

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“
ФАКУЛТЕТ „МИННО ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН „**

**КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ И
ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ“**

маг. инж. Павел Венциславов Данаилов

**„РАЗРАБОТВАНЕ НА АДАПТИРАНИ КРИТЕРИИ И
НОРМАТИВНИ ИЗИСКВАНИЯ ЗА КАЧЕСТВОТО НА
ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ“**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за присъждане на образователна и научна
степен
„ДОКТОР“**

**Област на висше образование 5. Технически науки
Направление: 5.2 „Електротехника, електроника и
автоматика“ Специалност: „Електроснабдяване и
електрообзавеждане“**

**Научен ръководител:
Доц. д-р инж. Илиян Христов Илиев**

**СОФИЯ
2022**

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен катедрен състав на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ на Факултет „Минно електромеханичен“ към Минно-геоложки университет – София на 04.05.2022г.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ към Минно-геоложки университет – София.

Защитата на дисертационният труд ще се състои в зала 105 на Минно-геоложки университет – София.

Материалите по дисертационния труд са на разположение в канцеларията на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ при Минно-геоложки университет – София.

Благодарност: *Издавам признателност, уважение и благодарност към научният ми ръководител за ценните указания, съвети и практически препоръки при създаването на настоящата дисертация, а също и за всестранната подкрепа и съдействие в преодоляване на затрудненията от най-различен характер.*

Автор: Павел Венциславов Данаилов

E-mail: pavel_danailov@abv.bg

Заглавие: „Разработване на адаптирани критерии и нормативни изисквания за качеството на електрическата енергия“

А.ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Иновативните съвременни технологии изискват електронизация, въвеждане на регулируеми полупроводникови задвижвания и управление на електрическите процеси в мощните потребители, като *електродъгови пещи(ЕДП), заваръчни агрегати, електролизни уредби, електрически багери, кранове, електровози и тролей, промишлено осветление и много други.* Тези потребители и електронните им системи за контрол, регистрация и управление предизвикват сериозни смущения, като отклонение и колебание на напрежението и тока, несиметрия и несинусоидалност на напрежението и тока, както и повишена вероятност за прекъсвания на електроснабдяването от най-различен характер. Влошаването на показателите на качеството на електрическата енергия (ПКЕЕ) от страна на потребителите на ЕЕ има сериозен негативен икономически ефект, изразяващ се в повишени загуби на мощност и ЕЕ. Оценката на тези загуби може да стане чрез определяне на изменението на специфичния разход на ЕЕ за отделните потребители, промишлени обекти (ПО) или отрасли. За постигане на висока точност на резултатите от подобни изследвания, от съществено значение е адекватно и практически издържано, вероятно-статистическо определяне на ПКЕЕ. Това е свързано с разработването на адаптирани критерии и нормативни изисквания за качеството на електрическата енергия.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на настоящия дисертационен труд е следната:

Да се изследват методи и постановки за аналитично и практически приложно определяне на ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС. Да се формулират теоретични направления и способности за комплексно изследване с цел установяване на взаимни връзки между качеството на ЕЕ и различни енергетични характеристики. Да се проведат теоретични и експериментални изследвания в реални обекти и се установят различни зависимости между енергетични показатели и ПКЕЕ, даващи възможност за създаване на адекватна нормативна база в областта на качеството на ЕЕ и ЕМС. На базата на проведени експериментални изследвания да се предложи научно-обоснована методика, която да обхваща комплексни критерии, принципи и зависимости в процеса на нормиране на ПКЕЕ и ЕМС.

За постигане на тази цел е необходимо да се формулират и решат следните задачи:

1. Чрез прилагане на задълбочено проучване и сравнителен анализ в сферата на водещите в световен аспект научни теории, да се изяснят несъответствията и неточностите при определянето на различните мощностни субстанции, които имат пряко отношение към качеството на ЕЕ. Да се проведе обстойно изследване на национални и световни стандарти в областта на качеството на ЕЕ и ЕМС и се предложи критичен подход относно принципите, критериите и методологията на прилагане на съществуващата нормативна база при експлоатация на електрическите съоръжения.

2. Въз основа на известни теоретични подходи, да се разработят методични постановки за експресен анализ при комплексно изследване и нормиране на ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС. Да се дефинират показатели и характеристики, отразяващи енергетичното въздействие на натоварването върху методите за оценка на качеството на ЕЕ и ЕМС.

3. Да се разработи комплексен теоретичен подход, даващ възможност да се установят взаимните връзки между различни енергетични характеристики и ПКЕЕ. В теоретичен и практически-приложен аспект, да се изследват характеристиките на качеството на ЕЕ и ЕМС, като се подходи комплексно, в съответствие с общата електротехническа природа на тези понятия и силната им релативна връзка.

4. Да се изучат възможностите и условията за настъпване на резонансни явления, като една от отрицателните характеристики на ЕМС, както и методите за подтискане на тези негативни явления.

5. Да се проведат изследвания в реални промишлени обекти с помощта на обективни измервателни средства и методи, даващи възможност да се установят количествени зависимости между енергетични показатели, ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

6. Да се изследват възможностите за прилагане на дуалистични подходи с цел постигане на висока електроенергийна ефективност и минимизиране на ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

7. Да се приложи в реални изследвания, представеният в т.3 комплексен многофакторен подход и се анализират резултатите от оптимизационните процеси с цел формулиране на адекватен критерий за нормиране на ПКЕЕ.

8. На базата на формулирания критерий за оптимизация, да се предложи опростен графо-аналитичен метод за нормиране на ПКЕЕ.

Методи на изследване

Дисертационния труд се базира на голям обем експериментални изследвания, като всички данни и измервани величини са обработени и анализирани с методите на математическата статистика, теорията на планиране на експеримента (ТПЕ), MATLAB, MATHCAD и др. инструменти.

Апробация на работата

Значителна част от резултатите на работата са представени в дисертацията и публикациите на автора.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационния труд е в обем от 164 стр., структуриран е в 4 глави и едно приложение съдържа множество формули, 54 фигури, 35 таблици, 123 заглавия на литературни източници от които 90 на кирилица и 32 на латиница. В автореферата номерацията на фигурите, таблиците и формулите съответства на тази от дисертационния труд.

Навсякъде в дисертационния труд основните термини и определения са представени с техните съкращения и обозначения. Те, съответно, за улесняване на прочита са изнесени в отделна страница в началото на дисертацията.

ПЪРВА ГЛАВА

ОБСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА АКТУАЛНИ МЕТОДИКИ И ПОСТАНОВКИ ЗА ОЦЕНКА НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Разгледани са класически теории за оценка на качеството на електрическата енергия и електромагнитна съвместимост. Направен е сравнителен анализ на различни мощностни теории, разделени в две групи – мощностни теории във времевата и в честотната област. Теорията на обобщената неактивна мощност (GINAPT) е детайлно обяснена и се използва при анализ на съвременни теоретични постановки за изследване качеството на ЕЕ. Направен е сравнителен анализ на стандартите на ANSI, ГОСТ, CNS, БДС EN, BS, IEEE, ESKOM и др., като някои от характеристиките са систематизирани в таблична форма.

- Мощностни теории, дефинирани във времевата област.
- Мощностни теории, дефинирани в честотната област
- Мощностна теория, базирана на оптимизационен подход

Теорията за обобщената моментна неактивна мощност (**Generalized Instantaneous Non Active Power – GINAPT**) е базирана на идеята на Fryze за неактивна мощност / ток

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T \\ i(t) &= [i_1(t), i_2(t), \dots, i_m(t)]^T \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t u^T(\tau) \cdot u(\tau) d\tau} \\
 I(t) &= \sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t i^T(\tau) \cdot i(\tau) d\tau}
 \end{aligned}
 \tag{1.11}$$

Моментната пълна мощност $p(t)$, се дефинира по стандартния начин:

$$p(t) = u i = \int_{k=1}^m u_k(t) i_k(t) \tag{1.12}$$

Същността на теорията е декомпозицията на пълният ток $i(t)$ на активна $i_a(t) = [i_{a1}(t), i_{a2}(t), \dots, i_{am}(t)]^T$ и неактивна $i_n(t) = [i_{n1}(t), i_{n2}(t), \dots, i_{nm}(t)]^T$ компонента:

$$\left. \begin{aligned}
 i_a(t) &= \frac{P(t)}{U_{ref}^2(t)} u_{ref}(t) \\
 i_n(t) &= i(t) - i_a(t)
 \end{aligned} \right\} \tag{1.13}$$

Въз основа на теоретичното представяне на GINAPT, може да се направят следните заключения:

- Моментният активен $i_a(t)$ и неактивен $i_n(t)$ ток са ортогонални, което означава, че интегралът от произведението им за цяло число полупериоди е равен на нула:

$$\int_{i-T_{avg}}^t i_a(\tau)^T i_n(\tau) \cdot d\tau = 0$$

- Моментния активен ток е във фаза със захранващото напрежение, докато моментния неактивен ток е в квадратура с него.

