаимодействие на инструмента с технологичната среда. Скалата е представена като еластично-пластичен елемент и условията са:

$$E \cdot A \cdot \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = k \cdot u(l,t), \quad \text{ако } \frac{\partial u(l,t)}{\partial t} \geq 0 \quad (13)$$

$$E \cdot A \cdot \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = 0, \quad \text{ако } \frac{\partial u(l,t)}{\partial t} < 0, \quad (14)$$

където:

k – коефициент на устойчивост на скалата, [N/m²];

E – модул на Юнг, [N/m²];

A – площ на допир, [m²]

След удара в сечението на пръта се формира вълна, която се разпространява по пръта до противоположния му край. Отразявайки се там във вид на опънова вълна, тя се разпространява обратно. Така процесът се повтаря.

Скоростта на разпространение на вълната е:

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} . \quad (15)$$

където:

ρ – плътност на материала, [kg/m³].

Частното диференциално уравнение е от втори ред с две независими променливи (x – пространствена променлива, t – време) и е уравнение на струна. Търсената функция е $u(x,t)$. Към смесената задача за областта $0 \leq x \leq l$ и $0 \leq t$ се добавят началните и гранични условия. По метода на Фурие се търси решение на смесената задача и се прилагат няколко стъпки: разделят се променливите, решава се задачата на Щурм-Лиувил, получава се ред за $u(x,t)$ /формално решение/ и се изследва сходимостта на този ред.

Изводи

Вълновият модел на надлъжен удар описва най-адекватно динамичните процеси при централен надлъжен удар на прът /за централен надлъжен удар се счита удар, при който оста на буталото съвпада с оста на пробивния инструмент/.

В настоящата статия е предложен модел, описващ взаимодействието между пробивен инструмент моноблок и скали с различна твърдост.

Литература

- Ерофеев В., 1999, *Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой*, Москва, Изд. Московского унив.
Манжосов В., 2006, *Модели продольного удара*, Ульяновск, УлГТУ.
Шейретов К., 1987, *Минни машини*, София, ДИ Техника.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Машинознание“.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИЗНОСВАНЕТО НА БАНДАЖНИТЕ ГРИВНИ ПРИ РУДНИЧНИТЕ ЛОКОМОТИВИ ЗА ПОДЗЕМЕН ИЗВОЗ

Любен Тасев, Кристиан Цветков, Венелин Тасев

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

РЕЗЮМЕ. Бандажните гривни са елементи от кинематичната схема на локомотива, които са подложени на най-интензивно износване. Подмяната им в руднични условия е почти невъзможна, което налага скъп и сложен ремонт. В статията се разглеждат причините, водещи до изменението интензивността на износването в зависимост от състоянието на релсовите пътища, условията на работа на подвижния състав, материала на бандажните гривни и технологията за тяхното изработване.

WEAR OF THE TRACTION BRACELETS OF THE MINE LOCOMOTIVES FOR UNDERGROUND TRANSPORTATION

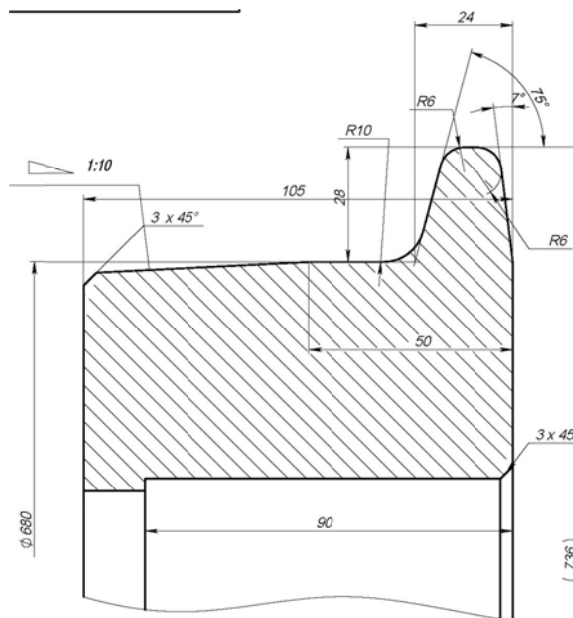
Lyuben Tasev, Kristian Cvetkov, Venelin Tasev

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

ABSTRACT. Traction bracelets are an element of the kinematic scheme of the locomotive, which is subjected to the most intense wear. Replacement in mining conditions is almost impossible, requiring an expensive and complex repairs. The article discusses the reasons leading to the change of wear intensity depending on the condition of the tracks, the working conditions, the material of the traction bracelets and technology in their construction.

Въведение

Локомотивите за подземен извоз, които се използват в България, са здрави, сигурни и добре направени машини. Те имат многогодишен експлоатационен срок, като дават сравнително малко откази и то предимно в електрическата система. Независимо от всичко отделните компоненти от механичната система подлежат на износване. Най-натоварени в това отношение са бандажните гривни, които са в контакт не само с релсовия път, но и с всички неблагоприятни условия в един подземен рудник, а именно: влага, кал, абразивен прах и др. Това води до тяхното износване, което за различните условия е различно и е обект на разглеждане от настоящата статия. Чертеж на гривната е показан на фигура 1. Трябва да се отбележи, че ремонтът или подмяната на бандажните гривни в руднични условия е невъзможен. Необходимо е целият локомотив или единични-те задвижвания да бъдат извадени на повърхността и закарани в специализирани ремонтни предприятия. Ремонтът също така не е лек и е свързан със значителни финансови разходи. Като се отчетат и загубите от престоя на локомотива, то става очевидно колко е важно да се увеличи междуремонтният пробег на бандажните гривни. В настоящата статия се разглеждат различните видове износвания, които настъпват при различни условия на работа в реални промишлени условия на мина „Бобов Дол“ и рудниците на ГОРУБСО.



Фиг. 1. Бандажно колело от руднични локомотиви 7,8 и 10 тонни

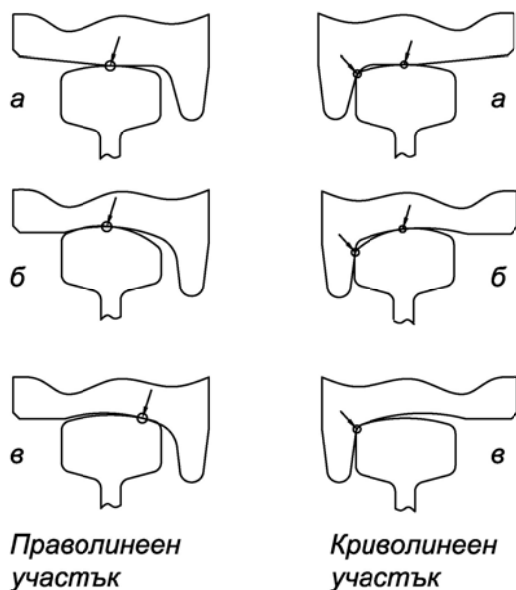
Изложение

Износването на бандажната гривна при нормални условия се определя от начина ѝ на контактуване с главата на релсата [Moore D.F., 1978]. На фигура 2 са показани различни варианти на контактуване на

бандажното колело с релсата според износването и вида на релсовия участък:

- а – нова релса и ново бандажно колело;
- б – износена глава на релсата и износено бандажно колело;
- в – нова релса и износено бандажно колело.

Точките на контактуване са показани както за праволинеен така и за криволинеен участък от пътя. Ясно се вижда, че контактът, съответно износването, ще бъдат различни за двата участъка. Докато при праволинейния участък контактът се намира по работната повърхнина на бандажното колело, при криволинейния се появява втора контактна точка на самия реборд.



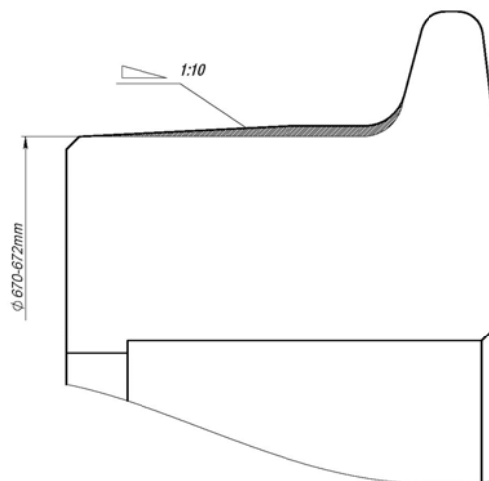
Фиг. 2 Начин на контактуване на бандажното колело с релсата при различни варианти на износване

Нашите изследвания в рудници на ГОРУБСО и мини Бобов Дол показаха, че износванията започват с намаляване на наклона на бандажната гривна (фиг. 3), като за съответните километри изминат път той се променя от началния 1:10 до нула, тоест повърхността на бандажната гривна от конусна се превръща в цилиндрична. Усреднени стойности за намаляването на този наклон за показани в таблица 1.

Таблица 1. Намаляване на наклона на бандажа спрямо изминатият път

Изминът път [km]	мина Бобов Дол	ГОРУБСО
0	1/10	1/10
1000	1/15	1/16
2000	1/17	1/18
3000	1/20	1/21
5000	1/28	1/32

Получените резултати в таблицата показват, че съществена разлика в износването на гривните във въглищни и оловно-цинкови рудници няма. Направеното изследване е с ограничен обхват на рудници (мина „Бобов Дол”, рудник „Марзян”, рудник „Крушев Дол”, рудник „Петровица”), но, по наше мнение, е доста показателно. От състоянието на бандажните гривни на локомотиви, които са пристигали в Научно-развойната база по минно



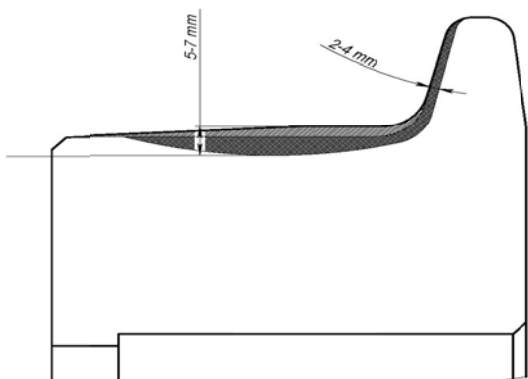
Фиг. 3 Износване на наклона на бандажната гривна



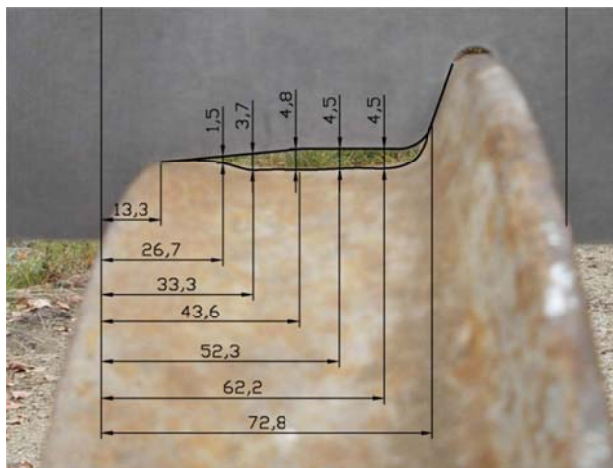
Фиг. 4 Износване на бандажна гривна рудник „Марзян” локомотив РКП-10 7500 км

оборудване към МГУ „Св. Иван Рилски” може да се съди, че наклонът на бандажната гривна изчезва напълно, но в повечето случаи износването продължава в канално износване, като в самата гривна се оформя канал с определени размери (фиг.5 и 6).

Износванията на носещата част на бандажната гривна с промяната на нейния наклон водят до загуба на правилно водене на локомотива, изместване в едната или другата страна на пътя, триене на реборда в релсата и съответно увеличаване на общите загуби на движението му. Освен това се губи общата устойчивост на локомотива, особено в криволинейни участъци, като съществува реална опасност за неговото дерайлиране. При всички случаи това води до активно износване на реборда на бандажната гривна. Последното позволява по-голямо напречно движение на локомотива, съответно по-малка надлъжна устойчивост. Износеният реборд предполага по-трудно водене на локомотива в кривите и неустойчиво влизане в стрелките. Каналното износване при всички случаи води до значително увеличение на триенето при търкаляне, а при него загубите от движение на локомотива са значително по-големи. Дебелината на бандажната гривна в тези участъци е намалена и, имайки предвид различното разпределение на напреженията, има реална опасност от спукване. Във всички случаи работата на локомотива с посочените износвания най-малкото е неприемлива, а в повечето случаи недопустима.



Фиг. 5 Канално износване на бандажна гривна



Фиг. 6 Снимка на канално износване на бандажна гривна от локомотив АМ8Д от минна Бобов Дол 17500 км

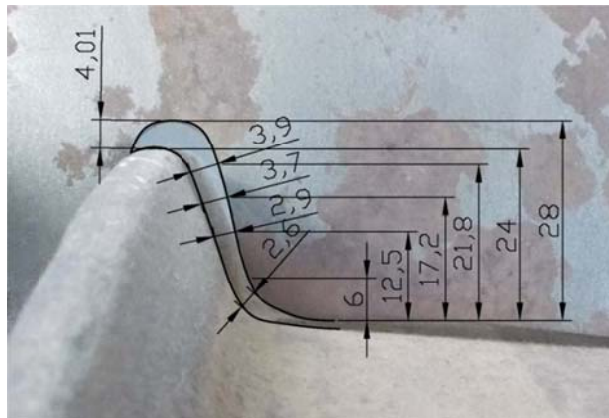
За да се установи влиянието на материала върху износването, нашият колектив направи следното. На локомотив, изработен в Монек-юг, заложихме единични задвижвания, произведени в Научно-развойната база поминно оборудване към МГУ „Св. Иван Рилски“. На едното единично задвижване монтирахме бандажи от манганова стомана, а на другото - от стомана 45. Първите бандажни гривни бяха валцовани, а вторите - отлети. Локомотивът минава по 1900 км всяка година от пускането си в експлоатация. Авторите на статията извършваха подробни измервания върху износването на отделните елементи на локомотива и най-вече върху бандажните гривни. Резултатите от измерванията са показани в таблица 2.

Таблица 2 Износване на бандажа в зависимост от материала при пробег от 6000 км

Отстояние от външния реборд	Бандаж 1 Манганова ст.	Бандаж 2 Стомана 45
20	-0.2	-0.7
30	-0.7	-1.8
40	-1.4	-2.2
50	-1.6	-2.8
60	-1.6	-2.8
70	-0.5	-0.9

Видно е по-интензивното износване на гривните, отлети от стомана 45. Те значително са променили своята форма и размер. Локомотивът все още е работоспособен, но едната колоос, по наша преценка, е за ремонт.

Освен износването на наклонената част на бандажната гривна се наблюдава значително износване на реборда. Подробни изследвания на влиянието на изминатия път върху това износване не успяхме да проведем. За него съдим по-предоставените за ремонт локомотиви, а те са десетки от различните рудници на България (фиг. 7).



Фиг. 7 Износване на реборд рудник „Крушев Дол“ локомотив К10 12000 км

ИЗВОДИ

Направените промишлени изследвания на бандажните гривни показват, че в различните рудници на България се получават износвания от следния тип:

1. Износване на наклона на бандажната гривна до нейното пълно изправяне
2. Вдълбаване на бандажната гривна с образуване на канал.
3. Износване на реборда - цялостно намаляване на дебелината му.

По наше мнение тези износвания настъпват преждевременно, което се дължи от една страна на лошото поддържане на релсовите пътища, а от друга на неподходящ материал, от който се изпълняват бандажните гривни.

Литература

- Андреев А.В., 1988, *Передача Трение*, Москва.
 Moore D.F., 1978, *Principles and Applications of Tribology*, Dublin.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Механизация на мините“.

СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА АТМОСФЕРАТА В ОТКРИТ РУДНИК

Захари Динчев, Михаил Михайлов, Елена Власева, Александър Крилчев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; zaharidinchev@gmail.com, michaylov@mgu.bg, elena@mgu.bg, krilchev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Проветряването на открити рудници с голяма (над 300m) дълбочина представлява труден за контролиране процес. Той зависи от много фактори – местоположение на рудника, метеорологични условия, технология на работа, разположение на обектите в него. Рудник "Асарел" е пионер в инсталирането на система за мониторинг на атмосферата чрез дистанционен контрол на CO, NO, NO₂, SO₂ и O₂ в четири станции в чашата на рудника. Статията представя внедрената система за мониторинг и начина за обработване и представяне на резултатите от измерванията. Анализирани са прагови стойности на концентрацията на следените газове за предупредително оповестяване и аварийно планиране. Набелязани са възможности за използване на системата при планиране на технологични операции.

OPEN PIT MINE ATMOSPHERE REMOTE CONTROL SYSTEM

Zahari Dinchev, Michael Michaylov, Elena Vlasseva, Alexander Krilchev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; zaharidinchev@gmail.com, michaylov@mgu.bg, elena@mgu.bg, krilchev@mgu.bg

ABSTRACT. Ventilation of open pit mines with great depth (more than 300m) is hardly controlled complicated process. It depends on several factors – mine location, meteorological conditions, technology, and objects location inside the mine. Asarel mine is a pioneer among open pit mines to install remote control system for CO, NO, NO₂, SO₂ and O₂ concentrations in four stations inside the mine. This paper presents the system, operating in the mine as well as the way of processing and presenting monitored data. Threshold limit values of traced gases concentrations for alarm announcement and accidental planning are analyzed. Some options to utilize the system in the planning process are proposed.

Въведение

Рудник "Асарел" е пионер във въвеждането на непрекъснат инструментален контрол на атмосферата в открити рудници. Стремехът е да се достигне до въвеждане на безопасни прагови стойности на контролираните примеси, които да се използват при оценка, управление на риска и аварийна евакуация на работещите в котлована на рудника. При това газовите примеси не се контролират в зоната на дишане на работещите.

Наредба 13 [2], в която са регламентирани гранични стойности за концентрация на вредности в работната среда, представлява въведена европейска норма. В ЕС са приети определени гранични стойности на концентрациите на примеси с атмосферата на работната среда, но всяка държава-членка ги установява самостоятелно в своите норми и често завишава изискванията спрямо законодателството на ЕС. Нормите за гранични концентрации на примеси са регламентирани в Наредба 13 като средно-сменни концентрации за работна смяна и за период до 15 минути, за замърсявания на работната среда, т.е. в зоната на дишане на човека. За два от най-токсичните компоненти - азотните оксиди - в наредбата [2] няма кратковременни норми. В страната няма норми за аварийно планиране нито за работната, нито за околната среда.

В рудник "Асарел" бе доставена и монтирана мониторингова система на фирмата ANLBORN GmbH, Германия за непрекъснат контрол на атмосферата. Системата има три

мониторингови станции, снабдени със сензори за измерване на пет газа: въглероден оксид, серен диоксид, кислород, азотен оксид и азотен диоксид. Всяка от станциите има предвидена възможност за включване на допълнителни сензори. В диспечерната зала на рудника са инсталирани адаптер и радиомодем, които прехвърлят регистрираните данни към компютър със софтуер RTM WIN-control [3]. На монитора се визуализират в реално време и в цифров формат измерените концентрации на петте газа. Доставчикът не е предоставил информация за периодичността на контрол на точността на работата на инсталираните в станциите сензорите и за техния експлоатационен срок.

Същността на представеното изследване е разработена методика за непрекъснат контрол на рудничната атмосфера, която да се верифицира на основата на анализ на представителна информация от нормална работа на комплектованата мониторингова система и метеорологична станция, за да се предложи инструкция за непрекъснат контрол на атмосферата с план за действие при превишения на съдържанието на примеси в нея. На основата на анализ на действащи нормативи в европейски и други страни да се предложат стойности на липсващите в [2] кратковременни концентрации и доза за различни нива на опасност.

1. Източници на вредности в рудника

Източниците на вредности в рудника са технологични:

- взривяване, като част от добивната технология;
- работа на дизелови двигатели за транспорт и на други машини.

Взривните работи в рудника се извършват 1-2 пъти седмично, в периода от 14 до 15 часа. Едно изследване на съдържанието на токсични газове във взривния облак на два открити рудника в Австралия [1] показва, че азотният диоксид присъства в сравнително малки (но опасни) концентрации при средно съдържание около 17-18ppm на нивото на земята. В същото време извън зоната на взрива са измерени много по-високи концентрации на CO, NO и SO₂. Средното съотношение на обемните концентрации на токсичните компоненти извън зоната на взрива е определено в [1], като:

CO : NO : SO₂ : NO₂ = 500 : 27.5 : 5.5 : 1

Основните продукти на непълното изгаряне на дизеловото гориво са:

- въглероден оксид (CO);
- въглеводороди, включително алдехиди (HC);
- недоизгорял въглерод (сажди);
- азотни оксиди (NO и NO₂);
- полиароматни въглеводороди.

2. Гранични стойности на концентрацията на следените от системата вредности

Тези стойности са регламентирани в Наредба 13 [2]. Там са дефинирани и някои определения, които са важни за работата на Системата за мониторинг:

- а) Експозиция - излагане на човешки организъм на въздействието на физични фактори, химични или биологични агенти;
- б) Гранична стойност на химичен агент във въздуха на работното място - допустима концентрация на химичния агент във въздуха на дихателната зона на работещия за определен период от време.

В Наредба 13 са пропуснати определенията за цитираните в нея гранични концентрации (за 8 h и за 15 min), които в съответствие с международно приетите означения имат следния смисъл:

- Средно-претеглена във времето концентрация (Международното означение е TWA – Time Weighted Average) - средната концентрация на газа или парата, на която всеки работник може да бъде изложен в обичайната 8-часова работна смяна в 40-часова работна седмица без неблагоприятни ефекти за неговото здраве;
- Кратковременна гранична концентрация (Международното означение е STEL – Short Term Exposure Level).- средно-претеглена във времето концентрация на газа или парата за 15-минутен период (експозиция), на която всеки работник може да бъде изложен без болезнено усещане, неблагоприятни ефекти за неговото здраве и която няма да затрудни неговото самоспасяване или безопасност.

В наредба 13 е пропуснато осъществено изискване към кратковременната STEL концентрационна граница, отнасящо се до допустимата експозиция в рамките на работна смяна:

- интервалът между две превишения до STEL не може да бъде по-малък от 60 минути;

- в рамките на работната смяна достигането на STEL може да се случи не повече от три пъти.

Тези изисквания, въведени от NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) [4,5], са съобразени с начина, по който човешкият организъм се разтоварва от вдишаните газове и пари. В таблица 1 са показани нормираните стойности за следените от системата газове. Както се вижда от данните, кратковременни норми за азотен диоксид не са определени, а за азотен оксид е показана стойност 9.4, която е STEL в нормите [6,7] на MSHA (Mine Safety and Health Administration - USA).

Таблица 1

Газ	Гранични стойности за експозиция			
	480 min (8h)		15 min	
	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm
CO	40	34,9	200	174,64
NO	20	16,3	9,4*	5*
NO ₂	4	2,13		
SO ₂	5	1,91	10	3,82

За два от най-токсичните компоненти-азотните оксиди в наредбата няма кратковременни (15-минутни) норми. Не е коментиран и фактът, че кратковременните гранични концентрации са средно претеглени за регламентирания кратък период от 15-минути, както и допустимият интервал между две кратковременни концентрации, а също и допустимият брой на достигането им в работна смяна или денонощие. В страната няма въведени норми за аварийно планиране (ERPG и IDHL – табл. 2) нито за работната, нито за околната среда. На основа анализ на действащи нормативи в европейски и други страни трябва да се предложат стойности на концентрациите и експозицията за различни нива на опасност на замърсяване на рудничната атмосфера. Съществено значение за технологичния режим има и въпросът: Кога рудникът изпада в аварийен режим поради газово замърсяване на атмосферата в него? Международно приетите дефиниции за гранични концентрации при аварийни ситуации и анализ на риска от замърсяване на въздуха са показани в табл. 2, а в табл. 3 – аварийни стойности на следените вредности.

Таблица 2

ERPG	Emergency Response Planning Guidelines Критерии на Американската асоциация по Хигиена на труда, които характеризират безопасни нива при 1-часова експозиция.
ERPG - 1	Максимална концентрация във въздуха, при която хората могат да получат леки и преходни здравни ефекти и да усетят характерна неприятна миризма.
ERPG-2	Максимална концентрация във въздуха, при която хората не получават или развиват необратими или други сериозни здравни ефекти или симптоми, които биха нарушили способността на човека да предприеме предпазни или спасителни действия.
ERPG-3	Максимална концентрация във въздуха, при която хората не получават или развиват застрашаващи живота здравни ефекти. Ако тази концентрация се превиши, могат да се развият опасни за живота ефекти.

IDLH	Immediate Danger for Life and Health Критерий на NIOSH – максимално ниво на експозиция на дадена вредност, при която здрав човек може да е подложен в продължение на 30min без да получи необратими последици за своето здраве.
-------------	--

Таблица 3

Газ	Концентрация, ppm			
	ERPG-1 ≤ 60min	ERPG-2 ≤ 60min	ERPG-3 ≤ 60min	IDLH ≤ 30min
CO	200	350	500	1200
NO	-	-	-	100
NO₂	1	15	30	20
SO₂	0.3	3	25	100

Стойностите в таблицата се използват като реперни за допустимото време за безопасна евакуация при настъпване на аварийен газов режим в рудника. В литературата липсват данни за ERPG на азотния оксид, защото се приема, че на открито той сравнително бързо се доокислява до азотен диоксид.

3. Предназначение и обхват на системата за непрекъснат контрол

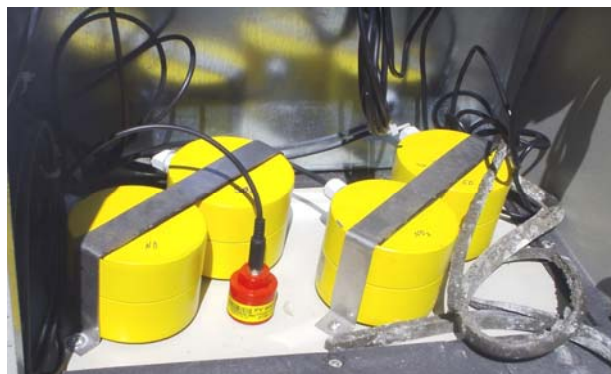
Стационарен мониторинг се извършва на избрани позиции в рудника. Следят се концентрациите на O₂, CO, NO, NO₂, SO₂, температурата, атмосферното налягане и относителната влажност на въздуха. Системата се състои от три измервателни пункта (мониторингови станции), разположени в чашата на рудника (таблица 4), модул за безжично предаване на измерената информация, централен компютър със специализиран софтуер AMR WinControl, инсталиран в диспечерския пункт, на който се приема и съхранява предадената информация.

Таблица 4

НАЗВАНИЕ на обекта	Хоризонт	Разстояние до ДП [m]
Мониторингова станция №1	707	770
Мониторингова станция №2	808	573
Мониторингова станция №3	957	3
Диспечерен пункт (ДП)	957	0

Всяка мониторингова станция е комплектувана с:

- газови сензори за O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ (фиг. 1);



Фиг. 1. Газови сензори

- уред за комбинирано измерване на температура, атмосферно налягане и относителна влажност на въздуха тип FHAD46-4AGL05 (фиг. 2);
- измервателен прибор тип ALMEMO® 2890-9 (фиг.3);
- радиомодем;
- електрическо захранване 220V.

Модулът за безжично предаване на информацията ползва радиомодем, разположен в съответната мониторингова станция. Всички сензори на системата измерват непрекъснато величината, която контролират. От настройката на измервателния прибор и софтуера зависи през колко време те ще се обръщат към сензора за измерван резултат.



Фиг. 2. Комбиниран сензор за температура, налягане и относителна влажност

Системата може да получава, показва и регистрира измервания през 10 секунди или на по-голям интервал от време.



Фиг. 3. Измервателен прибор тип ALMEMO® 2890-9

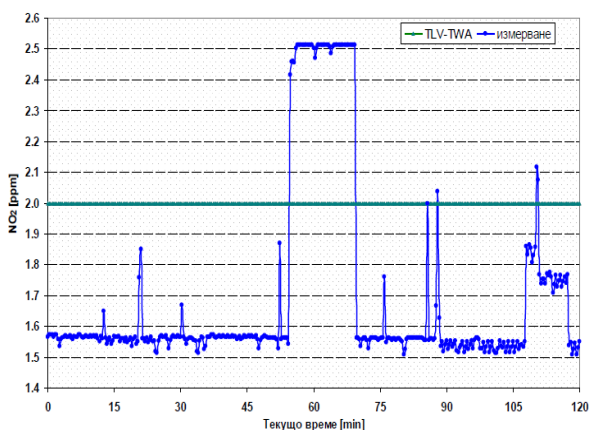
Динамиката на състава на рудничната атмосфера, нейната температура и налягане не се нуждаят от такава голяма честота и натрупване на огромен масив от данни с малка изменчивост. Системата е настроена да се обръща и да получава три данни в минута от всеки сензор, което означава поява на ново показание и запис за концентрацията на всеки газ през 20 секунди. Тази честота е достатъчна за целите на непрекъснатия контрол на рудничната атмосфера. В диспечерския пункт са разположени следните елементи на системата:

- персонален компютър, зареден със специализиран софтуер AMR WinControl;
- RS232/RS485 адаптер с мрежово захранване;
- Радио-модем Elpro;
- комплект кабели и преобразуватели за свързване с PC;
- непрекъсваемо захранване (UPS).

Логиката на програмиране на системата не допуска прекъсване в захранването на компютъра в диспечерския пункт. Всяко прекъсване предизвиква: ново отброяване на времето за изготвяне на доклад, поредица от 2-3 неверни данни за съдържанието на токсичните газове и смущения в логиката – транслирането на данни от софтуера. Новото отброяване на времето за изготвяне на доклад размества часовете в денонощието и прави генерирания доклад хронологично неверен. Големите отклонения на неверните данни след прекъсване могат да генерират фалшив аварийен сигнал в 15-минутната експозиционна концентрация. Заедно със смущенията в логиката те намаляват надеждността на системата, което неминуемо ще се отрази на доверието към нейните показания и аварийни сигнали.

4. Обработка на измерванията

Анализът на възможностите на софтуера на мониторинговата система и сравнението с изискванията на Наредба 13 [2] за контрол на две гранични концентрации: средно-смена TLW-TWA и кратковременна TLW-STEEL определя като възможно решение работата с «плъзгач прозорец» с продължителност на времевия интервал в него от 15 минути. При появата на всяко ново измерване се изчислява средната концентрация на газа за предходния 15 минутен период и резултатът се записва.



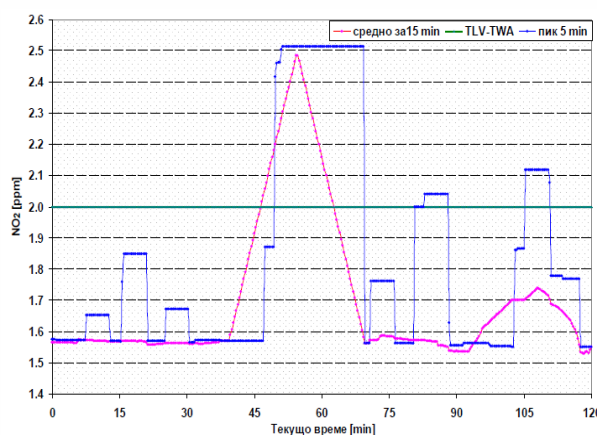
Фиг. 3. Измервания без обработване

Друг плаващ прозорец записва и максималната стойност на газа в 5-минутен интервал преди последното измерване. На фиг. 3 е показана извадка за два часа от записа на данните на системата. В измерените стойности се наблюдават три пика, които превишават средно-сменната гранична (TWA) концентрация и един, който я достига, с различа продължителност по време.

На фиг. 4 са дадени осреднените стойности на измерените концентрации от фиг. 3, както следва:

- плъзгач прозорец с интервал на осредняване 15 минути – линия с кръгче;
- плъзгач прозорец за максималните стойности на концентрацията в интервал от 5 минути – линия с квадратче.

Картината на фиг. 4 е по-ясна по отношение на превишението на граничната средно-сменна норма TLV-TWA = 2ppm и по-ясно очертава интервала от време, в който трябва да се търси причината за появата на пикове. В тези два часа не се достига кратковременната норма TLV-STEEL = 4ppm (табл. 1).



Фиг. 4. Плъзгач прозорец през 5 и 15 min

5. Визуализация на измерванията

Данните от мониторинговите станции се приемат от радиомодема и по стандартен интерфейс до компютъра. Визуализацията и обработката на данни се осъществява от специализиран софтуерен продукт AMR WinControl [3]. Програмата работи на стандартен PC в среда Windows. Работата с AMR WinControl започва с конфигурация на станциите и задаване на параметрите на сензорите. След началното конфигуриране и проверка за наличието на връзка с мониторинговите станции измерванията се визуализират. Програмата предоставя различни възможности за визуализация: в текстов или графичен вид (фиг.5), последователно показване на отделните станции, едновременно показвания на сензорите от трите станции (фиг. 6).

Програмата дава богати възможности за използване на регистрираните измервания, запис и съхраняване на



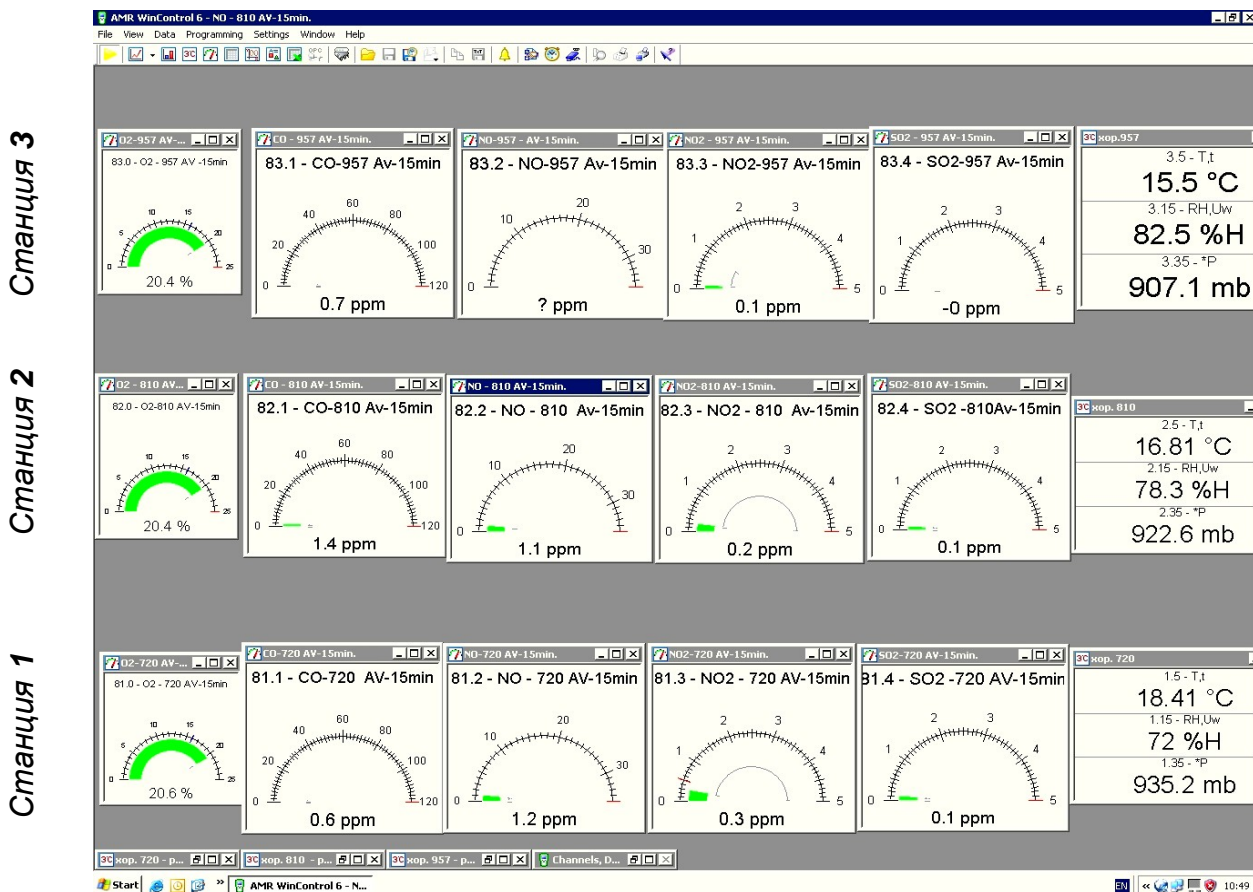
Фиг. 5. Екрани на системата

данни; аритметичната им обработка по зададен алгоритъм; визуална и/или акустична аларма – по дадени консервативни норми или изчислителни стойности; графично изображение на текущи стойности с възможност за цифрово означаване на локални екстремуми; експортиране на данни към друг софтуер, включително MS-Excel, генериране и разпечатване на дневни и седмични отчети.

Авторите са програмирали изобразяване на 15-минутни осреднени показания за петте наблюдавани газови компо-

нента от трите мониторингови станции (фиг.6). Екранът е разделен на три сектора, разположени по височина за всяка мониторингова станция. В дясната част на екрана са показани измерванията за температура (°C), атмосферно налягане (mb) и относителна влажност (%H) за всяка станция.

За всеки сензор в съответна цветна скала по ниво на опасност са показани 15 минутните осреднени стойности, както и средната 15 минутна стойност.



Фиг. 6. Програмиран основен екран на системата

6. Сигнални нива за аварийната обстановка

По отношение на кодовете за газова опасност се въвежда цветен код за всяко превишение на осреднените 15-минутни измервания. Цветният код се променя в зависимост от нивото на опасност за хората в него, както следва (табл. 5):

- черен код - концентрация на газа по-малка от TWA;
- син код - при достигане и превишаване на TWA, но концентрацията на газа е по-малка от STEL;
- червен код – достигане и превишаване на STEL, без непосредствена опасност за евакуация на хората от рудника за период от 30 минути след достигане на STEL;
- син код – концентрация, при която в рудника не трябва има хора.

Сензорите на системата, които диспечерът трябва да контролира, генерират 24 показания (включително 15 газови концентрации), които се актуализират три пъти в минута. Големият брой на сензорите наложи предложената визуализация на данните (фиг. 6).

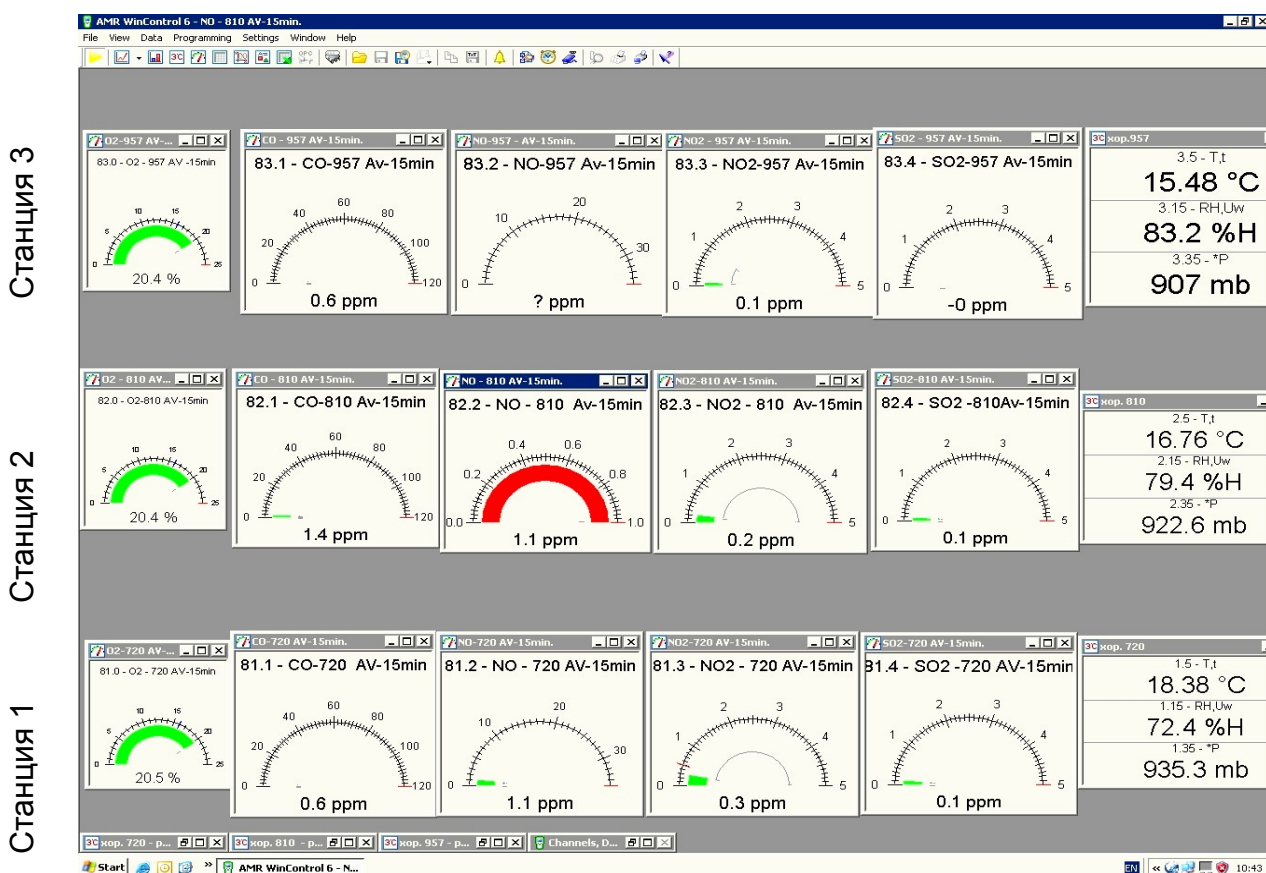
Обхватът на индикаторите за всеки газ е от 0 до зададената кратковременна концентрация (табл. 5). Индикаторите (фиг. 6) показват със зелен цвят текущите 15-минутни средни концентрации.

В основата на всеки часовников индикатор е изписана числената стойност на показанието на цветния плъзгач. Графичният часовников показател променя цвета си в зависимост от показанията на газовите сензори, както е видно в табл. 5. На фиг. 7 граничната концентрация на азотен оксид е изкуствено занижена до 1ppm, за да се илюстрира действието на индикатора – промяна на цвета му от зелен на червен, изпълнил целия циферблат. В долната част на екраните на фиг. 6 и 7 са минимизирани три прозореца за трите мониторингови станции. При получаване на сигнала за достигане на STEL диспечерът има възможност да отвори всеки от тях и да получи информацията във вида на фиг. 7. И в двата случая той има възможност да наблюдава изменението през 20 секунди на 15-минутната концентрация на всички газове на нивото, на което е достигната STEL.

