

ОСНОВНИ МЕТОДИ ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКАТА

Евтим Кърцелин¹, Йоана Маринова¹, Ангел Зъбчев¹, Георги Велев², Николай Илиев¹, Николай Минеков³

¹ Минно-геоложки университет "св. Иван Рилски", 1700 София

² Технически университет, гр. Габрово

³ "Асарел-медет" АД, гр. Панаягурисhte

РЕЗЮМЕ. Анализирани са основни пътища за разпространение на промишлени смущения и са представени основните методи за понижаване осигуряване на електромагнитната съвместимост в електроенергетиката.

BASIC METHODS TO ENSURE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN THE ENERGY SYSTEM

Evtim Kartselin¹, Joana Marinova¹, Angel Zabchev¹, George Velev², Nikolai Iliev¹, Nikolai Minekov³

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

² Technical University of Gabrovo

³ "Asarel Medet" Panagyurishte

ABSTRACT. An analysis of the main sources for distribution of industrial interference. Presents the main methods for reduction ensuring electromagnetic compatibility in the energy system.

Въведение

Специфичната особеност на всички електропотребители се явява обстоятелството, че чрез електроснабдителна система са свързани помежду си и следователно взаимно си влияят.

Това взаимно влияние между електропотребителите, свързани към една електроснабдителна система, се нарича електромагнитно смущение. Една от актуалните задачи на съвременната енергетика е свързана с измерване и ограничаване на електромагнитните смущения до ниво, при което не се нарушава нормираната работа на всички електропотребители.

В развитието на съвременните системи за електроснабдяване /ЕС/ се оформят следните основни тенденции

1. Внедряване на принципно ново електрообзавеждане, което условно може да се раздели на две групи: чувствително към смущения и генериращо смущения.

Към електрообзавеждане /ЕО/, чувствително към смущения се отнася електронната и микропроцесорна техника, която се явява основен елемент на техническите средства за автоматизация, на изчислителните машини и на информационните системи.

Към ЕО, генериращо смущение се отнася силовата полупроводникова техника: мощни нелинейни, несиметрични преобразуватели, с бързоизменящо се /рязкопро-

менящо се/ и ударно натоварване електродвигатели; електрически уредби с елегазови и вакуумни комутационни прекъсвачи.

2. Нарастване мощността на ЕО от втори клас обуславя съществено увеличаване нивото на електромагнитните смущения в електроснабдителните системи на промишлените предприятия и на енергийната система. Тези смущения в зависимост от техния характер, интензивност и продължителност, оказват неблагоприятно влияние на силовите електроуредби, системите за автоматика, телемеханика, каналите за връзка и релейна защита.

3. Наличие на електрическа връзка между всички елементи на системата за електроснабдяване осигурява възможност на смущения от страна на ниското напрежение да проникват в мрежи средно и високо напрежение на ЕСС, в мрежите на други потребители и оказват влияние на цялото ЕО. Тези и някои други обстоятелства водят до възникването на проблемите с електромагнитната съвместимост.

Електрическите подстанции (ЕП) са електрически уредби, предназначени за преобразуване и разпределение на електрическата енергия. В жилищните зони на градовете се използват във вид на трансформаторни подстанции и разпределителни устройства. ЕП представляват сложна структура, съставена от различно по предназначение, конструкция и мощност електрообзавеждане (ЕО): силови трансформатори (ТР), разпределителни табла или

разпределителни устройства (РУ); шинопроводи, кабели, кабелни въводи, електрически апарати (ЕА).

При работа ЕО създава външно електромагнитно поле (ВЕП) с честота, равна на честотата на захранващата електрическа мрежа (50Hz), което съществува както вътре, така и вън от електрическата подстанция. Това електромагнитно поле оказва влияние както на хората, така и на техническите средства – електрическите апарати за защита, управление и автоматика. В първия случай съществува проблема за екологическата безопасност на човека при действието на така наречената биологично магнитно поле [7,9], а във втория – проблема за електромагнитната съвместимост [5, 6] при действието на ВМП на чувствителните към него технически средства. Общо признато е, че намаляване нивото на ВМП осигурява решаването на двата проблема.