- Моментната мощност $p(t)$ е сума от моментната активна мощност $p_a(t)$ и моментната неактивна мощност $p_n(t)$:

- Ако за отправно напрежение е избрано самото захранващо напрежение, то пълната мощност $S(t)$, пълната активна мощност $P_{app}(t)$ и пълната неактивна мощност $Q(t)$, удовлетворяват равенството:

$$S(t) = \sqrt{P_{app}^2(t) + Q^2(t)}$$

Таблица 1.1. Сравнение между някои мощностни теории						
Автор(и) на мощностна теория	Година на публикуване	Брой фази на системата			Стойност на величините	
		Една	Три	Моно-фазна	Средна и/или ефективна стойност	Моментна стойност
Мощностни теории, дефинирани във времевата област						
Fryze (мощностна теория на Fryze) – ортогонални токове	1931	X			X	
Kusters и Moore - индуктивни и капацитивни токове	1979	X			X	
Depenbrock - първият хармоник на напрежението и тока	1979	X			X	
Akagi, Nabae, Kanazawa - p-q мощностна теория	1983		X			X
Ferrero, Superti-Furga - мощностна теория на Парк	1991		X			X
Willems - обобщение на мощностните теории на Akagi и Ferrero	1992		X	X		X
Depenbrock - FDB (Fryze-Bushholz-Depenbrock) Мощностна теория	1993		X	X	X	X
Rosseto и Tenti - моментни ортогонални токове	1994		X	X		X
Nabae и Tanaka - моментен вектор в полярни координати	1996		X			X
Peng - теория за обобщената Реактивна мощност	1996		X			X
Peng и Lai - теория за обобщената Неактивна мощност	2000	X	X	X	X	X
Мощностни теории, дефинирани в честотната област						
Budeanu	1927	X			X	
Shepherd и Zakikhani	1972	X				
Czarnecki - теория на физическите токови компоненти	1983 1994	X	X		Хармоничен анализ	
Оптимизационен подход						
Pasko, Siwczynaski, Walczak	1985	X	X	X	X	

Първата мощностна теория (табл.1.1), дефинирана в честотната област е разработена през 1927г. от Budeanu, отнесена за една фаза.

$$P = \sum_{v=1}^{\infty} U_v \cdot I_v \cdot \cos\varphi_v \quad (1.25)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi; \quad Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (1.26)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.27)$$

$$S = \sqrt{(\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2) \cdot (\sum_{v=1}^{\infty} I_v^2)} \quad (1.28)$$

$$\begin{aligned} P &= \sum_{v=1}^{\infty} P_v = \sum_{v=1}^{\infty} U_v \cdot I_v \cos\varphi_v \\ Q &= \sum_{v=1}^{\infty} Q_v = \sum_{v=1}^{\infty} U_v \cdot I_v \sin\varphi_v \end{aligned} \quad (1.29)$$

$$\begin{aligned} S^2 &= \sum_{v=1}^{\infty} U_v^2 \cdot \sum_{v=1}^{\infty} I_v^2 \geq (\sum_{v=1}^{\infty} U_v \cdot I_v \cos\varphi_v)^2 + \\ &+ (\sum_{v=1}^{\infty} U_v \cdot I_v \sin\varphi_v)^2 \end{aligned} \quad (1.30)$$

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad \text{или} \quad S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1.31)$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} [U_v(t) \cdot I_j(t) - I_v(t) \cdot U_j(t)]^2 \cdot dt} \quad (1.32)$$

Концептуален подход при нормиране на показателите на качеството на ел. енергия (ПКЕЕ). В съответствие с теоретичния анализ в параграф 1.1 и 1.2. се предлага качеството на електрическата енергия да се оценява чрез сравняването на неефективни величини (такива свързани с дефазирането на токовете и напреженията, дебаланс и деформации), с полезни величини.

$$K_{eU} = \frac{U_{eH}}{U_f^+} \quad K_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_f^+} \quad (1.50)$$

$$K_{OHU} = \frac{U_{небф}}{U_f^+} \quad K_{OHI} = \frac{I_{небф}}{I_f^+} \quad (1.51)$$

$$PF_e = \frac{P_f^+}{S_e} \quad (1.52)$$

ПКЕЕ регламентиращи нивото и формата на напрежението

В съответствие с БДС EN 50160 те са:

- отклонение и колебание на напрежението и честотата;
- несиметрията и изместването на неутралата на основната честота;
- несинусоидалност на формата на кривата на напрежението при нормален и аварийен (краткотраен преходен режим, свързан с нарушаване нормалната работа на системата) режим.

Изискванията на стандарта БДС EN 50160 касаят мрежи средно и ниско напрежение. Той по същество не поставя изисквания върху хармоничния състав на токовете, а разглежда единствено напреженията (за разлика от IEC 6100-3-X стандартите и IEEE 519). Допустимите стойности на хармоничният състав на напреженията спрямо БДС EN 50160 са показани в таблица 1.5

Таблица 1.5. Допустими стойности за напреженови хармоници					
Нечетни хармоници				Четни хармоници	
Не кратни на 3		Кратни на 3			
Номер ν	U [%]	Номер ν	U [%]	Номер ν	U [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6-24	0.5
13	3	21	0.2	-	-
17	2	-	-	-	-
19	1.5	-	-	-	-
23	1.5	-	-	-	-
25	1.5	-	-	-	-

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

1. В първа глава на дисертационната работа са анализирани актуални методики и постановки за оценка на качеството на ЕЕ и ЕМС. Направен е сравнителен анализ на различни мощностни теории, разделени в две групи – мощностни теории във времевата и в честотната област. Теорията на

обобщената неактивна мощност (GINAPT) е детайлно обяснена и се използва при анализ на съвременни теоретични постановки за изследване качеството на ЕЕ. Показани са несъответствията и неточностите на различните формализации за определяне ефективните стойности на токовете и напреженията. Представен е концептуален подход при нормиране на ПКЕЕ, при който се предлага качеството на ЕЕ да се оценява чрез сравняване на неефективни величини, свързани с дебаланса и деформациите на напрежението и токовете, със полезни величини (полезната активна мощност.)

2. Извършено е обстойно и задълбочено изследване на национални и международни стандарти, свързани с качеството на ЕЕ и ЕМС. Направен е сравнителен анализ на стандартите на ANSI, ГОСТ, CNS, БДС EN, BS, IEEE, ESKOM и др., като някои от характеристиките са систематизирани в таблична форма. Обърнато е внимание на голямото разнообразие от нормативни документи в национален и световен мащаб и често срещаните в тази връзка нееднозначност и противоречивост на тълкувания, обобщения и изводи. Установено е, че процеса на нормиране не е научно обоснован и методически регламентиран, а се извършва чрез механично копиране и взаимстване. Не са формулирани критерии за нормиране и не са обосновани стойностно и количествено заложените в стандартите показатели. В тази връзка в тази глава на дисертационната работа се предлагат конкретни критерии за нормиране, които отчитат режима на работа на съоръженията и тяхното натоварване. Освен това идейно е разработена и предложена система за метрологично осигуряване и контрол на качеството на ЕЕ и ЕМС. Този критичен подход е детайлно развит, като е застъпена тезата в процеса на нормиране да се подхожда комплексно, като се търси взаимната връзка между електроенергийната ефективност, качеството на ЕЕ и характеристиките на ЕМС.

ВТОРА ГЛАВА

ТЕОРИТИЧНИ И ПРАКТИЧНО-ПРИЛОЖНИ ИНСТРУМЕНТАРИУМИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЕ И ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ

Във втора глава са анализирани различни методи за практическо определяне на ПКЕЕ:

- Отклонение на напрежението. В коя да е точка от мрежата в произволен момент от време t , $\delta U(t)$ се определя от сумата на всички допълнителни напрежения $\sum_{i=1}^n \delta U_{\delta_i}$, намалено със сумата от загубите на напрежение $\sum_{i=1}^n \Delta U_i(t)$:

$$U(t) = \sum_{i=1}^n \delta U_{\delta_i} - \sum_{i=1}^n \Delta U_i(t) \quad (2.2)$$

- колебание на напрежението

$$\delta V = \frac{r \cdot \Delta I \cdot \cos \varphi + \Delta I \cdot \sin \varphi}{U_H}; \quad \delta V = \frac{\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x}{U_H} \quad (2.3)$$

$$\delta V = \frac{\Delta Q \cdot x}{U_H^2} 100[\%]; \quad \delta V = \frac{\Delta Q}{S_k} 100[\%] \quad (2.4)$$

$$\delta V_{BH} = \frac{\Delta Q}{S_k} 100[\%]; \quad \delta V_{CH} = \left(1 + \frac{S_k}{S_{HTP}} U_k\right) \frac{\Delta Q}{S_k} 100[\%] \quad (2.5)$$

При работа на дъгови стоманодобивни пещи с различни мощности ($2 \div 80$ MW; $20 \div 300$ тона), КН за работа на една пещ и група от n пещи се определя от условията:

$$\left. \begin{aligned} \delta V(n=1) &= \frac{S_{H\Pi T}}{S_K} 100 \leq 1\%; \delta V(n \leq 4) = 0.85 \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{HPT}^2}}{S_K} \leq 1\% \\ \delta V(n > 4) &= 0.6 \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{HPT}^2}}{S_K} \leq 1\% \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

При 3А, захранени, от изправители максималното КН δV_{max} за един 3А и група едновременно работещи 3А се определя съответно от изразите [20, 7]:

$$\delta U_{max} = k \frac{S_{H3A}}{S_{HTP}} U_k [\%]; \delta U_{max} = k \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 S_{H3Ai}^2}}{S_{HTP}} U_k [\%] \quad (2.7)$$

- несиметрия на напрежението и тока

Степента на насиметрия на трифазна система се характеризира с коефициента на несиметрия по напрежение и ток ε_U и ε_I и коефициентите на неуравновесеност по напрежение и ток α_U и α_I

$$\begin{aligned} \varepsilon_U &= U_2/U_1 \cdot 100\%; \quad \varepsilon_I = I_2/I_1 \cdot 100\%; \\ \alpha_U &= U_0/U_1 \cdot 100\%; \quad \alpha_I = I_2/I_1 \cdot 100\% \end{aligned} \quad (2.16)$$

