

НЯКОИ ТЕОРЕТИЧНИ АСПЕКТИ ПО ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ В ПРОМИШЛЕНИТЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Младен Прошков

Република България, 8000 Бургас, бул. „Проф. Яким Якимов“ №1, Университет „Проф. д-р.
Асен Златаров“, Факултет по технически науки

Катедра „Електроника, електротехника и машинознание“, m_proykov@abv.bg

ВЪВЕДЕНИЕ

При работа на електрическите прибори се създават условия за взаимодействие както между самите устройства, така и между тях и захранващата линия, при което се проявяват различните им функционални характеристики. Ако това взаимодействие протича с промяна тези характеристики (на устройствата или захранващата линия), то те са функционално непригодни за съвместна работа и това взаимодействие трябва да се балансира до момент, в който не се нарушават условията за нормална работа. Електромагнитната съвместимост (ЕМС) характеризира не само взаимодействието между електрическите апарати, оборудването и електромагнитната среда, но и взаимодействието помежду им.

Електромагнитната среда е съвкупност от електромагнитни явления, съществуващи в разглежданата електрозахранваща и консумираща система. Важна характеристика на електромагнитната среда е нивото на ЕМС, определено от нивото на електромагнитните изкривявания, при което се гарантира нормалната съвместната работа на всички устройства. По тази причина показателите за качеството на електрическата енергия (ПКЕЕ), са онова ниво на ЕМС, при което се гарантира нормалното функциониране на всички електрически прибори включени към електрическата мрежа.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Електрическата енергия е вид стока, която трябва да бъде доставена на потребителите с определено качество, характеризиращо се с: непрекъснатост на захранването, постоянна честота, постоянна големина и синусоидална форма на захранващото променливо напрежение. В практиката тези параметри не могат да бъдат строго постоянни, защото им влияят редица системни и случайни фактори.

Качеството на електрическата енергия се разглежда и регламентира в стандарт БДС EN 50160:2003 „Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически системи“.

Показателите за качеството на електрическата енергия са разделени на три групи:

- отклонение на честотата и напрежението
- несинусоидалност, несиметрия и колебание на напрежението
- провал на напрежението, пренапрежение и импулсно напрежение.

Отклонение на честотата

Честотата f е общосистемен параметър. При дефицит на генерирана активна мощност в системата тя се понижава до ниво на нов баланс между генерирана и потребявана активни мощност и обратно. Определя се от честотата на въртене на генераторите в генериращите

източници и може да се поддържа само при наличие на резервна активна мощност.

Определя се по формулата:

$$\Delta f = f_T - f_{\text{ном}}$$

Съгласно Европейският стандарт 50160, номиналната честота трябва да бъде 50Hz. При нормално работно състояние основната честота, средна за период от 10s, например за 99,5% от седмицата, не трябва да варира с повече от $\pm 1\%$ [20].

Отклонение на напрежението

Модерното електрическо оборудване е предназначено да работи в рамките на определен диапазон на напрежението, като може да понесе отклонение на напрежението за малък период от време. Допустимите граници на това отклонение варират в зависимост от изискването на регулаторните органи в различни страни и се определя се по формулата:

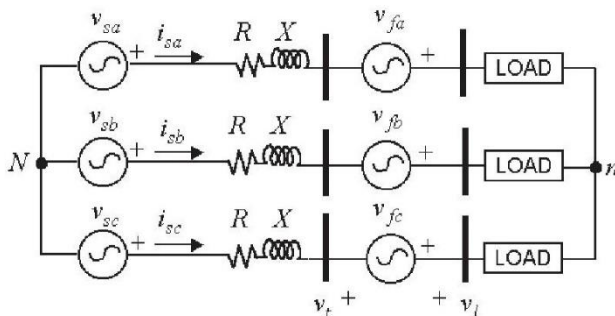
$$\Delta U_T = \frac{U_T - U_S}{U_S}$$

Съгласно Европейският стандарт 50160, отклонението на напрежението трябва да бъде $\pm 10\%$ (за 95% от ср. ефективни стойности за 10 минути) и $+ 10\% / -15\%$ (за 100% от средните ефективни стойности за 10 мин.) [20].