Източници на промишлени смущения.

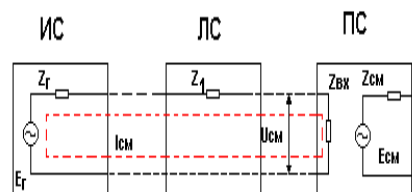
За избора на методи и технически решения за ограничаване (подтискане) на смущенията върху работа на един обект е необходимо преди всичко да се открият източниците на смущения, пътищата за проникване на тези смущения и определяне на техните параметри.

Същността на този подход се илюстрира със заместващата схема, показана на фиг.1. Източникът /генераторът/ на смущения **ИС** с е.д.с. **Е_г** и вътрешно съпротивление **Z_г** е включен чрез сигналната линия **ЛС** /линия за предаване на сигнали/ със съпротивление **Z_л** към приемника на смущения **ПС** с входно съпротивление **Z_{вх}**. Приемникът на смущения на страната на своя изход е възможно да се представи с еквивалентен генератор с е.д.с. **Е_{см}**, която зависи от сигнала на входа на приемника на смущения **ПС** и вътрешното му съпротивление **Z_{см}**. В най-общия случай съпротивленията **Z_г**, **Z_л**, **Z_{вх}** и **Z_{см}** е възможно да се приемат за комплексни и разпределени.

От схемата на фиг.1 се вижда, че токът на смущенията **I_{см}** и напрежението на смущенията **U_{см}** на входа на приемника на смущения **ПС** напълно се определят от спектралната характеристика на е.д.с. **Е_г** на източника на смущения и стойността на съпротивленията **Z_г**, **Z_л** и **Z_{вх}**.

Разграничаване и определяне елементите на една система за електрозадвижване на източници и приемници на смущения е твърде относително, тъй като най-често един и същ елемент е възможно да се явява едновременно и като източник, и като приемник на смущения. Устройствата, които нямат усилващи свойства, като например комутиращи устройства за постоянен и променлив ток (контактори, релета, превключватели, различни видове кнопки за управление) и неуправляемите захранващи източници (полупроводникови преобразуватели на променлив в постоянен ток, трансформаторите, преобразуватели на честота) е възможно да бъдат източници на смущения.

Устройствата в системите за електрозадвижване, притежаващи усилващи свойства (електрически машини за постоянен ток, управляеми полупроводникови преобразуватели, операционни усилватели и др.), е възможно да бъдат както източници, така и приемници на смущения.



фиг.1 Заместваща схема на източник, приемник и път за проникване на смущения.

С отчитането на спектралните характеристики на елементите на електрозадвижването източници на смущения е възможно да бъдат разделени на две групи:

1. Източници на смущения с непрекъснат честотен спектър на изходната е.д.с. /комутиращи устройства, машини за постоянен ток и др./.

2. Източници на смущения с дискретен спектър – хармонични смущения, честотният спектър на е.д.с. на които е неизменен, а относителното ниво е или постоянно /захранващи източници на постоянен или променлив ток/, или еднозначно се определят от режима на работа на самия източник /управляеми вентилни преобразуватели, операционни усилватели/.

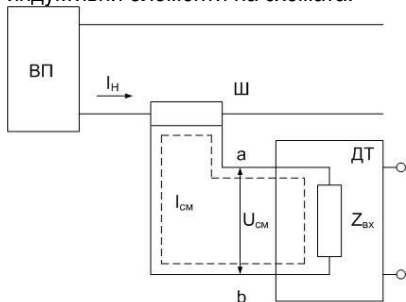
Посочените групи източници на смущения са неравнозначни от гледна точка за степента на влияние на създаваните /генерираните/ от тях смущения върху работата на системата за управление на електрозадвижването. Най-опасни се явяват хармоничните смущения, които е възможно да станат причина за възникването на паразитна нискочестотна амплитудна модулация на изходния сигнал на схемата за управление, а също така и до постоянно действащо претоварване по ток на редица елементи от схемата, борбата с които е изключително трудна. Към тях се отнася и относителното ниво на е.д.с. на източниците на хармонични смущения в схемите на вентилното електрозадвижване над нивото на е.д.с. на смущенията с непрекъснат честотен спектър.