При несиметрия на напреженията и токовете се влошава факторът на мощността K_P , за който могат да се запишат следните изрази:

$$K_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2}} \quad (2.17); \quad N = \varepsilon_I \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.18)$$

$$K_P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2} \sqrt{1 + \varepsilon_I^2}} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \varepsilon_I^2}} \quad (2.19)$$

Представени са съвременни подходи и методики за определяне ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

Методиката е развита в следната последователност. По аналогия на изрази (1.36), (1.37), (1.39) и (1.40), се определят еквивалентното (rms) напрежение и ток U_e и I_e чрез линейните

напряжения U_{12} , U_{23} и U_{31} и линейните токове I_{12} , I_{23} и I_{31} :

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2}{3}}; \quad I_e = \sqrt{\frac{I_{12}^2 + I_{23}^2 + I_{31}^2}{3}} \quad (2.43)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{12f} &= \frac{U_{12f}}{\sqrt{\frac{THDU_{12}+1}{100}}}; & U_{23f} &= \frac{U_{23f}}{\sqrt{\frac{THDU_{23}+1}{100}}}; & U_{31f} &= \frac{U_{31f}}{\sqrt{\frac{THDU_{31}+1}{100}}} \\ I_{12f} &= \frac{I_{12f}}{\sqrt{\frac{THDI_{12}+1}{100}}}; & I_{23f} &= \frac{I_{23f}}{\sqrt{\frac{THDI_{23}+1}{100}}}; & I_{31f} &= \frac{I_{31f}}{\sqrt{\frac{THDI_{31}+1}{100}}} \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

В съответствие с IEEE555 е въведен TDD – total demand distortion за напряженията и токовете съответно VTDD и ITDD:

$$\left. \begin{aligned} VTDD_{12} &= \sqrt{\frac{U_{12}^2 - U_{12f}^2}{U_{12}^2}}; & VTDD_{22} &= \sqrt{\frac{U_{23}^2 - U_{23f}^2}{U_{23}^2}}; & VTDD_{31} &= \sqrt{\frac{U_{31}^2 - U_{31f}^2}{U_{31}^2}} \\ ITDD_{12} &= \sqrt{\frac{I_{12}^2 - I_{12f}^2}{I_{12}^2}}; & ITDD_{22} &= \sqrt{\frac{I_{23}^2 - I_{23f}^2}{I_{23}^2}}; & ITDD_{31} &= \sqrt{\frac{I_{31}^2 - I_{31f}^2}{I_{31}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

Общия коефициент на несиметрия TU (total unbalance) за напряженията (VTU) и за токовете (ITU) се определя от изразите:

$$VTU = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{VDI_{12}^2 + VDI_{23}^2 + VDI_{31}^2}; \quad ITU = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{IDI_{12}^2 + IDI_{23}^2 + IDI_{31}^2} \quad (2.48)$$

$$THDIW = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{THDIW_{12}^2 \cdot \frac{I_{12}^2}{I_e^2} + THDIW_{23}^2 \cdot \frac{I_{23}^2}{I_e^2} + THDIW_{31}^2 \cdot \frac{I_{31}^2}{I_e^2}} \quad (2.50)$$

$$ITUW = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{IDIW_{12}^2 \cdot \frac{S_{12}^2}{S_{3p}^2} + IDIW_{23}^2 \cdot \frac{S_{23}^2}{S_{3p}^2} + IDIW_{31}^2 \cdot \frac{S_{31}^2}{S_{3p}^2}} \quad (2.51)$$

Пълната действителна мощност S_d се представя в съответствие с фиг.2.9 и израза:

$$S_d = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + (3n + 1)S_0^2 + D^2} \quad (2.52)$$

където: P , Q , N , S_0 и D – са съответно активна, реактивна, пулсираща, скрита и деформационна мощности; n – коефициент, показващ колко пъти съпротивлението на неутралния проводник е по-голямо от съпротивлението на фазните проводници.

Разработен е комплексен многофакторен подход, с помощта на който се получават математически модели, описващи зависимости между различни показатели и характеристики, свързани с качеството на ЕЕ и ЕМС. За осъществяването му се използва математическия апарат на Теорията на планиране на експеримента (ТПЕ).

При използване на теорията на планиране на експеримента (ТПЕ) съществуват две основни задачи:

- Планиране на експеримента с цел получаване на математически модели;
- Планиране на експеримента с цел получаване на оптимални стойности на факторите.



Фиг.2.10. Обект на изследване – „черна кутия“

Изисквания към обекта на изследване, изходните параметри и съществените фактори при ТПЕ:

- Възпроизводимост
- Управляемост
- Параметъра на оптимизация трябва да бъде количествено измерим
- Непрекъснатост и диференцируемост на функцията на отклика
- Съществените фактори (СФ) трябва да бъдат управляеми, съвместими и независими

Планиране на експеримента от първи порядък

$$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_m \cdot X_m \quad (2.69)$$

Матрицата на планиране притежава свойствата „симетричност“ и „нормираност“.

$$\dot{X}_i = \frac{X_i - X_{i0}}{I_i} \quad (2.70); \quad \sum_{j=1}^N \dot{X}_{ij} = 0 \quad (2.71)$$

Таблица 2.4. Матрица на ПЕ при три фактора (X_1, X_2, X_3) на две нива (1; -1)				
опит	X_1	X_2	X_3	Y
1	1	1	1	Y_1
2	-1	1	1	Y_2
3	1	-1	1	Y_3
4	-1	-1	1	Y_4
5	1	1	-1	Y_5
6	-1	1	-1	Y_6
7	1	-1	-1	Y_7
8	-1	-1	-1	Y_8

Планиране на експеримента от втори порядък

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot \dot{x}_1 + b_2 \cdot \dot{x}_2 + b_3 \cdot \dot{x}_3 + b_{12} \cdot \dot{x}_1 \cdot \dot{x}_2 + b_{13} \cdot \dot{x}_1 \cdot \dot{x}_3 + b_{23} \cdot \dot{x}_2 \cdot \dot{x}_3 + b_{11} \cdot \dot{x}_1^2 + b_{22} \cdot \dot{x}_2^2 + b_{33} \cdot \dot{x}_3^2 \quad (2.83)$$

$$B = [F^T \cdot F]^{-1} \cdot F^T \cdot Y \quad (2.84);$$

$$b_0 = a \sum_{u=1}^N y_u + p \sum_{j=1}^m \sum_{u=1}^N \dot{x}_{ju}^2 y_u \quad (2.85)$$

Таблица 2.5 матрица $C = [F^T \cdot F]^{-1}$ за план B_3										
0,40625	0	0	0	0	0	0	0	-0,15625	0,15625	0,15625
0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,125	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,125	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,125	0	0	0	0
-0,15625	0	0	0	0	0	0	0,40625	0,09375	0,09375	0,09375
-0,15625	0	0	0	0	0	0	-0,09375	0,40625	0,09375	0,09375
-0,15625	0	0	0	0	0	0	-0,09375	0,09375	0,40625	0,09375

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{уд} - \bar{y}_д)^2, \quad (2.89); \quad S_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 \quad (2.92)$$

$$S_{ост}^2 = \frac{Q_{ост}}{v_{ост}} = \frac{1}{v_{ост}} \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2, \quad (2.99);$$

$$F_R = \frac{S_R^2}{S_{ост}^2} \quad (2.102)$$

Представения многофакторен подход за изследване процесите на електроснабдяването, разработен на базата на ТПЕ, дава възможност да се получат математически модели, описващи връзките между различни ПКЕЕ и характеристики на ЕМС. Приложен за реални обекти от ЕСС, той оценява влиянието на всеки един фактор върху ИП при едновременно въздействие на всички съществени фактори. Освен това метода определя и оптимални области на изменение на съществените фактори и изходните параметри при заложили различни критерии за оптималност в техническите задачи. Това го прави особено подходящ при решаване по най-адекватен начин фундаменталния проблем, свързан с нормиране на ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА

1. Във втора глава на дисертационната работа са анализирани различни методи за практическо определяне на ПКЕЕ. Представени са съвременни и класически постановки, математически процедури и технологични решения, свързани с прилагане на тези подходи в реални обекти. Поставената задача е изключително актуална, прецизно разработена, с висока ефективност, адекватност и приложимост при анализ и оценка

на различни енергетични параметри и процеси, свързани с качеството на ЕЕ. Теоретичната разработка и нейните елементи дават възможност да се провежда експресен, качествен и ефективен анализ на различните енергетични субстанции в изследователския процес и определяне на релативни и корелационни връзки с ПКЕЕ и ЕМС. Методично е утвърдена приложимостта на представената концепция върху широк обхват потребители от различни отрасли на промишлеността, с различни технически характеристики и режимни параметри. Това дава възможност за лесна и ефективна апробация на теоретичните процедури, което е извършено по-нататък в разработката за изследване и нормиране на ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

2. В съответствие със стандарта IEEE 555 са дефинирани притеглени коефициенти на токова несиметрия IT_{UW} и коефициент на хармонични изкривявания $THDI_W$, отнесени съответно към пълна трифазна мощност и еквивалентния ток. Теоретичната постановка отразява по-справедливо и достоверно енергетично въздействие на натоварването върху качеството на ЕЕ и е необходимо ефективно да се използва при разработване на нова адекватна концепция за нормиране на ПКЕЕ и ЕМС, с отчитане натоварването и режимите на работа на електроенергийните съоръжения. Предложен е и теоретичен подход, при който енергетичните характеристики се разглеждат както в обобщен, така и в парциален вид. Различните субстанции на мощността и активните загуби от влошени ПКЕЕ са диференцирано определени и формулирани, което дава възможност лесно и обективно да се измерват с помоща на мрежови анализатори и травиални технически средства. Двете теоретични постановки са в пълна степен научно-обосновани и представляват нов критерий за оценка на качесвото на ЕЕ. Също така те могат да послужат като база за създаване на

съвременна философска стратегия за разработване на прогресивни нормативни изисквания за ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

3. Разработен е комплексен многофакторен подход, с помощта на който се получават математически модели, описващи зависимости между различни показатели и характеристики, свързани с качеството на ЕЕ и ЕМС. За осъществяването му се използва математическия апарат на Теорията на планиране на експеримента. Чрез прилагането му в многофакторно пространство, се реализира едновременно въздействие на множеството съществени фактори върху изходните параметри, с което се постига бързодействие и икономия на средства и ресурси. В методическата постановка са пояснени условията, съображенията и предпоставките за избор и определяне на изходните параметри и съществените фактори. Указани са методите и критериите за адекватност и значимост на математическите модели и съществените фактори при планиране от първи и втори порядък, както и за оценка на дисперсията на грешките. Направен е анализ на различни планове от втори порядък, като приоритетно са разгледани Вт плановете и в резултат на техните предимства е предложено използването им в изследователския процес. Метода дава възможност да се решават оптимизационни задачи, като се дефинират оптимални области на изменение на изходните параметри и съществените фактори и се управлява процеса като цяло.