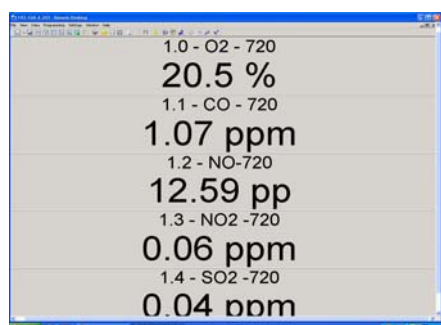
Таблица 5

Цвятен код	Ниво на опасност по концентрация "С" на газа				
	O2 [%vol.]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO2 [ppm]	SO2 [ppm]
черен	$C \geq 20$	$C < 30$	$C < 16$	$C < 2$	$C < 2$
зелен	$C \leq 19.5$	$30 \leq C < 174$	$16 \leq C < 25$	$2 \leq C < 5$	$2 \leq C < 4$
червен	$C = 19$	$C > 120$	$C > 35$	$C > 5$	$C > 4$
син	$C < 19$	$C \geq 250$	$C \geq 50$	$C \geq 15$	$C \geq 20$

Индикацията за това, върху показанията на кой сензор диспечерът трябва да съсредоточи вниманието си, е безпогрешна при конфигурираната цвятова визуализация. Привличане на вниманието на диспечера става от различим звуков сигнал, за който е настроена системата. Аварийният звуков сигнал се подава 60 секунди след достигане на праговото ниво на 15-минутната кратковременна концентрация.



Фиг. 7. Смяна на индикатора на сензора за NO



Фиг. 8.

7. Влияние на метеорологичните условия

Ефективността на естественото проветряване и тенденцията за промяна на концентрацията, която се наблюдава, трябва да се оценяват въз основа на мониторинга на газовите примеси в рудника при известни метеорологични условия. Авторите извършиха едногодишни метеорологич-

ни наблюдения, чрез които се изясниха някои предопределени от местоположението на рудника климатични фактори, влияещи върху разпространението и изнасянето на отделяните и контролирани със системата за непрекъснат мониторинг газови примеси. Обобщената информация въз основа на статистическа обработка на регистрираните метеорологични данни за едногодишен период обосновава следните изводи:

- най-малък период на затишие – 2% е наблюдаван през месец март на 2013 г.;
- най-продължителен период на затишие – 32.1%, наблюдаван през февруари 2013 г. (затишие през повече от една трета от времето в месеца, средно 5 часа в денонощието);
- средната продължителност на затишието през годината е изчислена на 18.76% от 8760 h/г, или 164 часа годишно. Средно-дневното затишие съответства на 4.5 часа в денонощие;
- медианата на периодите на затишие е 16.45%, по-малка е от изчислената средна стойност и показва, че

половината от данните са до тази стойност, докато другата половина е над нея.

Анализът на скоростта на вятъра в денонощието дава важна информация:

- максимални стойности на скоростта на вятъра са измерени в периода от 12:30 до 15:00 ч. Вероятно може да се твърди, че скоростта на вятъра в този период се очаква да бъде по-висока от 2 m/s (~7 km/h). Скоростта на вятъра расте от 12:30 до 14:00 ч., след което започва да намалява. Считаме, че този факт трябва да бъде отчетен и да доведе до негово изместване на режима на взривяване, което би било добре да приключва до 13-13:30 ч.;
- вероятността за затишие е най-голяма през периодите 22:30-24:00ч. и 1:30-6:00ч., в които интензивността на газоотделянето в рудника се налага да бъде минимизирана.

Посоката на вятъра се изменя през различните месеци на годината:

- от изток-югоизток; запад-северозапад - през зимния период
- до изток-североизток - през летния,
- една четвърт (25%) от средномесечните скорости са по-малки от 1,57 m/s;
- три четвърти (75%) от средномесечните скорости са по-малки от 2,63 m/s;
- медианата (50%) е 1,97 m/s.

8. Обработване, съхранение и архивиране на данните от системата

Системата генерира текстов файл с данните за зададен период от време, конвертируем в Excel формат. Докладите за работна смяна и денонощие се генерират от конвертирания Excel-файл. В началото това трябва да става ръчно, от специалиста по вентилация, докато дружеството реши да бъде създадена програма за генериране на доклади. Конвертираният Excel-файл с три електронни таблици, по една за всеки месец, се архивира в електронното досие на системата. Електронното досие на системата с архивиранията файлове се съхранява на друг твърд диск – RAR или външен диск.

Изготвят се сменни и денонощни доклади, съдържащи средни, максимални и минимални измерени стойности от всеки сензор. Сменни доклади се изготвят при регистрирано и потвърдено превишение на кратковременната концентрация на наблюдаваните газове. Денонощните доклади са съставени по данните за цяло денонощие. Те се изготвят всеки ден и се изпращат по електронната поща. При системна поява на аварийни сигнали за последователни смени или за цяло денонощие трябва да се проследи хронологично връзката на естественото проветряване на рудника с данни от метеорологичните измервания и показанията за газовите концентрации. Особено внимание е необходимо да се обърне на периодите на безветрие (нулева или по-малка от 0,3 m/s скорост на вятъра), и на инверсия (стратификация на атмосферата с устойчиво намаляване на температурата и нарастване на плътността на въздуха по дълбочина на котлована на рудника). Доклад за превишение на кратковременните концентрации ще се изпраща като e-mail писмо, съдържащо типов текст и приложен файл, в който

системата декларира вида на аварийното събитие – намеченото превишение на аварийното ниво на концентрацията. Длъжностните лица, на които е изпратен e-mail, е възможно да получат и SMS-съобщение на мобилния си телефон за превишението. Генерирането на този доклад от системата изисква допълнително програмиране. Докладите както и аварийните съобщения трябва да бъдат получавани поне от следните длъжностни лица: Главния инженер на рудника; Минно-спасителната служба; Специалиста по ТБ на рудника; Специалиста по вентилация в инспекцията по безопасност на предприятието; Началника на инспекцията по безопасност на предприятието.

9. Калибриране и контрол на сензорите

Надеждността на работа на мониторинговата система зависи от нейната комплектност и поддръжка. Рудникът разполага с три еталонни газови смеси за калибриране на сензорите и настройка на системата.

Други важни за правилното функциониране на системата са периодичните проверки на показанията с портативен газоанализатор. Измерването се извършва непосредствено до мониторинговата станция, като се записват показанията на измервателния прибор на станцията и тези на преносимия газоанализатор. За резултатите от проверката се води регистър. До набирането на опит в прилагането на системата проверките с портативен газоанализатор е препоръчително да се извършват на всеки две седмици. При отказ или нереални показания на сензорите на системата се извършват извънредни проверки. Тези проверки започват със сравнителен анализ с портативен газоанализатор, след което сензорът се проверява чрез измерване на електрическия му сигнал. Това може да стане чрез контролно измерване на място или след смяната му и прецизно измерване в ел.лаборатория. При отклонения от нормалната работа на повече от три сензора трябва да се извърши извънредна контролна проверка на всички сензори. От датата на тази проверка започва да се отчита времето до следващата тримесечна проверка. За да се бракува сензор, той трябва да премине през лабораторна диагностика и заключение за изчерпан ресурс.

10. Перспективно софтуерно разширение на системата

Насочено е към по-ефективно използване на системата. Като първа стъпка авторите препоръчват софтуерно осигуряване на длъжностните лица: Главен инженер на рудника; Минно-спасителна служба; Специалист по ТБ на рудника; Началник на инспекцията по безопасност на предприятието и Специалист по вентилация в инспекцията по безопасност на предприятието да могат да наблюдават газовата обстановка в рудника чрез следене на картината на екрана на диспечера и на персоналните си компютри.

Възможностите на специализирания софтуер AMR Win Control може да се оползотворят в няколко посоки:

- Програмиране на мониторинговата система за хронологично изобразяване на графика за концентрацията на газа, показал превишение, на трите контролирани хоризонта в реално време. Така длъжностните лица, които трябва да вземат решение, могат да видят

развитието на обгазяването или прочистването на рудника след достигане на STEL;

- Програмиране за автоматично генериране на текстово съобщение за достигане на STEL и изпращане на доклад с e-mail до длъжностните лица. Така може да автоматизира изпращането на съобщение за авария;
- Програмиране на автоматично генериране на сменни и денонощни доклади и графики за газовата обстановка рудника;
- Разработване на програма за показване на състояние на инверсия на рудничната атмосфера, с наличната информация от действащите в рудника сензори.

Някои от тези предложения могат да бъдат реализирани в кратки срокове, а други изискват известна практика в ползването на мониторинговата система при нормалната експлоатация в предприятието.

Заклучение

Стационарният мониторинг на атмосферата в открития рудник трябва да създаде условия за подобряване на безопасността на работа, чрез:

- Намаляване на обема на оперативното персонално опробване на работните места за наличието и съдържанието на вредни газове в зоната на дишане на работещите в рудника, без влошаване на качеството на персоналният мониторинг;
- Отчитане на влиянието на метеорологичните фактори върху проветряването на рудника при емисии от линейни, точкови и залпови източници на замърсяване на атмосферата в него;
- Набиране на емпирични данни за създаване на вътрешно-фирмени правила за управление на замърсява-

нето на атмосферата в рудника, на основата на моделиране, което може да прогнозира опасни по обгазяване зони.

Мониторингът създава условия за по-адекватно наблюдение на метеорологичните условия, оперативно и перспективно планиране на минната дейност и на технологичните процеси.

Литература

- [1] Management of oxides of nitrogen in open cut blasting. Mines Inspectorate & Explosives Inspectorate of the Department of Employment. Guidance Note – QGN 20, 95р.
- [2] Наредба 13 за защита на работещите от рискове, свързани с химически агенти при работа, ДВ. бр.8/30 Януари 2004г.
- [3] AMR Win Control, User Manual. akrobit® software GmbH, www.akrobit.de
- [4] OSHA Regulation (Standards-29 CFR), Limits for Air Contaminant.
- [5] NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards, Publ. No 2005-149, 2007
- [6] Exposure Limits for Gases, Table 1. <https://www.dieselnet.com/standards/us/ohs.php#gas>
- [7] Coal Mine Health Inspection Procedures handbook. PH89-V-1, chap_5, 2001, <http://www.msha.gov/>

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „РВ и ТБ“.

СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЕРОДИНАМИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ОСОВ ВЕНТИЛАТОР

Николай Переновски, Живко Илиев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; perenovski@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В доклада е направено сравнение на резултати, получени с помощта на симулационно изследване, и резултати, получени при реално изпитване на осов вентилатор.

SIMULATION STUDY OF AERODINAMIC PARAMETERS OF AN AXIAL FAN

Nikolay Perenovski, Zhivko Iliev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; perenovski@mgu.bg

ABSTRACT. The results obtained using the simulation study and the results obtained from a real testing of an axial fan are compared in the report.

Въведение

Рудничните вентилатори служат за проветряване на минни изработки в различните видове рудници. В зависимост от предназначението тези вентилатори имат различни габарити и форма. Вентилаторите с малки и средни диаметри (от 0,4 до 1,2 m) са предназначени за проветряване на неголеми участъци от най-вече глухи изработки, а тези с големи диаметри (над 1,2 m) - за проветряване на целия рудник.

Съвременната практика при проектиране на рудничните вентилатори изисква бързото създаване на нови, превъзхождащи по характеристики старите, модели вентилатори. Съкращаването на времето за разработка на машини с добри характеристики може да стане с помощта на използването на числени методи - в конкретния случай - CFD (**Computational fluid dynamics**) методи и основащите се на тях симулационни програми. Затова е необходима система за автоматизирано проектиране и инженерен анализ, която дава на конструкторите и проектантите инструмент, позволяващ да се направи сравнителен анализ на различни варианти още на етапа на конструирането.

Един от тези продукти за инженерен анализ е модулът на автоматизираната система за проектиране Solidworks - **Flow simulation**. Макар и от сравнително нисък клас продуктът има доста възможности за провеждане на проверочни изчисления, симулиране на флуидни течения, проиграване на различни варианти и сравняването им, оптимизиране на конструкцията на машината.

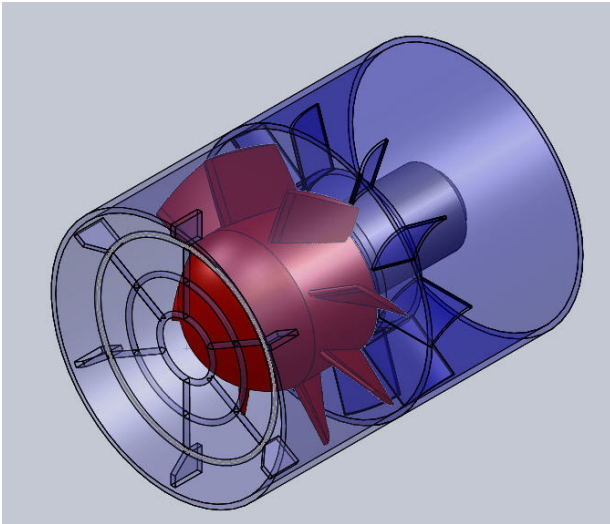
Синтез на триизмерен компютърен модел на вентилатора

Целта на настоящата публикация е да се направи сравнение на аеродинамичните параметри (налягане и производителност при номинален режим) на осов вентилатор "ОВ-Спартак", получени посредством измервания на реален модел, с параметрите, получени при симулиране на същите режими на компютърен модел на вентилатора. Синтезът на тридименсионния компютърен модел е направен с помощта на продукта Solidworks, при пълно съответствие на геометричните размери на модела и реалната машина. За да се опрости конструкцията и намали времето за изчисления, част от външните елементи на вентилатора са отстранени. Зоната на контакт на флуида с елементите на машината (вътрешната част) обаче, е точно копие на съществуващия реален модел. Компютърният модел е показан на фиг. 1.

Осовият вентилатор е изпълнен по схема НА - РК - ИА. Машината е нерегулируема, т.е. не се променят ориентацията на лопатките на направляващия апарат, работното колело и изправящия апарат, не се променят и оборотите на двигателя.

Сечението на лопатките на работното колело е симетрично, монтирани са на ъгъл 40° и усукани около вертикалната си ос на ъгъл 18°. Лопатките на изправящия апарат са плоски, едностранно огънати, монтирани на ъгъл - 20°.

За да се осигури несмущаване на въздушния поток, в двата края на вентилатора са добавени смукателен и напорен тръбопроводи с диаметър 0,5 m и съответна дължина.



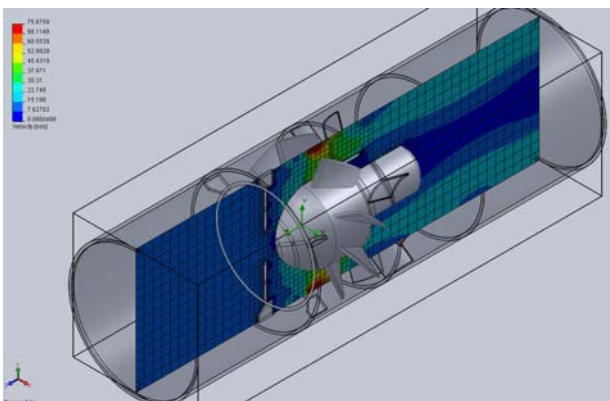
Фиг. 1. Компютърен модел на вентилатор "OB - Спартак"

За коректно провеждане на изследването е необходимо да се зададат начални условия - налягане на входа и изхода на тръбопровода, дефиниране на въртящата област, задаване на оборотите на въртене. Необходимо е също така да се дефинират по подходящ начин и исканите резултати - разлика в налягането на входа и изхода, стойности на скоростта в зоната на работното колело, разпределение на налягането в зоната на работното колело и изправящия апарат, дебит на вентилатора и др.

Прецизира се броят итерации и размерът на отделните елементи на мрежата, необходима за изчисленията. В конкретния случай софтуерният продукт **Flow simulation** използва пълните нелинейни уравнения на Навие-Стокс с отчитане на турбулентността.

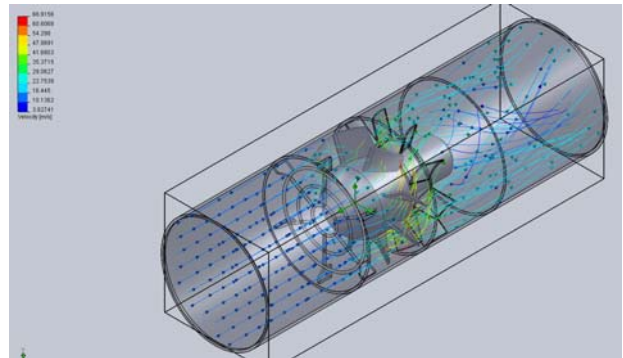
Направеното симулационно изпитване е за номиналните стойности на производителността и налягането на вентилатора при честота на въртене на работното колело $n = 2950 \text{ min}^{-1}$.

На фиг. 2 е показано разпределението на скоростта в средното сечение на тръбопровода. На същата фигура е показано и прецизирането на мрежата. При елементите на системата с по-малки размери гъстотата на мрежата е по-голяма (размерите на елементите на мрежата са по-малки), за да може по-точно да бъдат определени търсените величини.



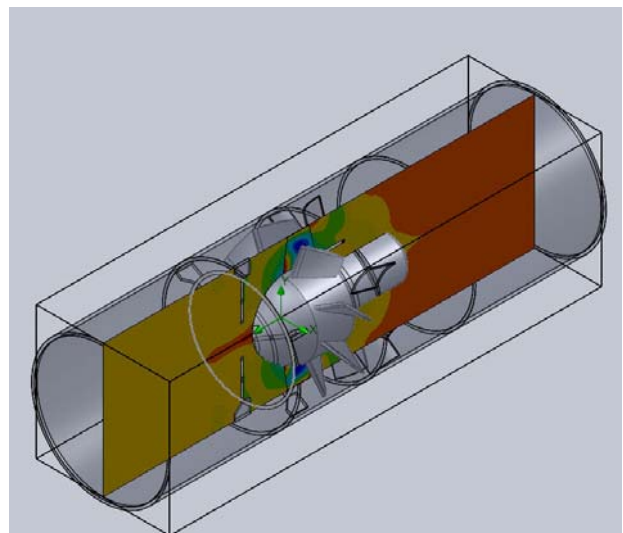
Фиг. 2. Скоростно разпределение на потока

На фиг. 3 е показана траекторията на въздушните частици при преминаването им през направляващия апарат, работното колело и изправящия апарат на вентилатора. Софтуерът дава възможност това движение да се анимира.

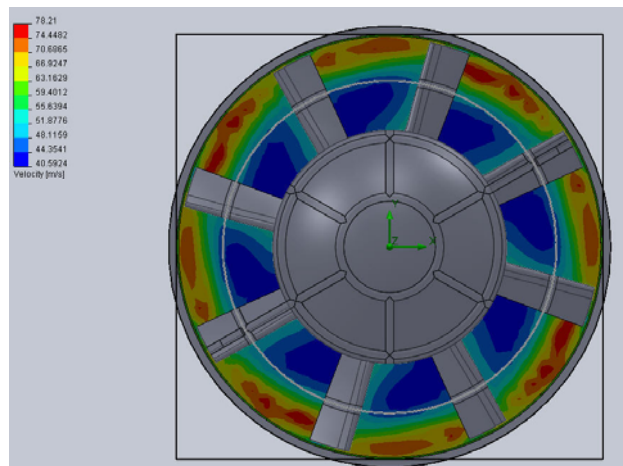


Фиг. 3. Траектория на въздушните частици (токови линии) с отчитане на скоростта на потока

Разпределението на налягането на потока в зоната на изпитване е показано на фиг. 4, а на фиг. 5 – разпределението на скоростта в зоната на работното колело в сечение, перпендикулярно на оста z. Както може да се очаква, най-високото налягане е след изхода на вентилатора, а най-голямата скорост - по периферията на работното колело (зоните в червено).



Фиг. 4. Налягане на потока в средното сечение на тръбопровода



Фиг. 5. Разпределение на скоростта в зоната на работното колело

Получените от симулацията стойности за налягането и дебита за номинален режим на работа на вентилатора са дадени в таблица 1.

Таблица 1.

Ventilator Spartak.SLDASM [Spartak sim]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
SG Inlet Volume Flow Rate	[m ³ /s]	2.93	2.90	2.86	2.93
SG Inlet Av Total Pressure	[Pa]	101325.00	101325.00	101325.00	101325.00
SG Outlet Av Total Pressure	[Pa]	102493.53	102493.96	102492.93	102494.45
Pressure drop	[Pa]	1168.53	1168.96	1167.93	1169.45

Iterations: 495

Analysis interval: 62

Опитно получените стойностите на дебита и на налягането за номинален режим на работа на вентилатора са съответно:

$$Q = 2,75 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$p = 1120,9 \text{ Pa (112,09 mmH}_2\text{O)}.$$

Разликата в средните стойности на дебита е 0,15m³/s, а в средните стойности на налягането е 48,06Pa.

Изразена в проценти, тази разлика се получава съответно:

- за дебита - 5,45%;

- за налягането - 4,28%.

Вероятните причини за възникване на тези разлики са две. Първо - зададеният при симулацията вид на флуида е атмосферен въздух, чиято плътност е 1,2kg/m³ (това е стойност, която е зададена от симулационната програма и не може да се променя), а при реалното изпитване измерената плътност на въздуха е 1,16kg/m³. Втората възможна причина за поява на разлики е несъответствието в грападостта на елементите, с които контактува флуидът. За улеснение при симулацията всички контактни повърхности са дефинирани като "real walls" с една и съща

грападост, което за реалния модел не е точно така - вероятно грападостта на тръбопровода има една стойност, на направляващия апарат - друга, на работното колело - трета и т.н.

От гледна точка на инженерните изчисления обаче и двете стойности на разликите са приемливи - и двете са около 5%.

Заклучение

Показаното сравнение на двата начина на изследване - симулационното и реалното - и получените резултати дават основание да се твърди, че симулационното изследване (на осовия вентилатор в конкретния случай) осигурява достатъчно достоверни данни (при коректно зададени начални условия и точно синтезиран компютърен модел), които могат да служат като база за разработване на реална машина. Този тип изследване може предварително да ориентира конструкторите за очакваните аеродинамични параметри на базата на вече синтезирания триизмерен модел, без да е необходимо изработването на реален такъв.

Литература

Lombard Matt. 2010. *Solidworks 2010 Bible*. www.wiley.com
Solidworks corp. 2010. *Flow Simulation 2010 Tutorials*.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Механизация на мините“.

ПАРАМЕТРИ НА ИНДИРЕКТЕН ДОПИР В IT МРЕЖИ НН, СЪДЪРЖАЩИ ВИСШИ ХАРМОНИЦИ

Стефан Чобанов

CMC-C EOOD, Pirdop, stefan.chobanov@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ: Изведени са зависимости за напрежението при индиректен допир, тока през човека и мощността в дефектиралата зона в стационарни и подвижни минни машини, присъединени към електрическата мрежа с изолирана неутрала, съдържаща висши хармоници. Коментира се повишената опасност, която зависи от амплитудно-честотния спектър на хармониците и необходимостта да се ограничи риска.

PARAMETERS OF INDIRECT CONTACT IN LV IT NETWORKS, WITH HIGH HARMONICS

Stefan Chobanov

CMC-C Ltd, Pirdop, stefan.chobanov@cmc-c.com

ABSTRACT: The dependencies of voltage in indirect contact, the current through the person and the power in the defective area in stationary and mobile mining equipment connected to the electrical power network with an isolated neutral, containing high harmonics was phased out. The increased risk, which depends from the amplitude-frequency spectrum of harmonics and the need to limit the risk are commented.

В рудничните мрежи с ниско напрежение еднозначно е регламентирана системата с изолиран звезден център на трансформатора (IT) [4, 5]. Безопасността при директен и индиректен допир се осигурява с две основни мерки: защитно изключване с контрол на съпротивлението на изолацията на мрежата и със защитно заземяване на електрифицираните машинни съоръжения с работно напрежение над 42V AC.

Защитното изключване гарантира безопасност при директен и при индиректен допир към мрежата с ефективност, зависеща от чувствителността и бързодействието за прекъсване на напрежението от системата реле от токови утечки – прекъсвач [1,4,5].

Защитното заземяване предпазва единствено и само при индиректен допир. Безопасността зависи от тока на земно съединение и съпротивлението на заземяване, определящи допирното напрежение, което трябва да се ограничи до нееднозначно регламентиранни допустими стойности.

В IT системите проблемите за безопасността се усложняват при наличие на висши хармоници в напрежението, генерирани от нарастващите по мощност и разпространение нелинейни товари, включително и в съвременните руднични мрежи НН [1, 6]. Дискриминирани, но в различна степен, те съществуват [3] и не трябва да се пренебрегват при оценка на безопасността.

Параметри на индиректния допир при стационарни машини и съоръжения

Стационарните машини и съоръжения в мините се заземяват задължително чрез присъединяване към общорудничната заземителна мрежа и с местен (локален) заземител (фиг.1), където:

g_1, g_2, g_3 – съставната проводимост на изолацията спрямо земя $\sim (10^{-4} - 10^{-5})$ S/ фаза [1,6];

C_1, C_2, C_3 – капацитет на мрежата спрямо земя $\sim (1-2)$ μ F/ фаза [1,6];

g_o – проводимост на главната заземителна мрежа $\geq 0,5$ S [4,5];

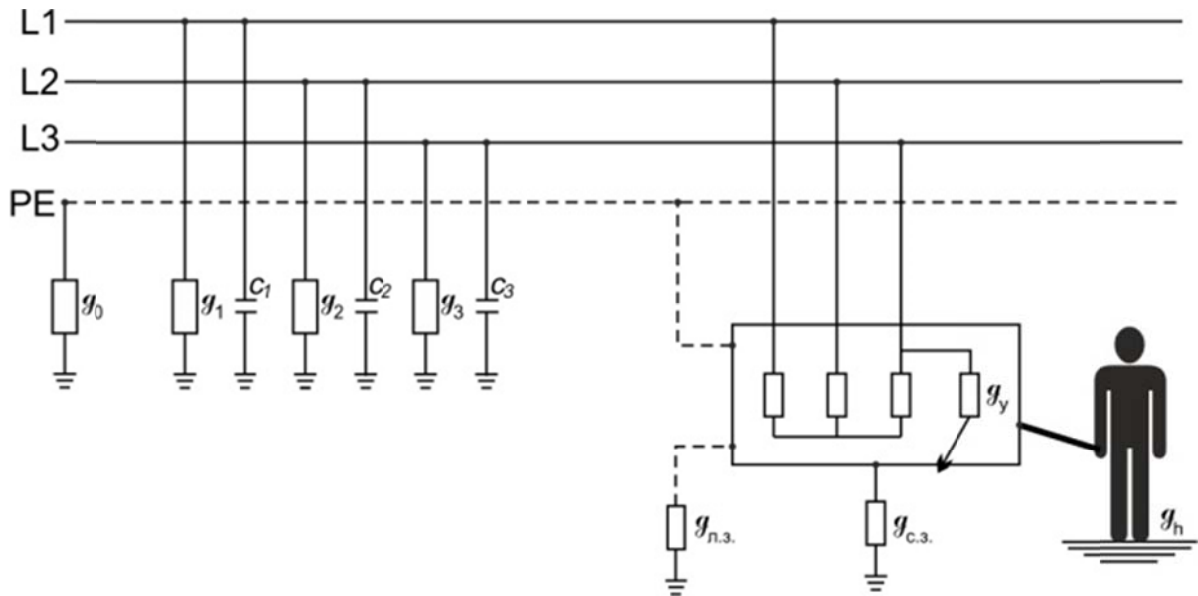
$g_{л.з.}$ – проводимост на допълнителния, локален заземител $\sim 10^{-2}$ S [6];

$g_{с.з.}$ – проводимост на самозаземяване на стационарната машина $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ S [2];

g_y – проводимост на дефект в изолацията $\sim 10^0 - 10^1$ S [6];

g_h – проводимост на човешкото тяло $\geq \frac{1}{600} = 1,54 \cdot 10^{-3}$ S, възприета по IEC 60479 и съобразена с условията в мините [6].

При нормално състояние на заземителната мрежа, съпротивлението на заземителния контур не надвишава 2Ω , т.е. $g_o = 0,5$ S. В този случай $g_{л.з.}, g_{с.з.}, g_h$ са няколко порядъка по-малки и са пренебрежими, т.е. приемаме, че клонят към нула. При възникване на утечка (пробив) в изолацията на машината токът ще се определи от хармониците в напрежението, образуващи трифазни



Фиг. 1.

системи с права последователност ($k_1 = 3n + 1$), и еквивалентната проводимост g_e от заземяването g_o и утечката g_y :

$$i_{yk_1} = (\dot{U}_{3k_1} - \dot{U}_{Nk_1})g_e = (\dot{U}_{3k_1} - \dot{U}_{Nk_1}) \frac{g_y \cdot g_o}{g_y + g_o}, \quad (1)$$

а за хармониците, образуващи системи с обратна последователност ($k_2 = 3n + 2$)

$$i_{yk_2} = (\dot{U}_{3k_2} - \dot{U}_{Nk_2})g_e = (\dot{U}_{3k_2} - \dot{U}_{Nk_2}) \frac{g_y \cdot g_o}{g_y + g_o}, \quad (2)$$

където: \dot{U}_{3k_1} и \dot{U}_{3k_2} са комплексите на напреженията в трета фаза за хармониците, кратни съответно на $3n+1$ и $3n+2$, образуващи системи с права и обратна последователност.

$$\dot{U}_{3k_1} = a \dot{U}_{1k_1} \quad (3)$$

$$\dot{U}_{3k_2} = a^2 \dot{U}_{1k_2} \quad (4)$$

като комплексният фазов оператор $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

\dot{U}_{Nk_1} и \dot{U}_{Nk_2} са комплексите на напреженията на звездния център за хармониците на напрежението, образуващи системи с права и обратна последователност и те се определят:

За хармониците, образуващи система с права последователност:

$$\dot{U}_{Nk_1} = U \frac{Y_{Nk_1} + a^2 Y_{2k_1} + a(Y_{3k_1} + g_y)}{Y_{1k_1} + Y_{2k_1} + Y_{3k_1} + g_y} \quad (5)$$

При симетрия в проводимостите на изолацията $Y_{1k_1} = Y_{2k_1} = Y_{3k_1} = Y_{k_1}$

$$\dot{U}_{Nk_1} = U \frac{Y_{k_1} + a^2 Y_{k_1} + a(Y_{k_1} + g_y)}{3Y_{k_1} + g_y} \quad (6)$$

Съответно за хармониците, образуващи система с обратна последователност:

$$\dot{U}_{Nk_2} = U \frac{Y_{1k_2} + aY_{2k_2} + a^2(Y_{3k_2} + g_y)}{Y_{1k_2} + Y_{2k_2} + Y_{3k_2} + g_y} \quad (7)$$

и при симетрия в изолационните проводимости:

$$\dot{U}_{Nk_2} = U \frac{Y_{k_2} + aY_{k_2} + a^2(Y_{3k_2} + g_y)}{3Y_{k_2} + g_y}. \quad (8)$$

Ефективната стойност на общия несинусоидален ток на утечка се определя от токовете на утечка на съставните хармоници с права и обратна последователност.

$$I_y = \sqrt{\sum_{\substack{k=3m+1 \\ n=m \\ k=1}}^{\infty} |i_{yk_1}|^2 + \sum_{\substack{k=3m+2 \\ n=m \\ k=2}}^{\infty} |i_{yk_2}|^2}. \quad (9)$$

Мощността, разсейвана в зоната на утечка се определя от (9) по

$$P_y = I_y^2 \frac{1}{g_y}, \quad (10)$$

а допирното напрежение се изчислява от (9) и еквивалентната проводимост g_e , пренебрегвайки $g_h \ll g_o, g_{c.з.}, g_{л.з.}$.

$$U_{\text{доп}} = \frac{I_y}{g_e} \neq \frac{I_y}{g_o} \quad (11)$$

Количествената експертна оценка показва, че напрежението при индиректен допир, при спазване на изискванията на ПБТ за съпротивлението на заземителния контур $\leq 2\Omega$, е в безопасни граници. Например, при максимален ток на утечка в руднични мрежи с напрежение 380V AC – 0,5A [6], допирното напрежение е в границите на няколко волта. За мрежи със същото напрежение, съдържащо висши хармоници, където според [1], пълният

ток на утечка може да бъде с няколкократно по-голяма стойност, допирното напрежение ще достигне 10-12V.

В случаите, когато стационарната машина е с прекръсната връзка към централната заземителна уредба ($g_o \rightarrow 0$) и се разчита само на локалния заземител $g_{л.з.}$, напрежението при индиректен допир може да достигне опасни стойности, надвишаващи $10^1 - 10^2$ V. Това се потвърждава от следните зависимости.

Възползвайки се от (1) и (2) за хармониците в токовете на утечка, които образуват системи с права и обратна последователност се получават изразите:

$$i_{yk_2} = (\dot{U}_{зк_1} - \dot{U}_{Nк_1})g_e = (\dot{U}_{зк_1} - \dot{U}_{Nк_1}) \frac{(g_{л.з.} + g_h + g_{с.з.})g_y}{g_{л.з.} + g_h + g_{с.з.} + g_y} \quad (12)$$

$$i_{yk_2} = (\dot{U}_{зк_2} - \dot{U}_{Nк_2})g_e = (\dot{U}_{зк_1} - \dot{U}_{Nк_1}) \frac{(g_{л.з.} + g_h + g_{с.з.})g_y}{g_{л.з.} + g_h + g_{с.з.} + g_y} \quad (13)$$

Допирното напрежение (11), което зависи от ефективната стойност на несинусоидалния ток на утечка, изчислен по (9), ще нарасне от намаляването на еквивалентната проводимост спрямо земя, тъй като в случая $g_o \rightarrow 0 \ll g_{л.з.} + g_{с.з.} + g_h$ и $g_e = g_{л.з.} + g_{с.з.} + g_h$:

$$U_{доп} = \frac{I_y}{g_e} = \frac{I_y}{g_{л.з.} + g_{с.з.} + g_h} \quad (14)$$

При прекръсване или нарастване на съпротивлението на връзката корпус – заземителна мрежа, големината на допирното напрежение ще се окаже зависима от проводимостта на локалния заземител $g_{л.з.}$, който на практика достига до десетки и стотици омове ($10^{-1} - 10^{-2}$)S. Съпротивлението на локалния заземител зависи от конструкцията му и от специфичното съпротивление на полезното изкопаемо или на вместващите скали.

Така при локално заземяване със съпротивление $R_{л.з.} = 60\Omega$ допирното напрежение в мрежи 380 V без висши хармоници може да достигне 30 V, а при наличие на висши хармоници – до 100 V. Това е безусловно опасно продължително допирно напрежение.

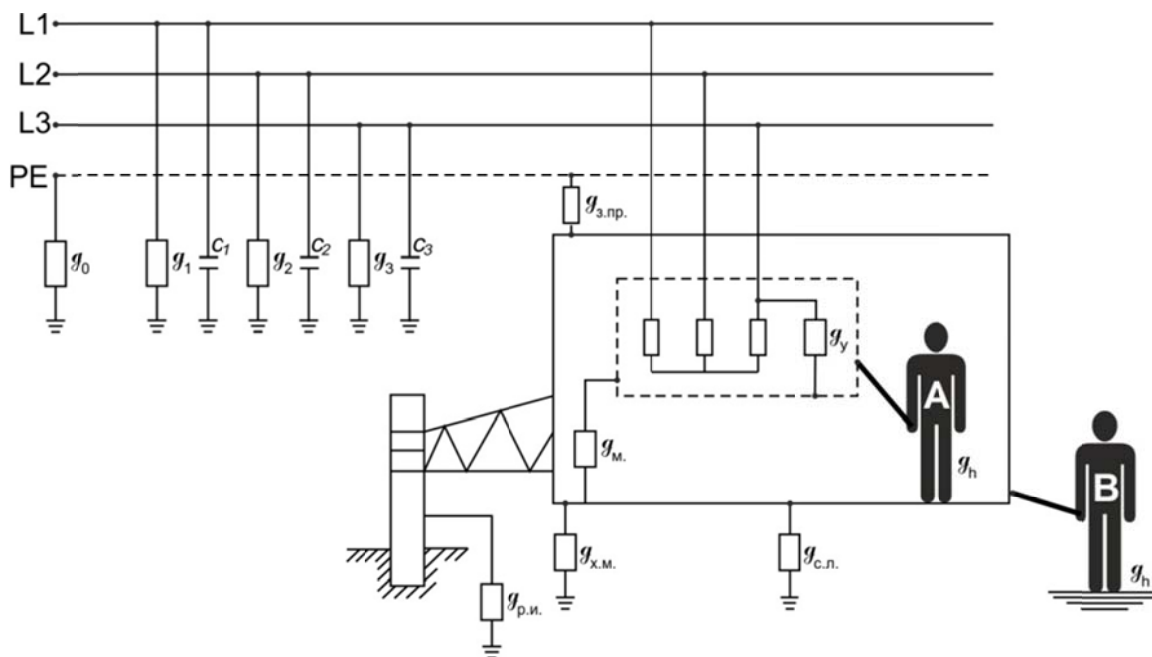
Параметри на индиректен допир при подвижни машини

Подвижните минни машини се заземяват като правилно през РЕ проводника на заземяващия кабел, който от своя страна е свързан с общорудничната заземителна мрежа. Локалните заземители е невъзможно или много сложно да се използват поради честото преместване на подвижни машини, следователно за ограничаване на напрежението при индиректен допир се разчита преди всичко на тази връзка със заземителната мрежа.

Подвижните електрифицирани машини в мините са сонди, комбайни, пробивни карети, машини за торкретирание, товарачни машини. Голяма част от тях се управляват от кабина, вградена в машината, но в по-малки машини операторът се намира в изработката, извън машината.

Възможните ситуации при индиректен допир са илюстрирани с фиг.2. В единият случай (А), човек попада под напрежение, когато се намира на машината, и изолационното съпротивление в случая на L3 е нарушено ($g_y \ll \infty$).

Вторият случай В е възможен, когато операторът с проводимост g_h е стъпил на изработката и попада под напрежение при пробив на изолацията.



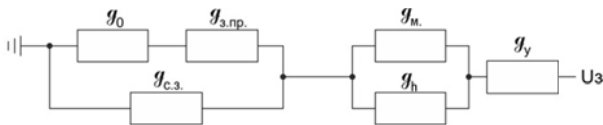
Фиг. 2.

Подвижната машина е свързана със заземителната мрежа със защитен проводник, с проводимост $g_{з.пр} = \frac{1}{r_{з.пр}}$. Освен това тя се самозаземява чрез работния инструмент, когато пробива или се намира в отвора - $g_{р.и}$; чрез ходовия механизъм (верижен или колесен) - $g_{х.м}$; и чрез стабилизиращите (нивелиращи) лапи - $g_{с.л}$. Общата проводимост на самозаземяване на машината $g_{с.з} = g_{р.и} + g_{х.и} + g_{с.л}$, зависи преди всичко от влажността на полезното изкопаемо и на вместващите скали.

Това се потвърждава от експериментални изследвания в подземен и в открит рудник [2]. Доказаната и възприета непредвидимост и преднамерено пренебрегване на проводимостта на самозаземяване на машина ($g_{с.з} = 0$) е правилен подход, тъй като за всяка стойност $g > 0$ допирното напрежение би се намалило, т.е. безопасността се подобрява.

Случай А

Пълната еквивалентна схема за определяне на g_e е дадена на фиг.3, където са отчетени всички проводимости (фиг.2), като трите проводимости на самозаземяване чрез опорните лапи, работният инструмент и ходовият механизъм са обединени в проводимостта на самозаземяване $g_{с.з}$, шунтиращи принудителното заземяване на машината чрез защитния проводник ($g_{з.пр}$) и заземителната мрежа (g_0).



Фиг. 3.

С g_m е означена проводимостта на свързване (заземяване) на електрообзавеждането спрямо корпуса на подвижната машина. Тя е пренебрежима при $g_y \approx g_m$, тъй като $g_h < g_m$.

Еквивалентната проводимост, лимитираща тока на утечка е:

$$g_e = \frac{g_y(g_m + g_h)(g_{з.пр} \cdot g_0 + g_{с.з})}{g_y + g_m + g_h(g_{з.пр} + g_0 + g_{с.з})}, \quad (15)$$

а допирното напрежение, към което може да се окаже оператора, когато се намира на машината е:

$$U_{доп.} = I_y(g_m + g_h) \quad (16)$$

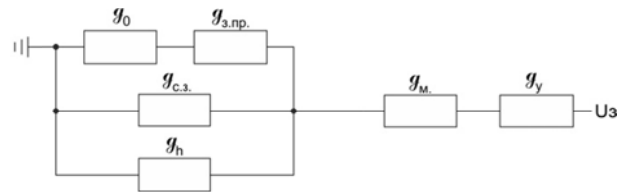
Тъй като, както бе посочено $g_h < g_m$.

$$U_{доп.} = I_y g_m \quad (17)$$

Когато $g_m \rightarrow 0$, допирното напрежение $U_{доп.} \rightarrow 0$ и операторът е в безопасност.

Случай В

Опасността при индиректен допир в този случай се оценява при анализа на еквивалентната схема на фиг.4. Допирното напрежение, към което може да се окаже операторът, с проводимост g_h се определя от проводимостта на заземителния контур, включващ и заземителния проводник ($g_{з.пр}$).



Фиг. 4.

Токовете на утечка на съставните хармоници с права и обратна последователност ще се определят по (1) и (2), където еквивалентната проводимост в случая е:

$$g_e = \frac{g_y \cdot g_m \cdot (g_h + g_{с.з} + \frac{g_0 \cdot g_{з.пр}}{g_0 + g_{з.пр}})}{g_y + g_m \cdot (g_h + g_{с.з} + \frac{g_0 \cdot g_{з.пр}}{g_0 + g_{з.пр}})} \quad (18)$$

Общият ток на утечка, изчислен по (9) и (18), позволява да се определи мощността, която ще се разсейва (10) в зоната на утечка.

Допирното напрежение, към което може да се окаже операторът, е:

$$U_{доп.} = \frac{I_y}{\frac{g_0 \cdot g_{з.пр}}{g_0 + g_{з.пр}} + g_h + g_{с.з}} \quad (19)$$

Пренебрегвайки проводимостта на самозаземяване на машината и на човека, като несъизмерими със проводимостта на заземителния контур, изразът за допирното напрежение придобива вида:

$$U_{доп.} = I_y \frac{g_0 + g_{з.пр}}{g_0 \cdot g_{з.пр}} \quad (20)$$

А отчитайки $g_0 \geq 0,5S > g_{з.пр}$, се получава приблизителният, но достатъчно точен израз за допирното напрежение:

$$U_{доп.} \approx \frac{I_y}{g_{з.пр}} \approx I_y R_{з.пр} \quad (21)$$

Зависимостта (21) потвърждава равностойната роля по отношение на съпротивлението на заземителния контур, по-точно на заземителния проводник и на ефективната стойност на несинусоидалния ток на утечка, лимитиран от амплитудночестотния спектър на висшите хармоници в напрежението.