Хармоничният състав на е.д.с. на източници на смущения с дискретен спектър се съдържа преди всички в честоти, кратни на честотата 50 Hz на захранващото напрежение на промишлени уредби, а относителното ниво на е.д.с. има максимум в диапазона 50-1200 Hz. Ето защо в схемите на вентилните електрозадвижвания на аналогови елементи на първо място следва да се отдели внимание за подтискане /ограничаване/ на хармоничните смущения, честотата на които е кратна на 50 Hz и се намират в диапазона 50-1200 Hz.

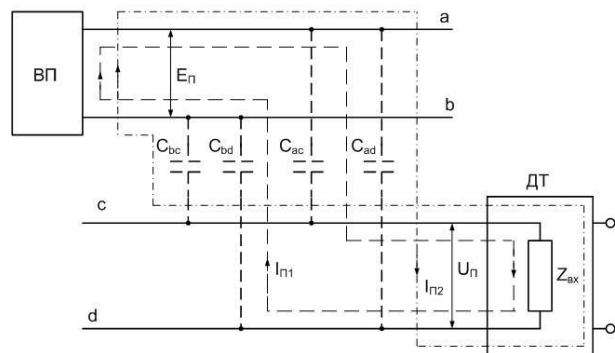
Пътища за проникване на промишлени смущения.

На разстояние от източника на смущение, по-малко от дължината на вълната λ електромагнитното поле има ярко изразени електрически или магнитен характер [8]. Ето защо при честота на електромагнитното поле в диапазона 50-1200 Hz е възможно да се приеме, че в схемите на вентилните електрозадвижвания, където разстоянието между елементите на схемата не надвишава $10^3 \text{ m} \leq \lambda \approx (60 \div 2.5) 10^5 \text{ m}$, електромагнитните връзки между източника и приемника на смущение се осъществява

преди всичко и основно за сметка или на електрическо, или магнитно поле. Тогава в схемите за управление на системи за електрозадвижване възможните пътища за проникване на смущения е целесъобразно да се разделят на галванични електростатични и магнитостатични. Галваничните пътища за проникване на смущения възникват за сметка на непосредственото включване чрез линията за връзка /управление/ на входната верига на елемента за управление към веригата на друг елемент, която играе ролята на източник на смущения. Линията за връзка /управление/ е възможно да се представи в най-общия случай като комбинация от активни, капацитивни и индуктивни елементи на схемата.



фиг.3. Пример на галваничен път за проникване на смущения



Фиг.4. Пример на електростатичен път за проникване на смущения.

Пример за галваничен път на проникване на смущения е представен на фиг.3. Тук за напрежение на смущение $U_{см}$ на входа на датчика на ток ДТ е приет спада на напрежението на шунта Ш от пулсиращата съставяща на постоянния товарен ток I_H на вентилния преобразувател ВП. Токът на смущението $I_{см}$ протича по проводниците за връзка (управление) а, в и входното съпротивление $Z_{вх}$ на датчика на ток ДТ.

Електростатичен път за проникване на смущения се обуславя от електрическата съставяща на електромагнитното поле и възниква за сметка на наличието на паразитни капацитети между отделни елементи на схемата.

Така например, на фиг. 4 електростатичния път за проникване на смущения е обусловен от съществуването на паразитни капацитивни връзки между шинопроводите а, в на ВП и входната верига с, d на датчика на ток Д.Т. Напрежението на смущение $U_{см}$ на входа на датчика на ток ДТ се определя от разликата на токовете на смущенията $I_{см1}$ и $I_{см2}$, които протичат през входното съпротивление $Z_{вх}$ на датчика на ток ДТ под действието на е.д.с. $E_{см}$ на източника на смущения. Ролята на $E_{см}$ играе пулсиращата съставяща на изправеното напрежение на вентилния преобразувател ВП. Токът $I_{см}$ протича през