ТРЕТА ГЛАВА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ, АНАЛИЗ И РАЦИОНАЛИЗИРАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЕ И ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ

Трета глава от работата е посветена на изследване върху енергетични процеси, параметри и характеристики на ЕСС, свързани с качеството на ЕЕ и ЕМС. Направен е задълбочен преглед и проучване на източниците на електромагнитни смущения, влошаващи ЕМС. Анализирани са различни режими на работа на силови трансформатори, дъгови съпротивителни пещи, заваръчни агрегати, електролизни уредби и компенсиращи системи, като са оценени количествено взаимните връзки между ПКЕЕ и ЕМС.

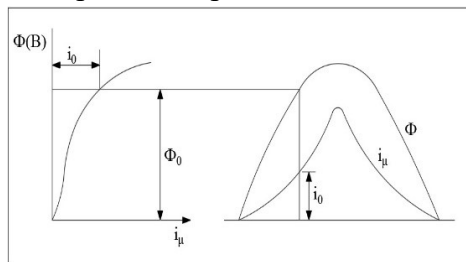
Систематизирани са следните основни източници, влошаващи ЕМС в ЕСС на различни обекти:

- Силови трансформатори (СТ);
- Електродъгови пещи (ЕДП);
- Заваръчни агрегати (ЗА);
- Електролизни уредби (ЕЛЛУ);
- Компенсиращи уредби (КУ);
- Осветителни Уредби (ОУ).

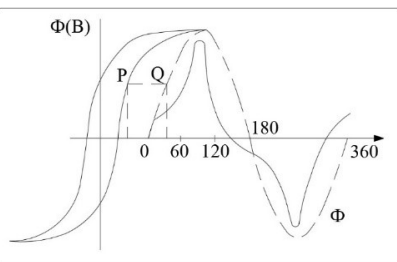
- Силови трансформатори

При отчитане на ефекта от хистерезиса (фиг. 3.3), несинусоидалната крива на намагнитване не е симетрична спрямо максималната стойност. Деформациите, илюстрирани на фиг. 3.2 и 3.3, предизвикват основно поява на нулева последователност на тока и съответстващите и трети и кратните на три хармоници. Този

проблем съществува при СТ, свързани в звезда и липсва при схема на свързване в триъгълник



Фиг.3.2. $\Phi=f(i_{\mu})$



Фиг.3.3. Влияние на хистерезиса

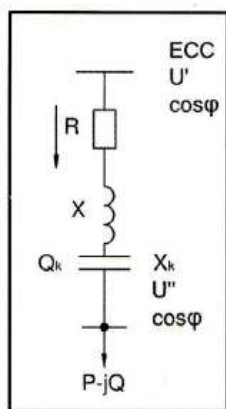
- Електродъгови пещи

$$K_{\Phi.S} = \frac{S_{\text{ср.кв.}}}{S_{\text{ср}}}; \quad K_{\Phi.P} = \frac{P_{\text{ср.кв.}}}{P_{\text{ср}}}; \quad K_{\Phi.Q} = \frac{Q_{\text{ср.кв.}}}{Q_{\text{ср}}} \quad (3.1)$$

$$K_{\Phi.S} = (1,2 \div 1,45); \quad K_{\Phi.P} = (1,2 \div 1,45); \quad K_{\Phi.Q} = (1,2 \div 1,5) \quad (3.2)$$

На практика почти всички ДСП се изграждат, като трипроводна система без нулев проводник и нулевата съставляща на тока отсъства, т.е. $I_0 = 0$. Коефициентът на несиметрия по ток ε_I може да се определи в съответствие с израза (2.29) по формулата:

$$\varepsilon_I = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - 4F\sqrt{3}}{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + 4F\sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - 4F\sqrt{3p(p-I_A)(p-I_B)(p-I_C)}}{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + 4F\sqrt{3p(p-I_A)(p-I_B)(p-I_C)}}} \quad (3.3)$$



На фиг. 3.5 е представена схема на надлъжна КРТ с потребление на реактивна мощност в линията $Q_L = I^2 \cdot X_C$, като част от мощността се компенсира от КБ: $Q_C = I^2 \cdot X_C$. Следователно общото потребление на реактивна мощност ще бъде Q'_L :

$$Q'_L = Q_L - Q_C = I^2(X_L - X_C) \quad (3.4)$$

Фиг.3.5. Ако $X_L = X_C$ то ще имаме 100% КРТ и $\cos\varphi_1 =$

$\cos\varphi_2$ а при $X_L < X_C$ ще се генерира реактивна мощност с капацитивен характер и $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$, т.е. надлъжната схема, както и напречната може да се използва за КРТ.

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{P_H R_1 + Q_H X_L}{U_1} \quad (3.5)$$

При наличие на надлъжна КРТ се получава ΔU :

$$\Delta U' = \frac{P_H R_1 + Q_H (X_L - X_C)}{U_1} \quad (3.6)$$

Загубата на напрежение се е намалила със стойността на ΔU_K :

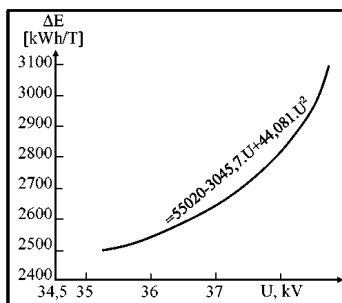
$$\Delta U_K = \Delta U - \Delta U' = Q X_C \frac{Q X_C}{U_1} \quad (3.7)$$

- Електролизни уредби

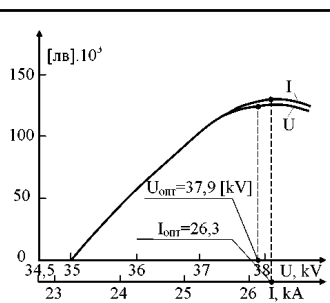
Представени са резултати от изследването на две серии електролизни уредби, всяка от които се състои от (125 ÷ 135) вани с номинален ток и напрежение $I_H = 25\text{kA}$; $U_H = 425\text{V}$. на фиг. 3.9 е представена еднолинейната схема на обекта, като изправителите са 12 фазни неуправляеми

$$\left. \begin{aligned} I_0(U) &= 21049,33 - 1115,71U + 14,693U^2 \\ I_0(I) &= -7705 + 593,751I - 11249I^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

За оптимизиране режима на работа на електролизната уредба определяща роля указва тока на уредбата. Следователно максималната икономическа ефективност $I_{0(\max)}$, може да е оптималната



Фиг.3.10. Зависимост $\Delta E = f(U)$

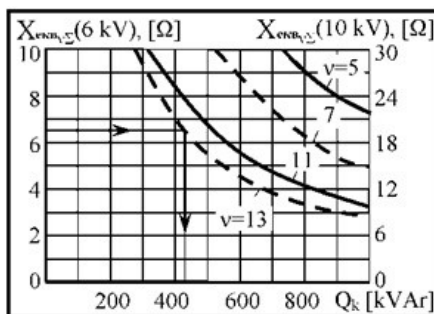
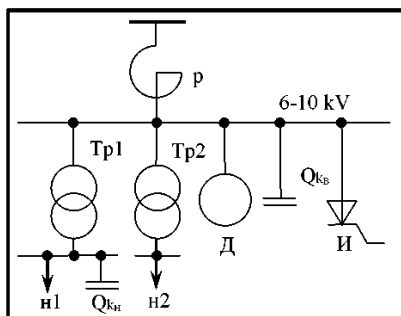


фиг.3.11. Зависимост $I_0(U) = f(U)$

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\frac{1-K_{II}^2}{1+\varepsilon_I^2+(3n+1)\alpha_I^2}}; \quad K_{II}^2 = \frac{D}{S} \\ S^2 &= P^2 + Q^2 + N^2 + (3n+1)S_0 + D^2 \\ D^2 &= 3U^2(\sum_{v=2}^{\infty} I_{av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{cv}^2 + n \sum_{v=2}^{\infty} I_{nv}^2) \\ N &= \varepsilon_I \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad S_0 = \alpha_I \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

- Компенсиращи уредби (КУ)

При КРТ е възможно да възникне, както резонанс на тока, така и на напрежението. По-голяма опасност предизвиква първият, т.к. той възниква на честоти $\nu = 5, 7, 11, 13$, докато резонансът на напрежението е при $\nu = (30 \div 40)$, при които честоти токовете са доста малки и не създават съществени падове на напрежението на КБ и другите елементи.