Заклучение

1. При нарастващите стойности на тока на утечка вследствие висши хармоници в напрежението, рискът от опасни допирни напрежения нараства.
2. При заземяване на стационарна машина само с локални заземители допирното напрежение може да придобие опасни стойности с вероятност, зависеща от амплитудночестотния спектър на хармониците в напрежението.
3. При подвижни минни машини максимален е рискът при индиректен допир за оператор, който се намира извън машината. Той се ограничава чрез намаляване на съпротивлението на заземителния контур. Допустимата стойност за съпротивлението на защитния проводник трябва да се коригира (намалява) в зависимост от амплитудночестотния спектър на хармониците в напрежението, обобщено характеризирани с коефициента на несинусоидалност $K_{нес}$ (THD).

Литература

- Ментешев М.С., 1986. *Безопасно прилагане на електрическата енергия в руднични мрежи НН*. Дисертация за получаване на научна степен доктор на техническите науки, София;
- Дренков, М., 2008. *Експериментално определяне на съпротивлението на естествено заземяване на електрически сонди в рудник „Елаците“*. Годишник на МГУ „Св.Иван Рилски“ т.51,св.III;
- Чобанов, Ст., М. Дренков, М. Ментешев, 2013. *Експериментално изследване и анализ на амплитудночестотен спектър на хармониците на тока и напрежението в руднична мрежа с честотно управляеми двигатели*. Годишник на МГУ „Св.Иван Рилски“ т.56, св.III;
- Правилник за безопасността на труда при разработване на въглищни находища*, Техника, София, 1982;
- Правилник по безопасност на труда при разработване на рудни и нерудни находища по подземен начин МТСП*, София 1971;
- Данков, Е., 1991. *Електрификация на минните предприятия*, Техника, София.

Статията е рецензирана от проф. д-р Менто Ментешев.

РЕЖИМИ НА НАТОВАРВАНЕ НА МОЩНИ ТРАНСФОРМАТОРИ СЪС СЪПАЛНО РЕГУЛИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО

Стефан Чобанов

CMC-C EOOD, Пирдоп, stefan.chobanov@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ: Разгледани са параметри, характерни за различни режими на работа. Дадени са резултатите от изследвания при съществуваща асиметрия в характеристиките на трансформаторите и на позициите на стъпалните регулатори. След анализ се дават обосновани препоръки за оптимален избор на степените на стъпалните регулатори на трансформаторите при преминаване в режим на паралелна работа.

LOADING MODES OF POWERFUL TRANSFORMERS WITH STEPPED REGULATING VOLTAGE

Stefan Scobanov

CMC-C Ltd, Pirdop, stefan.chobanov@cmc-c.com

ABSTRACT: Parameters that are typical for the different working modes are examined. The results from the studies in existing asymmetry in the characteristics of the transformers and the position of the stepped regulators are shown. After the analysis, based recommendations for the optimal choice of stepped regulators of the transformers in mode of parallel operation are given.

Изследването е в резултат на проблеми, възникващи при различните режими на работа на двата (еднотипни) захранващи трансформатора 110/6kV, 16MVA в Централна разпределителна подстанция (ЦРП) на Dundee Precious Metals Chelopech [3]. Трансформаторите са със стъпално регулиране на напрежението и на практика се налага да работят както индивидуално, така и в паралел.

Поводи за изследването са отклоненията в техническите показатели на един от трансформаторите и необходимостта от оптимизация на стъпалното регулиране на напрежението в двата трансформатора.

Режими на работа на трансформаторите

Възможните режими на работа се илюстрират с еднолинейната схема на фиг.1. Откритата разпределителна уредба (ОРУ) 110/6kV е изпълнена по „Н“ – схема. Закритата разпределителна уредба (ЗРУ) 6kV е с единична секционирана шинна система [1,2,4].

Двата трансформатора, с мощност по 16MVA, могат да работят самостоятелно и едновременно с разпределен товар помежду си. Самостоятелната работа е възможна, тъй като всеки един от трансформаторите, макар и на границата на своите възможности, е в състояние да поеме целия товар. Необходимост от паралелен режим на работа възниква при оперативни превключвания в ЦРП и се осъществява със затваряне (включване) на секционните прекъсвачи в ОРУ 110/6kV и в ЗРУ 6kV. Трансформаторите работят паралелно свързани

нормално за кратко време при преминаване от един работен режим към друг.

Едновременна работа на Т-р 1 и Т-р 2

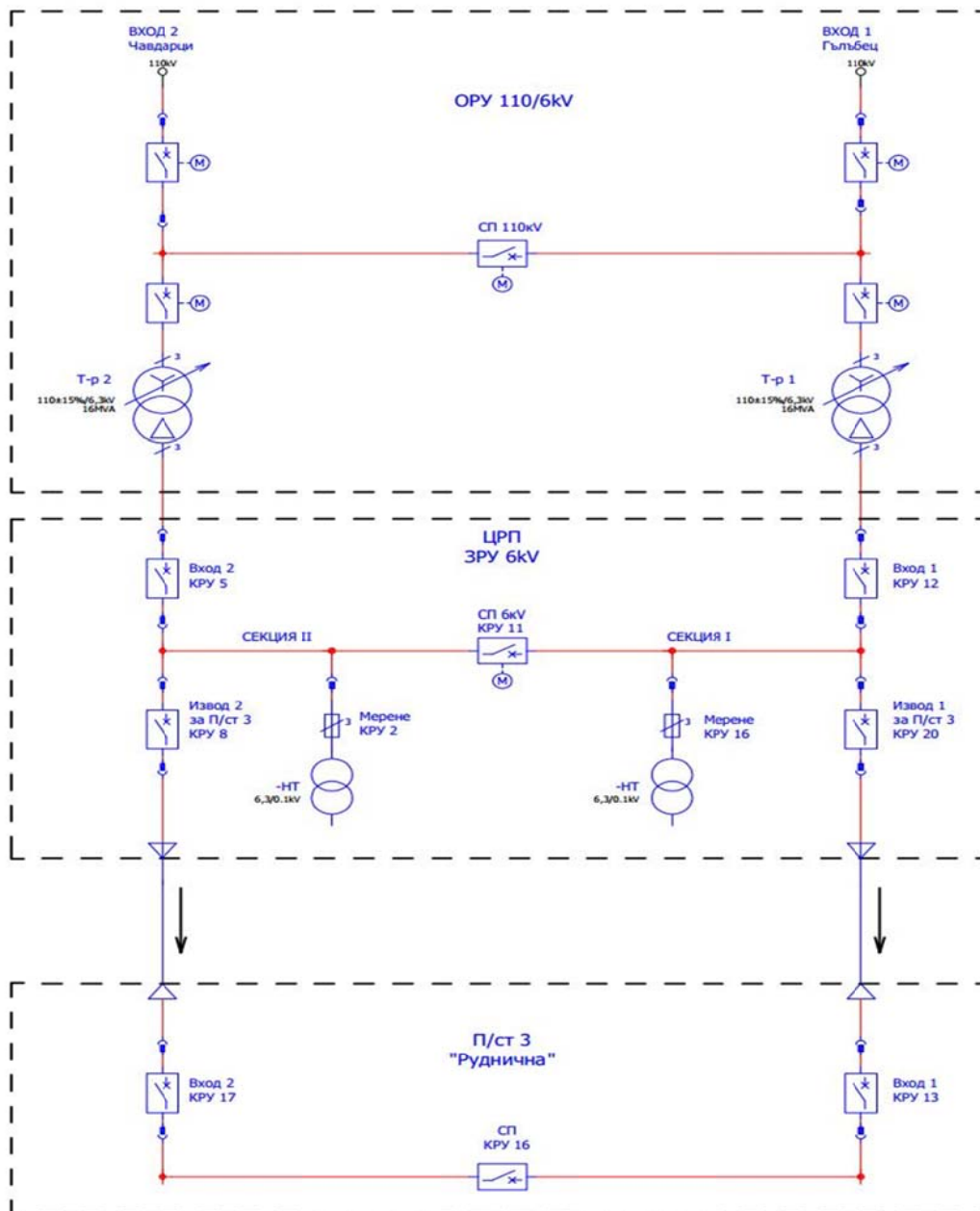
През последните няколко години основният режим е едновременна и самостоятелна работа на двата трансформатора (Т-р 1 и Т-р 2), захранвани от един от електропроводите 110kV, като товарът е разпределен между двете секции в ЗРУ 6kV, при отворен секционен прекъсвач (КРУ 11).

На фиг.1 са показани изводите от ЦРП само за една от цеховите подстанции – П/ст 3 „Руднична“. Двата извода от ЦРП за П/ст 3 (КРУ 8 и КРУ 20) и секционен прекъсвач (КРУ16) в П/ст 3 са включени, но единият от входовете на П/ст 3 (КРУ 17 или КРУ 13) е изключен. По аналогични схеми се захранват и останалите цехови подстанции, като натоварването на двете секции на ЦРП, респективно на Т-р 1 и Т-р 2 е практически изравнено.

Работа с един трансформатор Тр1 или Тр2.

През второто полугодие на 2014г. се пуска в експлоатация Т-р 3 (не е показан на фиг.1), който основно ще осигури захранването на мелницата в обогатителната фабрика.

След включването на Т-р 3 оптималният режим на работа на Т-р 1 и Т-р 2 е - единият под товар, а другият в резерв. СП в ЗРУ 6kV (КРУ 11) е включен задължително, тъй като част от консуматорите, захранвани от ЦРП, нямат осигурено резервно захранване, а са присъединени само към едната шинна система – I или II.



Фиг. 1.

Експериментални изследвания

Изследванията са направени при индивидуална и паралелна работа на двата трансформатора [3] и са измерени:

- токовете в трите фази А, В и С – I_A , I_B , I_C , А
- активната мощност P , kW
- реактивната мощност Q , kVA
- пълната (привидна) мощност S , kVA

В режим на индивидуална едновременна работа на Т-р 1 и Т-р 2 са направени 3 измервания през 15min с данни, посочени в табл.1, където n е номерът на трансформатора, а C_n е номерът на стъпалото на регулатора на напрежение.

Таблица 1

Експ. №	n	C_n	I_{An} [A]	I_{Bn} [A]	I_{Cn} [A]	Q_n , [kVA]	P_n , [kW]	S_n [kVA]
1	1	9	621,60	648,70	623,30	2718,7	6054,90	6637,3
	2	7	611,40	619,10	619,90	1898,8	6129,80	6402,1
2	1	9	616,50	641,10	609,70	2656,8	6067,40	6513,4
	2	7	613,10	619,10	619,90	1868,9	6127,60	6410,1
3	1	9	633,50	660,60	621,60	2680,9	6281,20	6745,4
	2	7	610,60	621,60	619,10	1864,9	6050,70	6366,9

Анализът на получените резултати от табл. 1 показва, че при индивидуална едновременна работа на двата трансформатора натоварването им е сравнително равномерно: по активна мощност Т-р 2 се натоварва от -3,7% до +1,2% спрямо Т-р 1, а по привидна (пълна)

мощност – Т-р 2 е натоварен от -1,6% до -5,6%, при едни и същи позиции на стъпалния регулатор - $C_1=9$ и $C_2=7$ за двата трансформатора.

В режим на паралелна работа на Т-р 1 и Т-р 2 са проведени по 5 измервания през 15мин.

Таблица 2 показва, че при паралелна работа на трансформаторите в зависимост от характера на товара и от позициите на стъпалните регулатори се изменя натоварването им, при това позициите на Тр 1 се изменят от $C_1 \in (9-11)$, а Тр 2 $C_2 \in (7-9)$.

Таблица 2

Експ №	n	C_n	I_{An} [A]	I_{Bn} [A]	I_{Cn} [A]	Q_{n1} [kVAr]	P_{n1} [kW]	S_n [kVA]
4	1	9	668,2	687,8	669,1	3114,2	6318,9	7046,5
	2	7	599,6	620,8	601,3	1638,3	6119,8	7046,5
5	1	9	665,7	699,6	683,5	3095,5	6443,1	7159,0
	2	8	644,5	669,9	653,0	2495,1	6443,5	6881,1
6	1	9	617,4	654,7	639,4	1716,9	6334,2	6418,0
	2	9	686,1	709,0	694,5	3358,5	6517,0	7327,9
7	1	8	611,4	630,9	611,4	1009,5	6318,4	6477,9
	2	9	742,0	766,6	753,9	4080,9	6748,7	7906,6
8	1	10	658,9	667,4	649,6	2495,5	6551,7	7003,0
	2	9	655,5	674,2	658,9	2627,2	6549,1	7028,0

На таблица 3 и 4, съставени по данните в таблица 1 и 2, са показани разликите на измерените величини в % за двата трансформатора: на токове ΔI_A , ΔI_B , ΔI_C , на мощностите – активна ΔP , реактивна ΔQ и пълна ΔS .

$\Delta C = C_1 - C_2$ е разликата в позициите на стъпалния регулатор за Тр1 – C_1 и за Тр 2 – C_2 , т.е. броя на стъпките, по които се различават позициите на двата регулатора.

Таблица 3

Експ. №	ΔQ , %	ΔP , %	ΔI_A , %	ΔI_B , %	ΔI_C , %	ΔS , %	ΔC
1	30,2	-1,2	1,6	4,6	0,5	3,5	2,0
2	29,7	-1,0	0,6	3,4	-1,7	1,6	2,0
3	30,4	3,7	3,6	5,9	0,4	5,6	2,0

Таблица 4

Експ. №	ΔQ , %	ΔP , %	ΔI_A , %	ΔI_B , %	ΔI_C , %	ΔS , %	ΔC
4	47,4	3,2	10,3	9,7	10,1	10,1	2,0
5	19,4	0,0	3,2	4,2	4,5	3,9	1,0
6	-95,6	-2,9	-11,1	-8,3	-8,6	-14,2	0,0
7	-304,2	-6,8	-21,4	-21,5	-23,3	-22,1	-1,0
8	-5,3	0,0	0,5	-1,0	-1,4	-0,4	1,0

Графично е изобразена връзката между позициите на стъпалните регулатори и разликите в натоварването на Тр1 и Тр2 по ток, активна, реактивна и пълна мощност. Графично са построени зависимостите ΔI_A , ΔI_B , ΔI_C , ΔP , ΔQ , $\Delta S = f(\Delta C)$.

На фиг. 2 са показани резултатите от измервания № 4, 5, 6, 7, в които стъпалните регулатори се намират в съответните позиции, както следва: за Тр 1 – позиция $C_1=9$, 9, 9, 8, а за Тр 2 – $C_2=7$, 8, 9, 9. На фиг. 3 е обхваната и позиция $C_1=10$ и $C_2=9$ (измерване № 8); изключвайки измерване №5 с позиции на стъпалния регулатор $C_1 = 9$ и $C_2 = 8$. Резултатите дават достатъчно основание да се екстраполират заключенията за всички степени на стъпалния регулатор.

Таблица 4, фиг. 2 и фиг. 3 илюстрират същественото заключение, че оптималният режим по критерия минимална разлика в натоварването на Тр 1 и Тр 2, за конкретния случай, не изисква работа с еднакви позиции на двата стъпални регулатора ($C_1 = C_2$), а разлика от 1 стъпка - $C_1 - C_2 = 1$. Това е важен извод и препоръка за експлоатационния режим на трансформаторите 110/6kV в ОРУ на Dundee Precious Metals Chelopech, който включва и тяхната паралелна работа.

Измерванията и анализът на получените резултати разсейва съмненията за техническа неизправност в силовата верига на Тр 2.

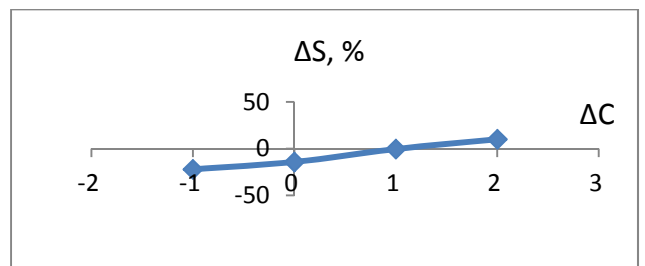
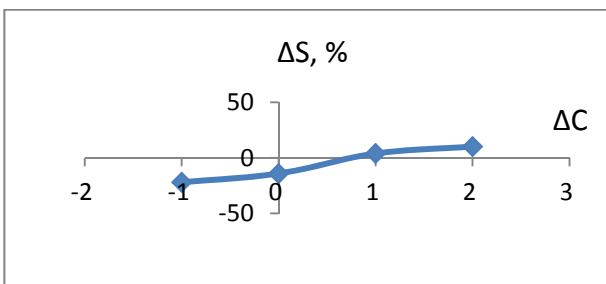
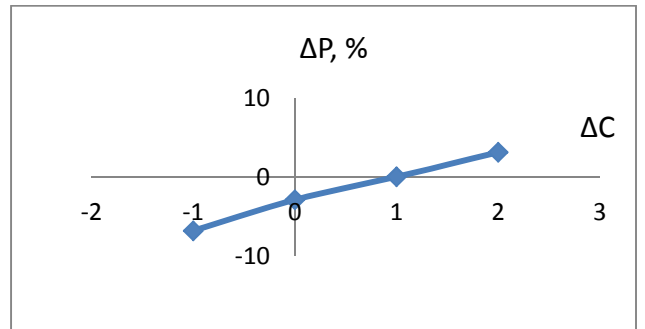
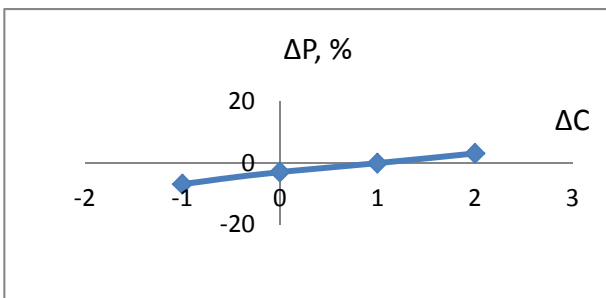
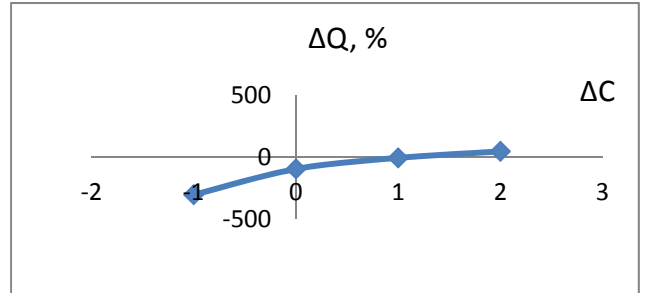
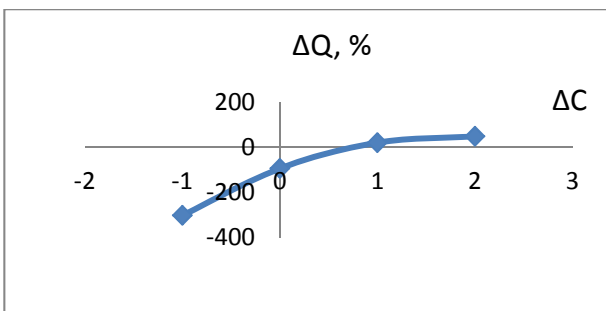
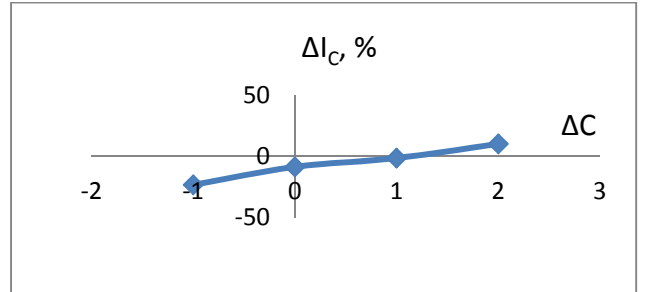
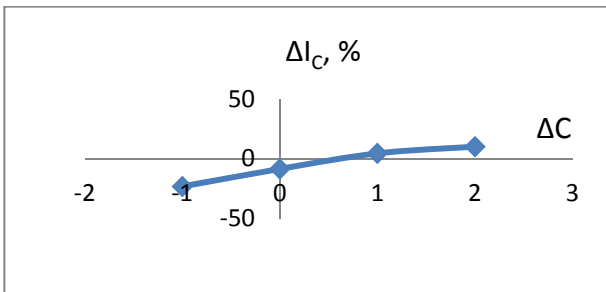
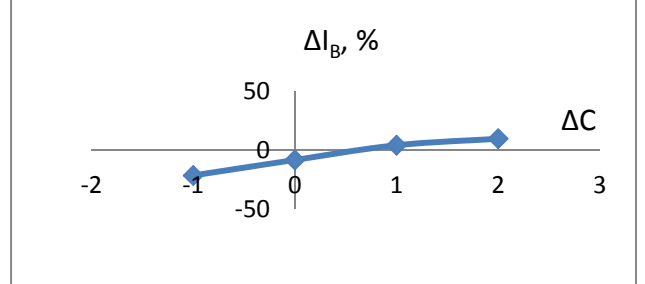
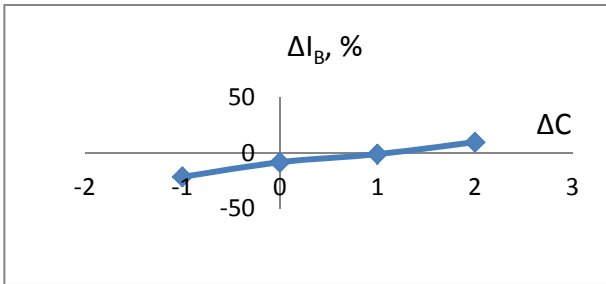
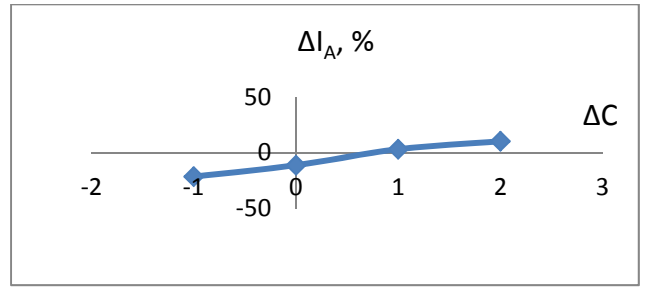
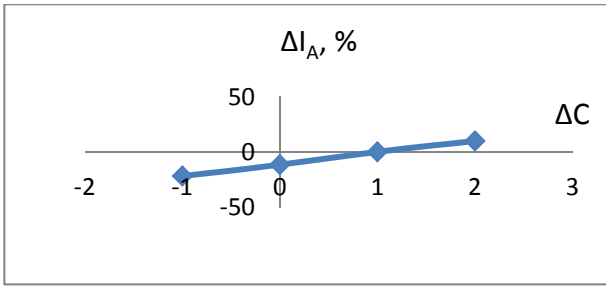
Заклучение

1. Доказана е и препоръчана оптимална работа на стъпковите регулатори на двата трансформатора 110/6kV, 16MVA в Dundee Precious Metals Chelopech, с разлика 1 стъпка, която гарантира минимално претоварване на трансформаторите в паралелен режим;
2. Разработеният експериментално-аналитичен подход е приложим за оптимизиране на разликите в позициите на стъпалните регулатори на напрежение на мощни трансформатори, работещи в паралелен режим.

Литература

- Генов, Л., 1979, *Техника на високите напрежения в електроенергийните системи*. Техника, София;
- Шнайдер Електрик България ЕООД, 2009, *Ръководство за електрически уредби, съгл. стандартите на IEC*. БДС 15320-81. *Трансформатори. Методи за изпитване. Методи за електромеханични измервания и методи за измерване на съпротивлението на намотките с постоянен ток*.
- Архив на СМС-С ЕООД, 2013, *Анализ на техническите параметри на трансформатори 110/6kV, 16MVA на Dundee Precious Metals Chelopech. Отчет за извършената работа*.

Статията е рецензирана от проф. д-р Менто Ментешев.



Фиг. 2.

Фиг. 3.

ЗАМЕСТВАЩА СХЕМА НА ТРИФАЗНА МРЕЖА С ИЗОЛИРАНА НЕУТРАЛА ПРИ ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ТОКА, ПРОТИЧАЩ ПРЕЗ ТЯЛОТО НА ЧОВЕКА, ПРИ ДОКОСВАНЕ ДО ЕДНА ОТ ФАЗИТЕ ПРИ ГОЛЕМИ СТОЙНОСТИ НА ПРОВОДИМОСТТА НА ИЗОЛАЦИЯТА

Стефан Стефанов, Иван Проданов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В доклада се предлага еквивалентна схема, чрез която се разглежда зависимостта на тока през човешкото тяло от съпротивлението на изолацията на тази фаза, към която е станало докосването. Изведен е израз, позволяващ да се определя токът през човешкото тяло при докосване към трифазна мрежа с изолиран звезден център, при произволни стойности на активното съпротивление на изолацията и капацитета на мрежата.

EQUIVALENT SCHEME OF A THREE-PHASE CIRCUIT WITH AN INSOLATED NEUTRAL, WHEN CALCULATING THE CURRENT FLOWING THROUGH THE HUMAN BODY AT THE TOUCH OF ONE OF THE PHASES, AT LARGE CONDUCTIVITY RATES OF THE INSULATION

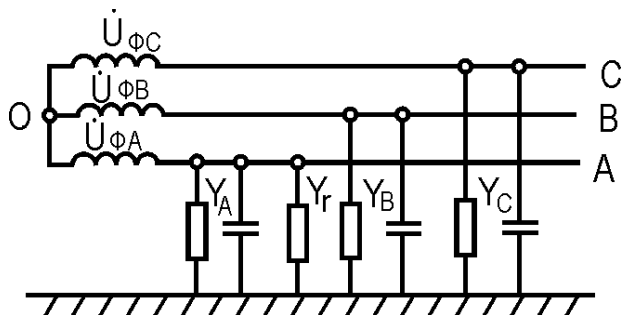
Stefan Stefanov, Ivan Prodanov

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

ABSTRACT. This report presents an equivalent scheme, with which it examines the correlation between the current that runs through the human body from the resistance of the insulation of this phase towards which the touch has occurred. An equation is derived, allowing for current to be determined when running through the human body at the touch towards a three-phase circuit with an insulated star center, at random values of the active insulation resistance and capacity of the network.

Въведение

В редица източници [1-5] е изведена зависимост на тока, протичащ през човешкото тяло при еднофазно докосване към трифазна мрежа с изолиран звезден център, използвайки заместващата схема, показана на фиг. 1.



Фиг. 1.

Отличавайки се с няколко частни моменти, изчисленията в [1-5] се базират на еднакви изходни данни и дават тъждествени зависимости и изводи. Изведените по тази схема аналитични зависимости имат следния вид:

- в общия случай, при неравни проводимости на изолацията на фазите спрямо земя ($Y_A \neq Y_B \neq Y_C$):

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| U_{\Phi} \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_r} \right|, \quad (1)$$

където Y_A, Y_B, Y_C са проводимостите на изолацията на фазите спрямо земя; Y_r - проводимостта на човешкото тяло; U_{Φ} - фазовото напрежение; a - фазовият

оператор; $a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$; $a^2 = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$;

- при равни проводимости на изолацията на фазите спрямо земя ($Y_A = Y_B = Y_C = Y$):

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| U_{\Phi} \cdot Y_r \cdot \frac{Y \cdot \left(1 + \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + Y \cdot \left(1 + \frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{Y + Y + Y + Y_r} \right| = \left| U_{\Phi} \cdot Y_r \cdot \frac{3Y}{3Y + Y_r} \right|, \quad (2)$$

В заместващата схема и получените от нея зависимости се отчитат следните параметри на трифазната мрежа: проводимостта на изолацията на фазовите проводници спрямо земя, напрежението на трифазния захранващ източник, честотата.

Вътрешното съпротивление на захранващия източник и съпротивлението на фазовите проводници в заместващата схема и изчисленията не се отчитат. Изразите (1) и (2) при големи стойности на проводимостите на фазите спрямо земя са неточни поради неадекватността на заместване на реалната електрическа схема. Тяхното използване при изчисленията води до изкривяване на зависимостта на тока през човешкото тяло като функция на проводимостите на фазовите проводници и до голяма неточност.

Както следва от израз (2), зависимостта на тока $I_r = f(Y)$ има физически смисъл в интервала $0 < Y < \infty$ и е ограничена монотонно нарастваща функция.

Разглеждаме граничните случаи:

-а. $|Y| \rightarrow 0$, тогава:

$$\lim_{|Y| \rightarrow 0} \left| \dot{I}_r \right| = \lim_{|Y| \rightarrow 0} \left| U_\Phi \cdot Y_r \cdot \frac{3Y}{3Y + Y_r} \right| = 0, \quad (3)$$

-б. $|Y| \rightarrow \infty$, тогава:

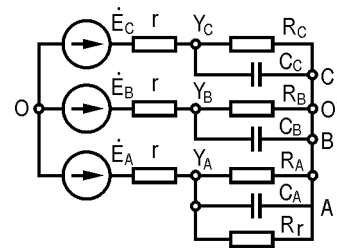
$$\begin{aligned} \lim_{|Y| \rightarrow \infty} \left| \dot{I}_r \right| &= \lim_{|Y| \rightarrow \infty} \left| U_\Phi \cdot Y_r \cdot \frac{3Y}{3Y + Y_r} \right| = \left| U_\Phi \right| \cdot Y_r = \\ &= \max_{|Y| \in (0, \infty)} \left| \dot{I}_r(Y) \right|. \end{aligned} \quad (4)$$

В действителност при $|Y| \rightarrow \infty$ става късо съединение на източника на трифазното напрежение и пълно шунтиране на съпротивлението на човешкото тяло от проводимостта на изолацията, т.е. $\left| \dot{I}_r \right| = 0$. Това

противоречие между израз (4) и физическата същност на явленията може да се обясни само с несъответствието на заместващата схема на реалната верига.

Получаване на реална зависимост

За отстраняване на визираното по-горе противоречие и получаване на реална зависимост на $\left| \dot{I}_r \right| = f(Y)$ за целия интервал на проводимостта на изолацията на фазите ($0 \leq |Y| < \infty$) разглеждаме изчислителната заместваща схема на трифазната мрежа, показана на фиг.2.



Фиг. 2.

Използвайки метода на възловите потенциали,

$$\text{получаваме: } \frac{\dot{I}_r}{\dot{I}_A} = \frac{Y_r}{Y_{izA} + Y_r} \text{ или } \dot{I}_r = \dot{I}_A \cdot \frac{Y_r}{Y_{izA} + Y_r},$$

където $\dot{I}_A = (\dot{E}_A - U_{OO'}) \cdot Y_A$ е токът на фаза А; Y_{izA} - проводимостта на изолацията на фаза А; \dot{E}_A - е.д.н. на

$$\text{фаза А; } U_{OO'} = \frac{\sum_{i=1}^3 \dot{E}_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^3 Y_i} = \frac{\dot{E}_A \cdot (Y_A + a^2 \cdot Y_B + a \cdot Y_C)}{Y_A + Y_B + Y_C} \text{ е}$$

напрежението между възлите O и O' (напрежение на

$$\text{сместване на неутралата); } Y_A = \frac{Y^I \cdot (Y_{izA} + Y_r)}{Y_{izA} + Y_r + Y^I} -$$

проводимост на фаза А между възлите O и O' ; Y^I - проводимост, отчитаща вътрешното съпротивление на източника на трифазното напрежение и съпротивлението

$$\text{на фазовите проводници; } Y_B = \frac{Y_{izB} \cdot Y^I}{Y_{izB} + Y^I} - \text{проводимост}$$

$$\text{на фаза В между възлите } O \text{ и } O'; Y_C = \frac{Y_{izC} \cdot Y^I}{Y_{izC} + Y^I} -$$

проводимост на фаза С между възлите O и O' ; Y_{izB}, Y_{izC} - проводимост на изолацията съответно на фази В и С.

За тока, протичащ през човешкото тяло, с отчитане на вътрешното съпротивление на източника на трифазното напрежение и съпротивлението на фазовите проводници при неравномерни проводимости на изолацията на фазите ($Y_{izA} \neq Y_{izB} \neq Y_{izC}$), се получава:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{E}_A - U_{OO'}) \cdot Y_A = \\ &= \left[\dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \cdot (Y_A + a^2 \cdot Y_B + a \cdot Y_C)}{Y_A + Y_B + Y_C} \right] \cdot Y_A =, \quad (5) \\ &= \dot{E}_A \cdot Y_A \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{Y_A + Y_B + Y_C} \end{aligned}$$

а

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y_A \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{(Y_A + Y_B + Y_C) \cdot (Y_{izA} + Y_r)} \right|, \quad (6)$$

При равни проводимости на изолацията на фазите ($Y_{izA} = Y_{izB} = Y_{izC} = Y$) изразът (6) се опростява, т.е.:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y_A \cdot \frac{3 \cdot Y_{B,C}}{(Y_A + 2 \cdot Y_{B,C}) \cdot (Y + Y_r)} \right|, \quad (7)$$

където $Y_{B,C} = Y_B = Y_C$, или:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| 3 \cdot \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y' \cdot \frac{Y}{3 \cdot Y^2 + 3 \cdot Y \cdot (Y_r + Y') + Y_r \cdot Y'} \right|. \quad (8)$$

Анализът на израз (8) показва, че зависимостта има екстремален характер и един максимум с координати:

$$Y = \sqrt{\frac{Y_r \cdot Y'}{3}}; \left| \dot{I}_r \right|_{\max} = \frac{\left| \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y' \right|}{Y_r + Y' + 2 \cdot \sqrt{\frac{Y_r \cdot Y'}{3}}}.$$

Както при $|Y| \rightarrow 0$, така и при $|Y| \rightarrow \infty$, функцията (8) се стреми към нула, т.е. отстранено е отбелязаното по-рано противоречие.

Зависимостта (8) във форма Y записваме във форма R, C и разглеждаме традиционните частни случаи:

$$1/1 \quad Y = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C; \quad \frac{1}{R} \gg \omega \cdot C. \quad \text{След}$$

заместване в (8) на $Y = \frac{1}{R}$, $Y' = \frac{1}{r}$ и $Y_r = \frac{1}{R_r}$,

получаваме:

$$\left| I_r(R) \right| = \left| \frac{3 \cdot \dot{E}_A \cdot R}{R^2 + 3 \cdot (R_r + r) \cdot R + 3 \cdot R_r \cdot r} \right|. \quad (9)$$

Зависимостта (9) също има екстремален характер с координати на максимума:

$$R = \sqrt{3 \cdot R_r \cdot r}; \left| \dot{I}_r \right|_{\max} = \frac{\left| \dot{E}_A \right|}{R_r + r + 2 \cdot \sqrt{\frac{R_r \cdot r}{3}}}.$$

На основание на предложената еквивалентна схема разглеждаме зависимостта на тока през човешкото тяло от

съпротивлението на изолацията на тази фаза, към която е станало докосването, т.е. $\left| \dot{I}_r \right| = f(R_A)$, позволяващо да се определи допустимата от гледна точка на безопасността стойност на съпротивлението R_A .

Приемайки $Y_B = Y_C = Y_{B,C}$, от (6) получаваме:

$$\left| I_r(R_A) \right| = \left| \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right| \cdot R_A}{(R_{B,C} + 2 \cdot R_r + 3 \cdot r) \cdot R_A + (R_{B,C} + 3 \cdot r) \cdot R_r} \right| \quad (10)$$

Зависимостта (10) е ограничена монотонно нарастваща функция, стремяща се към:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right|}{R_{B,C} + 2 \cdot R_r + 3 \cdot r} \right| \quad (11)$$

2/ $\frac{1}{R} \ll \omega \cdot C$. След заместване в (8) на

$$Y = j \cdot \omega \cdot C, \quad Y' = \frac{1}{r} \quad \text{и} \quad Y_r = \frac{1}{R_r}, \quad \text{получаваме:}$$

$$\left| I_r(C) \right| = \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right| \cdot \omega \cdot C}{\sqrt{(1 - 3 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_r \cdot r)^2 + 9 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot (R_r + r)^2}}. \quad (12)$$

Зависимостта (12) също има екстремален характер с координати на максимума:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3 \cdot R_r \cdot r}}; \left| \dot{I}_r \right|_{\max} = \frac{\left| \dot{E}_A \right|}{R_r + r}.$$

3/ $\frac{1}{R}$ и $\omega \cdot C$ са от един порядък. Заместваме в

$$(8) \quad Y = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C, \quad Y' = \frac{1}{r} \quad \text{и} \quad Y_r = \frac{1}{R_r} \quad \text{и}$$

получаваме:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right| \cdot R \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2}}{\sqrt{(D)^2 + 9 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2 \cdot (R_r \cdot R + r \cdot R + 2 \cdot R_r \cdot r)^2}}, \quad (13)$$

където:

$$D = R^2 - 3.\omega^2.C^2.R_r.r.R^2 + 3.R_r.R + 3.r.R + 3.R_r.r$$

Изразът (13) позволява определяне на тока през човешкото тяло при докосване към трифазна мрежа с изолиран звезден център при произволни стойности на активното съпротивление на изолацията ($0 \leq R < \infty$) и капацитет на мрежата ($0 \leq C < \infty$).

Изводи

1. Изчисляването на тока през човешкото тяло по заместваща схема, която не отчита вътрешното съпротивление на източника на трифазно напрежение и съпротивлението на проводниците, довежда до неверен извод за характера на изменение на тока от проводимостите на изолацията на фазите в областта на големите им стойности ($Y \rightarrow \infty$).

2. Отчитането на вътрешното съпротивление в заместващата схема позволява да се получат аналитични зависимости за тока през човешкото тяло от проводимостта на изолацията във всички диапазони на нейното изменение от 0 до ∞ .

3. Зависимостта на тока през човешкото тяло от проводимостта на изолацията на фазите има екстремален характер, при което $\left| \dot{I}_r \right| \rightarrow 0$ при $|Y| \rightarrow 0$ и $|Y| \rightarrow \infty$.

Литература

- Мотузко, Ф. Я., С. М. Михальчук. 1973. Защита от поражение электрических токов методом компенсации емкостных токов через изоляцию. *Известие высших учебных заведений, Энергетика, № 6*.
- Мотузко, Ф. Я. 1973. Защитные устройства в электроустановках. М., *Энергия*.
- Ревякин, А. И., Б. И. Кашолкин. 1980. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках. М., *Энергия*.
- Сычев, Л. И., Е. Ф. Цапенко. 1978. Шахтные гибкие кабели и электробезопасность сетей. М., *Недра*.
- Ягураев, Б. М., Н. Ф. Шишкин. В. В. Назаров 1982. Защита от электропоражение в горной промышленности. М., *Недра*.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.

АНАЛИТИЧЕН МЕТОД ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НЕСИМЕТРИЯТА НА НАПРЕЖЕНИЯТА В ТРИФАЗНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СИСТЕМИ

Стефан Стефанов, Иван Проданов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В доклада се третира проблем, разгледан в литературата към него, като се предлага друг аналитичен подход за определяне на формулата за несиметрията на напрежението. Полученият краен резултат е по-удобен за практическо ползване. Изведен е израз за определяне фазата на вектора на напрежението с обратна последователност.

ANALYTICAL METHODOLOGY FOR CALCULATING ASYMMETRY OF CURRENTS IN THREE-PHASE ELECTRICAL SYSTEMS

Stefan Stefanov, Ivan Prodanov

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

ABSTRACT. In this report, a problem is examined throughout the literature, where another analytical approach for determining the formula of asymmetry of currents is being proposed. The final result is more convenient for practical use. An equation is derived for determining the phase of the voltage vector with reverse order.

Въведение

Прието е несиметрията да се характеризира със стойностите на напреженията и токовете с обратна и нулева последователност на основната честота. Появата на тези съставки се обуславя от наличието на несиметрично натоварване и аварийни режими в електрическите трифазни мрежи.

Несиметрията на напреженията на изводите на консуматорите на електрическа енергия количествено е регламентирана в [1].

Появата на съставки с обратна и нулева последователност на напрежението (\dot{U}_2 и \dot{U}_0) и на тока (\dot{I}_2 и \dot{I}_0) довежда до увеличаване на сумарните токове в отделните фази на мрежата, вследствие на което по условието на нагряване се намалява допустимият за тях ток с права последователност. Появата на напрежение с обратна последователност на изводите на въртящите се електрически машини е причина в роторните им намотки да се индукират е.д.н. и токове с удвоена честота. Те предизвикват допълнително нагряване на машините.

Появата на напрежения и токове с обратна и нулева последователност оказват вредно въздействие върху нискочестотните канали на съобщителните връзки и уредбите за сигнализация, влошавайки тяхната нормална работа.

В доклада се третира проблем, разгледан в [2]. Предлага се друг аналитичен подход за определяне на формулата за несиметрията на напрежението. Полученият краен резултат е по-удобен за практическо използване. Изведен е израз за определяне фазата на вектора на напрежението с обратна последователност, липсващ в [2].

В някои случаи определят несиметрията на напрежението като отношение на напрежението с обратна последователност към номиналното напрежение:

$$\varepsilon_{U_{\text{НОМ}}} = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (1)$$

Такава оценка на несиметрията, при вероятностен характер на консумацията на енергия в големи количества от съвременни технологични консуматори, довежда до значителна грешка. При това грешката е толкова голяма, колкото е еднозначното отклонение.

Възприето е несиметрията да се оценява като отношение на напрежението с обратна и права последователност [1]:

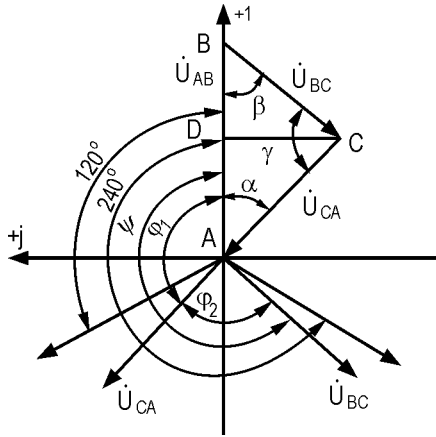
$$\varepsilon_{U_1} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (2)$$

Това се обяснява по следния начин. При големи едно-фазни отклонения напрежението $U_{\text{НОМ}}$ губи своята номинална стойност и се превръща в число, което не е

свързано с режима на несиметрията. Затова изчислението по формула (1) довежда до грешка, която расте с увеличаване на еднозначното отклонение.

Аналитичен подход за определяне на формулата за несиметрията на напрежението

Разглеждаме векторната диаграма на междуфазовите напрежения на трифазна система в несиметричен режим, показана на фиг.1.



Фиг. 1.

Независимо от схемата на съединение на намотките на захранващия източник и на консуматорите на електрическа енергия, геометричната сума на линейните напрежения е равна на нула (като сума на напрежението по дължината на затворен контур, съединяващ изводите на фазите А, В и С):

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0 \quad (3)$$

В съответствие с векторната диаграма напреженията с обратна и права последователност имат вида:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + a^2 \cdot U_{BC} \cdot e^{j\psi} + a \cdot U_{CA} \cdot e^{j\phi_1}) = U_2 \cdot e^{j\vartheta} \quad (4)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + a \cdot U_{BC} \cdot e^{j\psi} + a^2 \cdot U_{CA} \cdot e^{j\phi_1}) = U_1 \cdot e^{j\theta} \quad (5)$$

където $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ е фазовият оператор;

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \psi, \phi_1 - \text{ъглите между}$$

векторите на напреженията \dot{U}_{CA} и \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{AB} и \dot{U}_{CA} ; ϑ и θ - фазовите ъгли на напреженията с права и обратна последователност.