паразитните капацитети C_{ac} , C_{bd} между шинопроводите а, в и проводниците за управление с, d по контур, представен на фиг. 4 с пунктирна линия. Токът $I_{см2}$ протича през паразитните капацитети C_{ad} , C_{bc} по контура, изобразен с пунктирна линия на фиг.4 Напрежението на смущение $U_{см}$ се определя с израза:

$$U_{см} = (I_{см1} - I_{см2})Z_{вх} = E_{см} \frac{Z_{вх}}{Z_{вх} + \frac{1}{2\pi f \frac{C_{ac}C_{bd} - C_{bc}C_{ad}}{C_{ac}C_{bd} + C_{bc}C_{ad}}}}$$

където f – честота на смущенията.

По правило, $U_{см} \neq 0$, което се предизвиква от асиметрията на паразитните капацитивни връзки, когато $C_{ac}C_{bd} \neq C_{bc}C_{ad}$.

Магнитостатичният път за проникване на смущения се обуславя от магнитната съставяща на електромагнитното поле и се появява за сметка на съществуването на паразитни взаимни индуктивности между отделните елементи на схемата.

На фиг.5 магнитостатичният път за проникване на смущения се осъществява от съществуването на паразитните взаимни индуктивности M_{ac} , M_{ad} , M_{bc} и M_{bd} между шинопроводите а, в на вентилния преобразувател ВП и входните вериги с, d на датчика на ток ДТ. Напрежението на смущение $U_{см}$ на входа на датчика за ток ДТ се определя от разликата на е.д.с e_{ac} , e_{ad} и e_{bc} , e_{bd} , индуцирани в проводниците с, d под действието на пулсиращата съставяща на изправения товарен ток I_H на вентилния преобразувател. Токът на смущенията $I_{см}$ протича под резултантното действие на приведените е.д.с. през входното съпротивление $Z_{вх}$ на датчика на ток ДТ по контура, представен на фиг. 5 с пунктирна линия.

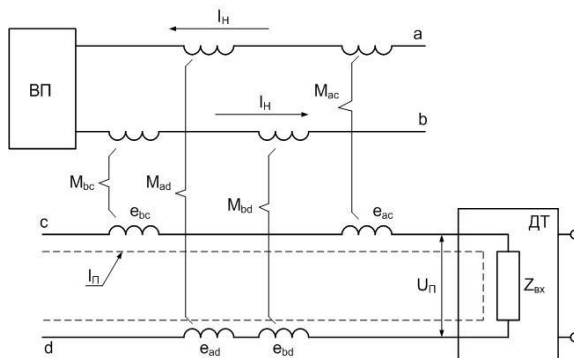
В най-простия случай при строго паралелно взаимно разположение на проводниците а,b,c и d напрежението на смущение на входа на датчика на ток ДТ се определя по израза

$$U_{см} = I_H \cdot f \cdot \mu_0 \cdot l \cdot n \cdot \frac{d_{ad} \cdot d_{bc}}{d_{ac} \cdot d_{ba}}$$

където d_{ad} , d_{bc} , d_{ac} , d_{bd} – разстояния между проводниците за пренасяне на сигнали за управления;

l - дължина на съвместно положените проводници за управление, m;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитна проницаемост във вакуум, H/m.



Фиг.5. Пример на магнитостатичен път за проникване на смущения.

В най-общия случай $d_{ad}, d_{bc} \neq d_{ac}, d_{bd}$, поради което на входа на датчика на ток ДТ действа магнитостатичната съставяща на смущенията $U_{см}$. Път за проникване на смущения се явяват линиите с разпределени параметри използвани за пренасяне на управляващи сигнали. За разлика от линиите за връзка в радио и телеграфната техника, в схемите за електрозадвижване веригите за пренасяне на управляващи сигнали между елементите, имат твърде малка дължина, поради което разпределените параметри на линиите за връзка без да се допуска голяма грешка е възможно да се представят като съсредоточени спрямо тези точки в схемата за електрозадвижване, в които се изследват смущенията. Такова представяне значително опростява и прави по-нагледен анализа на системите за електрозадвижване за устойчивост и защита от смущения, а също така дава възможност за експериментално определяне параметрите на основните пътища за проникване на смущения.