Фиг.3.12 Включване на КБ на СН Фиг.3.13 Ограничителни криви за Q_k

$$I_{CBV} = I_{KB} \frac{S_{np}}{\sqrt{\nu} Q_{HK6} K_R} \quad (3.11)$$

$$\nu_{\min} X_P > \frac{1,1 X_{KB}}{\nu_{\min}} \quad (3.12)$$

В изследователския процес е акцентирано върху вероятността за възникване на резонансни явления при генерирането на висши хармоници в ЕСС и в тази връзка са разгледани са критериите за поява на паралелен (токов) и последователен (напреженов) резонанс както за отделни елементи, така и за ЕСС като цяло.

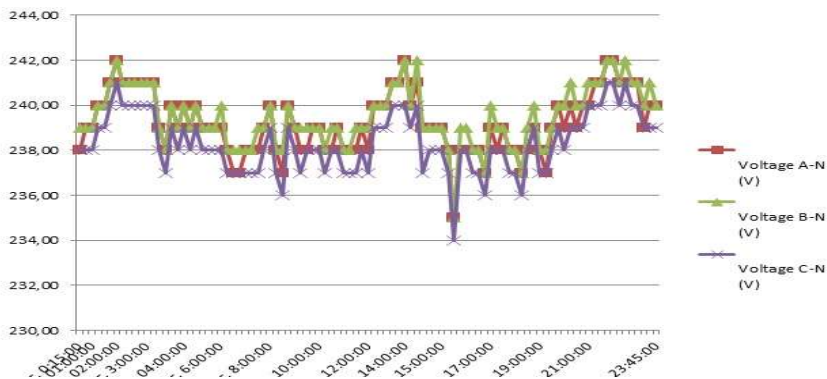
Извършено е практическо изследване на качеството на ЕЕ и ЕМС в индустрията на страната, като аргументирано е обоснована ефективността при внедряване на филтро-компенсиращи устройства, статични и бързодействащи компенсатори с тиристорно регулиране, хибридни схеми, многофункционални тиристорни ограничители на пусков ток и др. Синтезирани са методически и схемотехнически постановки и е потвърдена приложимостта на този подход за комплексно подтискане на колебанието на тока и напрежението, несиметричните и несинусоидални режими, както и за подобряване на фактора на мощността, при работа на прокатни станове, дъгови съпротивителни пещи, заваръчни агрегати, управляеми и неуправляеми изправители и др.

Проведено е изследване в ЕСС на фирма “Шнайдер Електрик-България” АД гр.Пловдив. Разпределителната уредба (РУ) на 20 kV се захранва от две места с кабелни линии. Изградена е като закрит тип с кру SM, има три броя сухи СТ тип Trihal с номинална мощност $S_H = 630\text{kVA}$ на напрежение 20/0,4kV. Търговското мерене е реализирано на страна СН с ТТ и НТ. Главните разпределителни табла на страна НН (ГРТ1, ГРТ2 и ГРТ3) са тип Prizma на фирма „Шнайдер Електрик“, работещи в мрежа тип TN-S с четири полюсни прекъсвачи (фиг. 3.22), от които се захранват различни потребители, като най-мощните са винтови компресори с единична номинална мощност $P_H = 75\text{kW}$.

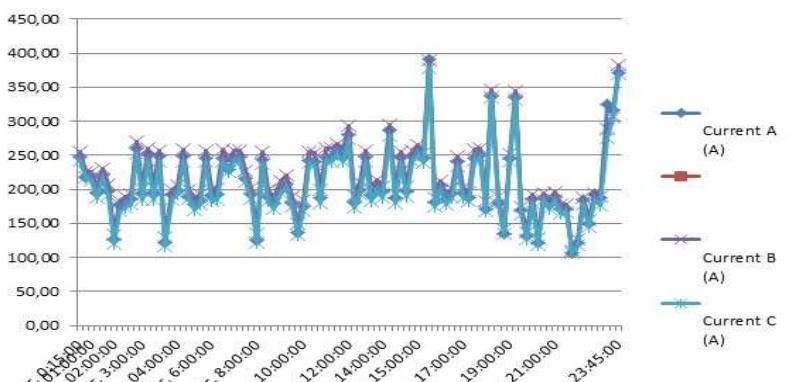
В обекта е изградена система за енергиен мениджмънт на база на SCADA и BMS системи, като Web-browser през Internet/Intranet дава възможност да се предават справки и отчети за електропотреблението. Дистанционно наблюдение на електротехническите параметри се осъществява посредством Power Logic Power View, като генерираните отчети се трансформират в Microsoft Excel. Изследваните мрежови анализатори PM800, PM820, PM850, PM870 работят под Power View и дават възможност да се измерват различни количествени

характеристики на електропотреблението и ПКЕЕ в съответствие със стандарта БДС EN 50160. Допълнителна информация може да се получи от многофункционалните прекъсвачи NSX 160/250, комплектовани с микропроцесорни защиты Micrologic 6,2E.

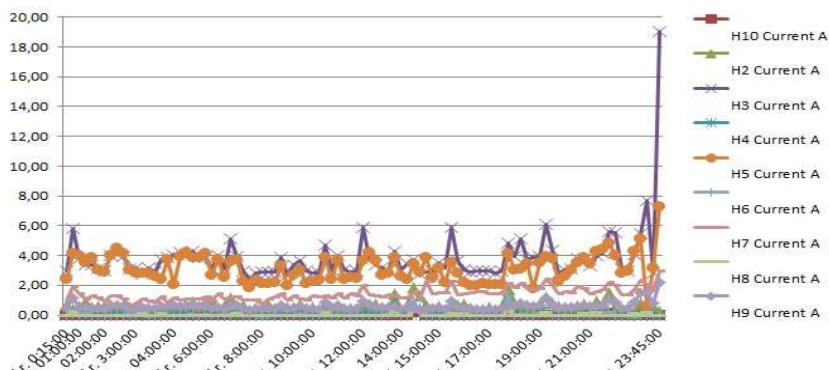
На фиг.3.23 до фиг.3.28 са представени някои електротехнически показатели, измерени от мрежовите анализатори за различен период от време и за различни контролни точки от ЕСС на обекта.



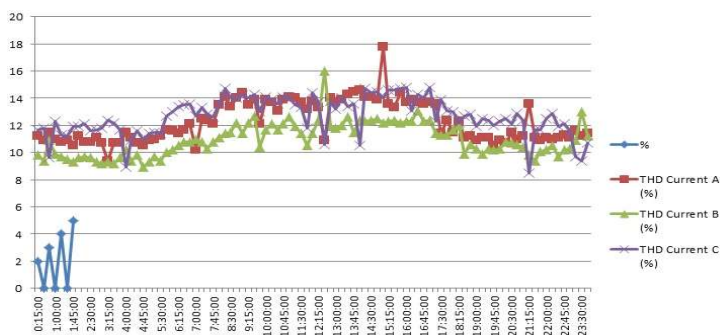
Фиг. 3.23. Изменения на напрежението за ГРТ1



Фиг.3.24 Изменение на токовете по фази за ГРТ1



Фиг.3.25. Изменение на хармоничния състав на тока за фаза А



Фиг.3.28. Изменение на интегралния коефициент на несинусоидалност THD_I

Въз основа на проведените измервания и в съответствие с методическата постановка, разработена в параграф 2.3 от втора глава на дисертационната работа (ф-ли 2.52 до 2.67) са определени осреднени стойности и диапазони на изменение за величините δU , ε_U , α_U , ε_I , α_I , THD_U , THD_I , ΔP_N , ΔP_{S_0} и ΔP_D , представени в табл.3.7.

Табл. 3.7. Диапазони на изменение на изследваните показатели				
δU	ε_U	α_U	ε_I	α_I
-2,5 ÷ +7,12	1,32 ÷ 3,17	1,21 ÷ 2,05	5,14 ÷ 12,54	2,78 ÷ 8,35
THD_U	THD_I	ΔP_N	ΔP_{S_0}	ΔP_D
4,02 ÷ 12,71	7,5 ÷ 24,2	2,68 ÷ 3,87	1,95 ÷ 2,82	1,83 ÷ 3,15

в табл. 3.8 са представени изчисленията за диапазоните на изменение на ITUW и THDIW в зависимост от изменението на S_{3P} за три интервала на пълната трифазна мощност.

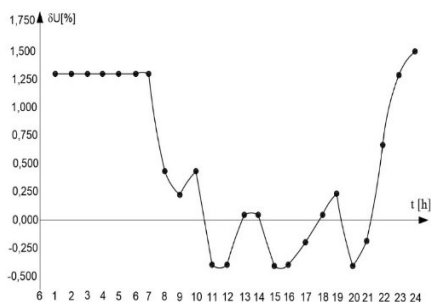
Табл.3.8. Изменение на показателите ITUW и THDIW в зависимост от S_{3P}		
S_{3P} [kVA]	ITUW [%]	THDIW [%]
$S_{3P} = 50 \div 100$	4,68 ÷ 8,19	6,31 ÷ 18,14
$S_{3P} = 100 \div 200$	4,41 ÷ 7,68	6,05 ÷ 17,49
$S_{3P} = 200 \div 300$	4,24 ÷ 7,66	5,88 ÷ 16,21

Сравнителния анализ на резултатите от табл. 3.7 и табл. 3.8 показва, че притеглените коефициенти ITUW и THDIW имат по-малки стойности, в сравнение с традиционните коефициенти ε_I и THD_I . Това се дължи на влиянието на натоварването и оценяването на тези характеристики като притеглени по отношение на товара. Освен това се установява, че при по-малки натоварвания на трифазната система, тези коефициенти имат по-високи стойности, което се обяснява с ефекта от влиянието на малките числа.