От векторната диаграма следва: $\phi_1 = \beta + \gamma$ и $\psi = \pi + \beta$.

Ъглите β и γ се намират, използвайки косинусовата теорема:

$$\beta = \arccos \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2 \cdot U_{AB} \cdot U_{BC}};$$

$$\gamma = \arccos \frac{U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - U_{AB}^2}{2 \cdot U_{BC} \cdot U_{CA}}.$$

Изчисляването на несиметрията може да се опрости. Спускаме перпендикуляр от върха С на триъгълника ABC към страната AB, записваме:

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB}; \quad \dot{U}_{BC} = -y - jx; \quad \dot{U}_{CA} = -(U_{AB} - y) + jx,$$

където $y = U_{BD}$; $x = U_{DC}$.

Замествайки стойностите на векторите в изрази (4) и (5), след преобразуване получаваме:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot U_{AB} - \sqrt{3} \cdot x + j \cdot \sqrt{3} \cdot \left(y - \frac{U_{AB}}{2} \right) \right] \quad (6)$$

Модулите на напреженията с обратна и права последователност се определят с изразите:

$$U_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{U_{AB}^2 - \sqrt{3} \cdot x \cdot U_{AB} + x^2 + y^2 - y \cdot U_{AB}} \quad (7)$$

$$U_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{U_{AB}^2 + \sqrt{3} \cdot x \cdot U_{AB} + x^2 + y^2 - y \cdot U_{AB}} \quad (8)$$

От векторната диаграма следва:

$$U_{CA}^2 = x^2 + y^2,$$

$$\text{където } x = \frac{2 \cdot S}{U_{AB}}.$$

Величината S (лицето на триъгълника ABC) се изчислява по формулата (3):

$$S = \sqrt{p \cdot (p - U_{AB}) \cdot (p - U_{BC}) \cdot (p - U_{CA})},$$

$$\text{където } p = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{2}.$$

От съотношението на страните на триъгълниците ABC и BCD имаме:

$$\cos \beta = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2 \cdot U_{AB} \cdot U_{BC}} \quad (9)$$

а

$$\cos \beta = \frac{U_{BD}}{U_{BC}} \quad (10)$$

След заместване на (10) в (9), при $y = U_{BD}$, получаваме:

$$y = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2 \cdot U_{AB}}$$

Фазата на вектора на напрежението с обратна последователност се определя от изразите:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arctg \frac{U_{2I}}{U_{2R}}, \text{ при } U_{2R} > 0 \\ \theta &= \pi + \frac{U_{2I}}{U_{2R}}, \text{ при } U_{2R} < 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

където U_{2R} и U_{2I} са действителната и имагинерната съставки на напрежението с обратна последователност.

Стойностите на U_{2R} и U_{2I} се определят с формулите:

$$\begin{aligned} U_{2R} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot U_{AB} - \sqrt{3} \cdot x \right) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot U_{AB} - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{2 \cdot S}{U_{AB}} = \\ &= \frac{U_{AB}}{2} - \frac{2 \cdot S}{\sqrt{3} \cdot U_{AB}}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} U_{2I} &= \frac{1}{3} \cdot \left[\sqrt{3} \cdot \left(y - \frac{U_{AB}}{2} \right) \right] = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \left(\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2 \cdot U_{AB}} - \frac{U_{AB}}{2} \right) = \\ &= \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{AB}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Изводи

1. Предложен е аналитичен метод за точно изчисляване несиметрията на напреженията с измерване и използване на техните модули.
2. Изведена е формула за фазата на вектора на напрежението с обратна последователност.
3. Предложената методика позволява да се анализира несиметрията на режима на системите на електро-снабдяване на промишлените предприятия с цел определяне пътя на тяхната оптимизация.

Литература

- БДС 10694 - 80. Норми за показателите на качеството на електрическата енергия при приемниците.
- Стефанов С., 1996. Критерии за оценка на несиметрията на напреженията и токовете в трифазни електрически системи. Год. МГУ "Св.Ив.Рилски", т. 41, св. IV.
- Бронштейн И. Н., К. А. Семендеев 1986. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М., Наука.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.

МЕТОДИ ЗА УВЕЛИЧАВАНЕ НА СТЪРМНОСТТА НА ТРАНЗИСТОРА

Мила Илиева-Обретенова

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

РЕЗЮМЕ. Стърмността на транзистора е важен параметър, отчитащ неговата енергийна ефективност. Стърмността се представя чрез изменението на изходния ток спрямо изменението на входното напрежение. Нейното изследване включва анализ на елементи с нови конструкции и нови материали по следните критерии: стъпка на изменение на входното напрежение, стойност на прагово напрежение и ток на утечка в състояние „изключен“. В статията са представени тунелен полев транзистор (TFET), триизмерен транзистор (Fin-FET), транзистор с два гейта (dual-gate), графенов баристор (graphene "barristor" - GB), фототранзистор с графин и квантови точки и фототранзистор с органични молекули с цел включване в учебник.

TRANSISTOR NONLINEARITY AUGMENTATION METHODS

Mila Ilieva-Obretenova

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

ABSTRACT. Transistor nonlinearity is an important parameter, considering its energy efficiency. Nonlinearity is represented by the output current change to input voltage change. Its study includes analyses of elements with new constructions and new materials on the following criteria: change step of input voltage, threshold voltage value and leakage current in state "off". The paper presents Tunneling field effect transistor (TFET), 3D-transistor (Fin-FET), dual-gate transistor, graphene "barristor" – GB, phototransistor with graphene and quantum dots and phototransistor with organic molecules. The aim is inclusion in students' book.

Въведение

Стърмността на транзистора е важен параметър, отчитащ неговата енергийна ефективност. Тя представлява изменението на изходния ток спрямо изменението на входното напрежение. При сега използваните транзистори стърмността е 60mV/dec, т.е. ако входното напрежение се измени с 60mV (0,06V), изходният ток се изменя с фактор 10 (10 пъти). Тази стърмност се постига чрез р-п-преход между два вида полупроводник и полев ефект в полупроводник.

При р-п-прехода се използват неговите изправителни свойства – в права посока провежда електричен ток с голяма стърмност, в обратна посока – много малък ток. Параметрите на р-п-прехода са:

1. Потенциална бариера: 0,32V,
2. Стъпка на изменение на входното напрежение: 60mV,
3. Прагово напрежение, при което преходът преминава в състояние „включен“: 0,6V (ток: 1mA),
4. Отношение ток на включване/ток на изключване:

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = 10^5$$

5. Ток на утечка в състояние „изключен“: 1 μ A,
6. Напрежение за достигане на праговото напрежение: 300 mV (0,3V).

При полев ефект в полупроводник се използва протичането на ток под действие на електрично поле. Феноменът се прилага при полев транзистор с р-п-преход. В полупроводниковия кристал са създадени два

срещуположни прехода, свързани в обратна посока. Целта е да се регулира токът през полупроводника. Праговото напрежение отбелязва състояние „изключен“. Токът на утечка е много малък, но транзисторът е енергоемък – напрежението за достигане на прагово напрежение е 3V. Този проблем се решава чрез MOSFET транзистор с индуциран канал. Чрез изолиращ окисен слой и срещуположни р-п-преходи в права посока се намалява консумацията. Праговото напрежение сочи състояние „включен“. В състояние „изключен“ липсва ток на утечка, защото няма изграден канал. За да се намали още разходът на енергия, фабрично се създава канал между два р-п-прехода (MOSFET с вграден канал). Р-п-преходът в права посока обеднява канала и праговото напрежение сочи състояние „изключен“. Въпреки това токът на утечка е по-голям от този при MOSFET с индуциран канал (Велчев, 2006; Вълков, 2006; Колева, 2010).

Целта на настоящата работа е да се представят най-новите изследвания за усъвършенстване на параметрите на транзисторите, най-важният от които е стърмността.

Методология

Методологията за изследване на стърмност на транзистора включва анализ на елементи с нови конструкции и нови материали по следните критерии:

1. Стъпка на изменение на входното напрежение,
2. Стойност на праговото напрежение,
3. Ток на утечка при състояние „изключен“.

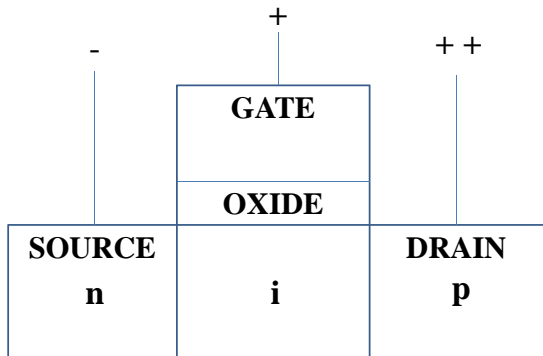
Резултати

1. Елементи с нови конструкции

1.1. Тунелен полев транзистор (Tunneling Field Effect Transistor - TFET)

В TFET (Seabaugh, 2013) е аранжиран полупроводников материал в p-i-n или n-i-p конфигурация. „i“ означава истински (intrinsic) и показва, че каналът има толкова електрони, колкото и дупки. Това състояние кореспондира с максималното съпротивление, което един полупроводник може да има, т.е. въвежда се енергийна бариера, която токоносителите в сорса е невъзможно да преминават. Но когато бариерата е с дебелина под 10nm, има малка, но ненулева, вероятност електрон, който стартира от едната страна на бариерата, да се появи от другата.

В TFET се стимулира тази вероятност чрез прилагане на напрежение към гейта на транзистора. Това предизвиква припокриване на валентната зона в сорса и на проводящата зона в канала, като се отваря един тунелен прозорец. Докато се движат в канала, електроните преминават от проводящата във валентната зона за разлика от MOSFET, в който електроните се намират в едната зона (валентна зона – липса на канал) или в другата зона (зона на проводимост – индуциран канал). На Фиг.1 е показана конструкция на TFET.



Фиг.1. Конструкция на TFET

В n-канален MOSFET електроните се движат в проводящата зона (с енергия E_c) от сорса към дрейна. Състоянието на елемента може да се превключи от „изключен“ към „включен“, ако се приложи достатъчно напрежение, което да намали енергийната бариера в p-n-прехода.

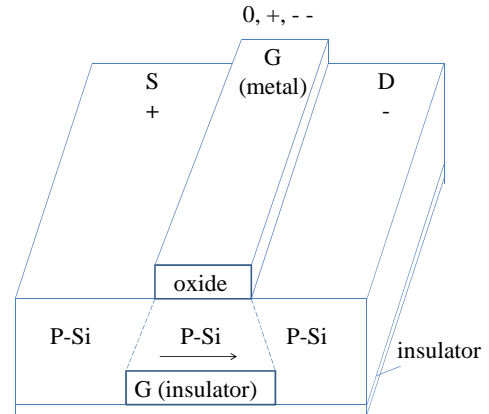
В n-канален TFET електроните произхождат от валентната зона на сорса (E_v), n-област. Малко положително напрежение на гейта увеличава проводящата зона на канала (електроните от сорса преминават в канала), така че тя се припокрива с валентната зона на дрейна (електроните от канала отиват в дрейна, p-област, който е по-положителен от гейта).

Тъй като тунелингът не се влияе от потока токоносителите през бариерата, TFET може да се превключва с много по-малко прагово напрежение и то може да се достигне с по-

малка стъпка на входното напрежение. Токът на утечка при състояние „изключен“ се възпрепятства от „истинския“ слой.

1.2. Транзистор с два гейта (dual-gate)

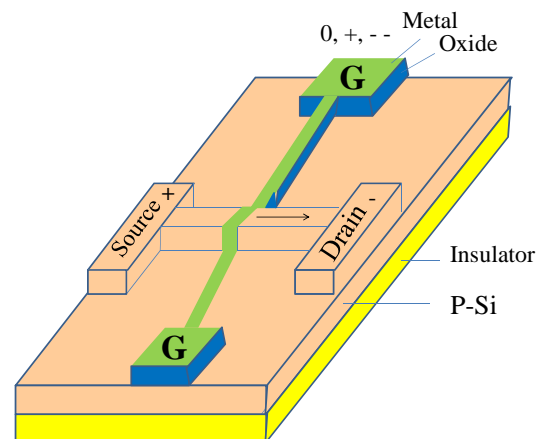
При транзистора с два гейта (Adee, 2007) първият е изпълнен както при конвенционалните MOSFET, а вторият се намира под канала. Целта е да се ограничи утечката на ток в състояние „изключен“. На Фиг.2 е показана конструкция на транзистор с два гейта.



Фиг.2. Конструкция на транзистор с два гейта

1.3. Триизмерен транзистор Fin-FET (Fin Field Effect Transistor)

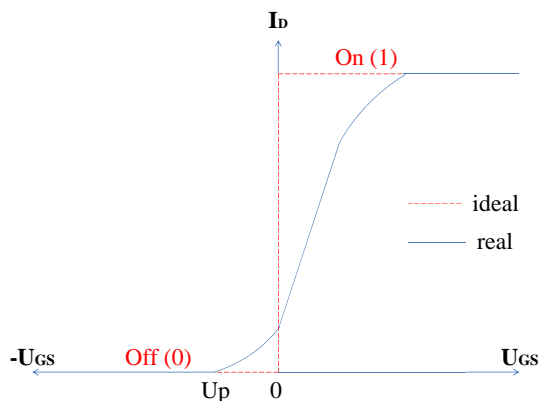
Fin-FET (Adee, 2007) представлява триизмерна реализация на транзистора с два гейта. Сорсът, дрейнът и гейтът са издигнати над подложката. Каналът сорс-дрейн е от материала на подложката, т.е. няма p-n-преход, за разлика от конвенционалните MOSFET. Силициевият кристал е разположен върху изолиращ материал. Този клас транзистори се нарича мултигейт, защото гейтът обгражда канала от три страни вместо от една. Каналът е изолиран от гейта чрез окисен слой. На Фиг.3 е показана конструкция на Fin-FET.



Фиг.3. Конструкция на Fin-FET

Токът е ограничен само в издигнатия канал между сорса и дрейна и електроните вече нямат път, през който да изтичат в режим „изключен“. Това позволява намаляване на стъпката на входното напрежение и понижава праговото напрежение. Волт-амперните характеристики са както при планарния вариант. На Фиг.4 е показана

предавателна статична характеристика на Fin-FET: $I_D = f(U_{GS})$. На фигурата с прекъснатата линия е показано идеалното превключване – със скок, а с пълтна линия – реалното – с голяма стръмност.

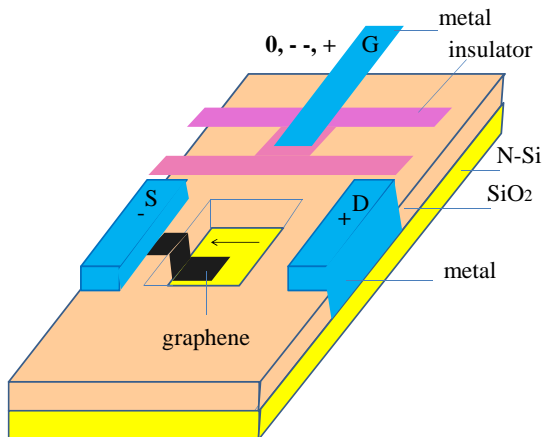


Фиг.4.Предавателна статична характеристика на Fin-FET

2. Елементи с нови материали

2.1. Графинов баристор – Graphene “barristor”

В графинов баристор (Yang, 2012) е създаден Шотки-преход (преход метал-полупроводник, графинът има метален характер) между графин и хидриран силиций. Липсата на ниво на Ферми (забранена зона) между двата материала позволява височината на потенциалната бариера да се намали до 0,2V при стойност от 0,32V за р-п-преход. Вместо каналът да се обогатява и обеднява чрез р-п-преход, той се обогатява и обеднява чрез лист графин, разположен върху част от него. Резултатът е намаляване на стъпката на входното напрежение и следователно понижаване на праговото напрежение. На Фиг.5 е показана конструкция на графинов баристор с п-канал. Статичните характеристики наподобяват тези на MOSFET с вграден р-канал.

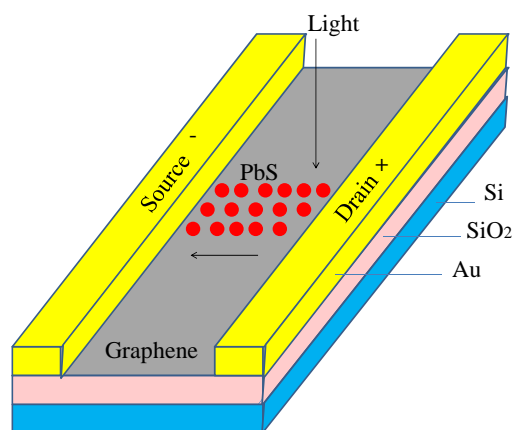


Фиг.5. Конструкция на графинов баристор

2.2. Фототранзистор с графин и квантови точки

Фототранзисторът с графин и квантови точки (Konstantatos, 2012) се състои от един или два слоя графин, покрити с тънък филм колоидни квантови точки от оловен сулфид (PbS). Абсорбирането на светлина в слоя квантови точки създава електрични заряди, които се

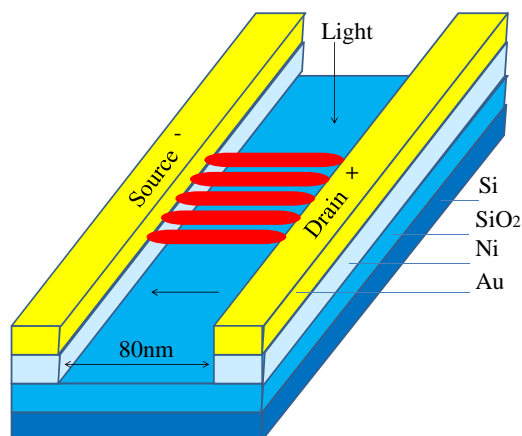
предават към графин. Там те циркулират много пъти поради високата мобилност на зарядите и дългия жизнен цикъл в слоя с квантови точки. В резултат на това се получава усилване $(I_o/I_i) 10^8$ електрона за фотон. Това води до увеличаване на изходния ток при една и съща входна мощност от $10^{-2} A/W$ при чисто графиновите детектори до $10^7 A/W$ при транзистор с графин и квантови точки. Това означава, че стъпката на входното напрежение може да се намали, а следователно – и праговото напрежение за поддържане на необходимото отношение I_{on}/I_{off} . На Фиг.6 е показана конструкция на фототранзистор с графин и квантови точки.



Фиг.6.Конструкция на фототранзистор с графин и квантови точки

2.3. Фототранзистор с органични молекули

Фототранзисторът с органични молекули (Faramarzi, 2012) съдържа нановлакна, самосглобяващи се между два метални електрода – всеки от никел и злато. Използва се разтвор на триариламин под едновременното действие на бяла светлина за 10 секунди и електрично поле. Органичните молекули се подреждат в редица, формирайки нановлакна, паралелни на полето. Ширината на канала е 80nm. Отчита се стойност на проводимостта $G > 5 \cdot 10^3 S/nm$. На Фиг.7 е показана конструкция на фототранзистор с органични молекули.



Фиг.7.Конструкция на фототранзистор с органични молекули

Проводимостта на органичния материал може да се представи в следния вид:

$$G = \frac{1 \cdot 10^{-1} \text{ mA}}{20 \text{ mV}} \cdot \frac{1}{\text{nm}}$$

За канал с дължина 80nm проводимостта е:

$$G = \frac{1 \text{ mA}}{2,5 \text{ mV}}$$

Това означава, че ако входното напрежение се увеличава с 2,5mV, изходният ток се увеличава с 1mA. Тази проводимост е по-малка от проводимостта (стръмността) на неорганичните материали. Въпреки това стъпката на входното напрежение е много малка: 2,5mV спрямо 60mV. Праговото напрежение, при което конвенционалният транзистор се включва, е 0,6V, токът е 1mA. Транзисторът с органични влакна достига ток 1mA при прагово напрежение 2,5mV. Ток на утечка в състояние „изключен“ няма, защото липсва канал. Недостатък на тези транзистори е, че изходен ток от 1000mA се достига при входно напрежение над 2V, за разлика от конвенционалните транзистори, които достигат този ток при напрежение под 2V. Предимство на транзисторите с органични влакна е високата им чувствителност.

Заклучение

Увеличаването на стръмността на транзистора може да се постигне основно по два начина:

1. Въвеждане на нови конструкции – без р-п-преход – с изолиращ слой между р- и п-силиций или само с един вид полупроводник;
2. Използване на нови материали – графин, хидриран силиций, квантови точки и органични молекули.

Възможно е управляващото напрежение да се замени със светлина. По този начин се усъвършенстват основните параметри: стъпка на изменение на входното напрежение, прагово напрежение и ток на утечка при състояние „изключен“. Бъдещата работа по темата включва симулационен анализ с подходящ софтуер.

Съвременните полупроводникови елементи с увеличена стръмност могат да се внедряват в памети (Динамична памет с произволен достъп - DRAM), които имат много по-строги изисквания към параметрите, отколкото логическите схеми. В паметите евентуалните загуби не са само топлина или енергия, а информация. Освен това конструкциите на новите елементи предлагат технологии, които улесняват моделирането на памети.

Литература

- Велчев, Н., 2006, 100 години Електроника, *Академично издателство „Проф. Марин Дринов”, София*
- Вълков, С., Ямаков, И., Дойчинова Р., Христов, М., Василева, Т., 2006, Електронни и полупроводникови елементи и интегрални схеми, *Издателство „Техника”, София*
- Колева, Е., 2010, Индустриална електроника, *Издателство Екс-Прес, Габрово*
- Adee, S., 2007, Transistors go vertical, <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/transistors-go-vertical>
- Faramarzi, V. et al., 2012, Light-triggered self-construction of supramolecular organic nanowires as metallic interconnects, *Nature Chemistry*, 4, pp. 485-490
- Konstantatos, G. et al. 2012, Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain, *Nature Nanotechnology* 7, pp. 363-368
- Seabaugh, A., 2013, The Tunneling Transistor, <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-tunneling-transistor>
- Yang, H. et al., 2012, Graphene Barristor, a Triode Device with a Gate-Controlled Schottky Barrier, *Science*, 1 June 2012: vol.336, №6085, pp. 1140-1143

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.

СЪСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ НА СВЕТОДИОДНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ В БЪЛГАРИЯ

Красимир Велинов, Росен Стефанов, Владимир Василев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, candela@mail.bg; http://light-bg.eu/

РЕЗЮМЕ. В доклада се обобщават данни от около 850 светодиодни осветителя, измерени в продължение на 3 години. Проследено е повишаване на светлинния добив във времето. Поотделно са разгледани осветители за вътрешно и улично осветление. Обобщени са перспективи за развитие, проблеми и често повтарящи се грешки при конструирането им.

STATUS AND PROSPECTS OF THE LED LIGHTING IN BULGARIA

Krasimir Velinov, Rosen Stefanov, Vladimir Vasilev

University of mining and geology "St. Ivan Rilski", candela@mail.bg, http://lighting-bg.eu/

ABSTRACT. The report summarizes data from about 850 LED luminaires measured for 3 years. Detected is to increase the light yield in time. Separately examined for internal and street luminaires. Summarizes the prospects, problems and frequent errors in their construction.

Keywords: LED, luminaire, current, voltage, power, light output

Въведение

Производителите на осветители са задължени да обявяват техническите параметри на своите изделия. Съгласно изискванията на БДС EN 60598 трябва да се декларират следните параметри:

- работно напрежение **Un**;
- работен ток **Ip**;
- активна мощност **Pa**;
- фактор на мощността **cos(φ)**;
- светлинен поток **Фл**;
- светлинен добив **η**;
- цветна температура **Tcol**;
- индекс на цвето предаване **CRI**.

Разпространена практика е декларираните от производителя параметри да не съответстват на реалните. Контролирането на тези параметрите от страна на потребителите е от изключителна важност и това трябва да се извършва в специализирани изпитателни лаборатории.

Научно изследователската лаборатория "Осветителна техника" към Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски" е основана със заповед на Ректора на МГУ Р1115/14.11.2011 г. с предмет на дейност научно-изследователска, изпитателна, експертна, консултантска и други дейности в областта на проучването, проектирането, оценката и изпитването на осветителни уредби и светлотехнически изделия. Основна дейност на лабораторията е изпитване на светлотехническа продукция. В нея също се извършват научни изследвания и се създават уникални измервателни устройства. За

изминалия период от време в лабораторията са изпитани около 1000 осветителни тела от различен вид. Преобладаващ брой от тях – 850 са светодиодни. Около 90% от изпитваните осветители се произвеждат от около 50 български фирми. Една малка част от тях е внос – предимно от Китай. Натрупаният голям брой експериментален материал позволява да се направят оценки на състоянието на светодиодните осветители и тенденциите на промяна на техните параметри.

Опитна постановка

Като опитна постановка е използван създаденият през 2010 г. гониофотометър (Velinov K., P. Velinova, 2013) и модернизираният през 2012 г. в НИЛ "Осветителна техника" към МГУ "Св. Иван Рилски" кълбов фотометър (Велинов К, 2012).

С помощта на тези уреди се извършва измерването на светлинния поток на светлинните източници и светлоразпределението на осветителни тела (БДС EN 13032-1, 2:2005).

За да се контролират електрическите параметри на осветителите, по време на измерването се използва лабораторният измервател на мощност HM-8115-2 (фиг. 1). Той позволява измерване 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).

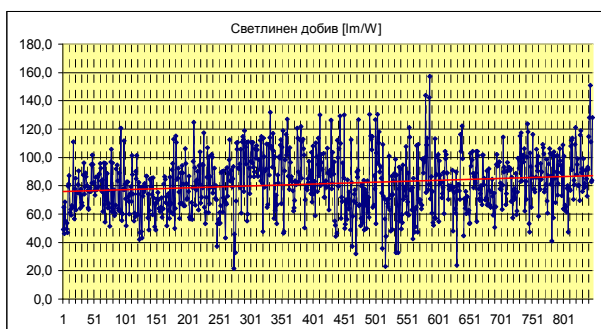


Фиг. 1. Измервател на мощност HM-8115-2

За извършване на измерванията и обработката на измерените стойности от трите уреда е създаден специализиран софтуер. Програмите са написани на DELPHI.

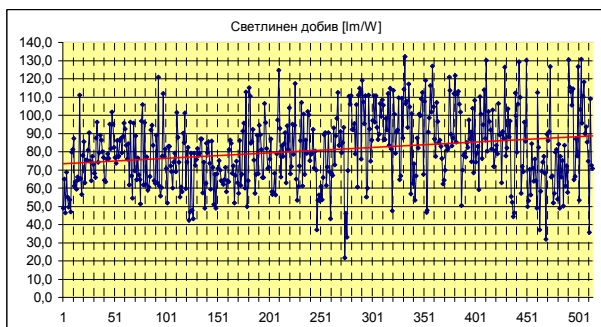
Резултати

Резултатите от измерванията са обобщени в таблица, съдържаща информация за номера на протокола, фирмата производител, типа на осветителя, неговата активна мощност, светлинен поток, светлинен добив, цветна температура, индекс на цвето предаване и др. Визуализацията на тези данни позволява да се проследят тенденциите в развитието на светодиодната техника и практическите граници на произвежданите осветителни тела.

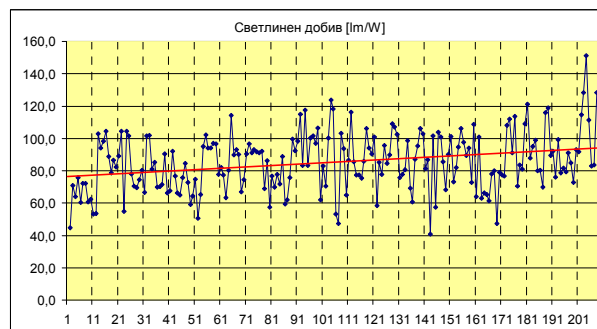


Фиг. 2. Промяна на светлинния добив на светодиодните осветители във времето

На фиг. 2 е показана промяната на светлинния добив на светодиодните осветители във времето. По абсцисата е показан поредният номер на измерването. На фигурата е даден трендът на нарастване на светлинния добив. Вижда се, че в началото на измерванията светлинният добив е бил около 75 lm/W, докато в последните месеци той достига до около 85 lm/W. Горните данни са обобщени за всички видове осветители. Затова интерес представлява как ефективността на осветителя зависи от неговото предназначение, което е показано на фиг. 3 и 4.



Фиг. 3. Промяна на светлинния добив на светодиодни осветители за вътрешно осветление във времето



Фиг. 4. Промяна на светлинния добив на светодиодни улични осветители във времето

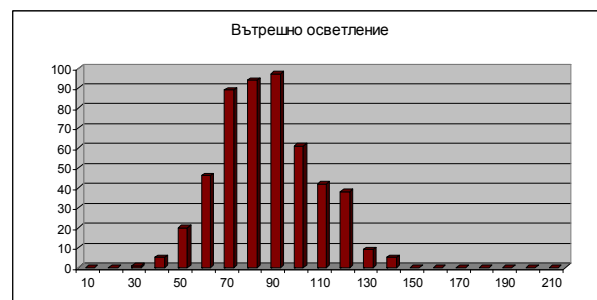
Аналогично на фиг. 2, 3 и 4 по абсцисата е показан поредният номер на измерването за съответния тип осветители. И на трите фигури ординатата съответства на светлинния добив на осветителя. На фиг. 3 трендът на нарастването на светлинния добив на осветители за вътрешно осветление показва увеличаване от 70 до 90 lm/W. В същото време за улични осветители (фиг. 4) той се увеличава от 75 до 95 lm/W. Това увеличение показва повишаване на ефективността на светодиодните осветители в продължение на две години и половина.

На фиг. 5, 6, 7 и 8 е показана хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители. По абсцисата е показан светлинният добив на осветителя, а по ординатата – броят на осветителите от даден тип в интервал от 10 единици.



Фиг. 5. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители

От фигурата се вижда, че максимално групирани има в интервала 70-90 lm/W.



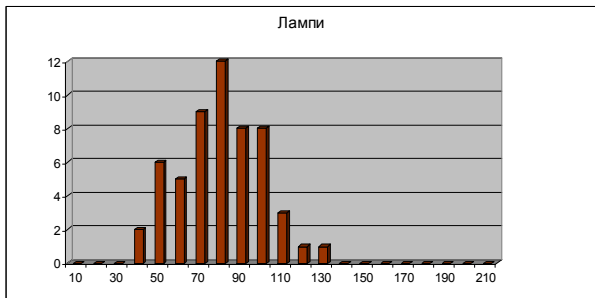
Фиг. 6. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители за вътрешно осветление



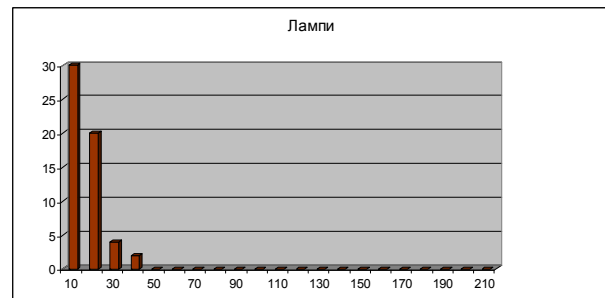
Фиг. 7. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни улични осветители



Фиг. 11. Хистограма на разпределение на мощността на светодиодни улични осветители



Фиг. 8. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни лампи



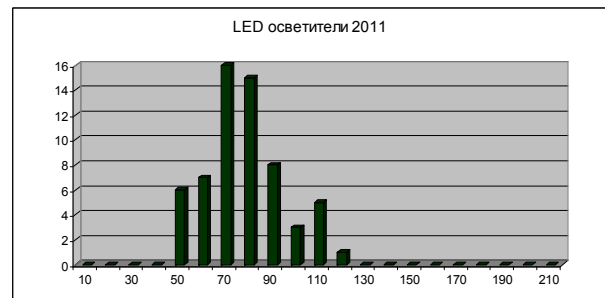
Фиг. 12. Хистограма на разпределение на мощността на светодиодни лампи

На фиг. 9, 10, 11 и 12 е показана хистограма на разпределение на мощността на изпитваните светодиодни осветители. По абсцисата е показана мощността на осветителя, а по ординатата – броят на осветителите от даден тип в интервал от 10 единици.

На фиг. 13, 14, 15 и 16 е дадена хистограма на разпределение на светлинния добив на изпитваните светодиодни осветители за 2011, 2012, 2013 и 2014 г. По абсцисата е показан светлинният добив на осветителя, а по ординатата – броят на осветителите от даден тип в интервал от 10 единици.



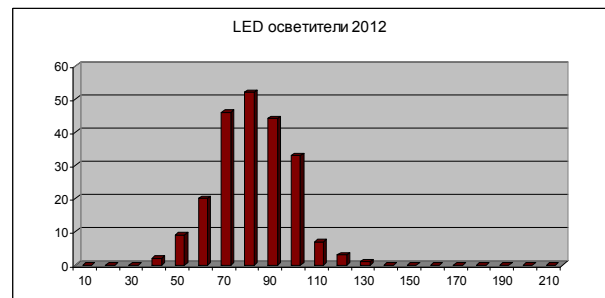
Фиг. 9. Хистограма на разпределение на мощността на светодиодни осветители



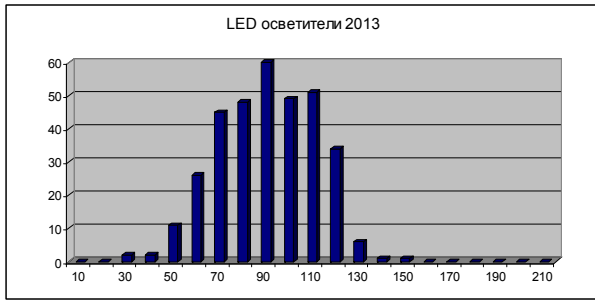
Фиг. 13. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители през 2011 г.



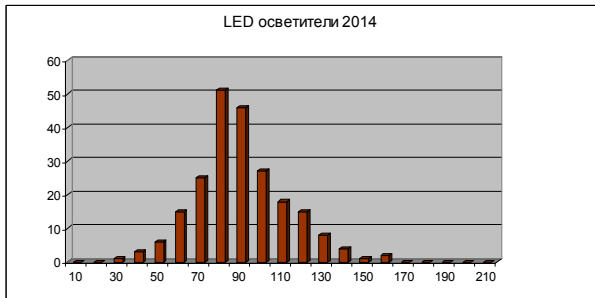
Фиг. 10. Хистограма на разпределение на мощността на светодиодни осветители за вътрешно осветление



Фиг. 14. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители през 2012 г.



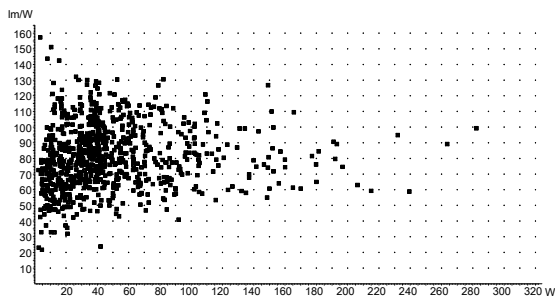
Фиг. 15. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители през 2013 г.



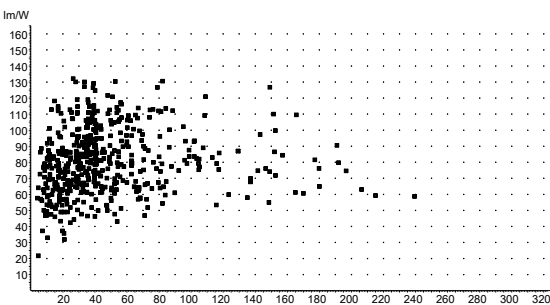
Фиг. 16. Хистограма на разпределение на светлинния добив на светодиодни осветители през 2014 г.

От фигурите се вижда, че докато през 2011 г. максимален брой осветители са имали ефективност в интервала 60 – 70 lm/W, за 2012 г. те са в интервала 70 – 80 lm/W, за 2013 г. - съответно 80 – 90lm/W, а за 2014 г. има отстъпление и максимумът е в интервала 70 – 80 lm/W.

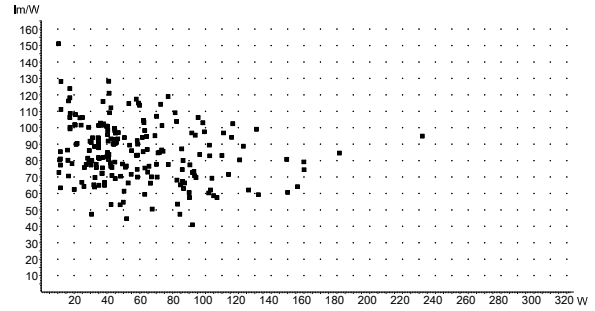
На фиг. 17, 18, 19 и 20 е показана зависимостта на светлинния добив от мощността на изпитваните светодиодни осветители. По абсцисата е показана мощността на осветителя, а по ординатата – светлинният добив.



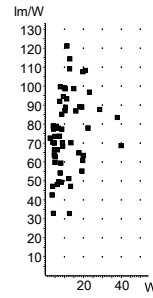
Фиг. 17. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители – за всички осветители



Фиг. 18. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители за вътрешно осветление

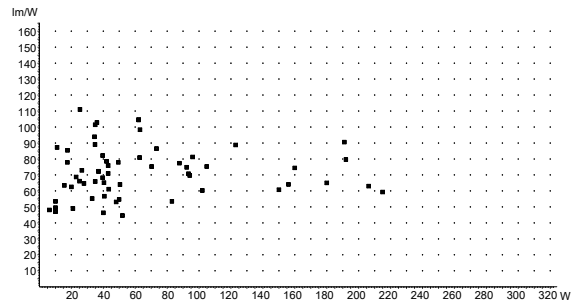


Фиг. 19. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители за улично осветление

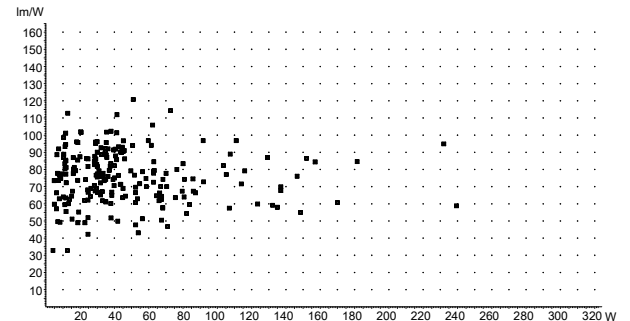


Фиг. 20. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни лампи

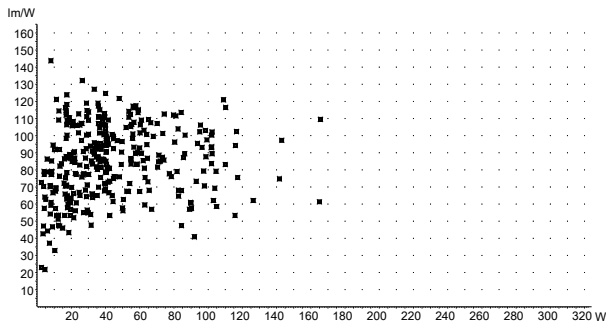
На фиг. 21, 22, 23 и 24 е показана зависимостта на светлинния добив от мощността на изпитваните светодиодни осветители за 2011 до 2014 година. По абсцисата е показана мощността на осветителя, а по ординатата – светлинният добив



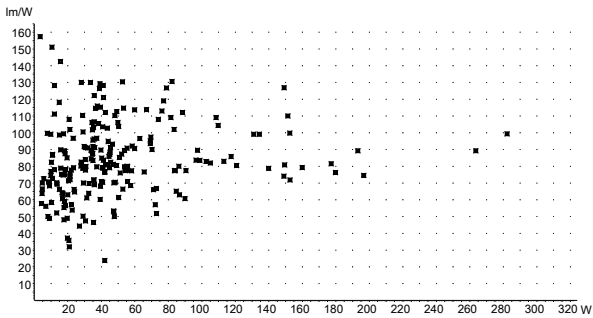
Фиг. 21. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители за 2011 година



Фиг. 22. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители за 2012 година

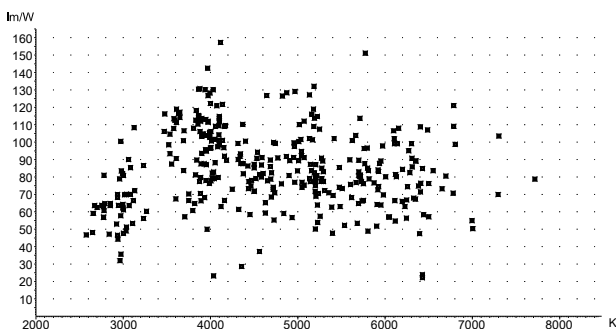


Фиг. 23. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители за 2013 година



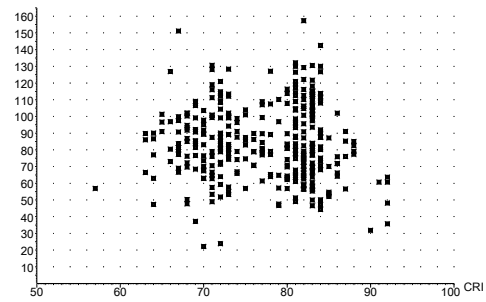
Фиг. 24. Светлинен добив във функция от мощността на светодиодни осветители за 2014 година

Забелязва се разширяване на диапазона на мощността и бройката на осветителите в диапазона 120 – 320 W.



Фиг. 25. Светлинен добив във функция от цветната температура на светодиодни осветители

Няма ясно изразена зависимост на светлинния добив от цветната температура в изпитваните осветители. В същото време за определен тип светодиоди, тези с по-висока цветна температура имат по-висока ефективност.



Фиг. 26. Светлинен добив във функция от индекса на цвето-предаване на светодиодни осветители

Няма ясно изразена зависимост на светлинния добив от индекса на цвето-предаване, но се забелязва групиране на осветителите около две зони – CRI=72 и CRI=85. Това е следствие от предназначението на осветителите. Докато приложението в офисното и битовото осветление изисква използването на светодиоди с CRI > 80, то за улично осветление е допустим по-нисък индекс на цвето-предаване. В същото време светодиодите с по-нисък CRI имат по-висока ефективност.

Изводи

1. В течение на три години средният светлинен добив на светодиодните осветители се е повишил от 75 на 85 lm/W. През 2013г. се появяват известен брой осветители с ефективност 130 lm/W, а през 2014г. – и такива със 140 – 150 lm/W.
2. Наблюдава се постепенно повишение на мощността на осветителите, като през последната – 2014 година има известен брой в диапазона 180 – 330 W.