Анализ за нивото на ВМП в електрически подстанции

Една от особеностите на съвременните градове е свързана с това, че ЕП се изграждат в близост до жилищните сгради или в самите сгради, т.е. в непосредствена близост до хората. В рамките на проблема за екологичната безопасност се разглеждат комплекс от въпроси относно определяне на влиянието на ВМП на човека и разработването на мероприятия и методи за тяхното намаляване. Обслужващият персонал на ЕО в зависимост от характера на неговата работа или дейност са принудени да се намират продължително време при условия на въздействие на тези ВМП. Продължителното въздействие на ВМП върху човека оказва негативно влияние на неговата психика, води до разстройство на нервната система и сърдечносъдовата система, понижава работоспособността на човека [9]. Научните изследвания по проблемите за ВМП се провеждат във всички развити страни по света в това число в страните от Европа, САЩ, Русия, Япония, Какана, Украйна, България. Като пример ще се посочат действащите норми за нивото на безопасните магнитни полета (БМП) на честотата на електрическата мрежа, която ги създава за различни страни (таблица 1).

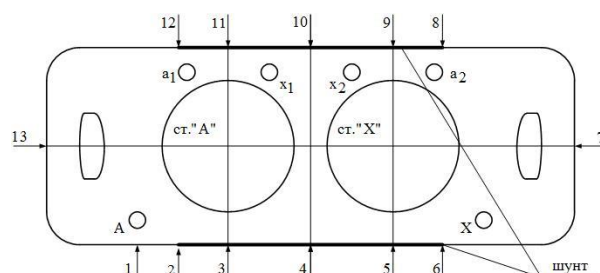
Таблица 1

	Държава	Допустима стойност на безопасно магнитно поле
1.	Украйна	1750 μT (0.5)
2.	Русия	100 μT
3.	Европа	100 μT
4.	Великобритания	100 μT
5.	Швеция	0.25 μT

Рязкото понижаване на нормите за безопасност на ВМП е обусловено от изменението на концепцията за формирането на неговите пределно - допустими стойности. Досегашната концепция се изграждаше от условието за понижаване на ВМП до ниво, при което индукираните от това поле токове в тялото на човека не трябва да превишават "тока на неотпускане". В съответствие с новата концепция ограничаване нивото на ВМП се определя от санитарни норми, при които отсъства вредно

действие на магнитното поле на клетката и организма на човека. При тези условия се изменя и подхода към ЕП като източници на ВМП.

За решаване на проблема за електромагнитната съвместимост международната асоциация за защита от излъчвания (IRPA/INICR) е изготвила препоръки за приемане от Европейските страни на допустими и пределно - допустими норми (стойности) за напрегнатост на ВМП в производствени и непроизводствени условия, на основата на които се разработват и националните стандарти. Допустимите стойности на ВМП за различни страни се изменят в широки граници. На фиг.6 са представени точките за измерване напрегнатостта на магнитното поле по периферията на силов трансформатор, а в таблица 2 измерените стойности.



Фиг. 6 Точки за измерване интензитета на магнитното поле по периферията на казана на силов трансформатор.

Таблица 2

Резултати от измерване на интензитета на магнитното поле на силов трансформатор тип ОРЦ - 4170000/750-77У1

Номер на точката на измерване	Интензитет на магнитното поле, А/м		
	Фаза А	Фаза Б	Фаза С
1	80	90	90
2	90	90	80
3	80	80	90
4	90	100	80
5	80	80	110
6	70	100	90
7	80	80	90
8	90	100	130
9	130	140	140
10	80	100	80
11	110	90	100
12	80	80	80
13	80	80	80

Осигуряване на електромагнитна съвместимост и намаляване на смущенията от електромагнитни полета

1. Активни методи на екраниране

За реализирането на този метод най-често се използват компенсационни намотки. По тези намотки се осигурява протичането на ток с такава стойност и посока, при която се създава за дадена област на електромагнитно поле, насочено противоположно на електромагнитното поле на смущенията (в противофаза) и да бъдат равни по

стойност. Наславяването на двете полета (компенсационното и полето на смущенията), насочени срещуположно и равни по стойност (амплитуда) дава сумарно поле, близко до нула.