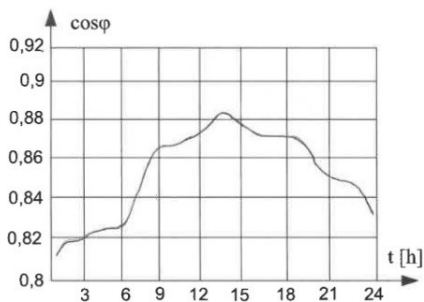
Друг обект от електротехническата промишленост в настоящото изследване е ЕСС на фирма „Елкабел“ АД – гр.Бургас, специализиран за производство на кабели и проводници. ЕСС на предприятието е изградена от ГРП на 20kV и 16 цехови подстанции (ЦП). Потребителите във фирмата са доста разнообразни и болшинството от тях са източници на висши хармоници – металирежещи машини, заваръчни агрегати, помпи, компресори, изтеглячи и усуквачи, кабелиращи и екраниращи машини, панцери, оловни преси и др., като асинхронните двигатели са със честотно управление, а постоянно-токовите машини се захранват с тиристорно управляеми изправители.

В продължение на 20 работни дни са направени измервания с помощта на мрежов анализатор „Hioki 3197” на напрежение 20kV

в ГРП и други контролни точки. Динамиката на $\cos\varphi$ и среднодневното отклонение на напрежението δU в денонощен разрез са показани на фиг. 3.29 и фиг.3.30.



Фиг.3.29.



фиг.3.30.

В табл. 3.9 са представени тези стойности, както и други експлоатационни показатели – номинална мощност на СТ [kVA]; напрежение на к.с. U_K [%]; натоварване β ; инсталирана кондензаторна мощност Q_K (kVAr) и среден $\cos\varphi$.

Табл. 3.9. Резултати от изследванията за ЕСС на фирмата						
Параметри	ЦП 1	ЦП 6	ЦП 9	ЦП 11	ЦП 13	ЦП 15
S_H [kVA]	1000	1000	630	560	1000	1000
U_K [%]	8,04	8,04	7,9	7,2	8,04	8,04
β	0,19	0,44	0,27	0,56	0,72	0,54
Q_K [kVAr]	240	240	150	120	240	240
$\cos\varphi$	0,81	0,85	0,84	0,89	0,88	0,87
f_p	743	285,6	562	266	459	258
v_p	15	6	11	5	9	5
I_{yp} [A]	31,2	32,8	28,4	48,7	35,2	58,9
I_{np} [A]	43,5	41,7	38,7	79,3	45,1	94,5
U_{yp} [V]	67,4	66,6	48,8	137,8	59,2	154,9
U_{np} [V]	93,9	84,7	66,7	224,4	82,1	264,6
X_{Hp} [Ω]	2,16	2,03	1,72	2,83	1,82	2,8

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

1. В настоящата глава, в теоретичен и практично-приложен план, са представени редица изследвания върху енергетични процеси, параметри и характеристики на ЕСС, свързани с качеството на ЕЕ и ЕМС. Тези две понятия се разглеждат в пряка връзка помежду им както в процеса на нормирането им, така и при експлоатация, изследване и оптимизиране на различни техни характеристики. В тази връзка е направен задълбочен преглед и обстойно проучване на източниците на електромагнитни смущения, влошаващи ЕМС, анализирани са установени и комутационни процеси при работа на прекъсвачи, разеденители, заземителни инсталации, силово обзавеждане и др. устройства. При изследване на различни енергетични съоръжения е застъпена тезата за комплексно регулиране на качеството на ЕЕ и характеристиките на ЕМС, като понятия с еднородна природа. Анализирани са различни режими на работа на силови трансформатори, дъгови съпротивителни пещи, заваръчни агрегати, електролизни уредби и компенсиращи системи, като са оценени количествено взаимните връзки между ПКЕЕ и ЕМС.

2. В изследователския процес, в теоретичен и практично-приложен аспект, е акцентирано върху вероятността за възникване на резонансни явления при генерирането на висши хармоници в ЕСС. В тази връзка са разгледани критериите за поява на паралелен (токов) и последователен (напреженов) резонанс както за отделни елементи, така и за ЕСС като цяло. Отчетено е и влиянието на активния товар, формиран от съпротивлението на мрежата и потребителите, който способства за подтискане в известна степен на резонансните

явления.

3. Проведено е теоретично и практично-приложно изследване за установяване на комплексното въздействие на различни технически средства, подобряващи едновременно ПКЕЕ и ЕМС. Аргументирано е обоснована ефективността при внедряване на филтро-компенсиращи устройства, статични и бързодействащи компенсатори с тиристорно регулиране, хибридни схеми, многофункционални тиристорни ограничители на пусков ток и др. Синтезирани са методически и схемотехнически постановки и е потвърдена приложимостта на този подход за комплексно подтискане на колебанието на тока и напрежението, несиметричните и несинусоидални режими, както и за подобряване на фактора на мощността, при работа на прокатни станове, дъгови съпротивителни пеци, заваръчни агрегати, управляеми и неуправляеми изправители и др.

4. ЕСС на фирма „Шнайдер-Електрик България“ е изследвана в продължителен период от време, като са определени ПКЕЕ в съответствие със стандарта БДС EN 50160, представени в табличен и графичен вид. Установени са високи стойности за всички показатели, характеризиращи качеството на ЕЕ и ЕМС, които много често са по-високи от референтните. Това обуславя по-големи общи загуби от влошено качество на ЕЕ ΔP_v , изменящи се в диапазона $\Delta P_v = (6,46 \div 9,84)\%$ от консумираната активна мощност. В съответствие със стандарта IEEE са определени притеглени по отношение на пълната трифазна мощност показатели ITUW и THDIW за оценка на несиметричните и несинусоидални режими. Те имат по-малки стойности от традиционно определените, което се дължи на влиянието на натоварването и оценяването им като притеглени стойности. Тази иновативна изследователска постановка претендира за по-висока обективност и достоверност от традиционната и е важен аргумент при разработването на нова философия за

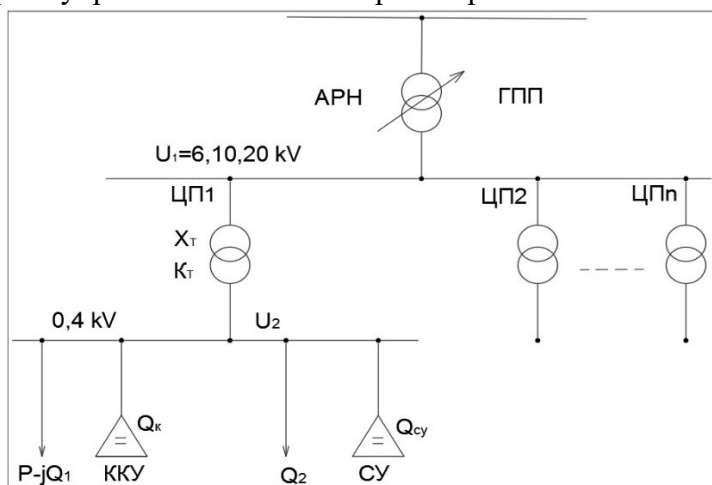
нормиране на ПКЕЕ с отчитане режимите на работа и натоварването на съоръженията.

5. Използвани са особеностите в експлоатацията на ЕСС на фирма „Елкабел“ АД гр.Бургас. В денонощен разрез са определени режимите на работа на електротехническите съоръжения и различните ПКЕЕ, както и условията за настъпване на резонансни явления. Доказано е, че при понижено натоварване съществува вероятност токов резонанс да настъпи при по-високи резонансни честоти, а също така са установени резонансни честоти при аномални хармоници. За някои ЦП са изчислени твърде високи стойности за резонансен ток и напрежение при установен и пусков режим, което може да предизвика проблеми при комутацията на КБ. Тези негативни предпоставки способстват за влошаване на ЕМС и изследвания обект. Освен това тези факти отново потвърждават необходимостта в процеса на нормиране на ПКЕЕ и ЕМС да се отчитат режимите на работа на ЕСС – в случая установен и пусков режим.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

КОМПЛЕКСНИ АДАПТИРАНИ ПОСТАНОВКИ ЗА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ И КРИТЕРИИ ЗА ОЦЕНКА И НОРМИРАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

В четвърта глава на дисертацията са синтезирани и апробирани комплексни адаптирани постановки за електроенергийна ефективност и критерии за качеството на ЕЕ. Разгледан е комплексен подход за намаляване на загубите на активна мощност чрез регулиране на напрежението, компенсация на реактивните товари и управление на несиметрични режими.