Литература

- Velinov K., P. Velinova, 2013, 11 Goniophotometer with large number of digital photo sensors. LuxJunior. Internationales Forum fur den lichttechnischen Nachwuchs 23 bis 27.09.2013, Dornfeld/Ilmenau.
- Велинов К., 2012, Модернизация на гониофотометър с голям брой цифрови фотосензори, Годишник на МГУ “Св. Иван Рилски”.
- БДС EN 13032-1, 2:2005, Светлина и осветление. Измерване и представяне на фотометрични данни на лампи и осветители.
- Hameg HM8115-2, Programmable AC Power Meter, <http://www.testequipmentdepot.com/hameg/powersupplies/hm81152.htm>
- Cree® XLamp® Long-Term Lumen Maintenance, July 2009.

Статията е рецензирана от доц. д-р Г. Ганчев и препоръчана за публикуване от кат. „Електрификация на мините“.

ВЛИЯНИЕ НА ОГРАНИЧИТЕЛНИТЕ УСЛОВИЯ ПРИ ОПТИМИЗИРАНЕ НА СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

Владимир Василев¹, Красимир Велинов²

^{1,2} Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, w.vasilev@mail.bg; candela@mail.bg

РЕЗЮМЕ. Поради специфичните особености на зрителната задача в уличното осветление разпределението на светлината оказва голямо въздействие върху ефективността на осветителя. В работата с помощта на MATLAB се решават проблеми за оптимално разпределение на светлината. Представена е 3D визуализация на решенията.

INFLUENCE OF LIMITATIVE CONDITIONS IN OPTIMIZING THE LIGHT DISTRIBUTION OF STREET LIGHTING

Vladimir Vasilev¹, Krasimir Velinov²

^{1,2} University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, candela@mail.bg; http://light-bg.eu/

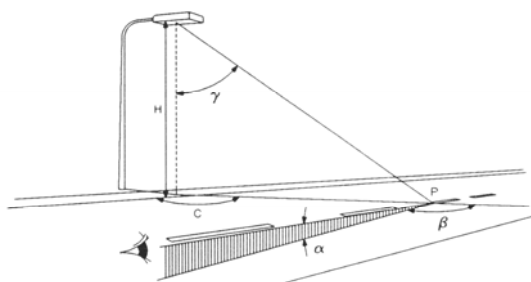
ABSTRACT. Due to specific visual task in street lighting, light distribution has a major impact on the efficiency of the luminaire. Using MATLAB to solve problems for optimal light distribution. Presented a 3D visualization solutions.

Keywords: Optimization, LED, luminaire, light distribution.

Въведение

Прието е нормирането на уличните осветителни уредби (УОУ) да се извършва по яркост (БДС EN 13201). За улици от среден клас нормената стойност на яркостта е от 0.5–1.0 cd/m². Поради характерната огледална отражателна характеристика на пътната настилка и малкия наклон на погледа на наблюдателя (0.5 – 1.5°) е възможно постигане на по-висока яркост чрез максимално използване на излъчването на осветителя в областта на излъчване от 60–90° (фиг. 1). Използването на тази зона е ограничено от стандарта с оглед намаляване на заслепяването (БДС EN 13201). Ако светлоразпределението на осветителя е подходящо, то реализирането на нормените показатели може да се осъществи с няколко пъти по-малка мощност.

Цел на настоящата работа е да се получи такова светлоразпределение на осветителя, че с минимален светлинен поток на източника на светлина да се реализират нормативните изисквания към осветителната уредба.



Фиг. 1. Геометрия на наблюдение в УОУ

Дефиниране на оптимизационната задача

Математически оптимизационната задача може да се дефинира (Велинов К, В. Василев, 2012) по следния начин:

Критерий за оптимизация е минималният светлинен поток, излъчен от осветителя, с който да се реализират нормативните изисквания.

$$\Phi_{\text{лампа}} = \sum \sum I_{\gamma c} \cdot \Delta\Omega_{\gamma c} = \text{MIN} \quad \gamma = 0 - \pi/2, C = 0 - \pi$$

Като ограничителни условия могат да бъдат формулирани няколко критерия:

1. При нормиране по яркост (Велинов К., 2010, Василев Хр., К. Велинов, 2004, Vassilev Hr., Velinov K., 2004)

$$\begin{aligned} L_{\text{средно}} &> L_0 \\ L_{\text{min}} / L_{\text{средно}} &> G_0 \\ E_{\text{min}} / E_{\text{средно}} &> G_{e0} \\ I_{\gamma c \text{ max}} (\text{при } \Phi_{\text{лампа}}=1000\text{lm}) &< I_0 \\ TI &< TI_{\text{зададено}} \end{aligned}$$

където:

$L_{\text{средно}}$ е средната яркост върху пътното платно,
 L_0 е зададената нормена яркост,
 L_{min} е минималната яркост върху пътното платно,
 $\Phi_{\text{лампа}}$ е светлинният поток на осветителя,
 $\Delta\Omega_{\gamma c}$ са пространствените ъгли за γ и c ,
 TI – показател на заслепяване.

2. При нормиране по осветеност

$$\begin{aligned} E_{\text{средно}} &> E_0 \\ E_{\text{min}} / E_{\text{средно}} &> G_{e0} \\ I_{\gamma c \text{ max}} (\text{при } \Phi_{\text{лампа}}=1000\text{lm}) &< I_0 \\ TI &< TI_{\text{зададено}} \end{aligned}$$

където:

$E_{\text{средно}}$ е средната осветеност върху пътното платно,
 E_o е зададената нормена осветеност,
 E_{min} е минималната осветеност върху пътното платно,
 $\Phi_{\text{лампа}}$ е светлинният поток на осветителя,
 $\Delta\Omega_{\gamma, \sigma}$ са пространствените ъгли за γ и σ ,
 TI – показател на заслепяване.

3. При нормиране по видимост (Василев Хр., Велинов Кр., 2006)

$V_{\text{средно}} > V_o$
 $V_{\text{min}} / V_{\text{средно}} > G_{eo}$
 $I_{\gamma, \sigma \text{ max}}$ (при $\Phi_{\text{лампа}} = 1000\text{lm}$) $< I_o$
 $TI < TI_{\text{зададено}}$

където:

$V_{\text{средно}}$ е средната видимост върху пътното платно,
 V_o е зададеното ниво на видимост,
 V_{min} е минималната видимост върху пътното платно,
 $\Phi_{\text{лампа}}$ е светлинният поток на осветителя,
 $\Delta\Omega_{\gamma, \sigma}$ са пространствените ъгли за γ и σ ,
 TI – показател на заслепяване.

В този случай основно ограничително условие е видимостта на тестовия обект да бъде по-голяма от предварително определено ниво. За условията на пътното движение се приема, че ниво, 10 пъти по-голямо от граничното, е приемливо. Като тестов обект се използва стандартен зрителен обект, възприет от международната комисия по осветление – куб със страна 0.2 m и коефициент на отражение 0.2.

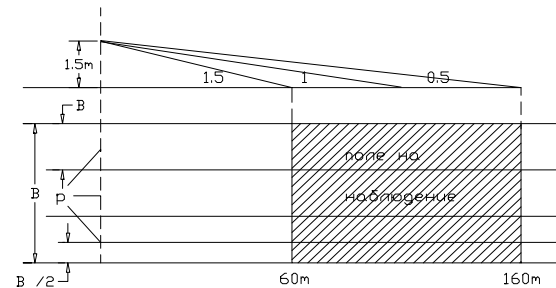
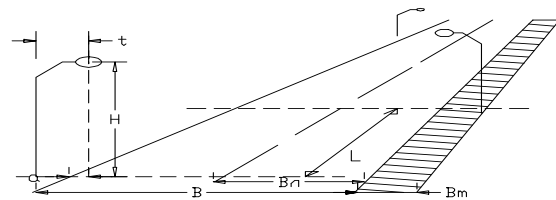
Посочените ограничителни условия са подбрани чрез предварителни изследвания за естеството на оптимизационната задача, като са отпаднали ограничения, които не влияят чувствително на оптималното решение.

В (Велинов К., 2010, Василев Хр., К. Велинов, 2004, Vassilev Hr., Velinov K., 2004) горната оптимизационната задача е формулирана като линейна. Това е направено, за да се получи лесно решението ѝ. В действителност дефинираната оптимизационна задача е нелинейна, тъй като функцията на яркостта, равномерността и заслепяването са нелинейни функции от параметрите на светлоразпределението на осветителя.

Дефиниране на нелинейна оптимизационната задача

Светлотехническата задача за намиране на оптимално светлоразпределение на осветител за улици се формулира по следния начин: разглежда се УОУ с широчина W . Осветителите са монтирани на височина H , на разстояние S един от друг. Известни са отражателните свойства на пътната настилка при различни ъгли на наблюдение, съответстващи на разрешените скорости на движение. Търси се такова светлоразпределение на осветителите, което ще осигури постигането на регламентиранията количествени и качествени показатели при най-ниска стойност на необходимия светлинен поток на източника ($\Phi_{\text{от}} = \text{min}$).

Взаимното положение на изчислителните точки, осветителите и наблюдателите са описани на фиг.1 и 2.



Фиг. 2.

В работата (Велинов К., Хр. Василев, 2007) оптимизационната задача е формулирана като нелинейна, като са получени ограничен брой решения.

За да се обвържат съседните стойности на интензитета на светлината с технологичните ограничения за производство на осветители, функцията на светлоразпределението трябва да се апроксимира с известна функционална зависимост.

Бяха изпробвани различни апроксимиращи функции и методи с цел да се изберат универсални формули, описващи различни класове светлоразпределения, като при това грешката на апроксимация да се сведе до минимум (Василев Хр., Георгиев Ц., Велинов Кр., 2006).

Полиномни функции и такива по степените на тригонометрични функции не се оказаха подходящи. Най-накрая изборът беше направен с ортогонални полиноми на Лежандър.

Получената функция за апроксимация има вида:

$$(1) f(\gamma, C) = \exp(d_0(\gamma_i) + d_1(\gamma_i)\hat{C}_1^i + d_2(\gamma_i)\hat{C}_2^i + \dots + d_n(\gamma_i)\hat{C}_n^i)$$

където: коефициентите $d_p(\gamma_i)$ са изразени чрез ортогонални полиноми на Лежандър, а $\hat{C} = \frac{C}{\text{Max}(C)}$ се изменя,

след нормализиране, в интервала $[0,1]$. Индекс i се използва за означаване на ред, а индекс j - за означаване на колона. Съответно ъгъл γ е свързан с редовете на осветителната характеристика, а ъгъл C е свързан с колоните на характеристиката.

Коефициентите $d_p(\gamma_i)$ ($p=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$) имат вида

$$(2) d_p(\gamma_i) = q_{p1}S_1(T_i) + q_{p2}S_2(T_i) + \dots + q_{pm}S_m(T_i),$$

където: q_{pk} са неизвестни коефициенти оценени по метода на най-малките ($p = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$), S_k - ортогонални полиноми на Лежандър от ред k ($k = 1 \dots m$), аргумент T_i изчислен както следва

$$(3) T_i = \frac{2\gamma_i - \gamma(1) - \gamma(n)}{\gamma(n) - \gamma(1)}. \text{ Ъглите } \gamma(1) \text{ и } \gamma(n) \text{ пред-}$$

ставят първата и последна стойност на ъгъл γ . Тази трансформация изобразява ъгъл γ в интервала $[0,1]$. След преобразуване се преминава в полярни координати γc ($\gamma=0 - 180^\circ$, $C=0 - 180^\circ$)

При апроксимацията бяха изпробвани ортогонални полиноми от степен 7, 9, 11 и 13. При по-високите редове точността на апроксимация се повишаваше, но броят на неизвестните нарастваше в геометрична прогресия. Установи се, че ортогонални полиноми от степен 9 задоволително описват всяко светлоразпределение и при решаване на оптимизационната задача беше използвана тази степен.

Резултати от изчисленията

Така формулираната задача на нелинейното оптимизиране беше решена при различни геометрични и нормативни условия. За решаването ѝ беше използвана функцията на MATLAB **fmincon**. Решението на задачата протичаше на два етапа: с голяма стъпка за намиране на глобалния максимум и малка стъпка – за получаване на точно решение. Времето за получаване на едно решение беше от порядъка на 20–40 часа на компютър с тактова честота 3 GHz. За да се получат повече решения, беше направено планиране на експеримента, като различни варианти на ограничителните условия се задаваха на различни компютри. При изчисленията бяха използвани 10 броя компютри, монтирани в зала 103. Целият процес на изчисления отне няколко месеца, през което време компютрите работеха непрекъснато.

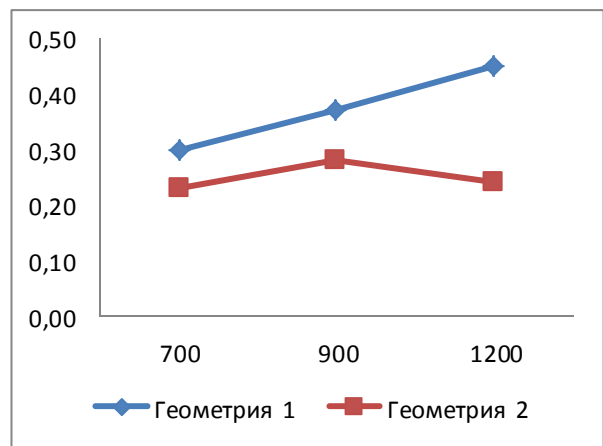
За да се анализират резултатите от изчисленията, допълнително беше направен програмен модул за генериране на светлоразпределението в EULUMDAT формат. С помощта на програмата ILEXA Ray-Viewer (<http://www.ilexa.de/>) получените оптимални светлоразпределения се визуализираха в 3D. С получените оптимални светлоразпределения с помощта на програмата DIALux се извършиха изчисления за реализираните действителни показатели.

Изчисленията са проведени при следните фиксирани параметри:

- ширина на улицата – 7 m,
- разположение на стълбовете – едностранно – ляво,
- височина на стълба – 7 и 9 m, .
- междустълбие – 30 m,
- брой на осветители на стълб – 1,
- тип на рогатката – едностранна,
- наклон на рогатката – 0 - 15°
- отражателна характеристика на пътната настилка – RIII
- зададена нормена яркост - $L_0 = 1 \text{ cd/m}^2$;
- зададена обща неравномерност – $G_0 = 0.4$
- брой ленти за движение – 2.

След получените множество решения може да се изведат следните зависимости:

- При различна геометрия на пътното платно и при еднакви ограничителни условия за максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток.



Фиг. 3. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен максимален интензитет

Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса - 1.

Зададен максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток (параметърът е показан по абсцисата на графиката).

Ограничителни условия: $T_l < 0,1$; $U_0 \geq 0,4$; $U_l \geq 0,6$

Междустълбие - $L = 30 \text{ m}$

Ширина на улицата 7 m,

Височина на стълба 7 m

Геометрия 1:

Дължина на рогатката – 3.5 m

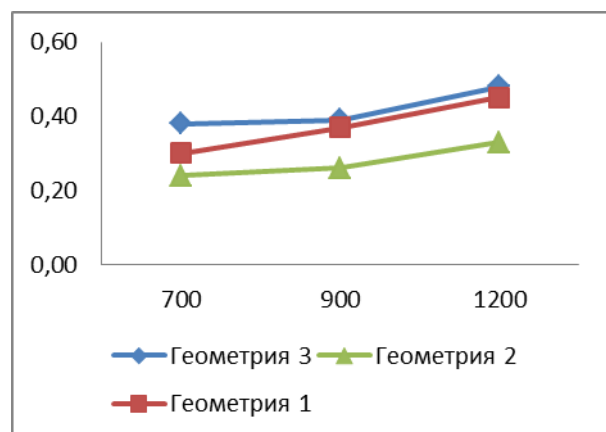
Геометрия 2:

Дължина на рогатката – 0 m

- При различна геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за зададен максимален интензитет на светлината от 1000 lm условен светлинен поток.

Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

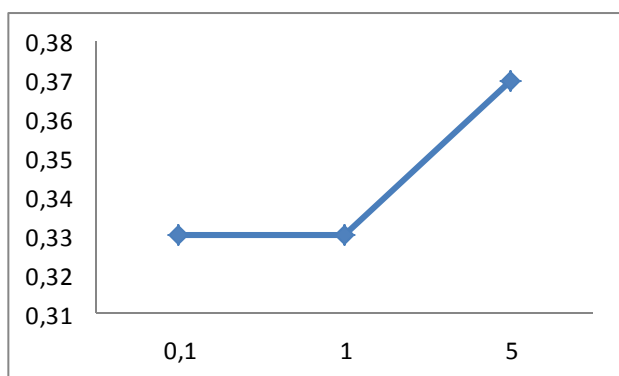


Фиг. 4. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен максимален интензитет и различни ограничителни условия

Зададен максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток (параметърът е показан по абцисата на графиката)

Междустълбие - L= 30 m
 Широчина на улицата 7 m
 Височина на стълба 7 m
 Геометрия 1:
 Дължина на рогатката – 3.5 m
 Ограничителни условия: $T_l < 5$; $U_0 \geq 0.2$; $U_l \geq 0.4$
 Геометрия 2:
 Дължина на рогатката – 0 m
 Ограничителни условия: $T_l < 0,1$; $U_0 \geq 0.2$; $U_l \geq 0.4$
 Геометрия 3:
 Дължина на рогатката – 3.5 m
 Ограничителни условия: $T_l < 0,1$; $U_0 \geq 0.4$; $U_l \geq 0.6$

- При еднаква геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за зададен максимален коефициент на заслепяване.



Фиг. 5. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен коефициент на заслепяване

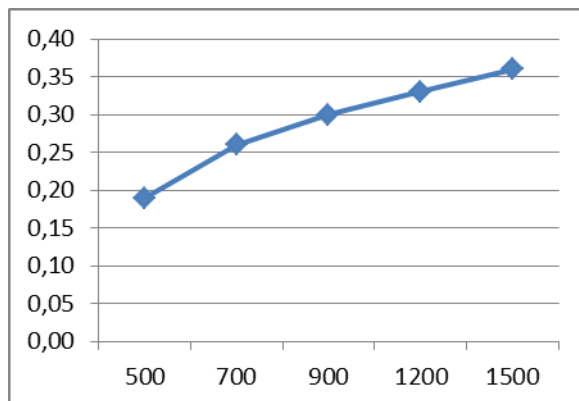
Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

Зададен максимален коефициент на заслепяване (параметърът е показан по абцисата на графиката)

Междустълбие - L= 30 m
 Широчина на улицата 7 m,
 Височина на стълба 7 m
 Дължина на рогатката – 0 m
 Ограничителни условия: $U_0 \geq 0.2$; $U_l \geq 0.4$

- При еднакви геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за зададен максимален интензитет на светлината 1000 lm условен светлинен поток.



Фиг. 6. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен максимален интензитет.

Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

Зададен максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток (параметърът е показан по абцисата на графиката)

Междустълбие - L= 30 m
 Широчина на улицата 7 m
 Височина на стълба 7 m
 Дължина на рогатката – 0 m
 Ограничителни условия: $U_0 \geq 0.2$; $U_l \geq 0.4$

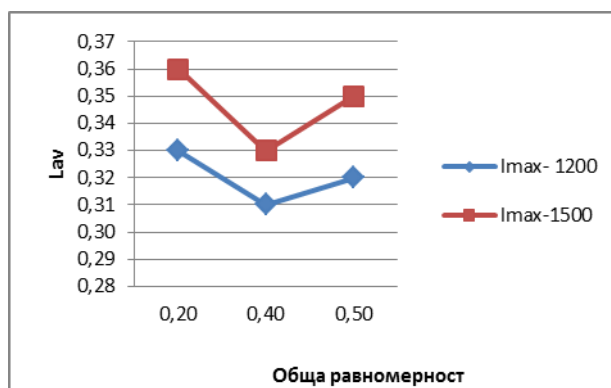
- При еднаква геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за неравномерност при два различни зададени максимални интензитета на светлината за 1000 lm условен светлинен поток.

Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

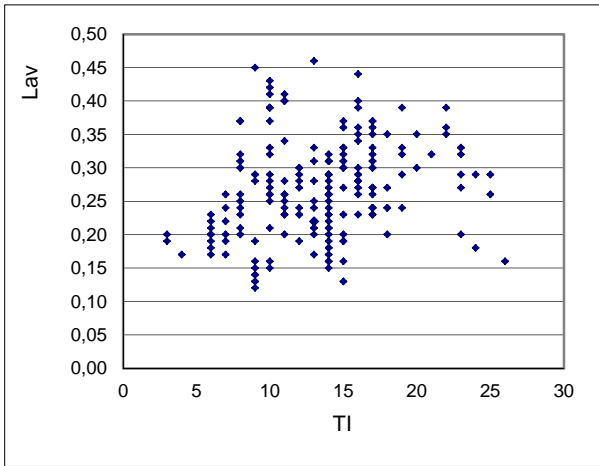
Зададена неравномерност на пътното платно (параметърът е показан по абцисата на графиката).

Междустълбие - L= 30 m
 Широчина на улицата 7 m,
 Височина на стълба 7 m
 Дължина на рогатката – 0 m



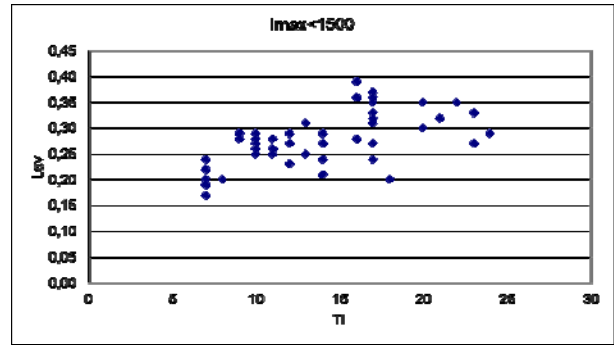
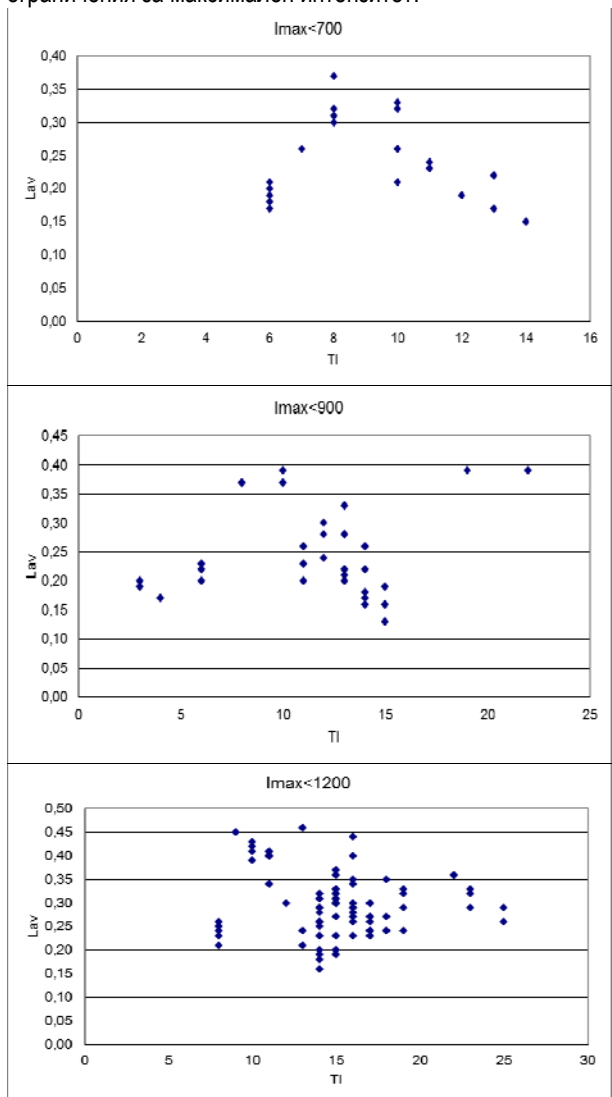
Фиг. 7. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя 1000lm и при различна зададена обща неравномерност за два различни максимални интензитета

- Зависимост на реализираната средна яркост на пътното платно от коефициента на заслепяване за различна геометрия на пътното платно и при различна ограничителни условия.



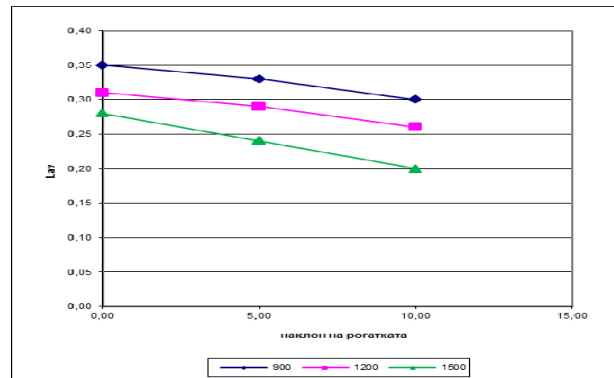
Фиг. 8. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя $1000lm$ в зависимост от коефициента на заслепяване.

- Зависимост на реализираната средна яркост на пътното платно от коефициента на заслепяване за различна геометрия на пътното платно и при различна ограничения за максимален интензитет:

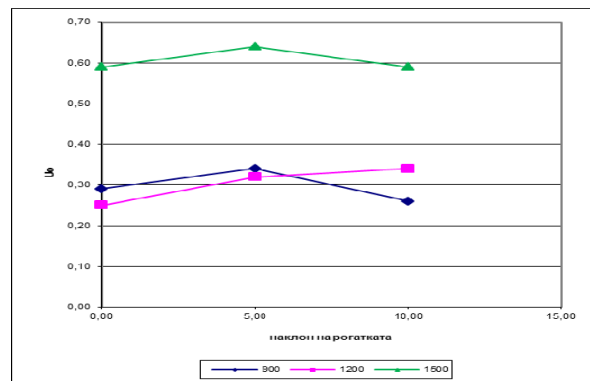


Фиг. 9. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя $1000lm$ в зависимост от коефициента на заслепяване при различен максимален интензитет.

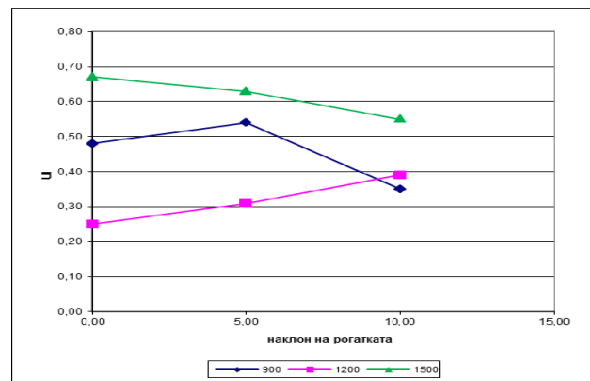
- Зависимост на резултатите при изчисленията от ъгъла на наклона на рогатката:



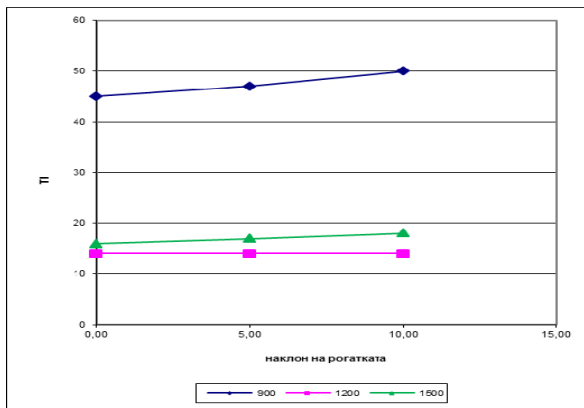
Фиг. 10. Реализирана средна яркост на пътното платно cd/m^2 при светлинен поток на осветителя = $1000lm$ в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



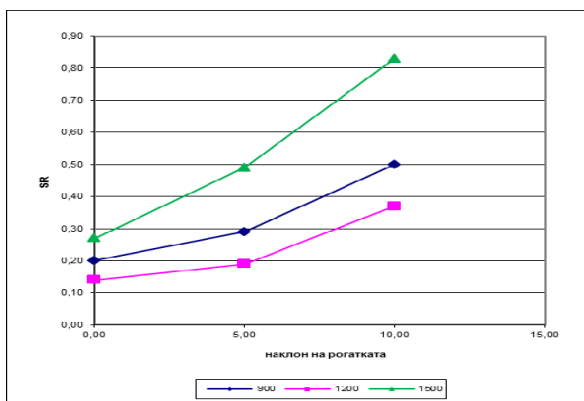
Фиг. 11. Реализирана обща неравномерност в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



Фиг. 12. Реализирана надлъжна неравномерност в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



Фиг. 13. Реализиран коефициент на заслепяване в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



Фиг. 14 Реализиран показател SR в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет

Изводи

1. С повишаване на наклона на рогатката спада средната яркост на пътното платно, коефициентът на заслепяване се повишава, показателят SR също се повишава, а различните равномерности не се променят с определена зависимост.

2. При получаване на по-високи реализирани стойности на коефициента на заслепяване се получава повишаване на реализираните стойности за средната яркост на пътното платно. Коефициентът на заслепяване оказва най-силно влияние върху максималния ъгъл на излъчване и съответно и на средната яркост на пътното платно.

3. Реализираната средна яркост на пътното платно зависи от ограничението на максималния интензитет. С увеличаване на максималния интензитет се реализират по-високи яркости на пътното платно.

Литература

- БДС EN 13201-2, 2003. Осветление на улици. Технически изисквания.
- Велинов К., 2010, Новости в системите за експлоатация и управление на уличното осветление, Национален семинар "Новости в осветителната техника", 16 декември, МГУ "Св. Иван Рилски", София;
- Василев Хр., Красимир Велинов, 2004, Оптимизиране на параметрите на улични осветителни уредби, Сборник с доклади на XII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление'2004, Международен дом на учените "Ф. Ж. Кюри", Варна, България, стр. 46
- Vassilev Hr., Velinov K., 2004, Optimization of the Light Distribution of Street Luminaires, 5. Ulusal Aydinlatma Kongresi ve Interlight Istanbul Fuarı, 7-8 Okt., Istanbul
- Велинов К., Хр. Василев, 2007, Влияние на геометричните параметри и нормативните ограничения върху оптималното светлоразпределение на уличните осветители, Сборник с доклади на XIII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление'2007, 12-13 Юни, Международен дом на учените "Ф. Ж. Кюри", Варна, България, стр. 94-104
- Василев Хр., Георгиев Ц., Велинов Кр., 2006, Апроксимиране на светлоразпределение осветителей чрез ортогоналные полиноми Лежандра, Калининград, Светлогорск, 19-21 септември, стр.109.
- Vassilev Hr., Velinov K., Gancho Ganchev, 2005, HIGH EFFICIENCY STREET LUMINAIRES, Conferinta internationala Iluminat 2005, (BALKANLIGHT 2005), Clush-Napoka, Romania, p.48-1, 48-7
- Василев Хр., Велинов Кр., 2006, Новая концепция освещения улиц, Шестая международная светотехническая конференция, Калининград, Светлогорск, стр.35.
- Велинов Кр., 2006, Осветление на пътища със светодиоди, Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски", 2006г. том 49, св. III Механизация, електрификация и автоматизация на мините, стр.159-162.
- EPS 1.4.2, 1996, Program for designing street lighting devices. Technical description, SD "Electroprograma" Sofia;
- Велинов К, В. Василев, 2012г., Повишаване на ефективността на улични осветители., Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски", Том 55, св. III, стр. 15-18
- <http://www.ilexa.de/> - ILEXA Ray-Viewer

Статията е препоръчана за публикуване от кат. "Електрификация на мините".

ПРЕВЕНЦИЯ, ИЗБОР НА МОДЕЛ, МЕТОДИ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ВЪТРЕШНАТА КОРОЗИЯ В ПОДЗЕМНИ ТРЪБОПРОВОДИ

Теодора Христова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, teodora@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В доклада са определени основните фактори, които влияят на развитието на вътрешна корозия. Обобщени са тенденциите в развитието на техническите средства за измерването ѝ. От изброените тенденции е направен изводът, че основната работа на учените е насочена към разработване на устройства за диагностициране по целия диаметър на тръбопровода, определяне на размера на пукнатините и развитие на мобилните роботизирани системи. Предложени са критерии за сравнение на методите и въз основа на тях като подходящи за средата, характерна за вътрешността на тръбите, са препоръчани за прилагане ултразвуков и вихровотоков принцип.

PREVENTION, MODEL SELECTION, METHODS AND TECHNICAL MEANS FOR MEASURING INTERNAL CORROSION OF UNDERGROUND PIPELINES

Teodora Hristova

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

ABSTRACT. The report identifies the main factors that influence the development of internal corrosion. It summarizes the trends in development of equipment for measuring of this corrosion. On the base of the trends it was made the conclusion that the main work of scientists is directed to the development of devices for diagnosing around the whole diameter of pipeline, determination of the size of the cracks and the development of mobile robotic systems. There were proposed criteria for comparing of different methods and on this base are recommended ultrasonic and eddy current principle as appropriate to the specific environment in the inside of the tubes.

Въведение

Механичните повреди са преобладаваща причина за отчетените инциденти в подземните тръбопроводи, като някои от тях с тежки последици за обществото (Белингам, WA, 1999 година). Независимо, че определянето им няма да доведе до предотвратяване на 70 до 80 процента от тези дефекти, то откриването на 10 процента от вътрешните корозионни петна е достатъчен успех за фирмите, експлоатиращи подземните комуникации. За разлика от водопреносните структури стоманените тръбопроводи, транспортиращи нефт и газ, са значително по-податливи на авария, инициирана от корозия поради високото си работно налягане и неблагоприятни условия на заобикалящата среда [Shamsuddoha, 2013].

От тези данни може да се направи изводът, че компаниите трябва да инвестират средства за измерване и защита от корозия на вътрешната повърхност на петролни и газопроводите. Много важно е разработването на технологии за намаляване на вътрешната корозия, чийто относителен дял не е особено висок, но в абсолютно изражение непрекъснато нараства, защото на този етап вътрешната корозия все още се подценява [Neil G. Thompson, 2003].

Аспекти при моделирането на корозионни поражения

Превенцията от вътрешна корозия обикновено включва активна и пасивна защита. Основни защитни средства са правилният избор на легирана стомана и фабрично поставяне на защитни покрития като лак, полимерни материали. За производство се използват стомани AISI 303, 304 L, 303 S и други, които са по стандарти ASTM A554, и ASTM A312. Вътрешните изолации са на основата на епоксидна смола, полиуретан, полиетилен или синтезиран материал от фенол и смола (Liquid Phenolic) [Христова, 2013]. Последният вид се препоръчва за нефтопроводите, защото издържа на CO₂, H₂S, CH₄. Активната защита на вътрешната повърхност е посредством електрохимична защита на външната, най-често катодна защита.

За поддържане на тръбопроводите се предвиждат ремонтни дейности, като са разработени устройства, които поставят изолации, без да е необходимо да се разкопават увредените участъци. За постигане и контролиране на тези мерки най-важното условие е редовна инспекция.

Мониторинг в разглежданата инфраструктура е трудна задача поради големия брой непредвидими променливи, като бързо променящи се експлоатационни условия, промени в налягането на флуида, ерозия в резултат на остатъчни продукти от корозия, наличие на агресивна среда. С цел предвиждане вида на корозионните поражения е необходим модел на динамиката на химичните процеси на вътрешната корозия, който трябва да обхване следните аспекти:

(1) Електрохимичната активност в подземните тръбопроводи и резервоари зависи от свойствата на пренасяния флуид, който в повечето случаи е слабо основен. Установено е, че според корозионното си действие най-агресивен е нефтът, след това газът, а най-малко водата. Причината е съдържанието на смес от нефт, серни съединения, Fe, Ni, Cu, V, Na и висока концентрация на соли.

(2) Химичните процеси по повърхността на метала, като натрупване на оксиди, които влияят върху електрохимичната активност и ускоряват или намаляват корозията. Възможно е подобни примеси да водят до ерозия или локални разрушения. Характерно за металните тръби е образуването на трислойни железни корозионни продукти: макропорест слой от черна ръжда (магнетит, Fe_3O_4) в контакт с метал, микропорест филм - смес от Fe_2+ и Fe_3+ , който покрива макрослоя, и най-горен слой на червената ръжда (главно гетит и хематит). Тези три слоя имат различно съпротивление помежду си и спрямо основния материал на тръбата. Въздействието на параметрите на средата като температура, pH на флуида, способност за обмен на катиони, повърхностни процеси също влияят на химичната активност. Например, смесването на нефт-вода с високо съдържание на соли води до развитието на локална корозия. Допълнително въздействие имат и различията на потенциала на вътрешната повърхност на подземната структура, които се индуцират от дефекти, възникнали при производството на стоманата, при свързване на тръбите, наличието въздух.

(3) Вида на движение на флуида, предизвикващ механична корозия. Освен химията на протичане на процесите, трябва да се вземе предвид движението на флуида през тръбата. В зависимост от числото на Рейнолдс потокът на флуида може да е ламинарен, преходен или турбулентен. Режимът на движение се дефинира като *ламинарен*, ако критерият на Reynolds е по-малък 2100, *турбулентен*, ако Reynolds е по-голям от 4000 и когато критерият на Reynolds е между 2100 и 4000 говорим за *преходен* режим на движение. Числото на Reynolds расте с повишаване на диаметъра на тръбата структура, плътността и налягането на флуида.

При ламинарни потоци при повишаване на скоростта на протичане на флуида расте скоростта на корозия, но все пак тя е бавна и обща. Големи загуби могат да се очакват в долната част на обекта. Едновременно с това флуидът пренася кислород, който реагира с металната повърхност. При по-висока скорост на флуида потокът е турбулентен и се иницират процеси по целия диаметър. Постепенно се повишава грапавостта на стената и следователно расте скоростта на корозия, развиват се локална, обща корозия и едновременно с тях и ерозия. В началото тя е бавна, защото тръбите са гладки, но после

скоростта се повишава поради грапавата корозирала повърхност. На този етап започват засилени процеси на развитие на интеркристална корозия [Juan Liang, 2013].

На базата на теоретични изследвания и от практиката е известно, че в магистралните тръбопроводи, които се изработват от стомана, потокът е турбулентен със скорост на флуида над 16 m/s, като може да достигне и 25 m/s. Въз основа на направения анализ е видно, че разрушенията във вътрешната повърхност на подземните комуникации са разнообразни и има голям риск от поява на дълбоки пукнатини, което изисква различни методи за наблюдение.

Тенденции в методите и техническите средства за измерване на вътрешна корозия

За измерването на корозионните поражения се прилагат и методите, характерни за външна корозия, които според принципа на функциониране са резистивен, капацитивен, магнитен, ултразвуков, вихровотоков, оптичен, инфрачервен, пиезоелектричен [Христова, 2008]. Датчиците, приложими при измерване на вътрешна корозия според функциите, които изпълняват, могат да се класифицират по следния начин:

1. Устройства за определяне на загубата на материал – работят предимно на принципа на електромагнитната индукция, промяна на големината на тока, капацитета или с ултразвукови вълни, като определят дебелината на стената на тръбата. Недостатък на метода е необходимостта от предварително калибриране при ненаранена повърхност на инфраструктурата. Невъзможно е използването на радиоактивен метод.

2. Устройства за установяване на пукнатини – ултразвукови, електромагнитни вълни, еластични вълни, вихрови токове. Неудобството при тези методи е нуждата от измерване под различни ъгли, за да се определи точно големината на дефекта.

3. Устройства, използващи геометрични средства - оценяват се промените на формата, здравината и т.н.; това могат да бъдат механични пръсти, които минават по повърхността - ултразвукови вълни, жироскопско изследване, капацитивен, резистивен метод, оптични камери.

4. Устройства за измерване на течове чрез инфрачервен, оптичен или топлинен метод. Те се влияят от параметрите на околната среда и не са точни. Обикновено системата е положена под тръбопровода и се задейства при авария. Погледнато от екологична и енергийна гледна точка аварийно състояние за подземните структури, пренасящи нефт и газ, е недопустимо и за това тези методи няма да се разглеждат.

За разлика от външната корозия при регистриране на вътрешната има определени специфики, които трябва да се вземат под внимание. Датчиците, измерващи външна корозия, предават сигнала от регистрираната величина в повечето случаи през проводник, докато в подземните линии се използват записващи устройства или безжична връзка. Поставянето на постоянни уреди е възможно само при полагане на тръбите или при основен ремонт. Затова за стари инсталации се използват роботизирани системи,

които инспектират по дължина линията на определено време. Едно от основните ограничения при измерване в магистрални тръбопроводи е захранването с енергия на датчиците, с което идентифицирането на дефектните участъци е нетривиална задача. Освен това голяма трудност се среща при диагностицирането на локална корозия и пукнатини, а те са едни от основните причини за аварии. Затова водещ критерий за избор на метод за наблюдение е точното регистриране на пукнатините, определяне тяхната дълбочина и локация. Въз основа на него са разгледани предимствата и недостатъците на методите за обследване. Установено е, че най-ниска себестойност имат уредите, конструирани на резистивен, магнитен или капацитивен принцип. Използват се за регистриране на обща корозия, но се влияят от агресивността на флуида (без магнитния), имат кратък срок на служба и проста конструкция. Ултразвуковият, магнитният и резистивният метод не са ефективни при откриване на крекинг корозията без прилагането на няколко измервания от различен ъгъл.

Ултразвуковите сензори са идеални и предпочитани пред други методи за неразрушаващо тестване на петроло- и газопроводи с цел откриване, оразмеряване на пукнатини и локализация. Измерването не зависи от материал, цвят и степен на прозрачност на покритието, а ултразвуковата вълна се разпространява и в извивките и разклоненията на инсталацията. Имат много добра устойчивост на промишлени среди (конструирани са като компаундни елементи, изцяло капсулирани в смола). Работят надеждно в промишлено замърсени среди с дим, прах, шум и агресивен флуид. Няма движещи се части в сензора, следователно тези устройства имат стабилна механика и дълъг експлоатационен живот, независимо от броя на операционните цикли. Има възможност за изграждане на мониторингова система по целия тръбопровод, която да предава в реално време. [Bickerstaff, 2002]. Недостатъци на системата са високата цена в сравнение с резистивните и капацитивните методи, за определяне прецизно на дефектите е необходимо измерване под различни ъгли, което е предпоставка за усложняване на системата. Чувствителни са към условия, като вятър, радио сигнали и доплерови ефекти [D.Isa, R.Rajkumar]. При повишаване броя на дефектите се намалява точността им.

Пиезодатчиците са подходящи за обследване на грапавост и локални дефекти по стените на подземната мрежа, определят вибрациите и структурните изменения в резултат на корозията. Нечувствителни са към електромагнитни лъчения, което ги прави подходящи за инспекция при тежки условия. Обикновено се съвместяват с мобилна система за измерване тип „гъсеница“. Недостатък е, че се влияят от агресивността на флуида и са чувствителни към други величини. Затова в практиката се е наложило пиезосензорите да работят чрез MEMS системи, или да се поставя и трети датчик с друг принцип на работа.

Чрез акустичните методи се диагностицират вътрешната грапавост на тръбата т.е. на нивото на корозия и локални дефекти. Подходящи са за сложни структури, където трудно могат да се приложат други устройства за наблюдение. Такива са градските тръбопроводни мрежи.