Следва да се отбележи, че компенсационните намотки е възможно да бъдат както индивидуални (на всеки мощен източник), така и групови (на група източници на отделно помещение или на цяла автономна енергоуредба). Като пример за групови компенсационни намотки е възможно да се посочи например, размагнитваща намотка, която обхваща едно помещение, в което е разположено (монтирано) електрообзавеждане и служи за намаляване интензитета на полето до нормативно определена стойност, създавано от феромагнитни маси, съсредоточени вътре в помещението, а също така и от други източници на постоянно магнитно поле.

Методът за понижаване (намаляване) нивото както на постоянни магнитни полета, така и на електромагнитните полета на смущение с помощта на компенсационни намотки се явява метод с висока стойност, изисква големи енергийни разходи, значително тегло и габарити, които не винаги е възможно да бъдат осигурени.

2. Пасивни методи на екраниране

Към пасивните методи на екраниране се отнасят различните видове пасивни екрани-плътни, дискретни (мрежести).

В зависимост от нивото на понижаване (намаляване) на електромагнитното поле на смущенията тези екрани се разделят на

- еднослойни и многослойни;
- концентрични и неконцентрични;
- Многослойни еднотипни (сферични, кръгови цилиндрични и др.) и на многослойни нееднотипни (има редуване на цилиндрични и сферични слоеве; на сферични и сфероидални и т.н.)

Екраниращите обвивки се различават и по следните показатели

- Материала, от който са изпълнени;
- Честотните зони на електромагнитните полета на смущения;
- В нискочестотната зона на електромагнитните полета на смущения и полета на постоянни магнити ($f \in [0 \div 10^4] \text{ Hz}$) се използват феромагнитни материали (електротехническа стомана, феролити и др.).
Във високочестотните зони на ЕМП на смущения ($f > 10^8 \text{ Hz}$) се използват проводящи немагнитни материали (алуминий).
За средночестотни ЕМП на смущения ($10^4 < f < 10^8 \text{ Hz}$) се използват фероматнитни материали, които пропускат електрически ток (например магнитно – меки стомани).

Действието на екраниращата обвивка се състои в следното. Приема се, че на екраниращата обвивка, притежаваща електрическа проводимост и магнитна прони-

цаемост, нормално към повърхността пада ЕМП на смущенията с интензитет $\vec{H}_n^{(0)}$ ($\vec{n}$ - посока на нормалата към повърхността на екрана).

Под влиянието на $\vec{H}_n^{(0)}$ в материала на екрана се индуцира ЕДС и протича ток.

Под влиянието на тока, индуциран в екрана, възниква електромагнитно поле (ЕМП), което противодейства на падащото поле. Освен това, за сметка на съществуващата разлика в магнитните проницаемости на екрана μ и на средата μ_0 , част от магнитния поток се затваря през стената на екрана (по пътя на най-малкото съпротивление), без да прониква през екрана. За сметка на двете описани въздействия през екрана прониква само част от ЕМП с интензитет $\vec{H}_n^{(1)}$ (по нормалата към повърхността на екрана).

За оценка на ефекта от екранирането се съставя отношението

$$E_H^{(S)} = \frac{\vec{H}_n^{(0)}}{\vec{H}_n^{(1)}} \quad (1.1)$$

Формула (1.1) показва, колко пъти се намалява интензитета на ЕМП след екрана в сравнение с интензитета на ЕМП, падащо на екраниращата повърхност.

По аналогичен начин се определя и ефективността на екраниране по интензитет на електрическото поле с отношението

$$E_E^{(S)} = \frac{\vec{E}_n^{(0)}}{\vec{E}_n^{(1)}} \quad (1.2)$$

където $\vec{E}_n^{(1)}$ - интензитет на електрическото поле на ЕМП в равнината на екрана (по нормалата към повърхността на екрана)

С използването на екраниращите обвивки е възможно съществено да се намали интензитета на падащо ЕМП до желани стойности. Всички недостатъци на активните екрани е възможно да се отнесат и към пасивните екрани, а именно висока стойност, голямо тегло и габарити;

3. Намаляване на електромагнитното поле чрез рационално разположение на електрообзавеждането

Този метод се явява по-перспективен, макар и да е сложен в аналитично отношение, в сравнение с разглежданите методи в т. 1 и 2.