Фиг.4.1. Класическа ЕЕС на промишлен обект

$$Q_k = \frac{K_T \cdot U_1 \cdot U_{20} - U_1^2}{X} + P \left(\frac{R}{X} + \operatorname{tg} \varphi \right) = \Delta Q + Q_1 \quad (4.1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_1^2 - K_T \cdot U_{20} \cdot U_1}{P \cdot X} - \frac{R}{X} \quad (4.2)$$

$$K_{T_{\text{опт}}} = \frac{U_1}{U_{20}} - \frac{P.R}{U_1 \cdot U_{20}}$$

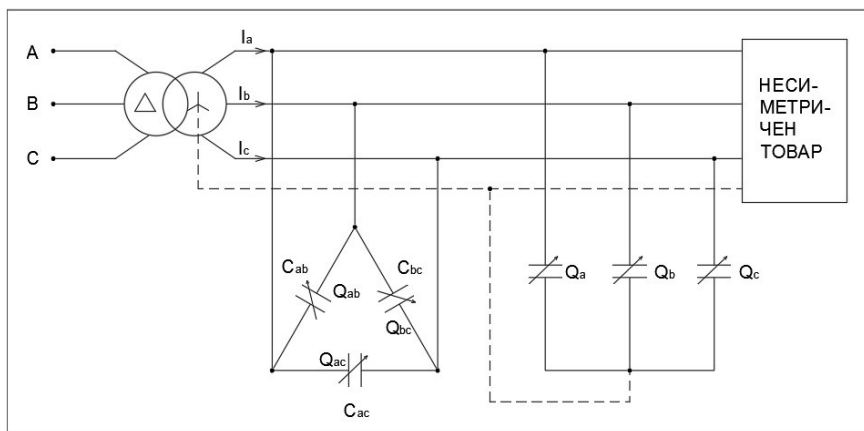
$$X_{KP} = \frac{U_1^2 - K_T \cdot U_2 \cdot U_1}{P \cdot \text{tg}\varphi} - \frac{R}{\text{tg}\varphi} \quad (4.3)$$

От изрази (4.1) и (4.2) следва, че с увеличаване на X , Q_K и $\text{tg}\varphi$ намаляват, следователно, с увеличаването на реактивното съпротивление между шини СН и НН се постига повишаване на ефективността на компенсиращите устройства, монтирани на страна НН, като се намаляват загубите на активна мощност от реактивните товари и се подобряват регулиращите функции на ККУ. Практически винаги в реалните ЕЕС на промишлените обекти инсталираните на страна НН ККУ могат да се използват както за компенсация на реактивните товари (КРТ), така също и за регулиране на напрежението и в това се състои т.н. **дуалистичен подход** при КРТ.

$$Q_K + Q_{CY} = Q_1 + Q_2 \quad (4.4)$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{KPT} + \Delta P_{CY} \Rightarrow \min \quad (4.5)$$

$$\Delta P_{\Sigma} = f(Q_{CY}) \Rightarrow \min \quad (4.6)$$



Фиг.4.2. Симетриране на съставящи с нулева и обратна последователност на КРТ

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= j \cdot U \cdot \omega (C_{ab} + C_{bc} + C_{ca}) \\ \dot{I}_2 &= -j \cdot U \cdot \omega (\dot{a}^2 \cdot C_{ab} + C_{bc} + \dot{a} \cdot C_{ca}) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

С помощта на капацитета на КБ в трите рамена на триъгълника и реактивните елементи Q_a, Q_b и Q_c , се осъществява КРТ и симетриране на токовете с обратна и нулева последователност, т.е. реализира се формулирания по-горе дуалистичен подход.

Съвместяването на КРТ и компенсацията на токовете с обратна последователност може да се представи с изрази:

$$Q_K = Q_{ab}^{сим} + Q_{bc}^{сим} + Q_{ca}^{сим} \quad (4.8.)$$

$$Q^{сим} = Q_{ab}^{сим} + Q_{bc}^{сим} + Q_{ca}^{сим} \quad (4.11)$$

Компенсацията на $\dot{I}_2$ зависи от отношението $Q_K/Q_{сим}$.

- $Q_K/Q_{сим} = 1$. В този случай се получава пълно симетриране на токовете с обратна последователност;
- $Q_K/Q_{сим} > 1$. Получава се прекомпенсация на тока с обратна последователност;
- $Q_K/Q_{сим} < 1$. В този случай имаме непълно компенсиране на тока с обратна последователност.

Прилагането на комплексен многофакторен подход при анализ и оптимизация на загубите от влошени ПКЕЕ, т.е. едновременно въздействие на няколко съществени фактора върху изходния параметър, е подход с висока адекватност и ефективност. Той дава възможност да се икономисат ресурси, време и труд, като се постига оптимално управление на експеримента и се получават точни и обективни математически модели за параметрите на оптимизация. Математическата формализация на този подход се осъществява чрез използване на теорията на планиране на експеримента и в съответствие с теоретичните постановки в трета

глава на разработката се препоръчва да се използват планове от втори порядък с ММ от вида

$$Y_I = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i < k}} b_{ik} \cdot x_i \cdot x_k + \sum_{i=1}^m b_{ii} \cdot x_i^2$$

D – оптималните планове притежават много добри статистически свойства и са намерили широко приложение. Близки до тях са т.н. B_m планове, при които броя на опитите е значително по-малък

Въз основа на анализа на литературните източници в трета глава и съображенията, направени в началото на параграф 4.2, в изследователския процес са предложени следните съществени фактори:

- Отклонението на напрежението: $X_1 \equiv \delta U$, определено от израза:

$$X_1 \equiv \delta U = \frac{U - U_H}{U_H} \cdot 100 [\%]$$

- Коефициент на несиметрия по ток - $X_2 \equiv \varepsilon_I$, определен от израза:

$$X_2 \equiv \varepsilon_I = \frac{I_2}{I_H} \cdot 100 [\%]$$

- Интегрален коефициент на несинусоидалност по ток: $X_3 \equiv THD_I$, определен от израза:

$$X_3 \equiv THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} I_v^2}}{I_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} I_v}}{I_H} \cdot 100 [\%]$$

Стойностите на съществения фактори са получени чрез измерването им с помощта на мрежови анализатори и впоследствие определени с помощта на изчислителни процедури. Нивата на факторите (долно, средно и горно) и интервала на верифициране са представени в табл.4.5.

Табл.4.5. Интервали и нива на вариране на съществените фактори				
Съществен фактор	Интервал на вариране	Долно ниво (-1)	Средно ниво (0)	Горно ниво (+1)
$X_1 \equiv \delta U$ [%]	10%	-10%	0%	+10%
$X_2 \equiv \varepsilon_I$ [%]	5%	0%	5%	10%
$X_3 \equiv THD_I$ [%]	10%	10%	20%	30%

Проведено е изследване за девет отрасли от индустрията в страната със съответния брой промишлени обекти и сумарната им мощност.

Изследванията са проведени за три нива на натоварване и два основни режима – с компенсация и без компенсация на реактивните товари. Изходен параметър на изследванията е специфичния разход на ел. енергия ΔE [kWh/обем продукция]. Установено е, че за повечето от анализирания отрасли съществува ясно изразена тенденция за намаляване на ΔE при отклонение на напрежението на шинните системи и клемите на потребителите в диапазона $\delta U = (0,9 \div 1)$. Изследванията също така показват, че компенсацията на реактивните товари осигурява икономия на ел. енергия не само при оптимално и високо натоварване, но и при ниски натоварвания на промишлените обекти.

Табл. 4.6. Процентно изменение на ΔE за β_1 и β_2				
Отрасъл	$\delta U_1 = (0,9 \div 1)U_H$		$\delta U_2 = (1,05 \div 1,1)U_H$	
	$\beta_1 = 0,16 \div 0,38$	$\beta_2 = 0,39 \div 0,57$	$\beta_1 = 0,13 \div 0,36$	$\beta_2 = 0,37 \div 0,59$
М	4,6	5,7	2,9	3,9
ХДП	-1,3	-0,2	0,7	2,7
С	5,1	3,5	1,6	0,7
ЕП	1,4	2,8	1,7	-0,2
ХТШО	12	10,6	2,1	5,4
МДП	7,2	6,2	-0,9	-0,1
ХВП	5,7	3,7	-1,2	-0,3
ГЕТ	-1,4	-2,1	-1,9	1,2
КБС	7,2	5,2	4,2	2,6

В табл. 4.6 е представено процентното намаление на ΔE за две нива на натоварване β_1 и β_2 и две отклонения на напрежението δU_1 и δU_2 , отнесени за деветте изследвани отрасли в условията на компенсация на реактивните товари

В табл.4.7. са представени резултатите от изследванията, от които се вижда, че ΔP_k се изменя в границите $\Delta P_k = (8,42 \div 10,15)\%$, $\Delta P_b = (3,89 \div 4,88)\%$.

Табл. 4.7.					
Отрасъл	Брой обекти	Мощност $S_{cp}[MVA]$	Осреднени кон- венц. загуби $\Delta P_k[\%]$	ΔP_b [%]	Коеф. на натоварване β
М	21	568	9,27	4,35	0,27 ÷ 0,63
ХДП	19	635	9,48	4,88	0,25 ÷ 0,78
С	17	284	8,57	4,28	0,25 ÷ 0,59
ЕП	18	207	8,42	4,32	0,22 ÷ 0,61
ХТШО	20	187	8,95	4,79	0,24 ÷ 0,72
МДП	18	82	8,67	3,89	0,34 ÷ 0,69
ХВП	36	117	8,75	4,52	0,32 ÷ 0,79
ГЕТ	14	78	10,15	4,45	0,09 ÷ 0,84
КБС	17	65	9,11	4,83	0,06 ÷ 0,38

Разгледаните постановки дават основание да се зададат интервали на изменение на влияещите фактори $\delta U, \varepsilon_I$ и THD_I както следва:

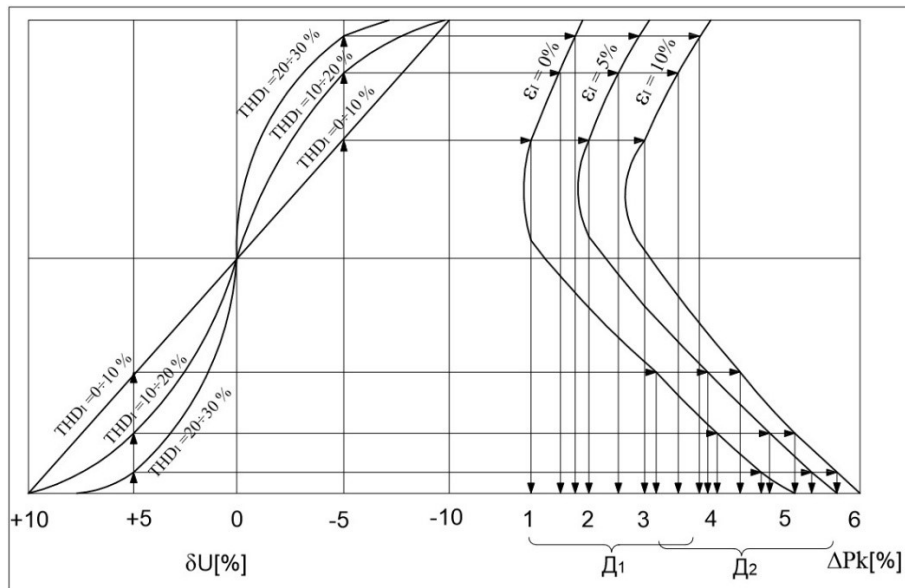
$$\delta U = (-10 \div 10)\% ; \varepsilon_I = (0 \div 10)\% ; THD_I = (0 \div 30)\%$$

Загубите от влошени ПКЕЕ варират съответно в границите:

$$\Delta P_b = (1 \div 6)\%$$

С помощта на методическата постановка, представена в Приложение 1 е конструирана мрежеста номограма с изходен

параметър $\Delta P_b[\%]$ и съществени фактори $\delta U[\%]$; $\varepsilon_I[\%]$ и $THD_I[\%]$, представена на фиг.4.3



Фиг.4.3

Предложеният номографичен метод дава възможност за нормиране на три ПКЕЕ на базата на научно обоснован критерий. Този подход има висока стойност т.к. неговото реализиране е на базата на резултати от изследователски процес, определящ зависимости на избран изходен параметър от тези показатели разгледани като съществени фактори.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. В съответствие с целите и задачите на дисертационната работа и предложените в първа глава критерии за нормиране, тук са синтезирани и апробирани комплексни адаптирани постановки за електроенергийна ефективност и критерии за оценка на качеството на ЕЕ. На базата на дуалистични подходи за компенсация на реактивните товари и регулиране на напрежението, а също така за компенсация и симетриране, се постига минимизиране на загубите на активна мощност и ел. енергия в ЕСС. Това са иновативни подходи, отличаващи се с точност и прецизност, висока ефективност, бързодействие и експедитивност при изследване на експлоатационните характеристики на ЕСС на промишлените обекти.

2. Чрез прилагане на „комплексен многофакторен подход“ с използване на Теорията на планиране на експеримента, се решава много важна оптимизационна задача, което дава възможност да се дефинират оптимални области на изменение на съществените фактори и изходните параметри. За шест различни основни групи потребители от промишлеността са определени математическите модели на загубите на активна мощност в зависимост от фактори, свързани с качеството на ЕЕ (δU , ε_I и THD_I). Получените експериментално математически формализации, дават възможност да се анализират и оптимизират тези зависимости, като е констатирано същественото влияние на избраните фактори върху изследвания изходен параметър. Следователно, дефинирания и възприет за изследване „комплексен многофакторен подход“, се утвърждава като подход с висока степен на адекватност, значимост, достоверност и тъждественост.

3. На база на теоретично и практически получени резултати от

прилагане на Теорията на планиране на експеримента и въз основа на изследвания в девет отрасли от промишлеността и индустрията е предложен графичен метод за нормиране на ПКЕЕ по критерий „Минимизиране на загубите от влошени ПКЕЕ“. Конструираната мрежеста номограма се отличава с простота, бързодействие, механизирано и точно определяне на три основни, нормативно определени показатели за качеството на ЕЕ. Освен това тя е създадена в пълно съответствие с дефинирания в първа глава подход за обвързване на философията, стратегията, критериите и принципите на нормиране на ПКЕЕ и ЕМС с характеристиките и параметрите на електроенергийната ефективност.

ОБООБЩЕНИ ИЗВОДИ КЪМ ДИСЕРТАЦИЯТА

1. В дисертационната работа са представени теоретичните основи за определяне и нормиране на ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС, въз основа на които са разработени международни и национални стандарти в това направление. Анализа показва, че теоретичните постановки на са прецизирани, налице са несъответствия и неточности в математическите формализации на различни електроенергетични категории, а нормативните документи не са научно обосновани и методически регламентирани. В тази връзка са разработени и се предлагат за утвърждаване нови адекватни принципи и критерии за нормиране, които отчитат особеностите на енергетичните характеристики, режимите на работа и натоварването на електротехническите съоръжения.

2. Проведено е теоретично изследване на методите за определяне на ПКЕЕ върху широк обхват от потребители, а също така е представена математическа формализация на нови,

притеглени по отношение на товара показатели, отразяващи обективно и в по-голяма степен достоверно енергетично въздействие на натоварването. По аналогичен начин е обоснована и теоретична постановка, в която енергетичните характеристики се разглеждат чрез прилагане на диференциран подход. И двете постановки са в пълна степен научно-обосновани и могат да се използват за разработване на прогресивни норми и стандарти за ПКЕЕ и характеристиките на ЕМС.

3. С помощта на Теорията на планиране на експеримента е разработен „комплексен многофакторен подход“, при който целевата функция и влияещите съществени фактори подлежат на оптимизация в многофакторно пространство. Прилагането на различни математически процедури, дава възможност за дефиниране на математически модели и определянето на оптимални области на изменение на изследваните параметри. Синтезирания метод се отличава с висока степен на ефективност, икономисва време и средства и е приложим за изследване, оптимизиране и нормиране на ПКЕЕ.

4. В теоретичен и практично-приложен аспект, са анализирани процеси и режими на работа на електротехнически съоръжения при влошени ПКЕЕ и ЕМС. Представена е методология за оценка на резонансни процеси и са маркирани технически средства за ограничаване и подтискане на различни негативни явления.

5. В ЕСС на две фирми от електротехническата промишленост, са проведени обективни апаратурни измервания и изследвания. Чрез прилагане на формулирания във втора глава парциален подход за оценка на загубите на активна мощност от влошени ПКЕЕ, са определени диапазони на изменение на тези загуби. Също така са определени и относителните по отношение на пълната мощност, показатели на несиметрични и несинусоидални режими. Установено е влиянието на

натоварването върху вероятността за настъпване на резонансни явления, което по същество представлява иновативно изследване за ЕСС на промишлени обекти.

6. Извършено е апробиране на дуалистични подходи и е приложен комплексен многофакторен подход в реални ЕСС с цел подобряване на електроенергийната ефективност и оптимизиране на загубите на активна мощност от влошени ПКЕЕ. Предложен е опростен графоаналитичен метод за нормиране, с който се постига механизизирано определяне на ПКЕЕ и енергетичните характеристики на изследвания обект.

В.АВТОРСКА СПРАВКА ЗА ПРИНОСИТЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси :

1. Разработен е „комплексен многофакторен подход“ с използване на възможностите за изследване, анализ и оптимизация на Теорията на планиране на експеримента. Осъществена е апробация на теоретичния подход при провеждане на научно-изследователски експеримент върху основни електротехнически съоръжения и цели отрасли, с изходен параметър „загубите на мощност от влошено качество на ЕЕ“ и съществени фактори показатели на качеството на ЕЕ. Получените математически модели дават възможност за оптимизация на процеса, а дефинирания подход се утвърждава като метод с висока степен на адекватност, значимост, достоверност и тъждественост.

2. С помощта на разработения комплексен многофакторен подход и получените резултати от изследвания в девет отрасли на промишлеността, е синтезиран научно обоснован

графоаналитичен метод за нормиране на ПКЕЕ. Той дава възможност за механизирано отчитане, с голямо бързодействие и точност на изследваните показатели, с което се утвърждават принципите и критериите на нова, прогресивна стратегия и философия на процеса на нормиране.

Научно приложни приноси :

1. Разработената теоретична постановка за определяне на парциалните загуби на активна мощност от влошени ПКЕЕ е приложена в практично-приложен аспект в ЕСС на две фирми от електротехническата промишленост. Получените резултати и направените сравнителни анализи потвърждават работоспособността и значимостта на методиката, както и нейната висока научно-изследователска дейност.

2. Разработена е нова концепция за оценка на несиметричните и несинусоидални режими с помощта на притеглени коефициенти на токова несиметрия и хармонично изкривяване. Методиката отразява адекватно и пълно енергетичното въздействие на натоварването върху качеството на ЕЕ. Аprobацията на този подход в реален промишлен обект потвърждава неговата приложимост и ефективност при експериментални изследвания, а получените резултати се отличават с висока достоверност и точност.

3. Разработените теоретични подходи за оценка на резонансни явления, дават възможност за изследването им в реални условия и набелязване на мерки за тяхното подтискане. За обект от електротехническата промишленост е установено влиянието на натоварването върху вероятността за настъпване на резонанс, като получените резултати от цялостното приложение на метода и доказвания ефект, претендират за иновативност в изследователската практика.

ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА ВЪВ ВРЪЗКА С ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Данаилов П., *Икономически щети от загуба на мощност и съкращаване срока на изолацията при несинусоидални режими*, Енергиен форум брой 37/38/2020, стр. 29÷32.
2. Данаилов П., *Консуматори, източници на висши хармоници*, Енергиен форум брой 37/38/2020, стр. 33÷37.
3. Илиев И., Данаилов П., *Захранване на електрически консуматори чрез магистрални мрежи*, Енергиен форум брой 37/38/2020, стр. 38÷41.
4. Илиев. И., Данаилов П., *Рационализиране режимите на работа на силови трансформатори в многотрансформаторни подстанции*, Енергиен форум брой 39/40/2020, стр. 43÷46