[Z. M. Hafizi, C.K. E. Nizwan] Недостатък е, че са чувствителни към радиосигнали и шумови сигнали, доплер ефекти, което ги прави неизползваеми в неконтролируема среда, каквито е подземната инфраструктура.

Магнитоиндуктивната технология с използване на разпространение на вихровите токове (eddy current) не се влияе от наличието на покритие или оксиден филм, каквито са изолираните метални стени. Не зависи също и от агресивността на флуида, извивките на тръбата. Може да определя точно дълбочината на пукнатините, дебелината на стените и мястото на поражение (външна или вътрешна страна), заради което се използва масово за подземна инспекция. За разлика от ултразвуковия мониторинг не се влияе от влажни повърхности. Магнитното поле и вихровите токове също се използват успешно за регистриране на стрес корозия и при магнитни материали.

Тъй като използването на датчици е скъпо, а в някои случаи трудноприложимо, за определяне на нивото на корозия се използват косвени методи. Те се основават на факта, че флуидът съдържа определена концентрация агресивни частици и се измерва количеството преминал флуид. Най-често се използва сензор за топлинен поток MEMS, който може да е вграден в жлеб в стената на тръбата. MEMS технологиите вече позволяват да се интегрират много сензори при единичен малък IC борд, като така отпада ограничението за следене само на една величина. Тази платформа осигурява лесна реализация, забележителен ефект и висока точност на откриване. Използването на подобно измерване не дава точни резултати за определяне на разрушенията от корозия, особено локална, но е вариант за избор на начините на обследване на вече поставени тръбопроводи [CN202403744, CN102620780].

С цел повишаване на точността и обхвата на действие на датчиците, учените разработват нови устройства. Тенденциите в иновативните технологии могат да се обобщят така:

- използване на радиални мембрани, които обхващат едновременно цялата вътрешна повърхност на структурата и позволяват регулиране на диаметъра на разположение на сензорите. Предимство на метода е възможността за радиално измерване в областта на завиване на тръбите и прилагане в роботизирана система. Недостатък е, че с времето се губи еластичността на мембраната, а точността зависи от скоростта на потока. При по-големи вдлъбнатини се раздалечават сензорите и точността на резултатите също намалява. Прилага се чрез резистивни, ултразвукови и капацитивни методи [AU2012203076, WO03083357, US4807484, CN2793713].

- радиално разположени електроди с цели обхващане на целия диаметър на обекта, откриване на локална корозия и повишаване на точността [CN102147384, Ru2139469, US3786684]. При тази система на свързване на сензорите също се намалява точността при наличие на големи вдлъбнатини, ето защо за постигане на многообхватност на работа при различни диаметри, чувствителните елементи са свързани с носещото тяло чрез пружини [US4457073].

- използване на многомодов диск, чийто диаметър може да се променя според диаметъра на тръбопровода, чрез прибавяне на нови модове [CN202502074]. Подходящи методи за прилагане са резистивни, ултразвукови, капацитивни. Недостатък в случая е невъзможността за преминаване на роботизираната система през наклонени участъци и завои.

- поставяне на монитор директно в обследвания обект, което позволява регистриране в реално време. За внедряването му има ограничение за диаметъра на тръбата, оскъпяване на технологията, необходимост от непрекъснато електро-захранване, неустойчивост на агресивни условия.

- използване на пиезоефект, който да дава енергия за придвижване на сензора, което позволява изследване на по-голяма дължина [CN201107299].

- придвижване от силата на компресирания въздух, като при висока скорост на флуида точността на измерването намалява [US4295092].

- използване на ултразвукови и вихровотокови методи, които дават възможност за оценка на корозионното състояние на изолирани с асфалт, парафин и други материали повърхности [US5892162].

- някои от методите позволяват едновременно мониторинг на корозия и картографиране на тръбопроводите [US2008041173, US2003010125].

- съвместяване на няколко датчика в едно устройство или използване на автоматична система с няколко функции – обследване, обработване на данните, дозиране на инхибитори или подаване на сигнал за ремонтни дейности в подземните структури, което понижава общите разходи за поддръжка [RU2304636, CN102644850, CN2574001, EP0605085, US7104147].

- почистване на главите на чувствителните елементи по време на работа за запазване на първоначалните характеристики [WO03083357].

- внедряване на сателитно предаване на информация [JP2003323688] или GPS технологии [US2006203411, GB2370583, US6992594].

- използване на материали със специфично действие за подобряване на точността. Например, при прилагане на магнитен метод анодът се изработва от нисколегирана или въглеродородна стомана. Катодът е от магнетик, който съответства по химическа природа с корозионната среда.

- използване на специфични метали за изработка на сензори при наличие на покритие във вътрешността на тръбопровода [RU2085906].

- изработване на системи за локално захранване, най-често чрез слънчеви панели [Gbenga Owojaiye, 2013].

- изработване на системи за самостоятелно излизане на датчика при изразходване на батерията [Ted Tsung-Te Lai].

Критерии за избор на система за измерване на вътрешна корозия

От изброените тенденции може да се направи изводът, че основната работа на екипите е насочена към разработване на устройства за диагностициране по целия диаметър на обекта, определяне на размера на пукнатините и

развитие на мобилните роботизирани системи. Предимствата на роботизираните пред стационарни системи са следните: поставяне на няколко датчика, които измерват различни величини, възможност за периодична замяна или ремонт на елементи, получаване на резултати в реално време, използване на едно устройство за голяма дължина от тръбопровода и др. Предвид многообразието от системи за мониторинг е труден изборът на подходяща. За целта е необходимо да се изработят критерии, според които методите да могат да се сравняват в зависимост от целите на измерването. В основата на дефинирането им влизат показатели като вид на корозионните разрушения, форма и размери на инфраструктурата, ниво на придвижване и автоматизация на роботизираната система, вид на пренасяния флуид и начин на движението му. За правилен избор на система за диагностика трябва да се оценят следните критерии:

- точност на сензора
- обхват на уреда, което има особено значение при стационарни системи
- предназначение – обща, локална корозия или двете
- възможност да обследва в завоите и разклоненията на структурата
- съвместимост с движението на потока
- пасивна или активна система на предаване на данните до базата
- измерване наличието на твърди частици и примеси във флуида
- устойчивост в агресивна среда
- ниво на автоматизация на работа, придвижващ датчика
- възможност да диагностицира по диаметъра на тръбата
- нисък разход на енергия
- надеждност

Оценката на приложимостта на методите според цитираните критерии е трудна задача поради многообразието от сензори и техните характеристики. Известно е, че контактните методи (резистивните, индуктивен или капацитивен) са подходящи и точни за измерване в агресивни почвени условия [Петров, Велев, 2011], но при наличие на примеси във флуида точността им намалява. Безконтактните методи (ултразвуков, оптичен, инфрачервен, вихровотоков) също се влияят от примесите във флуида, но в по-малка степен, което ги прави подходящи за мониторинг на вътрешна корозия.

Затова при изграждане на тръбопровода с голям диаметър, където средата е агресивна и потокът – турбулентен, на първо място трябва да се избере подходящ метод за оценка. Както беше споменато, до най-голям риск от авария води образуването на пукнатини и стрес корозията. По този показател се препоръчват ултразвукови и вихрови методи за инспекция. Освен това те са устойчиви при работа в агресивни среди. Техни предимства са високата точност: до 0,2 mm за ултразвуковите и до 0,5 mm - за вихровотоковите. Стационарните и мобилните системи, конструирани по тези методи, обследват обектите по целия диаметър, в

завоите и разклоненията, дават възможност за он-лайн предаване на данни.

По показател разход на енергия, контактните сензори само предават сигнали, докато безконтактните имат предавател и приемник. Предимството на пиезо-резистивните и кондензаторни методи е установено от техния разход в порядък на 10 mW, когато се работи непрекъснато, докато ултразвуковите консумират 550 mW за една и съща операция. Магнито-резистивните имат малко по-висока консумация от порядъка на 20 mW [<http://www.clampon.com/products/topside/corrosion-erosion-monitor/specifications/>]. Тези констатации ограничават внедряването на ултразвуковите сензори само за периодични проверки и наблюдения, но роботизираните системи са предназначени точно за такива инспекции. Когато се използва неподвижна система за измерване е редно да се отбележи, че въпреки своята голяма консумация ултразвуковите и вихровотоковите прибори действат на определен обхват по тръбопровода и диагностицират по целия диаметър, докато пиезо-резистивните и кондензаторните имат по-малък обхват на действие. За пример в изградена стационарна система на 100км са разположени 112 ултразвукови трансдусера, докато за инспектиране на същия участък с резистивни датчици, ще са нужни много повече устройства. Ето защо за реално сравнение на сензорите по енергиен показател е редно да не се разглежда консумацията на едно от тях, а тя да се изчисли за определен за участък.

Изводи

Устройствата за измерване на вътрешна корозия в подземните тръбопроводи се различават от тези, използвани за инспекция на повърхността. Основен фактор за тази разлика са спецификите на средата, на базата на които са обобщени основните тенденции в разработването на датчици за измерване на вътрешна корозия. За определяне приложимостта на методите за регистриране на нивото на корозия са разгледани основните корозионни фактори в тръбопроводите. Поради многообразието на методите и техните специфични свойства не е възможно те да се оценят, ето защо са препоръчани критерии, според които те да се сравняват. Предвид условията във вътрешността на подземните структури и необходимостта от измерване на големината и локализацията на пукнатини се препоръчва прилагането на ултразвуков или вихровотоков метод. Все пак, поради ниската си консумация на енергия и простота на действие като задача пред специалистите стои изработването на резистивен или кондензаторен датчик за измерване на локална корозия.

Литература

- Петров, Велев, 2011, *Нов метод за определяне на степента на корозия на стоманени заземители чрез използване на индуктивни датчици*, Годишник МГУ, т.54, 151-154;
- Христова Т., 2008, *Наблюдение на корозионното състояние на подземни тръбопроводи с помощта на сензорни устройства*, МНС на МГУ, том 51;
- Христова Т., 2013, *Предимства и недостатъци на известните изолации. Критерии за избор на изолация според критериите и оценяване на риска за възникване на корозия*, Годишник МГУ, т. 56, 128-132
- Bickerstaff, R., Vaughn, M., Stoker, G., 2002, *Review of sensor technologies for in-line inspection of natural gas pipelines*, Sandia National Laboratories. Hassard, M. and Garrett M.; D.Isa, R.Rajkumar, *Ultrasonic Sensor Data Processing using Support Vector Machines*;
- Gbenga Owojaiye, Yichuang Sun, 2013, *Focal design issues affecting the deployment of wireless sensor networks for pipeline monitoring*, Ad Hoc Networks 11, 1237–1253;
- Juan Liang, Anqi Den, Rongjing Xie, Mylene Gomez, Jiangyong Hu, Jufang Zhang, Choon Nam Ong, Avner Adin, 2013, *Impact of flow rate on corrosion of cast iron and quality of re-mineralized seawater reverse osmosis (SWRO) membrane product water*, Desalination, Vol. 322, 76–83;
- Neil G. Thompson, 2003, *Gas and liquid transmission pipelines. Summary Analysis of Results, Corrosion Control and Prevention*, CC Technologies, Inc, Dublin, Ohio, www.corrosioncost.com/pdf/gasliquid.pdf;
- Pots Bert; Mateer Mark; Scott P K; Fagbayl Kola, 2005, *System and method for measuring electric current in a pipeline*, US2008276731;
- Shamsuddoha, Mainul Islam, Thiru Aravinthan, Allan Manalo, Kin-tak Lau, 2013, *Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs*, Composite Structures, Vol. 100, 40–54;
- Ted Tsung-Te Lai, Wei-Ju Chen, Kuei-Han Li, Polly Huang, Hao-Hua Chu, *TriopusNet: Automating Wireless Sensor Network Deployment and Replacement in Pipeline Monitoring*, National Taiwan University, Taipei;
- Z. M. Hafizi, C.K. E. Nizwan, M.F.A .Reza& M.A.A.Johari, *High Frequency Acoustic Signal Analysis for Internal Surface Pipe Roughness Classification*, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Malaysia

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.

ПРОГНОЗИРАНЕ ЧРЕЗ НЕВРОННА МРЕЖА НА НАТОВАРВАНЕТО НА ДВИГАТЕЛ, ЗАДВИЖВАЩ ПОЛУАВТОГЕННА МЕЛНИЦА

Теодора Христова¹, Веселин Христов², Иван Минин³

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, teodora@mgu.bg

² Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, veso@mgu.bg

³ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, minin@dir.bg

РЕЗЮМЕ. С цел предвиждане натоварването на двигател, задвижващ полуавтогенна мелница, са обучени невронни мрежи. Направени са изводи относно възможностите за прогнозиране на работните параметри на двигателя в реално време чрез невроморфни макроси. Резултатите от изследването сочат, че многослоен персептрон с 10 - 20 възела в скритите слоеве дава най-добри резултати.

FORECASTING THE LOAD THROUGH NEURAL NETWORK ENGINE THAT POWER SAG MILL

Teodora Hristova¹, Veselin Christov², Ivan Minin³

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, teodora@mgu.bg

² University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, veso@mgu.bg

³ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, minin@dir.bg

ABSTRACT. In this paper, in order to predict the load on the engine which drives the SAG mill are trained neural networks. Conclusions are made concerning the opportunities to predict the performance parameters of the engine in real-time on the base of neuromorphic macros. The results of the study indicate that the multilayer perception with 10-20 knots in the hidden layers produces the best results.

Увод

В съвременните условия на управление на технологичните процеси за прогнозиране на натоварването на машините прилагането на невронни мрежи не е честа практика, особено в България. В минния бранш има експериментални опити за въвеждането им [Христов, Грабатов, 1998], но няма реално приложение. През следващите години автоматизираното електро-задвижване ще бъде обвързано с интелигентното самообучаващо се управление. Предполага се, че през 2017г. 10% от компютрите ще са обучаващи се, а не обработващи. Gartner цитира факта, че невронните мрежи се развиват и IBM има библиотека от 150 невроморфни макроси. Невронните мрежи ще се прилагат за прогнозиране на пазара, на ценовите криви, на търсенето и предлагането на стоки и специалисти. До 2024 г. поне 10% от дейностите, потенциално опасни за човешкия живот, ще изискват задължителната употреба на интелигентни самообучаващи се системи [3].

През последните години определянето на параметрите на електрическите двигатели е немислимо без изчислителни машини и програми. При определяне на мощността на двигателите на барабанните мелници се използват алгоритми, в които като входни параметри влизат размерите, ъгловата скорост и натоварването на мелниците

със смилаци тела. При повечето от тях, обаче, се оказва, че изчислената мощност обикновено е по-ниска от необходимата, което води до инсталиране на много по-мощен двигател от изчисления.

За улесняване на проектантската дейност изчислението на мощността на двигателите, задвижващи барабанните мелници, се автоматизира чрез използване на компютърни програми. Най-простата среда за това е „Microsoft EXCEL“ или „MatLab“. Въпреки въвеждането на коригиращи коефициенти изчислената мощност на двигателя отново се различава от инсталираната от завода-производител. Това най-вероятно се дължи на факта, че много от входните параметри, участващи в методиките за пресмятане на мощността на електро-двигателя на мелницата, не могат да бъдат зададени коректно и се различават от действителните. Например, при определяне на топковия товар на барабанните мелници се приема, че всички топки в барабана на мелниците са с еднакъв диаметър. От практиката обаче е известно, че при работа топките се износват и намаляват своя диаметър, което води до повишаване на плътността на смилачната среда, на нейното тегло и до повишаване на изразходваната мощност за издигане и предаване на кинетична енергия на топките.

Състояние на проблема

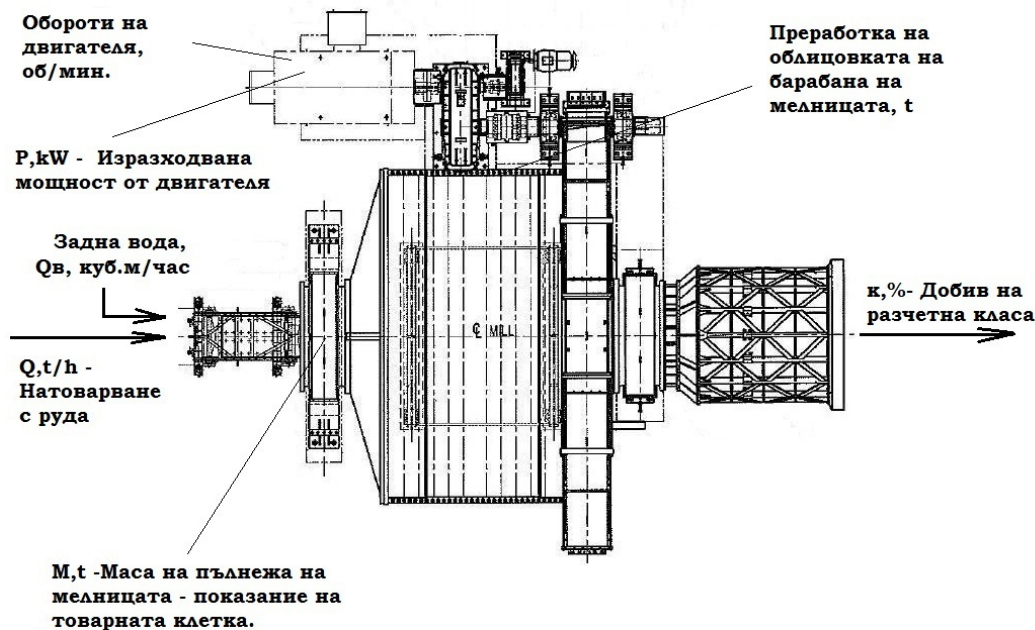
За решаване на този проблем са обучени невронни мрежи [Христова, Минин, 2012], чрез които да се определя по-точно мощността на електродвигателите на барабанните мелници. За обучението им се избра универсална програма QwikNet 2.23, в чийто масив могат да се използват няколко вида обучаващи алгоритъма. Създаден е масив от данни от размерите и натоварването на работеща мелница със зависими и с независими входни данни, а на изхода на невронната мрежа са зададени параметрите на двигател, работещ в реални условия. Зависими входни параметри са: дебелина на облицовката, mm и маса на топковия или прътов товар, kg, а независими един от друг са: вътрешен диаметър на барабана, m; дължина на барабана, m с обем на барабана, m³ и обороти на мелницата, min⁻¹ и относителна ъглова скорост на барабана, %. На създадените невронни мрежи са изчислени теглата на възлите, като принципът на обработване на данните за изчисление е следният: въвеждат се входните и определените по експертна оценка или взети от практиката стойности на изходни параметри. След това мрежите се обучават до определен процент грешка. Получените тегла показват степента на влияние между всички входове и изходи. След експериментите беше установено, че в невронната мрежа със зависими входни параметри, поради наличие на връзка между входните данни, прогнозирането на мощността на двигателя е с много по-ниска грешка. За

пример корелационната грешка при обучение със зависими входни параметри е (Final_RMS_error) 1.00619e-005, а максималната грешка е (Final_Max_error) - 3.76222.10⁻⁵, докато при независими входни параметри е: (Final_RMS_error) 0.383008.

Стигна се до заключение, че при обучение на невронна мрежа е необходимо да има повече входни данни, като някои от параметрите трябва да имат връзка. Това важи, обаче, когато параметрите са зависими от конструкцията на обекта, както е в случая. Така при определянето на мощността на двигателя при липса на един или два входни параметъра, ако той е зависим от останалите параметри, получената стойност ще е точна. [Христова, Минин, 2012].

В много случаи, в практиката се изисква управление на процесите съобразно с промяната на технологичните параметри в реално време. Въз основа на досегашните експерименти с невронни мрежи екипът реши да обучи нова с цел определяне на изходящата мощност на електродвигател на базата на технологични данни. По този начин при промяна на натоварването, инженерите ще имат представа за процента на неизползваемост или пренатоварване на задвижващите мощности.

За входни данни са взети технологични параметри, измерени на мелница тип SAG 8,5 x 5,3, показани на Фиг.1.



Фиг. 1. Схема на измерваните параметри

За обучение е използвана програмата Stat Soft Statistica Inc. варианти 7 и 8. Една от основните трудности при анализ на данни с невронни мрежи е подборът на вида мрежа и нейните характеристики, които са най-подходящи за конкретния анализ на данните, с които разполагаме, което е предимството на Statistica. Системата Statistica 7 притежава модул Neural Network за анализ на данни чрез невронни мрежи. В този модул е вграден инструментът Intelligent Problem Solver (IPS), който позволява на

изследвателя да даде основни параметри на 5 вида невронни мрежи и да ги изпробва върху своите данни. По време на изпробването IPS обучава десетки разновидности от избраните мрежи и накрая дава няколко с най-подходящи показатели.

В настоящия анализ са взети характеристиките на 37 обучаващи примери при различни натоварвания на обекта.

Целта е с тези данни да се намери и обучи регресионна невронна мрежа, която по зададени на нейния вход:

- L - обучаващи данни;
- В - тестващи данни,

може да определя потреблението на електроенергия на търсения обект, в случая мелница.

За да се извърши анализът в IPS се задават следните видове невронни мрежи:

- Многослоен перцептрон. (Multi-Layer Perceptron – MLP). Той има един, два или повече скрити слоеве. В нашия случай се изпробват с един и с два скрити слоя. Входът към възлите, различни от входните, е претеглена сума от изходите на невроните от предния слой, а активираща функция може да е нелинейна функция, най-често сигмоид. Използва се главно обучение с обратно разпространение, но също спрегнато градиентно спускане, квази-нютон метод и др.

- Мрежи с радиални базисни функции (Radial Base Function - RBF). Това е трислойна мрежа с разпространение напред, в която невроните от скрития среден слой са радиални, а невроните от изходния слой са с псевдо-линейна активираща функция. Активиращата функция на радиалния неврон се нарича радиална базисна функция и зависи от разстоянието на входния сигнал до точка определена като централна точка на неврона. Най-често се избира Гаусова функция. Обучението на мрежата включва два етапа: намиране на оптимални централни точки за радиалните неврони и обучение на невроните от изходния слой. Обучаващи методи са: методи на подизвадките и на k – средно най-близък възел.

- Обобщени регресионни невронни мрежи (Generalized Regression Neural Network – GRNN). Те са модификация на вероятностните невронни мрежи. Основните им характеристики са: мрежа с два скрити слоя, с разпространение напред. Първият слой е с радиални неврони. Препоръчва се броят им да е равен на обучаващите данни, което е трудно постижимо при голям брой данни. Вторият скрит слой се състои от неврони, които са с един в повече от изходните. Задачата им е да изчислят претеглено средно от сигналите на невроните от предния слой и да го дадат на невроните от изходния слой. Обучението на този вид мрежи е сходно с това на тези с радиални базисни функции. Те работят по-бавно и изискват повече памет.

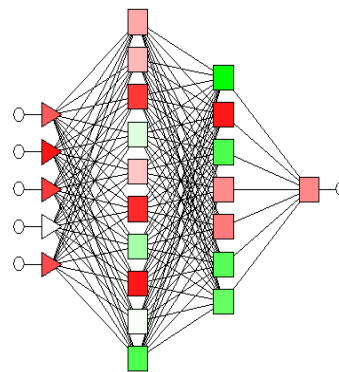
Резултати от изследването

Обучаващата извадка е от 37 данни, които се разделят по случаен принцип на 27 записа за обучение и 10 записа за тестване на намерените мрежи. В резултат от работата на IPS са намерени като най-подходящи два многослойни перцептрона (MLP) с по два скрити слоя и две невронни мрежи с радиални базисни функции (RBF), дадени в Таблица 1.

Използвани са следните методи на обучение и самообучение: BP – обучение с обратно разпространение (Back Propagation), KM – К средно (K Mean), CG – спрегнато градиентно спускане (Conjugate Gradient Descent), KN – К-ти най-близък съсед (K-Nearest Neighbor) и PI – псевдо-инвертиране (Pseudo-Invert).

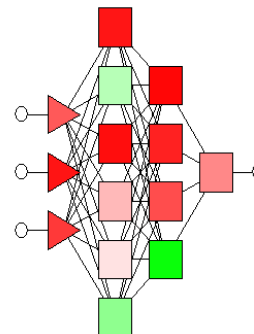
Известно е, че при обучаване на невронна мрежа с повече входове се постига по-висока грешка и по-ниска достоверност на резултатите. При нарастване на броя на входовете се е повишава трениращата грешката, обаче се наблюдава намаляване на грешката при тестване. Това се дължи на силната зависимост между входните параметри т.е. на технологичните величини. Следователно за прогнозиране на консумацията на електроенергия на двигателя прилагането само на технологични величини не е достатъчно. Необходимо е да има и конструктивни параметри. Данните от изследванията са представени в таблица 1 и таблица 3.

Profile : MLP 5:5-10-7-1:1 , Index = 4
Train Perf. = 0.018914 , Select Perf. = 0.000000 , Test Perf. = 1.826073



Фиг. 2. Невронна мрежа с един изключен вход

Profile : MLP 3:3-6-4-1:1 , Index = 9
Train Perf. = 0.028206 , Select Perf. = 0.000000 , Test Perf. = 5.629580



Фиг. 3. Невронна мрежа с три входа

Поради силната зависимост на входните параметри един от друг, обучаващата програма предлага мрежи, в които е изключен един от зависимите входове. Изключването на един вход за невронна мрежа с подадени 5 входа е визуализирано на фиг. 2. При други симулации, програмата предложи мрежи с изключен вход, стойността на който се изменя в много малки граници. Това доказва, че IPS модула подсказва редукция на броя на входовете, но в нашия случай е трудно да се намери необходимият брой взаимно независими параметри фиг.3.

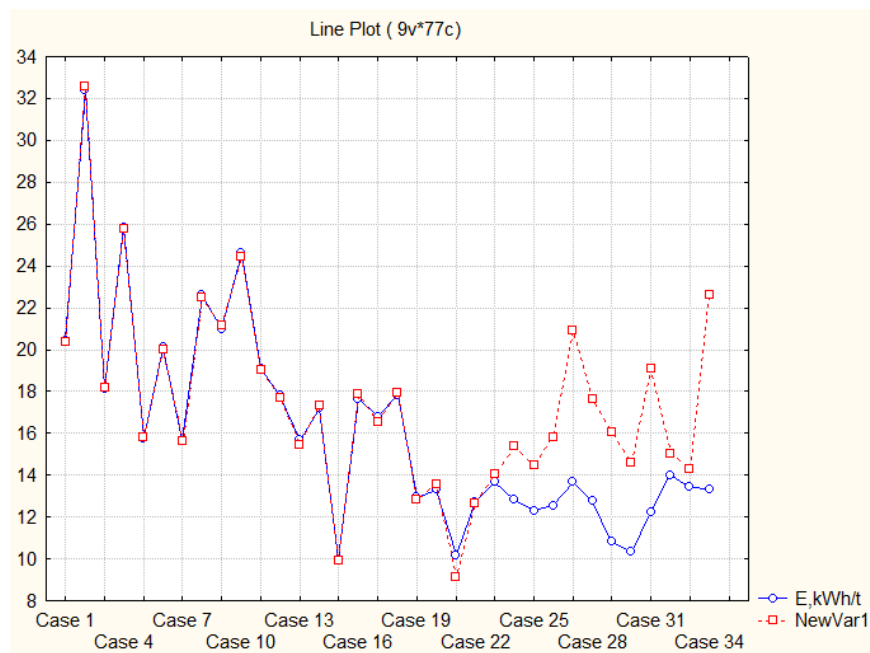
Бяха направени два вида симулации с различен брой на скритите възли. Установи се, че при повишаване на броя на междинните (скритите) възли грешката при обучение намалява, но има опасност от преобучение на мрежата, което би довело до увеличаване на грешката при тестване, което се доказва от таблици 1 и 2. В единия

случай е зададено, че в скритите слоеве може да има до 6 възела, а в другия до 10. В случая при 6 възела, IPS предлага като най-добри мрежи тези с два скрити слоя, което повишава броя на възлите (2x6). При 10 възела IPS предлага мрежи с един скрит слой. И в двата случая броят на възлите е почти еднакъв. Същият резултат се потвърждава с мрежите с независими параметри с три входа.

За добри резултати се избира мрежа (MLP 5:5-6-6-1:1), чиято корелация между обучаващите и получените от мрежата данни е 0.85938 и е достатъчна. При три входни параметъра тя е 0.80747 (фиг.3) за MLP 3:3-10-7-1:1 (таблица 3), което също е приемлива стойност. Кривата на реално измерените и предвидените данни е показана на фиг.4.

Таблица 1. Невронни мрежи с пет входа със зададени 10 междинни възела

Profile	Train Perf.	Test Perf.	Train Error	Test Error	Training/Members
MLP 4:4-10-8-1:1	0.027654	7.621368	0.006007	0.662251	BP100,CG20,CG59b
MLP 5:5-8-1:1	0.062686	0.875287	0.010897	0.075888	BP100,CG17c,CG1b
MLP 5:5-8-1:1	0.058421	1.317903	0.010153	0.110610	
MLP 4:4-5-1:1	0.154809	1.68229	0.026929	0.158571	BP100,CG20,CG8b
MLP 4:4-7-1:1	0.111652	1.80080	0.019506	0.162725	BP100,CG20,CG17b
MLP 4:4-8-1:1	0.093595	3.36325	0.016267	0.256430	BP100,CG20,CG4b
MLP 4:4-9-1:1	0.072481	2.87789	0.015745	0.281779	BP100,CG20,CG6
MLP 4:4-10-6-1:1	0.045059	3.78923	0.009789	0.412534	BP100,CG20,CG58b



Фиг. 4. Крива на реално измерените и предвидените данни

Таблица 2. Пет възела зададени 6 междинни възела

MLP 4:4-6-4-1:1	0.030841	1.985888	0.006700	0.209390	BP100,CG20,CG65b
MLP 5:5-6-6-1:1	0.029964	2.484024	0.006525	0.199884	BP100,CG20,CG47b

Таблица 3. Три независими входни параметри и зададени 6 и 10 междинни възела

Profile	Train Perf.	Test Perf.	Train Error	Test Error	Training/Members
RBF 3:3-6-1:1	0.656460	2.244820	0.128286	0.220023	KM,KN,PI
MLP 3:3-6-4-1:1	0.028206	5.659580	0.006128	0.390170	BP100,CG20,CG643b
MLP 3:3-10-7-1:1	0.020200	2.824885	0.004390	0.166350	BP100,CG20,CG352b
MLP 3:3-6-3-1:1	0.654349	1.44267	0.113715	0.113340	BP100,CG20,CG33b

Изводи

Предвиждането на разхода на електроенергия на двигателите според технологичните параметри чрез невронни мрежи е възможно. За постигане на по-висока точност на предвиждането са необходими технологични данни, които се променят в по-големи диапазони, т.е. при пускане и спиране на обектите, за да обхваща преходни процеси и екстремални ситуации. За по-голяма представителност и достоверност на резултатите задължително трябва да се включат и конструктивни параметри като: размер на мелницата, дебелина на облицовката или измерване на друг технологичен параметър. Следва заключението, че невронните мрежи са подходящи за прогнозиране на технологични величини.

Могат да се дадат следните препоръки за достоверно обучение на невронна мрежа с цел внедряване в реалното управление на технологичен обект:

- Търсене на технологично независими параметри.
- При наличие на голям брой зависими параметри те да се изменят в съизмерими диапазони.
- Диапазонът на изменение на обучаващата извадка да е достатъчно висок.
- Обучаващата извадка да е значително по-голяма от използваната в това изследване.
- Правилен подбор на критерии за оптималност, например разход на електроенергия, който в най-висока

степен зависи от мощността на електродвигателя, задвижващ обекта.

- От направеното изследване се вижда, че най-високи резултати дават многослойни перцептрони с един или два скрити слоя с общ брой на скритите възли от 10 до 20. При опит да се намали броят на възлите в даден слой IPS повишава броя на слоевете.

Литература

Христова Т, И. Минин, 2012, *„Определяне на мощността на двигателите на барабанните мелници чрез невронна мрежа с независими входни параметри“*, Годишник МГУ, т. 55, стр.178-181 *„Determination of the drum mills' engine capacity by using neural network with independent input parameters“*.

Христов В., Ст. Гарабитов, 1998, *„Оптимизация на задвижването на лентов транспортър с цел минимално импулсно натоварване на електродвигателя“*. Национална конференция *„Автоматика и Информатика '98“*, т.6 *„Автоматизация на минната промишленост“*, стр.92-95.

http://computerworld.bg/44737_gartner_top_10_strategicheski_it_predskazaniya/

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.

АНАЛИЗ НА РУДНИЧНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ С ИЗОЛИРАНА НЕУТРАЛА

Владимир Перпелицев, Иван Стоилов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Изведени са аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и тока на земно съединение за мрежите с изолиран звезден център. За руднични мрежи с напрежение 6kV са построени графични зависимости на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение при различни стойности на капацитета и активната изолационна проводимост на фазите спрямо земя. Анализирани са зависимостите на тока на земно съединение от големината на преходното съпротивление към земя.

ANALYSIS OF MIDDLE VOLTAGE ELECTRICAL GRIDS WITH ISOLATED NEUTRAL GROUNDING IN MINES

Vladimir Perpelitsev, Ivan Stoilov

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

ABSTRACT. In the current paper are led analytic equations for voltage with zero successions, voltages compared to earth and earth fault current in grids with isolated neutral grounding. There are simulated graphical relationships between voltage with zero succession and earth fault current, at different capacities to ground and active insulation conductivity phase to ground in mine middle voltage electrical grids 6kV. In analysis is led relation between earth fault current and magnitude of transition resistance to ground.

1. Въведение

Режимът на работа с изолиран звезден център е най масово прилаганият в откритите рудници у нас. Вторичните намотки на трансформаторите 6kV, като правило, са свързани в триъгълник, поради което неутралната точка физически отсъства. Правилникът за безопасност на труда при разработване на находища по открит начин (1996) ограничава прилагането на този режим за мрежи с максимален ток на земно съединение 15A, но на практика това изискване не се спазва. Голяма част от електрическите мрежи 6-20kV в нашите минни предприятия работят с изолиран звезден център при капацитивен ток, значително надвишаващ регламентирания 15A.

Исторически режимът на работа с изолиран звезден център е първият, приложен в мрежите средно напрежение (Нанчев Н., 1955). Основните му предимства са:

- малък ток в мястото на повредата (при ниски стойности на капацитета на мрежата към земя);
- възможност за работа известно време при наличие на земно съединение в мрежата.

Правилникът за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин изисква автоматично изключване от релейната защита при възникване на земно съединение, така че второто от изброените предимства не е актуално у нас .

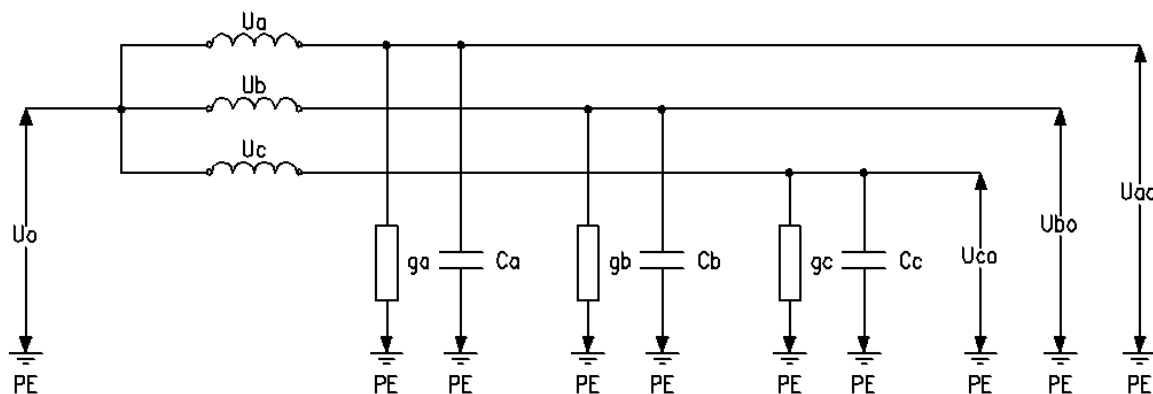
Недостатъците на този режим на неутралата са (Багаев В., 2009; Пенчев С., 2011):

- възможност за възникване на дъгови пренапрежения при малки токове в мястото на земно съединение;
- възможност за възникване на многоместни повреди (излизане от строя на няколко електродвигателя, кабели) при пробив в изолацията в други изводи, поради дъгови пренапрежения;
- възможност за продължително въздействие на дъговите пренапрежения върху изолацията, което води до намаляване на нейния срок на служба;
- необходимост изолацията на електрооборудването спрямо земя да бъде оразмерена за линейното напрежение;
- възможност за възникване на късо съединение през земя и съответно големи поражение на електрооборудването;
- трудно откриване на мястото на земно съединение;
- опасност от електротравми на персонала при продължително съществуване на земното съединение;
- трудности при обезпечаването на правилна работа на релейната защита, тъй като реалният ток на земно съединение зависи от режима на работа на мрежата (броя на включените изводи).

Недостатъците на режима на работа с изолирана неутрала са много съществени, а предимството за възможност за работа с еднофазно земно съединение е доста спорно. Така винаги има вероятност за възникване на второ земно съединение на други изводи и съответно едновременно изключване на два кабела, два двигателя или въздушни линии.

Това е основната причина в много страни като САЩ, Канада, Англия, Австралия, Белгия, Франция, Португалия и др. да се откажат от системата с изолиран звезден център още в 50-те години на миналия век. От 2003г. в Русия за

мрежите средно напрежение са разрешени всички режими на работа, освен системата с директно заземен звезден център (Сирота М., 1985).



Фиг. 1.

2. Аналитични зависимости

Означенията на показаната на фиг.1 мрежа с изолирана неутрала на трансформатора са, както следва:

- напрежение на неутралата \dot{U}_0 ;
- напрежение на фазите спрямо земя \dot{U}_{a0} , \dot{U}_{b0} , \dot{U}_{c0} ;
- фазни напрежения \dot{U}_a , \dot{U}_b , \dot{U}_c ;
- активни изолационни проводимости на изолацията към земя g_a, g_b, g_c ;
- капацитет на фазите спрямо земя C_a, C_b, C_c ;

Несиметрията в активните изолационни проводимости се дефинира чрез въведения векторен коефициент (Стоилов И.Г., 1988):

$$\dot{K}_r = \frac{g_a + a^2 g_b + a g_c}{g_a + g_b + g_c}$$

Несиметрията на капацитетите спрямо земя се дефинира чрез векторен коефициент (Нанчев Н., 1955):

$$\dot{K}_c = \frac{C_a + a^2 C_b + a C_c}{C_a + C_b + C_c}$$

При теоретични изследвания, свързани с електробезопасността, работата на защитите от земни съединения и особено при анализ на входните параметри на защитите е необходимо да се оцени влиянието на естествената несиметрия в мрежата (Стоилов И., 1988). Чрез коефициентите на несиметрия при необходимост може да се отчете влиянието на естествената несиметрия на активните изолационни проводимости и несиметрията на капацитета на фазите спрямо земя върху напрежението с нулева последователност, напреженията на фазите спрямо земя и тока на еднофазно земно съединение.

При въвеждане на означенията: $g_0 = \frac{g_a + g_b + g_c}{3}$ -

средна активна проводимост на фаза спрямо земя;

$C_0 = \frac{C_a + C_b + C_c}{3}$ - среден капацитет на фаза спрямо

земя;

$tg\delta = \frac{g_0}{\omega C_0}$ - обобщен показател на изолацията спрямо

земя, могат да се напишат следните зависимости:

2.1. Напрежение с нулева последователност

При еднофазно земно съединение в мрежите с изолиран звезден център върхът на вектора на \dot{U}_0 , описва полуокръжност. Напрежението с нулева последователност при земно съединение през преходно съпротивление g' се определя с изразите:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg\delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg\delta + j) + g'_a} \quad (1)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg\delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg\delta + j) + g'_b} \quad (2)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg\delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg\delta + j) + g'_c} \quad (3)$$

2.2. Напрежения на фазите спрямо земя

Напреженията спрямо земя при еднофазно земно съединение се определят с уравненията:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]; \quad (4)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]; \quad (5)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]. \quad (6)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (7)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (8)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (9)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]; \quad (10)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]; \quad (11)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]; \quad (12)$$

2.3. Ток на земно съединение

Токът на земно съединение през преходна проводимост g' се определя с изразите:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{I}_a = U g'_a \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]; \quad (13)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{I}_b = U g'_b \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (14)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{I}_c = U g'_c \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]. \quad (15)$$

3. Изследване на параметрите на мрежите в зависимост от големината на преходното съпротивление при земно съединение

Изследването е проведено при следните допускания:

- симетрия в активните и капацитивните изолационни проводимости на мрежата спрямо земя;
- изменение на стойностите на преходната проводимост при земно съединение g' от 0 до 1S (1Ω);
- линейно напрежение на изследваната мрежа - 6 kV;
- земното съединение се реализира във фаза А.

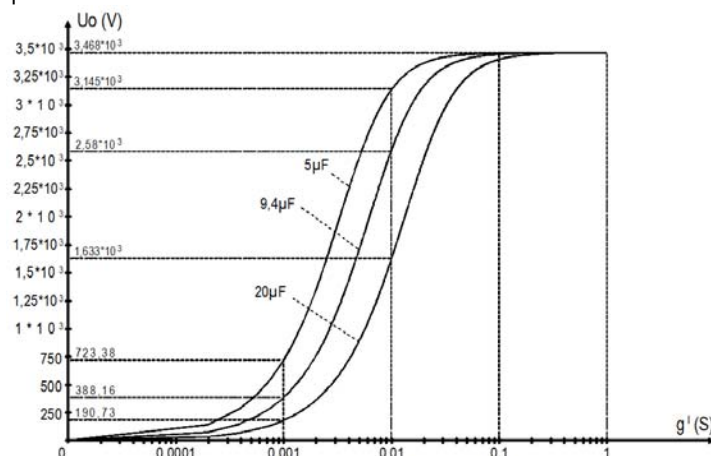
На база на изведените уравнения с помощта на програмата „MathCad“ са получени следните зависимости:

3.1. Ефективна стойност на напрежението с нулева

последователност \dot{U}_0 във функция от преходното съпротивление при земно съединение g' (фиг. 2).

Възприето е изолационната проводимост на фазите спрямо земя $g_a = g_b = g_c = 0,000001S$ (1MΩ).

Напрежението с нулева последователност е изследвано при стойности на капацитета на фазите спрямо земя $C_1 = 5\mu F$, $C_2 = 9,4\mu F$ и $C_3 = 20\mu F$. Стойността на капацитета на фазите спрямо земя $C_2 = 9,4\mu F$ е получена по изчислителен път за електрическата мрежа 6kV на открития рудник „Елаците“ за конфигурация на мрежата в средата на 2013 г. Тази стойност е възприета при анализирането на количествените параметри на рудничните мрежи с резистивно заземена неутрала (Перпелицев В, Ив. Стоилов, 2013). По този начин е възможна съпоставка на изследваните параметри на двата вида заземяване на неутралата.