Намаляване на ЕМП в зададени зони се постига за сметка на рационалното разположение на електрообзавеждането (ЕО-електрически машини, електрически апарати, трансформатори, токопроводители и др.) едно спрямо друго. За сметка на подходящо разположение на ЕО е възможно да се получи значителна взаимна компенсация на ЕМП.

Особено значение този подход придобива при необходимост от намаляване на ЕМП от няколко източника, намиращи вътре в затворена екранираща обвивка. За поддържане параметрите на ЕМП в зададени (допустими) стойности чрез използването на активни или пасивни екрани е не винаги възможно поради големите габарити и тегло на последните и поради конструктивно-технологични трудности по тяхното създаване и разположение. Във връзка с това, допълнително към наличната екранираща обвивка се провеждат мероприятията по разполагане на електрообзавеждането вътре в екраниращото помещение по такъв начин, при който сумарното ЕМП да удовлетворява предварително зададените характеристики и да отговарят на изискванията за електромагнитна съвместимост на електрообзавеждането. За решаването на подобни задачи е необходимо от една страна да се разполага с метод за изчисляване на електромагнитни полета от няколко източници на полета, разположени в границите на екраниращата обвивка и от друга страна, методи за формализация и алгоритми за решаване на оптимизационни задачи за разполагане на електрообзавеждането.

Изясняването на въпросите за оптимално разполагане на източниците на електромагнитни полета (ИЕМП), имащи определени геометрични и енергийни характеристики, имат важно значение за практиката на проектиране на електрообзавеждане. При това търсенето на най-доброто решение за разположението на източниците на ЕМП трябва да се осъществява с отчитане на ограниченията както на характера на ЕМП, така и на местоположението на източника на ЕМП в зададената област.

Следва да се отбележи, че задачата за намаляване на ЕМП чрез рационалното разместване на източниците на ЕМП е малко изследвана и разработвана, а получените резултати имат съществени недостатъци, като например: разположението на източниците на ЕМП е необходимо да се изчисляват на етап проектиране, когато е необходимо да удовлетворяват и голям брой други критерии, свързани с оптималното проектиране.

4. Филтри

Електрическите филтри, построени на базата на комбинацията на капацитивни C , и индуктивни L елементи се използват в електрическите схеми на електронните прибори, линиите за връзка и т.н., които задължително трябва да бъдат защитени от нежелателното проникване на токове с определен честотен диапазон, а също така и за изглаждане на интегралната токова характеристика на електрическата верига. Ако е необходимо да се покрият няколко честотни полюси, то е необходимо включването на каскадни филтри. В редки случаи филтрите се включват във веригата на силовото електрообзавеждане, но поради големите габарити и тегло на този тип филтри, използването им е възможно само в условията на стационарната енергетика.

Литература

1. Быков Ю.М., и др. Помехи в системах с вентилюющими преобразователями. М. Энергоатомиздат, 1986
2. Стоилов И, Джустров К. Висши хармонии в мощни вентилни преобразуватели. Год на МГУ "св. Иван Рилски", том 53, св. III, 2010 г.
3. EN 50160:2000. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
4. Иванов В. С. И др. Режимы потребления и качества электроэнергии систем электроснабжения промышленных.
5. Лазаров А.И. Электромагнитна съвместимост на средствата за измерване и управление. С., Ту 2004.
6. Иванов Е.Б. Электромагнитна съвместимост. С., 2011
7. Кърцелин Е. Р, Маринова Й. М и др. Электромагнитна съвместимост в электроснабдителните системи на промишлените предприятия. Международна научна конференция "БУЛКАМК-2011", гр. София
8. Гроднев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот, М., Связь, 1972.
9. Анев Г. А. и др. Вредни действия на электричеством и защитата от тях, С., Техника, 1987