Фиг. 2.

От графичните зависимости, показани на фиг. 2, се вижда значителното влияние на капацитета на мрежата върху големината на напрежението с нулева последователност. Например, при стойност на преходната проводимост при земно съединение g' от $0,001\text{S}$ (1000Ω) при $C_1 = 5\mu\text{F}$, $\dot{U}_0 \approx 723\text{V}$, при $C_2 = 9,4\mu\text{F}$ - $\dot{U}_0 \approx 388\text{V}$, а при $C_3 = 20\mu\text{F}$ - $\dot{U}_0 \approx 190\text{V}$.

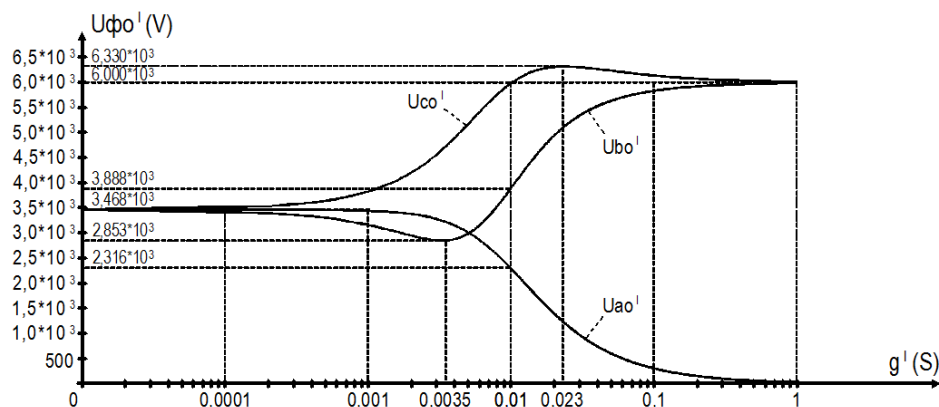
След стойност на $g' = 0,001\text{S}$ (1000Ω) големината на напрежението \dot{U}_0 рязко нараства и при $g' = 0,01\text{S}$ (100Ω) при $C_1 = 5\mu\text{F}$ - $\dot{U}_0 = 3145\text{V}$; при $C_2 = 9,4\mu\text{F}$ - $\dot{U}_0 = 2580\text{V}$; $C_3 = 20\mu\text{F}$ - $\dot{U}_0 = 1633\text{V}$.

След стойности на проводимостта при земно съединение $g' = 0,01\text{S}$ (100Ω) разликата между напреженията започва да намалява, като при $g' = 1\text{S}$ (1Ω), те са приблизително равни на фазното напрежение $\dot{U}_n \approx 3468\text{V}$;

3.2. Ефективна стойност на напреженията на фазите спрямо земя във функция от преходното съпротивление при земно съединение g' (фиг.3).

Стойностите на капацитета на фазите спрямо земя са приети $C_a = C_b = C_c = 9,4\mu\text{F}$, (това е капацитетът на електрическата мрежа 6 kV рудник „Елаците“, изчислена през 2013 г.). Активната изолационна проводимост на фазите спрямо земя е приета $g_a = g_b = g_c = 0,000002\text{S}$ ($500\text{k}\Omega$). На фиг. 3 са показани графичните зависимости на напреженията на фазите спрямо земя във функция от преходната проводимост в мястото на земно съединение.

Изменението на преходната проводимост при земно съединение g' оказва значително влияние върху напрежението на фазите спрямо земя \dot{U}_{a0} , \dot{U}_{b0} , \dot{U}_{c0} . При малки стойности на g' и приетата симетрия на активните и капацитивните изолационни проводимости напреженията на фазите спрямо земя са еднакви и равни на фазните напрежения ($\dot{U}_{a0} = \dot{U}_{b0} = \dot{U}_{c0} = 3468\text{V}$). Забележимо влияние на напреженията спрямо земя оказват преходни проводимости на земно съединение със стойности $g' = 0,001\text{S}$ (1000Ω) и по-големи. С увеличаване на преходната проводимост в мястото на земно съединение напрежението на повредената фаза започва да намалява, а напреженията на здравите фази се увеличават.



Фиг. 3.

При преходна проводимост $g' = 0,01\text{S}$ (100Ω), напрежението спрямо земя са: $\dot{U}_{a0} = 2316\text{V}$, $\dot{U}_{b0} = 3888\text{V}$, а $\dot{U}_{c0} \approx 6000\text{V}$. При стойност на $g' = 1\text{S}$ (1Ω) (метално земно съединение) напрежението на повредената фаза $\dot{U}_{a0} = 0$, а напреженията на здравите фази са равни на линейното $\dot{U}_{b0} = \dot{U}_{c0} = 6000\text{V}$.

При изменение на преходната проводимост на земно съединение се забелязват екстремуми в кривите на напреженията в «здравите» фази спрямо земя. При възприетите изолационни параметри на изследваната

мрежа напрежението \dot{U}_{b0} достига минималната си стойност от 2853V при $g' = 0,0035\text{S}$ (286Ω).

И от тези изследвания се потвърждава фактът, че при определени условия една от «здравите» фази има екстремум със стойност по-висока от линейните напрежения в електрическата мрежа. За конкретния случай максималната стойност напрежението \dot{U}_{c0} е 6330V и тя се достига при $g' = 0,0023\text{S}$ (44Ω).

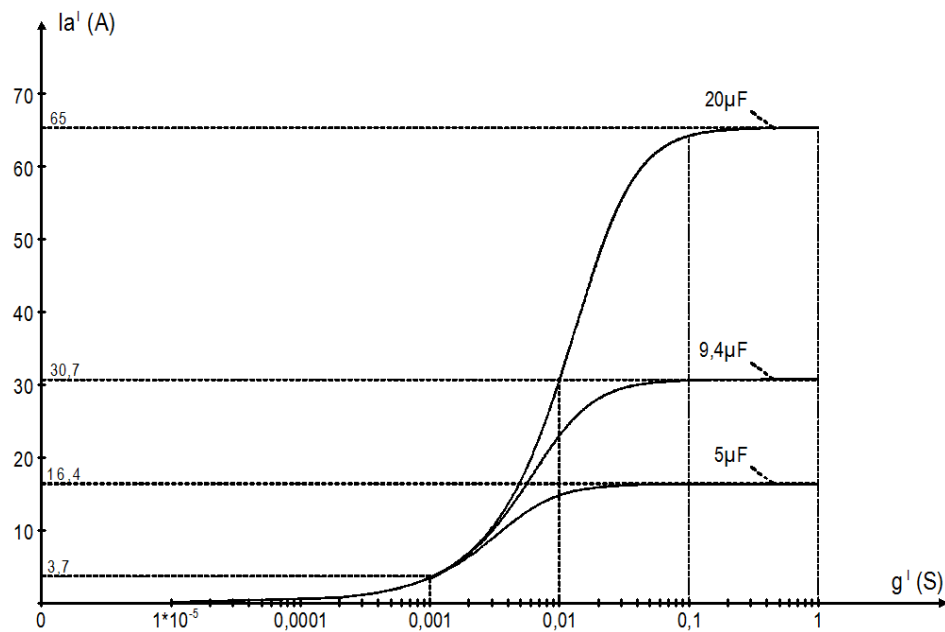
3.2. Ефективната стойност на тока на земно съединение \dot{I}'_a във функция от преходното съпротивление при земно съединение (Фиг. 4).

Активната изолационна проводимост на фазите спрямо земя е приета $g_a = g_b = g_c = 0,000001S$ ($1M\Omega$).

От графичните зависимости, показани на Фиг. 4, могат да се направят следните заключения:

- при земно съединение със стойност на преходната проводимост $g' = 0,001S$ (1000Ω), токът на земно съединение има много ниска стойност ($3,7A$) и практически не зависи от големината на капацитета на мрежата. Очевидно е, че токовете непосредствени защити от земни съединения в мрежите с изолиран звезден център няма да работят ефективно, независимо от големината на капацитета на мрежата.

- при земно съединение с преходна проводимост, изменяща се в границите от $g' = 0,001S$ (1000Ω) до $g' = 0,01S$ (100Ω) токът на земно съединение нараства значително, като най-стръмна е кривата, показваща изменението на тока на земно съединение в случая с мрежата с най-голям капацитет ($C_3 = 20\mu F$);



Фиг. 4.

Едно сравнение на резултатите, показани на фиг. 4, и подобни изследвания в електрически мрежи средно напрежение с резистивно заземена неутрала със същите изолационни параметри на мрежата ($g_a = g_b = g_c = 0,000001S$ ($1M\Omega$), $C_2 = 9,4\mu F$), (Перпелицев В, Ив. Стоилов, 2013) показва следното:

- в зависимост от големината на заземяващия резистор токът на метално земно съединение в случай на заземена през резистор неутрала нараства както следва:

- при заземена неутрала със стойност на резистора 120Ω токът на метално земно съединение нараства от $30,7A$ до $41,8A$ или с $1,36$ пъти;

- при стойност на резистора 80Ω нарастването е $1,72$ пъти;

- в диапазона на изменение на преходната проводимост при земно съединение $g' = 0,01S$ (100Ω) до $g' = 0,1S$ (10Ω) при мрежите с малък капацитет ($C_1 = 5\mu F$) нарастването на тока на земно съединение е незначително;

- при мрежата с голям капацитет ($C_3 = 20\mu F$) токът на земно съединение нараства повече от два пъти.

Максималната си стойност \dot{I}'_a достига при $g' = 0,1S$ (10Ω), където при $C_1 = 5\mu F$ - $\dot{I}'_a \approx 16,4A$, при

$C_2 = 9,4\mu F$ - $\dot{I}'_a \approx 30,7A$, а при $C_3 = 20\mu F$ -

$\dot{I}'_a \approx 65A$. След стойности на $g' = 0,1S$ (10Ω) до $g' = 1S$ (1Ω) токът на земно съединение не се изменя значително и графиките имат линеен характер.

- при стойност на резистора 60Ω нарастването е $2,09$ пъти.

Безспорно по-високите стойности на тока на земно съединение в рудничните мрежи средно напрежение влошават условията за безопасна работа, главно поради възможността да възникнат по-високи допирни напрежения. От друга страна по-сигурната работа на релейните защити от земни съединения води до минимизиране на вероятността за незадействане и съответно съществуване на опасни допирни напрежения продължително време. Окончателното решение за избор на режима на работа на неутралата на рудничните трансформатори средно напрежение трябва да става след обстоен анализ, както на експлоатационните предимства, така и по отношение на нивото на електробезопасност.

Заклучение

Изведените аналитични зависимости дават възможност за провеждане на изследвания на електрически мрежи с изолиран звезден център на трансформатора. Има възможност при необходимост да се отчита естествената несиметрия в активните и капацитивните изолационни проводимости спрямо земя. Получените количествени стойности за влиянието на големината на преходната проводимост в мястото на земно съединение за електрически мрежи с малък, среден и голям капацитет на фазите спрямо земя могат да се използват за ориентировъчни преценки на изследваните параметри. Те могат да служат и като ориентир при преценка на въведените настройки на релейните защиты от еднофазни земни съединения.

С разрастването на рудника се увеличава и дължината на кабелните линии, което води до увеличаване на капацитета на мрежата спрямо земя. И това поставя под въпрос целесъобразността от използване на режима с изолирана неутрала в мрежите с голям капацитет спрямо земя.

При руднични мрежи с голям капацитет на фазите спрямо земя е необходимо да се премине към резистивно заземяване на неутралата. При този режим на неутралата не се изискват сложни релейни защиты, лесно се осигурява тяхната селективност, отсъстват дъгови пренапрежения и ферорезонансни процеси (Перпелицев В, Ив. Стоилов, 2013). Освен това не се изискват големи капиталовложения и големи промени в съществуващата мрежа. У нас има натрупан известен опит с изграждането на

руднични мрежи с резистивно заземена неутрала. Такива са в „Мини Марица Изток“ ЕАД и „Асарел-Медет“ АД.

Литература

- ПРАВИЛНИК за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин, 1996, Министерство на труда и социалните грижи. Главна инспекция по труда, София.
- Багаев Д.В., В.Н.Сазонов, С.О. Астафьев, В.И. Кучеренко, 2009, *Резистивное заземление нейтрали сетях 6-35кВ в ОАО "МРСК Волги"*. КАБЕЛЬ-news, № 3.
- Нанчев Н., 1955, *Земни съединения в електрическите системи.*, С., Наука и изкуство.
- Пенчев Св., 2011, *Контрол и измерване в електроснабдителните системи*, Записки, ТУ Габрово.
- Стоилов И.Г., 1988, *За несиметрията на проводимостта спрямо земя в мрежите с изолиран звезден център*. Годишник на ВМГИ, София, т. XXXIV св. IV.
- Сирота И.М., С.Н.Кисленко, А.М. Михайлов. 1985, *Режимы нейтрали электрических сетей*. Киев, Наукова думка.
- Перпелицев В., Ив. Стоилов, 2013, *Анализ на рудничните електрически мрежи средно напрежение с резистивно заземена неутрала*, Годишник на МГУ «Св. Иван Рилски», София, т. 56, св. III.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електрификация на мините“.

ДВИЖЕНИЕ НА ЧАСТИЦА ПО ВЕРТИКАЛЕН ЦИЛИНДРИЧЕН КОЖУХ НА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВА МЕЛНИЦА В ЦИЛИНДРИЧНА КООРДИНАТНА СИСТЕМА

Симеон Сезонов

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

РЕЗЮМЕ. Получени са уравнения в цилиндрична координатна система за движение на частица руда по вертикален цилиндричен кожух. За решаване на нелинейните диференциални уравнения се предлага един итерационен метод. Описан е подробен алгоритъм за определяне на траекторията и компонентите на относителната скорост и ускорение. За по-голяма яснота алгоритъмът е илюстриран на две блок схеми.

Ключови думи: центробежно-ролкова мелница, поведение на частиците, метод на Рунге-Кута.

MOUVEMENT OF PARTICLE IN A VERTICAL CYLINDRICAL HOUSING OF CENTRIFUGAL-ROLLER MILL IN THE CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM

Simeon Sezonov

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

ABSTRACT. Equations are derived for the motion of ore particle in a vertical cylindrical housing of centrifugal-roller mill in the cylindrical coordinate system. In order to solve the nonlinear differential equations we provide an iteration method. A detailed algorithm is described for determining the trajectory, the components of the relative velocity and acceleration. To better imagine the process it is illustrated on two block diagrams.

Key words: centrifugal – roller mill, behavior of the particles, method of Runge-Kutta.

Увод

Центробежно-ролковите мелници са перспективни рудоподготвителни машини, които намират широко приложение при преработката на минерални суровини. За да се оптимизира смилането в тях, е необходимо да бъде изучено движението на частиците руда в работното пространство на машината. Освен това центробежните сили, използвани за налягането и смилането на частиците, могат да бъдат многократно по-големи от гравитационните сили. При тях материалът се смачква между неподвижния кожух и бързо въртящите се ролки.

Тези машини се отличават с по-добри енергетични показатели, по-голяма производителност и заемат по-малко пространство в сравнение с класическите топкови.

Задачата за определяне на движението на частиците руда по цилиндричен кожух на центробежно-ролкова мелница и математическото описание на движението на рудата е решена с метода на Рунге-Кута в декартова координатна система (Сезонов С., 2013).

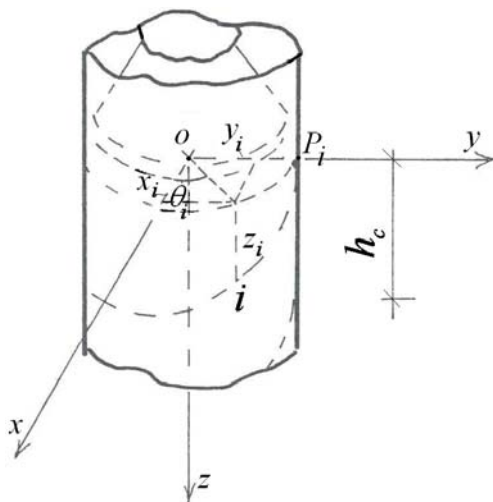
Целта на това изследване е да се извърши задълбочен анализ и да се развие теорията на движение на смиланата частица, за да се предоставят на вниманието

на технолозите и механиците в обогатителните фабрики. В настоящата работа се извеждат диференциалните уравнения за движение на частица от смиланата руда по вертикален цилиндричен кожух без наличие на вибрации в цилиндрична координатна система. Даден е план за решаване на траекторията, скоростта и ускорението на движението на частица руда по кожуха.

Изложение

1. Диференциални уравнения за движение в цилиндрична координатна система

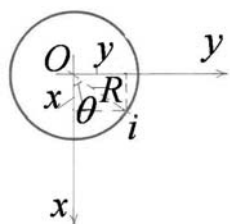
Разглежда се движението на материална частица от смилания материал, като се допуска, че няма лъкатушене. На фиг.1 е дадена частица в произволен момент от движение по вертикален цилиндричен кожух. Движението на частицата руда по кожуха е спираловидно. Въвежда се координатна система $Oxyz$ с начало $O \equiv C$ (C – център на напречното сечение на кожуха). Вертикалната ос на цилиндъра съвпада с ос Oz . Приема се, че положението на точка P_i в произволен момент от време има координати x, y, z .



Фиг. 1. Траектория на точка върху цилиндричен кожух

Въвежда се цилиндрична координатна система, като оста на ротация се запазва. Декартовите координати в хоризонталната равнина имат вида (фиг.2):

$$x = R \cos \theta; \quad y = R \sin \theta. \quad (1)$$



Фиг. 2. Проекция на траекторията на точка върху Oxy .

Компонентите на скоростта и ускорението имат вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -R\dot{\theta} \sin \theta; & \dot{y} &= R\dot{\theta} \cos \theta; \\ \ddot{x} &= -R(\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta); & & \\ \ddot{y} &= -R(-\dot{\theta}^2 \sin \theta + \ddot{\theta} \cos \theta). & & \end{aligned} \quad (2)$$

Системата уравнения за движение в декартови координати е:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{\omega^2 R \mu \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 R^2 + \dot{z}^2 (R^2 - x^2)}} + \\ \frac{2\omega R^2 \mu (\dot{x})^3}{\dot{x}^2 R^2 + \dot{z}^2 (R^2 - x^2)} = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$(\ddot{z} + g)\dot{x} - \dot{x}\dot{z} = 0.$$

Променливите в тези уравнения са подробно описани в (Сезонов С., 2013). Заместват се (1) и (2) в (3) и системата уравнения в цилиндрична координатна система придобива вида:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= -\dot{\theta}^2 \cot g \theta - \frac{2\omega \mu R^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta}{\dot{\theta}^2 R^2 + \dot{z}^2} \\ &- \frac{\omega^2 R^2 \mu \dot{\theta}}{\sqrt{\dot{\theta}^2 R^2 + \dot{z}^2}}; \\ \ddot{z} + g &= -\dot{z} \left(\dot{\theta} \cot g \theta - \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

2. Движение на точка по цилиндричен кожух

Разглежда се движението на точка, когато компонентата на относителната скорост по вертикалата е постоянна $\dot{z} = c$. Тогава $\ddot{z} = 0$, а второто уравнение на системата (4) приема вида:

$$\ddot{\theta} = -\dot{\theta}^2 \cot g \theta - \frac{g}{c} \dot{\theta}. \quad (5)$$

Замества се горният израз заедно с приетата постоянна компонента на скоростта по вертикалата в първото уравнение на системата (4). Предполага се, че $\dot{\theta} \neq 0$, и уравнението се разделя на $\dot{\theta}$. След това се подвежда под общ знаменател и се повдигат на квадрат двете страни на равенството. След преработка се получава

$$A_1 \dot{\theta}^4 + A_2 \dot{\theta}^2 + A_3 = 0. \quad (6)$$

Изразите пред производната на ъгловата координата от четвърта степен, втора степен и свободния член на горното уравнение са:

$$\begin{aligned} A_1 &= (A_4 - A_5 \sin^2 \theta)^2 [m^4 / s^2]; \\ A_2 &= R^2 (A_6 - A_7 \sin^2 \theta) [m^4 / s^4]; \\ A_3 &= A_3^* = c^2 (g^2 - \omega^2 R^2 \mu^2) [m^4 / s^6], \end{aligned} \quad (7)$$

където

$$\begin{aligned} A_4 &= \frac{g}{c}; & A_5 &= 2\omega \mu; \\ A_6 &= 2g^2 - \omega^4 R^2 \mu^2; & A_7 &= 4g\omega \mu c. \end{aligned}$$

Решението на уравнение (6) има вида:

$$\dot{\theta} = A_8 = \sqrt{\frac{A_2^2 - 4A_1 A_3}{2A_1}}. \quad (8)$$

3. Приближителен метод за определяне на кинематичните зависимости

За числено решаване на (8) се прилага методът на Рунге-Кута. Теоретичните постановки на метода могат да се видят в трудовете на Ралстон (Ralston) и Копал (Kopal). Според тях уравнението се записва във вида:

$$\dot{\theta}_i = A_{8,j}^i; \rightarrow i = 1, \dots, n; \quad j = 0, 1, 2, 3, \quad (9)$$

където n е общият брой на точките.

Решението се дава с израза:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{\Delta t}{6} (k_1^i + 2k_2^i + 2k_3^i + k_4^i), \quad (10)$$

където

$$\begin{aligned} k_{j+1}^i &= A_{8,j}^i; \quad A_{8,j}^i = \sqrt{\frac{-A_{2,j}^i + A_{9,j}^i}{2A_{1,j}^i}}; \\ A_{1,0}^i &= A_4 - A_5 \sin^2 \theta_i; \quad A_{1,1}^i = A_4 - A_5 \sin^2 \theta_{k_1}^i; \\ A_{1,2}^i &= A_4 - A_5 \sin^2 \theta_{k_2}^i; \quad A_{1,3}^i = A_4 - A_5 \sin^2 \theta_{k_3}^i; \\ \theta_{k_1}^i &= \theta_i + 0,5k_1^i; \quad \theta_{k_2}^i = \theta_i + 0,5k_2^i; \quad \theta_{k_3}^i = \theta_i + k_3^i; \\ A_{2,0}^i &= R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_i]; \\ A_{2,1}^i &= R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_{k_1}^i]; \\ A_{2,2}^i &= R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_{k_2}^i]; \\ A_{2,3}^i &= R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_{k_3}^i]; \\ A_{9,j}^i &= \sqrt{(A_{2,j}^i)^2 - 4A_{1,j}^i A_3^*}. \end{aligned} \quad (11)$$

Ъгловата координата на точка $i + 1$ се определя от (10), а останалите цилиндрични координати са:

$$r_{i+1} = R; \quad z_{i+1} = z_i + \dot{z}_i \Delta t. \quad (12)$$

Големините на векторите на относителната скорост и ускорение в цилиндрична координатна система се определят от изразите:

$$\begin{aligned} v_r &= \sqrt{\dot{\theta}^2 R^2 + \dot{z}^2}; \\ a_r &= \sqrt{R^4 (\dot{\theta}^4 + \ddot{\theta}^2) + \ddot{z}^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

където

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= A_{8,j}^i; \quad \dot{z}_{i+1} = c; \\ \ddot{\theta}_{i+1} &= \frac{\dot{\theta}_{i+1} - \dot{\theta}_i}{\Delta t}; \quad \ddot{z} = 0. \end{aligned}$$

Декартовите координати на точката се определят от:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= R \cos \theta_{i+1}; \\ y_{i+1} &= R \sin \theta_{i+1}; \\ z_{i+1} &= z_i + \dot{z}_i \Delta t. \end{aligned} \quad (14)$$

Траекторията е спираловидна по цилиндрична повърхнина със стъпка (фиг.1), която се определя от израза $h_c = \frac{2\rho c}{\omega}$.

Декартовите компоненти на скоростта и ускорението, както и големините на векторите на скоростта и ускорението се определят от:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i+1} &= -R \dot{\theta}_{i+1} \sin \theta_{i+1}; \\ \dot{y}_{i+1} &= R \dot{\theta}_{i+1} \cos \theta_{i+1}; \\ \dot{z}_{i+1} &= c; \\ \ddot{x}_{i+1} &= -R [\dot{\theta}_{i+1}^2 \cos \theta_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \sin \theta_{i+1}]; \\ \ddot{y}_{i+1} &= -R [\dot{\theta}_{i+1}^2 \sin \theta_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \cos \theta_{i+1}]; \\ \ddot{z} &= 0; \\ v_r &= \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}; \\ a_r &= \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

В резултат на проведеното изследване е получен законът за движение на частицата руда в цилиндрична координатна система.

4. Алгоритъм за решаване

Получените изрази участват в алгоритъма на метода. Той се състои от следните стъпки:

1. Задават се стойностите на c , ω , R , g и μ и се определят коефициентите $A_3 - A_7$ от (7).

2. Задава се началната стойност на ъгъла θ° и нарастването на времето Δt , и общият брой точки n .

3. Номерът на точката е $i = 1$.

4. Определяне на коефициентите при нарастване на променливата j (цикъл по j).

4а) Полага се $j = 0$.

4б) Изчисляват се $A_{1,j}^i$, $A_{2,j}^i$, $A_{8,j}^i$, $A_{9,j}^i$, k_{j+1}^i от (11).

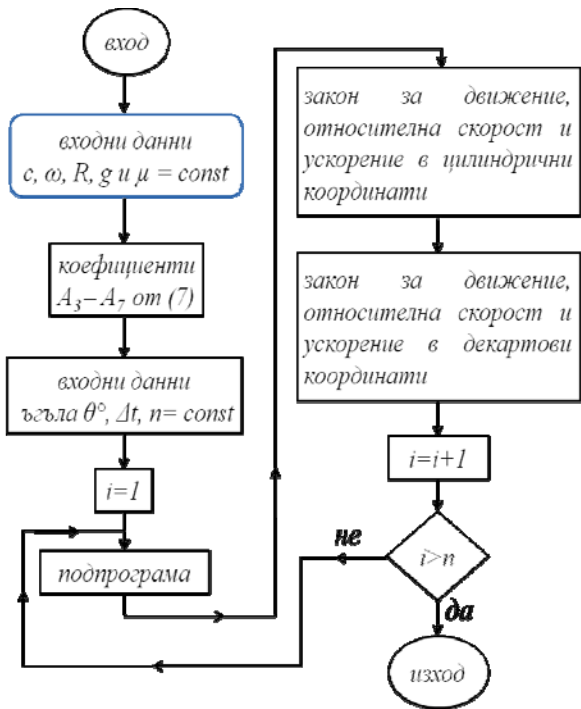
4в) Променливата j нараства с 1. Ако е по-малка от 4, то се преминава към 4б.

4г) Ако $j > 3$, то се слага край на цикъла. Изчислява се θ_{i+1} от (10).

5. Изчисляват се изразите (12-15).

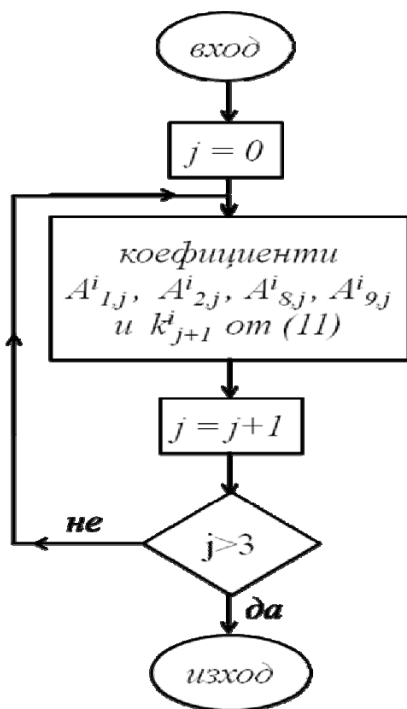
6. Увеличава се номерът на точката с 1 ($i = i + 1$). Ако $i > n$, то се слага край. В противен случай се преминава към точка 4 от алгоритъма.

Предложеният алгоритъм е илюстриран на фиг. 3а и фиг. 3б.



Фиг. 3а. Главна блок схема на алгоритъма за решаване

Главната блок схема описва стъпките на алгоритъма за решаване от 1 до 4.



Фиг. 3б. Блок схема на подпрограмата

Подпрограмата описва итерацията за следваща точка $i = 2$ и стъпките на алгоритъма за решаване са от 4а до 5.

Решението по описания алгоритъм може да се реализира ръчно или с помощта на специално съставена програма. Вторият подход е прилаган при други практически задачи (Buchvarov St., Poulev St., Kunchev L.), (Пулев С. Н.), (Бъчваров С. Н., Кунчев Л. П., Пулев Ст. Н.). В тях числено са изследвани трептенията в машинни елементи.

Заклучение

Получени са диференциални уравнения за движение на смилещата частица по вертикалния кожух на машината в цилиндрична координатна система. Решението на диференциалното уравнение е направено по метода на Рунге-Кута. Подробно е описан алгоритъм за числено решаване.

Този математически модел за кинематичен анализ на движението се отличава с простота. Получените кинематични величини участват при управлението на работния процес на машината.

Предлаганият метод може да улесни технолозите и механиците в тяхната практическа работа.

Литература

- Сезонов С. 2013, Изследване на процесите в нова конструкция на центробежно-ролкова мелница, Доклади XIII Международна научна конференция ВСУ 6-7 юни, С., Том I, I-106-I-111, ISSN: 1314 - 071X .
- Buchvarov St., Poulev St., Kunchev L., Theoretical Study on vertical Vibration of an Internal Combustion Engine, "Theoretical and Applied Mechanics", №1-2, 1994-95, 34-39.
- Бъчваров С. Н., Кунчев Л. П., Пулев Ст. Н., 1991, Симуляционен модел за числено изследване на трептенията в трансмисията на автомобила при потегляне, Втора научно-техническа сесия с международно участие, ВВТУ „Тодор Каблешков“ София, 28-29 ноември, 220-225.
- Пулев С. Н., 1998, Числено изследване на самовъзбуждащите се трептения в триещия съединител на автомобила, Машиностроение, № 1-2, 9-10.
- Ralston A., 1962, Ringe - Kutta Methods with Minimum Error Bounds. Math. Comput., vol16 pp431-437.
- Kopal Z., 1955, Numerical Analysis, New York, Wiley.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Техническа механика“.

ИЗСЛЕДВАНЕ РАВНОВЕСИЕТО НА СИСТЕМА ОТ ТРИ ТЕЛА С MATHCAD

Асен Стоянов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, asen_dragomirov@mail.bg

РЕЗЮМЕ. Решена е конкретна задача с пакета MathCAD, като първоначално са получени аналитичните изрази на десните страни на системата от единадесет независими относно неизвестните уравнения, а след въвеждане на изходните данни са получени и съответните числени резултати.

STUDY OF EQUILIBRIUM SYSTEM OF THREE UNITS WITH A MATHCAD

Asen Stoyanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, asen_dragomirov@mail.bg

ABSTRACT. Specific task is solved with the MathCAD package as originally received the analytical expressions of the right sides of the system of eleven independent equations on the unknown, and then introducing the output data are derived and corresponding numerical results.

Въведение

Класическото решение на система от три тела, подложени на силово въздействие, в теоретичната механика предполага прилагането на принципа на тоталното разчленяване и заместване на отстранените връзки с техните реакции. При това извършваните пресмятания върху отделните елементи се реализират в последователност обратна на реда на построяване на ансамбъла, включвайки в себе си и три проверки.

Целта на настоящата работа е да се представи алгоритъм и числено решение за конкретен пример.

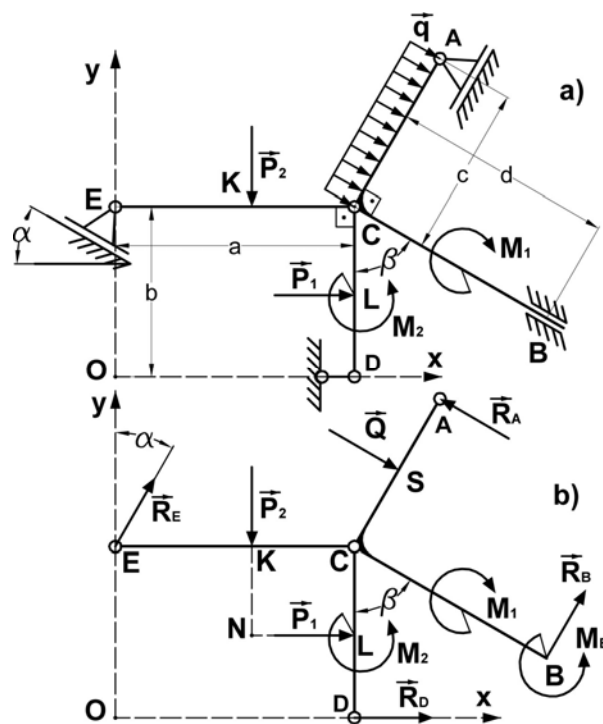
Определяне опорните реакции на равнинна натоварена система от три тела с помощта на MathCAD

За показаната на фиг. 1.a) система се определят опорните реакции при зададени:

$$a = 1,4\text{ m}; b = 1\text{ m}; c = 1\text{ m}; d = 1,3\text{ m}; \alpha = \frac{\pi}{6};$$

$$\beta = \frac{\pi}{3}; M_1 = 30\text{ kN.m}; M_2 = 20\text{ kN.m}; P_1 = 15\text{ kN}$$

$$P_2 = 30\text{ kN}; q = 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}}; Q = 10\text{ kN}.$$



Фиг. 1.
 а) изчислителна схема на системата; б) приложен принцип на освобождаване от външните опорни устройства и замяна със съответни реакции;

Определянето на неизвестните опорни реакции е свързано със съставянето (на ум се прилага принципът на тоталното разчленяване при избраната координатна система) и решаването на системата от единадесет уравнения за равновесие – фиг. 1.b).

Задачата се решава в следния ред:

1. формират се векторите на активните сили, реакциите на връзките и радиус векторите на приложните им точки;
2. формират се в аналитичен вид главните вектори и главните моменти на външните сили за гредите ACB , CD и CE –

$$Pac_b := rA + rC1 + fQ + rB \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} Xc1 + Q.\sin(\beta) + Rb.\cos(\beta) - Ra.\sin(\beta) \\ Yc1 - Q.\cos(\beta) + Rb.\sin(\beta) + Ra.\cos(\beta) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$McACB := (rc - rc) \times rC1 + (rb - rc) \times rB + mB +$$

$$+ m1 + (rs - rc) \times fQ + (ra - rc) \times rA \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Mb - M1 - \frac{Q.c}{2} + Ra.c + Rb.d \end{pmatrix};$$

$$Pcd := rD + p1 + rC2 \rightarrow \begin{pmatrix} P1 + Rd + Xc2 \\ Yc2 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$McCD := (rd - rc) \times rD + (rl - rc) \times p1 + m2 +$$

$$(rc - rc) \times rC2 \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M2 + 0,52.P1.b + Rd.b \end{pmatrix};$$

$$Pce := rE + p2 + rC3 \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} Xc3 + Re.\sin(\alpha) \\ Yc3 - P2 + Re.\cos(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$McCE := (re - rc) \times rE + (rk - rc) \times p2 +$$

$$+ (rc - rc) \times rC3 \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,43.P2.a - 1.Re.a.\cos(\alpha) \end{pmatrix};$$

3. формира се главният вектор на вътрешните сили, действащи в ставата C –

$$PC := rC1 + rC2 + rC3 \rightarrow \begin{pmatrix} Xc1 + Xc2 + Xc3 \\ Yc1 + Yc2 + Yc3 \\ 0 \end{pmatrix};$$

където:

- $ra, rc, rb, rd, re, rk, rs$ – съответните радиус вектори на приложните точки на силите;

- $fQ, p1, p2, m1, m2, mB, rA, rB, rD, rE, rC1, rC2, rC3$ – натоварването на отделните греди;

- $Xc1, Yc1, Xc2, Yc2, Xc3, Yc3$ – компоненти на реакциите в ставата C за отделните греди;

4. формират се единичните вектори на декартовата координатна система;

5. формира се и изчислява лявата част на уравненията за равновесие –

$$EQ \rightarrow \begin{pmatrix} Xc1 + Q.\sin(\beta) + Rb.\cos(\beta) - Ra.\sin(\beta) \\ P1 + Rd + Xc2 \\ Xc3 + Re.\sin(\alpha) \\ Xc1 + Xc2 + Xc3 \\ Yc1 - Q.\cos(\beta) + Ra.\cos(\beta) + Rb.\sin(\beta) \\ Yc2 \\ Yc3 - P2 - Re.\cos(\alpha) \\ Yc1 + Yc2 + Yc3 \\ Mb - M1 - \frac{Q.c}{2} + Ra.c + Rb.d \\ M2 + Rd.b + 0,52.P1.b \\ 0,43.P2.a - 1.Re.a.\cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

6. въвеждат се изходните данни за численото решение и се задава началното приближение за неизвестните реакции;

7. задава се началото на блока за решаване на системата уравнения Given (Бертяев, В., Любенов, П.) и се формира системата уравнения за равновесие посредством операциите Copy/Paste;

Given

$$\begin{pmatrix} Xc1 + Q.\sin(\beta) + Rb.\cos(\beta) - Ra.\sin(\beta) \\ P1 + Rd + Xc2 \\ Xc3 + Re.\sin(\alpha) \\ Xc1 + Xc2 + Xc3 \\ Yc1 - Q.\cos(\beta) + Ra.\cos(\beta) + Rb.\sin(\beta) \\ Yc2 \\ Yc3 - P2 - Re.\cos(\alpha) \\ Yc1 + Yc2 + Yc3 \\ Mb - M1 - \frac{Q.c}{2} + Ra.c + Rb.d \\ M2 + Rd.b + 0,52.P1.b \\ 0,43.P2.a - 1.Re.a.\cos(\alpha) \end{pmatrix} = 0$$

8. неизвестните опорни реакции се определят с помощта на процедурата Find (Бертяев, В.,

Любенов, Л.), като последната е крайт на блока за решаване на системата;

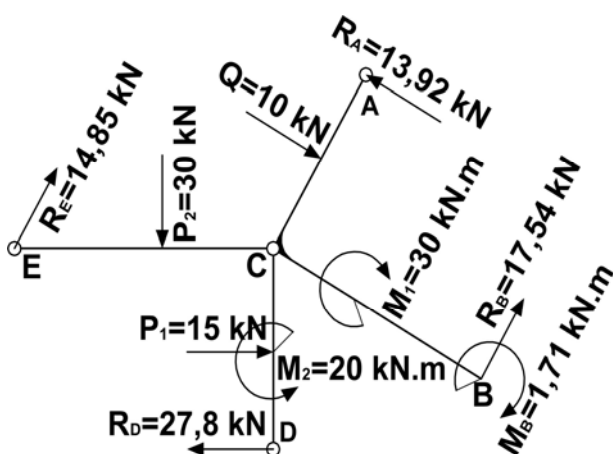
- изчисляват се модулите на реакциите и тяхната ориентация в пространството (Стоянов, А. 2014г.);
- извършва се проверка за верността на получените резултати;

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rb \\ Mb \\ Rd \\ Re \\ Xc1 \\ Yc1 \\ Xc2 \\ Yc2 \\ Xc3 \\ Yc3 \end{pmatrix} := \text{Find} \left(\begin{pmatrix} Ra \\ Rb \\ Mb \\ Rd \\ Re \\ Xc1 \\ Yc1 \\ Xc2 \\ Yc2 \\ Xc3 \\ Yc3 \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} Ra \\ Rb \\ Mb \\ Rd \\ Re \\ Xc1 \\ Yc1 \\ Xc2 \\ Yc2 \\ Xc3 \\ Yc3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13,92 \\ 17,54 \\ -1,71 \\ -27,8 \\ 14,85 \\ -5,38 \\ -17,14 \\ 12,8 \\ 0 \\ -7,42 \\ 17,14 \end{pmatrix} ; \right.$$

$$Mn = 0; Mn = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 8,926 \cdot 10^{-14} \end{pmatrix}.$$

С точност, обезпечена от числения метод, задачата е решена вярно.

На фиг. 2. са показани действителните посоки на външните за системата реакции на опорните устройства.



Фиг. 2. Натоварената система с действителните посоки на външните реактивни усилия

Заклучение

Представеното изследване, в което системата от уравнения е решена с блока Given-Find, демонстрира бързина и простота – отпада необходимостта от спазване на последователност при пресмятанята по класическия метод, както и от двете междинни проверки (виж въведението).

С помощта на пакета Mathcad могат да се решават задачи, както от областта на абсолютно твърдите, така и от областта на деформируемите тела.

Възможността за интеграция между MathCAD и други мощни системи за автоматизация на изчисления процес като MATLAB и Excel предоставя незаменим инструмент за решаване на сложни системи от инженерната практика (Бертяев В.).

Пресмятането на многозвенни конструкции с помощта на блока Given-Find не изисква специални знания по програмиране и матрична алгебра, но в същото време ограничава информацията, свързана с изследванията на намерените решения на уравненията за равновесие.

Прилагането на матричните методи при решаването на система линейни алгебрични уравнения позволява изследването на намерените величини в пълен обем. Така например може да се изследва влиянието на геометричните параметри на гредите върху големините на реакциите и да се намери областта на техните допустими стойности. Авторът ще разгледа тези въпроси в бъдеща публикация.

Литература

- Бертяев, В., Теоретическая механика на базе Mathcad практикум, „БХВ–Петербург”, Санкт–Петербург, 2005 г., 739 стр.
- Любенов, Л., Малчева-Якова, С. *Използването на MathCAD за решаване на инженерни задачи*. Научна конференция с международно участие ВСУ 2008, София, България, том II, стр. IX-72 ÷76.
- Стоянов, А. 2014г. Изследване равновесието на тяло, натоварено с равнинна система сили, посредством Mathcad, XVI-та международна научна конференция „Управление и устойчиво развитие” 21-23/03/2014 г., Юндола.
- Стоянов, А. 2014г. Изследване равновесието на равнинна система от две тела с Mathcad, XIV Международна научна конференция ВСУ 2014г., 5-6/06/2014 г.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Техническа механика“.

ДИНАМИКА НА ВИБРАЦИОННИ МАШИНИ С ЕКСЦЕНТРИКОВ ВИБРОВЪЗБУДИТЕЛ

Стефан Пулев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Изследвани са едномасов и двумасов модели на вибрационни машини с ексцентрикъв вибровъзбудител. Диференциалните уравнения на движението са изведени и решени аналитично. Получени са зависимости между параметрите на вибрационните машини, при които елементите на задвижването остават ненатоварени силово.

DYNAMICS OF VIBRATION MACHINES WITH AN ECCENTRIC VIBRATION GENERATOR

Stefan Pulev

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

ABSTRACT. A one- and a two-mass model of vibrating machines with an eccentric vibration generator are studied. The differential equations of motion are derived and solved analytically. The relations between the machines' parameters at which the drive remains unaffected by forces are determined.

Увод

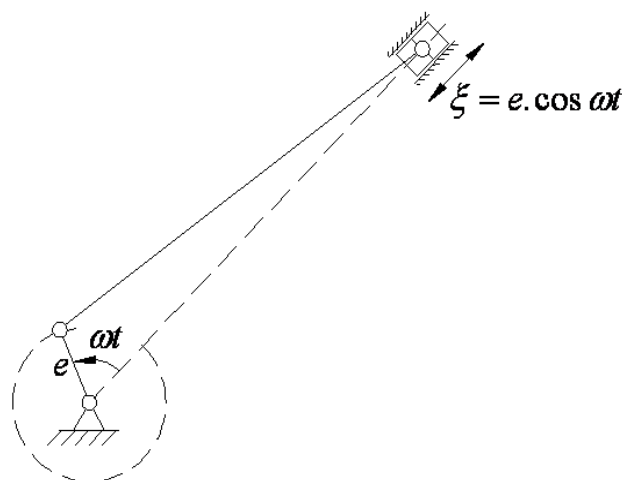
Вибрационните машини са получили наименованието си от характера на движение на техните работни органи – вибрация, т.е. трептения с малка амплитуда и висока честота. При тях съвсем целенасочено се предизвикват механични трептения за осъществяване на определени полезни функции. В минно-преработвателната индустрия такива машини са например: някои видове пресевни уредби, мелници, трошачки, транспортъори и др.

Целта на настоящата работа е да се определи законът за движение на изпълнителното звено на вибрационна машина с ексцентрикъв вибровъзбудител. Да се подберат стойности на параметрите, осигуряващи минимални динамични натоварвания и максимална ефективност в процеса на експлоатация на машината.

Описание на вибровъзбудителя

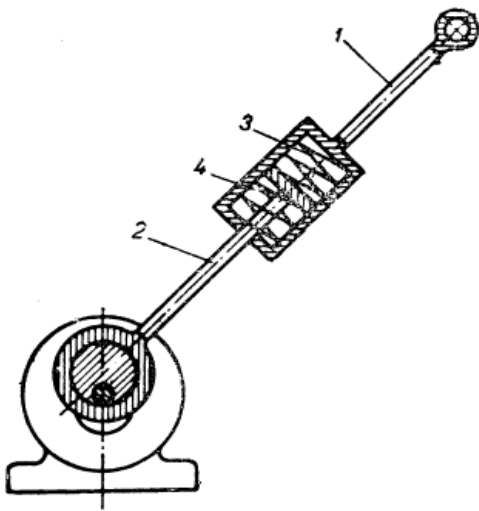
Ексцентриквият вибровъзбудител може да се разглежда като коляно-мотовилков механизъм (фиг. 1). Той се състои от ексцентрикъв вал, привездан в движение от електродвигател посредством ремъчна предавка, и мотовилка. Дължината на коляното e (ексцентрицитетът) е между 1 и 10mm и е многократно по-малка от дължината на мотовилката. Ако ексцентриквият вал се върти с постоянна ъглова скорост ω , то изпълнителното звено извършва праволинейно възвратно-постъпателно движение по закона $\xi = e \cdot \cos \omega t$. Това е възможно, само ако електродвигателят е достатъчно мощен, така че

трептенията на изпълнителното звено да не влияят върху големината на смущаващата честота ω .



Фиг. 1. Принципна схема на ексцентрикъв вибровъзбудител

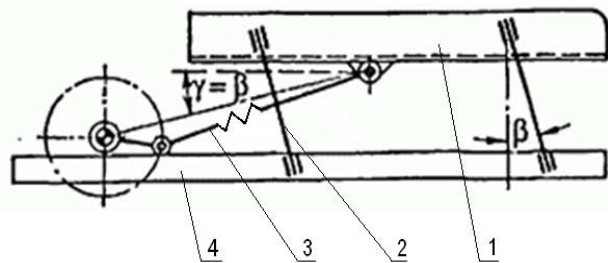
Поради безспорните си предимства широко се прилагат ексцентрикви вибровъзбудители с еластична мотовилка (фиг. 2). Мотовилката се състои от две половини 1 и 2, свързани посредством еластични елементи 3 и 4, които освен стоманени спирални пружини могат да са и гумени тампони. Поради свиването или удължаването на пружините мотовилката променя своята дължина в процеса на работа. Наличието на еластични елементи снижава пусковия момент на електродвигателя при стартиране на вибрационната машина.



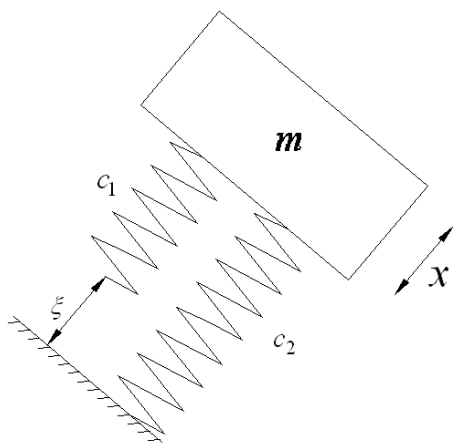
Фиг. 2. Ексцентриков вибровъзбудител с еластична мотовилка

Динамичен модел на едномасова вибрационна машина с ексцентриков вибровъзбудител

Пример за такъв вид вибрационна машина е познатото в специализираната литература сито на Ферарис. То се състои от корпус с пресевни повърхности 1, еластично окачване с листови пружини (ресори) 2, ексцентриков вибровъзбудител с еластична мотовилка 3 и основа 4. Трептенията на тяло 1 са много близки до праволинейните.



Фиг. 3. Вибрационно сито на Ферарис



Фиг. 4. Динамичен модел на едномасова вибрационна машина с ексцентриков вибровъзбудител

Динамичният модел на описаната вибрационна машина, както и на много други подобни е представен на фиг. 4. С m е означена масата на работния орган на вибрационната машина (в случая - на пресевните повърхности), който извършва праволинейни трептения. Еластичността на мотовилката е c_1 , а тази на окачването е c_2 . Вибровъзбудителят внася в трептящата система кинематично смущение, което се представя с израза:

$$\xi = e \cdot \cos \omega t.$$

Трептящата маса е с една степен на свобода и с x е означено нейното преместване.

Диференциалното уравнение, описващо малките трептения на механичната система, е:

$$m\ddot{x} + (c_1 + c_2)x = c_1 \cdot \xi.$$

След като положим $k^2 = \frac{c_1 + c_2}{m}$ и заместим израза за ξ , получаваме:

$$\ddot{x} + k^2 \cdot x = \frac{c_1 \cdot e}{m} \cos \omega t. \quad (1)$$

Това е нехомогенно диференциално уравнение от втори ред с постоянни коефициенти. Свободните трептения, извършващи се със собствената честота

$$k = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m}}$$

на системата бързо затихват. Поради това се интересуваме от чисто принудените трептения, които търсим във вида

$$x = C \cdot \cos \omega t. \quad (2)$$

След заместване на израза (2) в диференциалното уравнение на малките трептения (1) и приравняване на коефициентите пред $\cos \omega t$ се получава следният израз за амплитудата на трептенията:

$$C = \frac{c_1 \cdot e}{m(k^2 - \omega^2)}.$$

Следователно чисто принудените трептения на работния орган на вибрационната машина се извършват по закона

$$x = \frac{c_1 \cdot e}{m(k^2 - \omega^2)} \cos \omega t. \quad (3)$$

Силата, натоварваща еластичната мотовилка, се представя със следния израз:

$$F = c_1(x - \xi).$$

След като в горната формула заместим с (3) и извършим опростяване, получаваме

$$F = \frac{c_1 \cdot e (m\omega^2 - c_2)}{m(k^2 - \omega^2)} \cos \omega t.$$

Интерес представлява случаят, когато изразът в скобите от числителя се нулира, т.е.

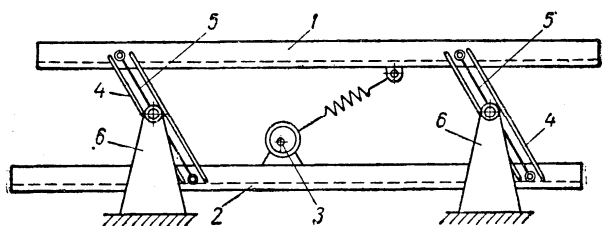
$$m\omega^2 - c_2 = 0 \text{ или } \omega = \sqrt{\frac{c_2}{m}}. \quad (4)$$

тогава амплитудата на силата, натоварваща мотовилката, става равна на нула, респективно $F = 0$. С други думи елементите на вибровъзбудителя не са натоварени силово. Това е много благоприятен случай от гледна точка на надеждността и безотказността на вибрационната машина.

Разгледаните едномасови вибрационни машини с ексцентриков вибровъзбудител се отличават с висока производителност, надеждност и проста конструкция. Те обаче имат един сериозен недостатък. Не са добре виброизолирани и големите инерционни сили от трептенията се предават върху основата (фундамента). Не се препоръчва те да се монтират и експлоатират в сгради. Този недостатък се преодолява при уравновесените едномасови вибрационни машини, които са предмет на изследванията по-долу.

Динамичен модел на двумасова уравновесена вибрационна машина с ексцентриков вибровъзбудител

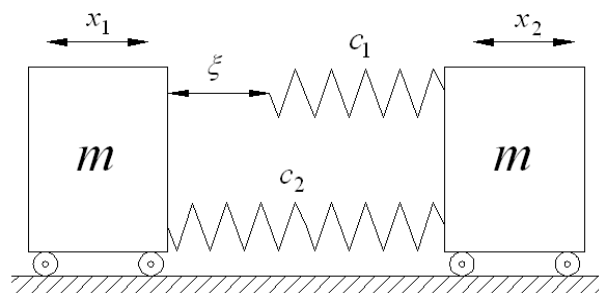
Пример за такъв тип вибрационна машина е пресевната уредба на австрийската фирма BINDER (фиг.5). Тя се състои от две пресевни повърхности 1 и 2, свързани помежду си с листови пружини (ресори) 4, и мотовилки 5. Мотовилките са ставно закрепени към стойките 6 и към тела 1 и 2. Източникът на вибрации е ексцентриковият вибровъзбудител 3 с еластична мотовилка. Мотовилките 5 извършват ротационно движение. Пресевните повърхности 1 и 2 се движат транслационно, като трептят в противофаза. Те имат еднакви маси и инерционните сили се уравновесяват напълно. Така върху опорите не се предават динамични натоварвания.



Фиг. 5. Принципна схема на двумасово вибрационно сито

Динамичният модел на една двумасова вибрационна машина от този тип е представен на фигура 6. Състои се

от две трептящи маси m . Еластичността на мотовилката е c_1 , а тази на ресорите е c_2 . Обобщените координати са преместванията x_1 и x_2 на двете маси. Кинематичното смущение, внасяно от вибровъзбудителя, отново е $\xi = e \cdot \cos \omega t$.



Фиг. 6. Динамичен модел на двумасова уравновесена вибрационна машина с ексцентриков вибровъзбудител

Диференциалните уравнения на движението са изведени с помощта на уравненията на Лагранж от II род и имат вида:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)x_1 - (c_1 + c_2)x_2 = -c_1 e \cos \omega t \\ m\ddot{x}_2 - (c_1 + c_2)x_1 + (c_1 + c_2)x_2 = c_1 e \cos \omega t. \end{cases} \quad (5)$$

Интересуваме се от чисто принудените трептения поради бързото затихване на свободните. Затова считаме, че честотата на трептенията съвпада с тази на смущението и търсим едно частно решение на системата (5) във вида:

$$\begin{cases} x_1 = A \cdot \cos \omega t \\ x_2 = B \cdot \cos \omega t. \end{cases} \quad (6)$$

След заместване на изразите (6) в диференциалните уравнения (5) за интеграционните константи се получава:

$$A = -B = \frac{c_1 e m \omega^2}{m^2 \omega^4 - 2m\omega^2(c_1 + c_2)}.$$

Следователно законът за малките трептения е

$$x_1 = -x_2 = \frac{c_1 e m \omega^2}{m^2 \omega^4 - 2m\omega^2(c_1 + c_2)} \cos \omega t. \quad (7)$$

Особено важно за практиката е да се определи силата, натоварваща еластичната мотовилка на вибровъзбудителя

$$F = c_1(x_2 - x_1 - \xi).$$

След заместване на (7) и опростяване, израза за силата се трансформира в

$$F = \frac{c_1 e m \omega^2 (2c_2 - m \omega^2)}{m^2 \omega^4 - 2m \omega^2 (c_1 + c_2)} \cos \omega t.$$

Става ясно, че когато изразът в скобите от числителя стане равен на нула, т.е.

$$\omega^2 = \frac{2c_2}{m} \quad (8)$$

тогава и силата, натоварваща мотовилката, се нулира. Формула (8) позволява да се определят честотата на електродвигателя, масите и еластичността на окачването така, че елементите на задвижването да останат ненатоварени силово. В това се състои най-голямото предимство на този тип вибровъзбудители.

Вибрационната машина от фигури 5 и 6 се препоръчва да работи в резонансен режим. Когато знаменателят на формула (7) стане равен на нула, амплитудата на двете трептящи маси може да стане безкрайно голяма. Това се постига, ако за смущаващата честота е в сила зависимостта:

$$\omega^2 = \frac{2(c_1 + c_2)}{m}. \quad (9)$$

В такъв случай за регулиране на амплитудата се поставят ограничители и допълнителни еластични елементи (буфери). Резонансните режими на работа на този тип вибрационни машини са предмет на отделно изследване.

Заклучение

Като обобщение на получените резултати могат да се направят следните констатации:

1. Ексцентриковите вибровъзбудители широко се прилагат като източник на механични трептения при вибрационните машини поради простотата и надеждността на конструкцията си.

2. Аналитично изведените зависимости (4) и (8) между стойностите на параметрите осигуряват режим на работа, при който елементите на задвижването остават ненатоварени силово.

3. Уравновесените вибрационни машини са подходящи за работа и в резонансен режим, ако параметрите им удовлетворяват условие (9).

Литература

- Цветков Х., 1988, Обогатителни машини. Техника, С.
 Денев Ст., 1964, Трошене, смилане и пресяване на полезни изкопаеми. Техника, С.,
 Писарев А.М., 1985, Механични трептения, Техника, С.
 Повидайло В.А., 1962, Расчет и конструирование вибрационных питателей. МАШГИЗ, Киев.
 Тимонин А.С., 2003, Инженерно-экологический справочник. Т. 3. Калуга: Изд. Н. Бочкаревой.
 Кафтанов С.В. (ред.), 1947 Общая химическая технология топлива. 2-е издание, Москва-Ленинград: Госхимиздат.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Техническа механика“.

ТЕРМОДИНАМИЧНИ ОСОБЕНОСТИ ПРИ ЕСТЕСТВЕНА ВЕНТИЛАЦИЯ НА КАРИЕРИТЕ

Пламен Савов, Майя Вацкичева

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700, psavov@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Процесът на генериране, разпространение и отлагане на праха във въздуха на мините и кариерите е един от основните, които се проследяват за оценка на качеството на въздуха. Метеорологичните условия са главен фактор при формиране на атмосферната стратификация и заедно с комплексната топография на кариерата предизвикват сложен процес на разпространение (рециркулация, вторично излъчване и утаяване) на праховите примеси в атмосферния граничен слой. Поради тази причина определянето на режима на вентилация в кариерите е сложен процес, върху който оказват влияние както естествената ветрова система с нейните денонощни и сезонни особености, така и пряката слънчева радиация, често формираща многослойна атмосферна стратификация. В тази работа са представени резултати от сравнението на експериментални данни с тези от прост термодинамичен теоретичен модел, описващ процеса на естествено проветряване на кариерите. Моделът отчита погълнатата през деня слънчева топлина, като симулира процеса на охлаждане на склоновете на кариерата през нощта и генерираната в резултат на това локална ветрова система.

THE THERMODYNAMIC PECULIARITY OF THE NATURAL VENTILATION OF OPEN PIT MINES

Plamen Savov, Maya Vatzkitcheva

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

ABSTRACT. Dust generation and its dispersion has been the major concern in ambient air quality in deep cavities such as open cast mines. The meteorological conditions within the deep open pit mines are significantly affected by temperature (stability) and roughness conditions which ultimately generate complex dispersion phenomenon including separation of atmospheric boundary layer, recirculation, resuspension and settling of dust. The determination of the internal ventilation regime within the open pit is a complex process as the driving natural wind system will change subject to diurnal and seasonal changes in its strength and direction, which are dictated by the local wind systems and the differential heating of the earth's surface by the sun. In this paper are presented the results from the simple thermodynamic model of the dynamic of open pit ventilation systems. The model can simulate the diurnal change of the solar radiation that take place during the day and the release of this energy during the evening and night as natural ventilation.

Въведение

Основно направление в развитието на промишления добив на полезни изкопаеми се явява откритият способ на разработка на месторожденията. Дълбочината при по-голямата част от съвременните кариери е в границите 150 – 450 m, като в перспектива тя ще продължава да се увеличава.

При проектирането на кариерите е необходимо да се оцени ефективността на тяхното естествено проветряване с цел прогноза на състава на атмосферните примеси и предписание на необходимите средства и начини за борба с тях.

Изискването за непрекъснато подобряване на условията на труд на минните работници и необходимостта от интензификация на производството поставя пред изследователите на процесите на аерация на кариерите редица нови задачи, които предполагат едно по-дълбоко изучаване на законите на проветряване в зависимост от процесите на образуване, разсейване и утаяване на вредните примеси в тясна връзка с микроклиматичните особености на кариерното пространство.

Необходимостта от решаването на този сложен проблем доведе до значително увеличаване на броя на научните изследвания свързани с аерацията на кариерите, като в процеса на проучване се използват най-съвременни методи и апаратура за измерване на параметрите на атмосферата и показателите на въздуха в кариерите (Grainer and Meroney, 1993; Loska, 2007). Едновременно с експерименталните изследвания голяма част от работите в областта са посветени и на теоретични разработки на модели за предвиждане на процесите на разпространение на вредните примеси в атмосферата на откритите рудници (Baklanov, 1986; Vodnor et al., 2008).

Настоящата работа разглежда оценката на потенциала за естествено термодинамично проветряване на кариерите чрез използване на експериментални данни за метеопараметрите и процеса на нагряване и охлаждане на кариерните склонове. На базата на тези данни са пресметнати скоростите на конвективните потоци по склоновете на кариерата през деня в зависимост от тяхното географско разположение.

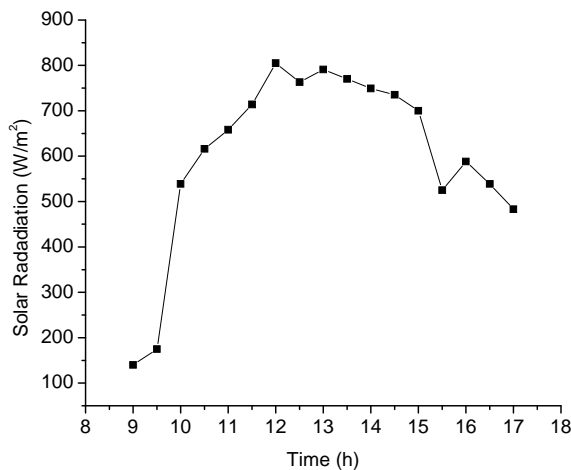
Експериментални резултати

Спецификата на кариерите, формираща микроклиматическите особености, зависи от абсолютните и относителните размери на кариерата, географската ориентация, експозицията и степента на разработка на страничните склонове, от минералния и петрографски състав, албедото и физикохимичните свойства на подложната повърхност.

Главен източник на топлинна енергия за всички атмосферни термодинамични процеси се явява слънчевата радиация. Притокът на топлина към даден участък зависи от неговата ориентация, наклон, време от денонощието, окраска и др. Количеството на сумарната слънчева радиация на дъното на кариерата и на нейните бордове при безоблачно време зависи от изменението на ъгъла на падане на слънчевите лъчи върху разглежданата повърхност.

За да се симулират процесите на нагряване на склоновете на кариерата, са използвани два контейнера с обем 0,03 m³ и повърхнина 0,1 m² - със североизточно и югоизточно изложение съответно. Контейнерите са пълни с около 45 kg варовик с размери на късовете в диапазона 1 – 4 cm. За определяне на температурата на две дълбочини - 5 и 10 cm са използвани калибрирани терморезистори. Слънчевата радиация е измервана с термоелектричен пиранометър. Измерванията са проведени в края на юни 2014.

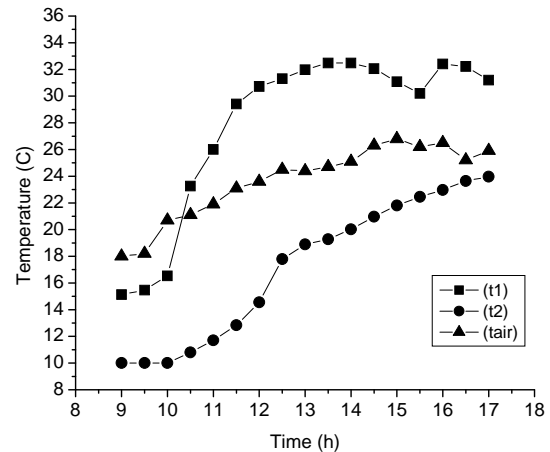
На фигура 1 са представени стойностите на слънчевата радиация през деня. Тя се променя от около 150 W/m² в сутрешните часове до около 800 W/m² към обяд, след което започва да спада и в 17 часа достига до 500 W/m².



Фиг.1. Стойности на слънчевата радиация през деня

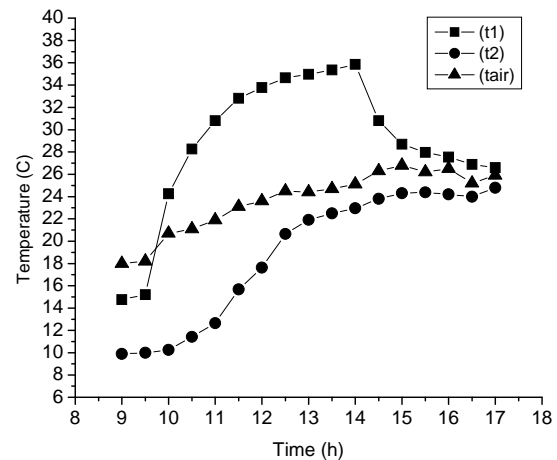
На фигура 2 са представени данни за еволюцията на температурите на варовика на две дълбочини (5 и 10 cm) и на температурата на въздуха. В началото на деня до около 10 часа температурата на скалите е по-ниска от тази на въздуха, след което температурата на дълбочина 5 cm бързо надхвърля тази на въздуха, като около обяд повърхностният слой се нагрява до около 33°C. Температурата на скалните късове на дълбочина 10 cm

дори в 17 часа не успява да достигне тази на въздуха от около 24°C.



Фиг. 2. Промяна на температурата на варовика на дълбочина 5cm (кривата с квадратчета), на дълбочина 10cm (кръгчета) и на въздуха (триъгълници), североизточно изложение

На фигура 3 са представени данните от контейнера с югозападно изложение. За него е характерно, че след 14 часа този склон е вече засенчен. Много добре се вижда как повърхностният слой бързо се охлажда, като само около час след засенчването температурата му почти достига тази на въздуха, докато на дълбочина 10 cm влиянието на засенчването е значително по-слабо.



Фиг. 3. Промяна на температурата на варовика на дълбочина 5cm (кривата с квадратчета), на дълбочина 15cm (кръгчета) и на въздуха (триъгълници), югозападно изложение

Разпределението на топлинната енергия в обема на кариерата се определя от температурата на подложната повърхност. На свой ред, непосредственият контакт между подложната повърхност и въздуха определя температурата на последния за сметка основно на топлообмена.

Приходът на топлина към повърхността на кариерата е неравномерен във времето. Неговото специфично разпределение между различните нива и бордове формира в обема на кариерата своеобразно температурно поле, което съществено се различава от това на повърхността.

Теоретични пресмятания

Разпространението на примесите в кариерата, характера и нивото на замърсяване на въздуха се определят от структурата, посоката, скоростта и режима на въздушните потоци, действащи при различните схеми на естествено проветряване. В основата на класификацията на аеродинамичната картина на движение на въздуха под влияние на естествените термични и/или динамични сили лежат четири типа схеми на аерация: конвективна; инверсионна; правопоточна и рециркуляционна. В редица случаи могат да се наблюдават и комбинирани схеми на проветряване.

Главните физични величини, определящи възникването на една или друга схема на проветряване са скоростта и посоката на вятъра на повърхността и големината на вертикалния температурен градиент в атмосферата на кариерата.

Скоростта на въздуха в кариерата зависи от скоростта на вятъра на повърхността, температурния градиент и от геометрията и ориентацията на кариерата. При скорост на вятъра на повърхността по-ниска от 2 – 3 m/s скоростта на въздушните потоци в кариерата в значителна степен се определят от термичния фактор.

В тази работа е анализирана конвективната схема на проветряване на кариерата. При тази схема на аерация въздухообмена в кариерата се осъществява от възходящите въздушни потоци, възникващи за сметка на притока на топлина към повърхността. Под влияние на слънчевата радиация конвективните потоци активно се развиват през деня, а при пожари и окислителни процеси могат да се наблюдават и нощно време. Конвективно движение на въздуха в кариерата възниква когато вертикалния температурен градиент е положителен и стойността му надвишава сухо адиабатния градиент ($1^\circ\text{C}/100\text{ m}$).

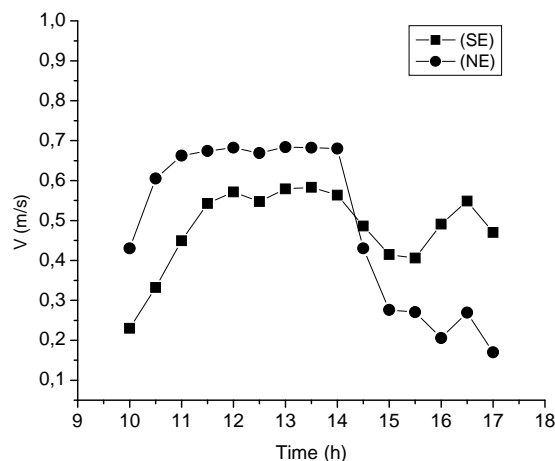
Скоростта на възходящия поток се определя от интензивността на нагряване на съответния борд, неговия ъгъл на наклон и от минералния състав. Ориентировъчно скоростта на възходящите въздушни потоци може да бъде пресметната по формулата (Никитин и Битколов, 1975; Бересневич и др., 1990).

$$v = 0,06 \sqrt{g(H-h) \left(\frac{t_n}{t_b} - 1 \right) \sin \alpha},$$

където H е дълбочината на кариерата, h е дълбочината на точката, за която се изчислява скоростта, t_n е температурата на повърхността на склона, t_b е температурата на въздуха на повърхността на кариерата, α е ъгълът на наклона на съответния склон.

На базата на тази формула и от експерименталните данни за температурите се получават скорости на въздушните потоци, които са показани на фиг. 4. За дълбочината на кариерата е взета стойност 150 m, дълбочината на точката за която се определя скоростта на възходящите потоци, е 50 m, а ъгълът на наклона на

склоновете - 20° . От фигурата се вижда, че скоростта на възходящия поток на склона със североизточно изложение след 11 часа достига стойности от около 0,7 m/s, а на другия - 0,6 m/s. След засенчването на склона със североизточно изложение, скоростта на потоците нагоре бързо спада, като два часа след засенчването достига 0,2 m/s.



Фиг. 4. Еволюция на скоростта на въздушните потоци през различните часове от деня, за двете ориентации на склоновете (NE – североизточно и SE – югоизточно изложение)

Заклучение

Експерименталните данни за еволюцията на температурата на късовете варовик за двете дълбочини 5 и 10 cm, показват, че в началото на деня температурата на скалните късове е по-ниска в сравнение с тази на въздуха. Само след около час – за контейнера с югозападно изложение и след около час и половина – за този със североизточно изложение температурата на варовика превишава тази на околния въздух, като около обяд достига стойности с десет градуса по-високи от тези на въздуха.

След засенчването на контейнера със североизточно изложение, температурата на дълбочина 5 cm започва сравнително бързо да се понижава, като за час тя спада с осем градуса и е само с около два градуса по-висока от тази на околния въздух.

При пресмятането на скоростта на вертикалните въздушни потоци за двете ориентации се вижда, че за склона с югоизточно изложение скоростта на потока в следобедните часове, с малки изключения, се поддържа около 0,6 m/s. За контейнера със североизточно изложение, поради по-бързото му нагряване в началото на деня и достигането на по-високи температури на повърхността, за скоростта на конвективния поток се получават стойности от около 0,7 m/s, която само около час след засенчването спада до около 0,2 m/s.

На базата на тази информация могат да се направят следните изводи:

- Продължителността и интензитетът на слънчевото греене, както и геометрията и ориентацията на кариерата, определят степента на нагряване на съответните склонове.
- Температурният градиент между повърхността на кариерните склонове и въздуха на повърхността определят от своя страна скоростта и времетраенето на конвективните потоци.
- Интензитетът и продължителността на тези потоци формират специфичните условия за проветряване на атмосферата на кариерите в зависимост от тяхната геометрия, ориентация, дълбочина и минерален състав, което в крайна сметка определя и комфорта за работа в мините.

Литература

- Бересневич, П., Михайлов В., Филатов С., 1990. Аэрология карьеров, Москва, Недра.
- Никитин В., Битколов Н., 1975. Проветривание карьеров. Москва, Недра.
- Baklanov A., 1986. A method for evaluating the energy characteristics of the air in an open pit mine. *Journal of Mining Science*, 22.1, pp.66-70.
- Bodnor T., Benez and Kozel, K. 2008. Numerical simulation of flow and pollution dispersion in the area of opencast coal mine. *American Institute of Physics, Conference proceedings*. 1048, 100-103.
- Grainer C. and Meroney, R.N. 1993. Dispersion in an open-cut coal mine in stably stratified flow. *Boundary-Layer Meteorology*, 63, 117-140.
- Loska, G. 2007. Variations in microclimate modified by open-cast mining: case studies from hungary. *Gogr.Fis.Dinan. Quat*, 30, 215-218.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Физика“.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАБОТНИТЕ РЕЖИМИ НА ПРОМЕНЛИВОТОКОВА ЕЛЕКТРИЧЕСКА МАШИНА С ДВОЙНО ЗАХРАНВАНЕ

Ангел Зъбчев, Ромео Александров, Петър Петров, Венко Войводов

Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“, 1700 София, elektrotehnika@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Върху лабораторна постановка, състояща се от куплирани асинхронен двигател с навит ротор и постояннотокова машина, са експериментирани различни режими на работа. Опитите са направени при захранване на статора, на ротора и двустранно. Осъществено е регулиране на скоростта на въртене на асинхронния двигател чрез захранване на статора от мрежата и на ротора от инвертор. Снети са характеристики на системата и са определени основните параметри за избор на инвертор за захранване на ротора с променлива честота.

RESEARCHING OF OPERATING MODES OF DOUBLY FED AC ELECTRIC MACHINE

Angel Zabchev, Romeo Aleksandrov, Petar Petrov, Venko Voivodov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, E-mail: elktrotehnika@mgu.bg

ABSTRACT. On laboratory setup consisting of coupled induction motor with wound rotor and DC machines have been tested different modes. Attempts were made in the power of the stator, the rotor and bilaterally. Powered is controlling the speed of rotation of the asynchronous motor by feeding the stator from the grid and the rotor of the inverter. Taken are characteristics of the system and determine the main parameters for selecting the inverter to power the rotor with variable frequency.

Увод

Развитието на микропроцесорната техника и силовата електроника доведе до раздвижване в приложението на така наречените машини с двойно захранване. На практика този вид електрическа машина не се различава конструктивно от асинхронната машина с навит ротор. При едновременното подаване на променливо напрежение в статора и ротора в двигателен режим може да се регулира скоростта на въртене в зависимост от разликата в честотите на двете напрежения. При тези условия двигателят вече не е асинхронен, по-скоро съответства на синхронен. Един от често използваните варианти за реализиране на машина с двойно захранване е показан на фиг. 3. При него статорът е присъединен към захранващата мрежа с номинални за машината напрежение и честота, а роторът е свързан към регулируем честотен преобразувател. При изменение на честотата и съответно напрежението на изхода на честотния преобразувател се постига регулиране на скоростта на въртене в широки граници. В зависимост от поредността на фазите на двете напрежения това може да става под и над синхронната честота на въртене. Традиционно под синхронна честота на въртене се разбира честотата на въртене на полето, определена от честотата на мрежовото напрежение. В последно време машината с двойно захранване е намерила приложение в областта на добива на енергия от вятърни турбини. Това е обосновано от способността на машината да работи в генераторен режим като произвежда електроенергия с

определени качествени показатели при непостоянни обороти на вала.

По отношение на минната промишленост интерес представляват всички режими на работа на машината. Този тип задвижване може да се прилага при руднични подземни уредби, където електрическата машина трябва да има възможност да работи в двигателен режим и режими на рекоперативно и динамично спиране. Освен това може да се прилага за задвижване на вентилатори за главно руднично проветряване.

Описание на проведените опити

За провеждане на експерименталните изследвания се използват две куплирани машини: изследваната - променливо-токова и товарната - постоянно-токова.

Данни за електрическите машини.

Асинхронен двигател (АД) с навит ротор тип МТ1 12-6.

$$P_n = 5 \text{ kW}$$

$$n_{\min} = 930 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{\max} = 2590 \text{ min}^{-1}$$

$$U_{\text{смап.}} = 380 / 220 \text{ V}$$

$$I_{\text{смап.}} = 13,3 / 23 \text{ A}$$

$$U_{\text{пот.}} = 208 \text{ V}$$

$$I_{\text{пот.}} = 16,5 \text{ A}$$

Постоянно-токова машина със смесено възбуждане тип П-52.

$$P_n = 4,5 \text{ kW}$$

$$I_n = 50,3 \text{ A}$$

$$U_n = 110 \text{ V}$$

$$n_n = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{\text{max}} = 2000 \text{ min}^{-1}$$

Първи опит:

Първоначално се захранва статорът с понижено напрежение (230V) с мрежова честота, а роторът се оставя отворен. Роторът не се върти, липсва момент и ъглова скорост. С помощта на указател на поредността на фазите се определят изводите на ротора, които съответстват на тези на статора. При схемата на фиг. 1 данните за напреженията на статора, ротора и входната мощност са следните:

$$U_{RT} = 232 \text{ V (статор)}$$

$$U_{RS} = 128 \text{ V (ротор)}$$

$$P = 50 \text{ W}$$

При предварително определена права последователност на фазите и подадено напрежение на статора се затваря роторът накъсо. Валът на машината се върти в положителна посока. Данните за входната мощност, обороти и ток на ротора са следните:

$$P = 60 \text{ W}$$

$$n = 995 \text{ min}^{-1}$$

$$I_{\text{рот.}} = 0,7 \text{ A}$$

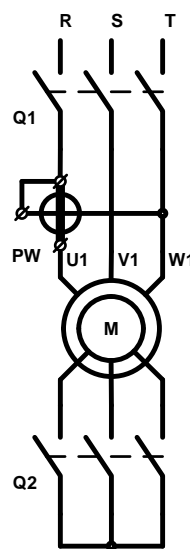
Първоначално товарната машина работи на празен ход, след това се натоварва. Нейната електрическа мощност се определя чрез товарен реостат при номинално възбуждане. Данни при натоварвания от 10 до 25A са дадени в таблица 1.

Таблица 1

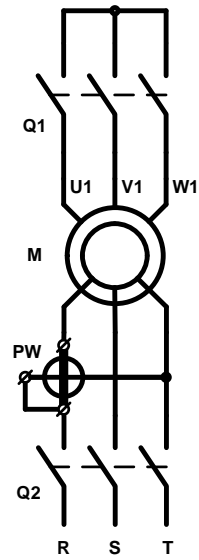
АД захранен в статора				
И ген. А	10	15	20	25
U ген. V	98	92	88	84
P дв. W	470	650	850	1170
I рот. А	6.8	8.8	12	15
I стат. А	5.9	7.1	8.5	10.3
n min-1	945	920	900	865

Втори опит:

Роторът на машината се захранва с понижено напрежение при права последователност на фазите, съответстваща на последователността на статорните изводи (фиг. 2). Статорът е отворен. Напрежението на ротора се регулира чрез автотрансформатор, така че индуцираното в статора напрежение да стане равно на 230V. В този момент роторът не се върти. Данните са следните:



Фиг. 1



Фиг. 2

$$U_{RT} = 232 \text{ V (статор)}$$

$$U_{RS} = 142 \text{ V (ротор)}$$

$$P = 710 \text{ W}$$

$$P_T = 660 \text{ W}$$

$$I_R = 3 \text{ A}$$

$$I_S = 8,3 \text{ A}$$

$$I_T = 8,8 \text{ A}$$

Затваря се статорът накъсо. Валът на машината се завърта в отрицателна посока, обратна на тази при захранване на статора. Данни при натоварвания 10A, 15A, 20A, 25A са дадени в таблица 2.

Таблица 2

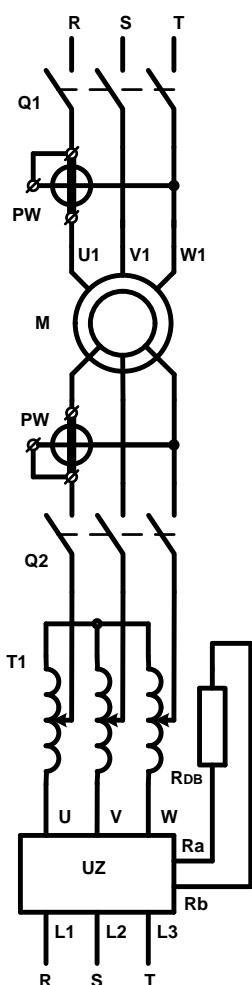
АД захранен в ротора				
И ген. А	10	15	20	25
U ген. V	100	98	94	86
P дв. W	470	650	850	1170
I рот. А	6.8	8.8	12	15
I стат. А	5.9	7.1	8.5	10.3
n min-1	945	920	900	865

Трети опит - Двойно захранване:

Статорът се захранва от мрежата с понижено напрежение (230V), а роторът - през трифазен автотрансформатор от трифазен инвертор на напрежение (честотен преобразувател). И двете напрежения са с права последователност, приложени върху едноименните изводи на статора и ротора. Схемата е показана на фиг. 3. Опитът е направен при честоти на инвертора 50Hz, 40Hz, 30Hz, 20Hz и 10Hz.

Установена е следната последователност на включване на напреженията. Инверторът, с който се работи, е предназначен за управление на АД през статора и при включване неговата честота е нула, като започва да се повишава по зададена рампа. В нашия случай се изисква началната честота, при която машината не се върти, да бъде 50Hz. Затова инверторът се включва на празен ход

до достигане на честота 50Hz. След това през автотрансформатор той се включва към ротора на двигателя при отворен статор. Напрежението се настройва от автотрансформатора, така че индуцираното в статора напрежение да е равно на захранващото понижено напрежение с мрежова честота.



Фиг. 3

Чрез прекъсвач прекъсваме напрежението към ротора и подаваме захранване на статора от мрежата. След това се затваря прекъсвачът Q2 и се захранва роторът от инвертора. Машината работи с двойно захранване – от мрежата към статора и от инвертора към ротора.

А) Работа на АД при честота на инвертора 50Hz

Роторът застава неподвижно в три устойчиви положения, отговарящи на трите чифта полюси на тази машина. Причина за това е, че двете въртящи се магнитни полета на статора и на ротора са в синхрон и са неподвижни едно спрямо друго. Устойчивото положение се получава, когато съответните полюси на фазите на статора и ротора застанат един срещу друг. Всяко принудително механично изместване на тези положения създава значителен съпротивителен момент и съответно увеличаване на тока. Наблюдава се пълзене (въртене с много ниска ъглова скорост) на ротора поради това, че честотата на инвертора не е точно равна на мрежовата.

В) Работа на АД при честота на инвертора 40Hz (Таблица 3)

Тази честота се достига при плавно намаляване на честотата на инвертора от 50Hz до 40Hz. Двигателят се развърта плавно от 0 до 200 об/мин.

$$n = \frac{f_1 - f_2}{p} \times 60 = \frac{50 - 40}{3} \times 60 = 200 \text{ min}^{-1}$$

f_1 - мрежова честота на статора

f_2 - честота на инвертора към ротора

$$f_2 = 40 \text{ Hz}$$

$$U_{л.рот.} = 140 \text{ V}$$

$$n = 200 \text{ min}^{-1}$$

Таблица 3

Р ген.W	38	72	105	136	160	186
Р стат.W	228	600	900	1080	1200	1500
Р рот. W	192	300	480	600	720	900
U rdb V	0	25	40	69	75	100

С) Работа на АД при честота на инвертора 30Hz (Таблица 4)

По подобен начин честотата на инвертора се понижава плавно от 50Hz до 30Hz. Двигателят се върти със скорост 400 об/мин. След установяване на скоростта двигателят се изследва при празен ход и натоварване. Данните са показани в таблицата за 30Hz.

$$f_2 = 30 \text{ Hz}$$

$$U_{л.рот.} = 82 \text{ V}$$

$$n = 400 \text{ min}^{-1}$$

Таблица 4

Рген.W	154	228	296	365	432	518
Рстат.W	600	900	1080	1320	1560	1740
Прот. W	180	300	-360	-480	-540	660
U rdb V	0	5	25	40	50	60

Подобно изследване е направено при честота 20Hz, където оборотите са 600 об/мин (Таблица 5), и при 10Hz, където оборотите са 800 об/мин (Таблица 6).

$$f_2 = 20 \text{ Hz}$$

$$U_{л.рот.} = 56 \text{ V}$$

$$n = 600 \text{ min}^{-1}$$

Таблица 5

Рген.W	345	456	560	672	777	880	981
Рстат.W	900	1080	1320	1500	1800	1980	2280
Ррот.W	120	180	240	300	360	360	420
U rdb V	0	0	0	0	2	10	20

$$f_2 = 10\text{Hz}$$

$$U_{л.ром.} = 26\text{V}$$

$$n = 800\text{ min}^{-1}$$

Таблица 6

Рген.W		704	880	1056	1232	1760	2610
Рстат.W	180	1200	1440	1620	1800	2400	3840
Рот.W	180	120	120	60	60	60	180
Uрст V	31			26			20
Urdb V							

В данните интерес представлява фактът, че при пониски обороти на въртене потокът на енергия с натоварване на двигателя е от статора към ротора. Това се вижда от стойностите на напрежението върху резистора $R_{\text{ДВ}}$.

Заклучение

Основните начини на свързване на АД и данните, получени от описаните опити, потвърждават, че скоростта

на двигателя може плавно да се регулира при захранване на статора с мрежово напрежение и на ротора - от инвертор.

На базата на получените стойности за токовете, напреженията и мощностите за този двигател трябва да се избере инвертор, програмиран за захранване на ротора. Такъв начин на управление е подходящ за АД за високо напрежение, тъй като може да се управлява с инвертор за ниско напрежение през ротора.

Литература

- Онищенко Г. Б. 1967, *Асинхронный вентильный каскад*, М. Энергия, стр. 8, 31.
 Онищенко Г. Б. 1979, *Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания*, М. Энергия, стр.15, 52.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.