Причините за появата му в електроенергийните системи (ЕЕС) са: повишен импеданс на захранващата линия или недостиг на реактивна мощност в системата.

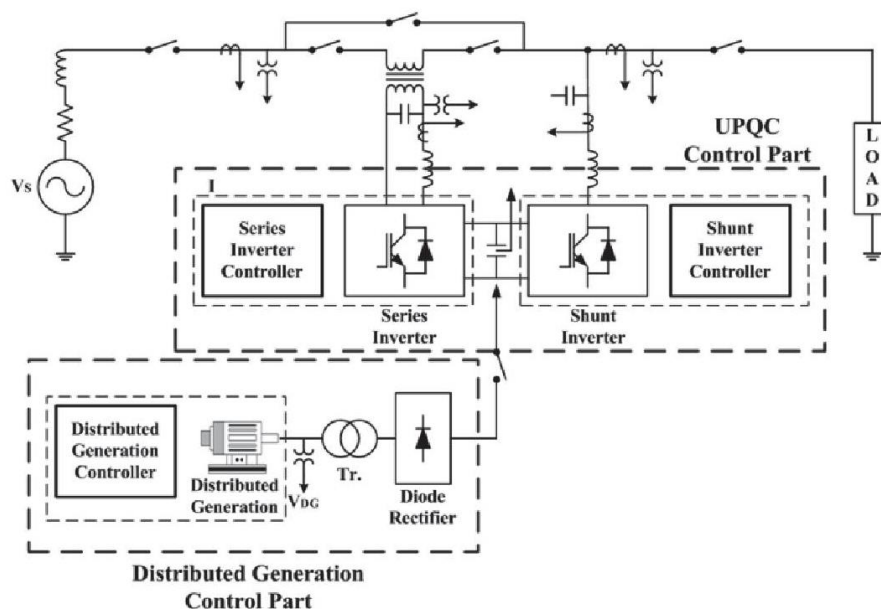
Отклонението на напрежението влияе негативно на: светлинните източници (понижаване на светлинния поток, светлинния добив и експлоатационния срок), асинхронни двигатели (понижаване на въртящия момент и к.п.д. и повишени загуби на активна мощност и прегряване на двигателя), синхронни двигатели (повишени загуби в стоманата), електротермични устройства (влошават се температурния им режим и технологичния процес), битови консуматори (влошава се работата им и експлоатационния им живот), генератори и синхронни компенсатори (понижава се мощността им) и силови трансформатори (намалена способност за претоварване, повишени активни загуби, прегряване и генериране на висши хармоници) [21].

Отклонението на напрежението може да се компенсира, чрез включване в системата на динамични напреженови регулатори (ДНР). Те представляват мощностни електронни конвертори, които се присъединяват последователно на захранващата линия и са в състояние да генерират или компенсират активна и реактивна мощност в точката на присъединяването им.



Служат да подават напрежение с необходимата големина и честота и възстановяват напрежението на клемите на товара до желаната големина и форма на вълната, дори когато източникът на напрежение е небалансиран или несинусоидален. Изграждат се от мощностен DC/AC конвертор, свързан последователно на захранващата линия, чрез три монофазни трансформатори. DC страна на конвертора е свързана към за акумулатор [1].

Нововъзникваща тенденция в развитието на разпределителните мрежи е да се използват малки генериращи единици, известни като разпределено производство (РП), работещи в паралел с основната мрежа. Те имат потенциал да променят енергийния поток (да инжектират активна и реактивна мощност), системните напрежения и производителността на системата [3]. С цел оптимизиране тяхната работа, се комбинират с устройства за подобряване на качеството на ЕЕ (UPQC) [6]. Една такава система се състои от: два инвертора (последователен и паралелен), токоизправител и РП.



Така реализираната системата може да компенсира: отклонения или прекъсвания на напрежението, наличието на висши хармоници и реактивната мощност в системата.

Колебание на напрежението

Предизвиква се от колебания в консумирания ток в мрежата, които водят до бързо изменящи се загуби на напрежение в елементите от захранващата мрежа. Характеризира се с размах и се определя при всеки полупериод на захранващото напрежение:

$$\Delta U_i = \frac{|U_i - U_{i-1}|}{U_{\text{НОМ}}}$$

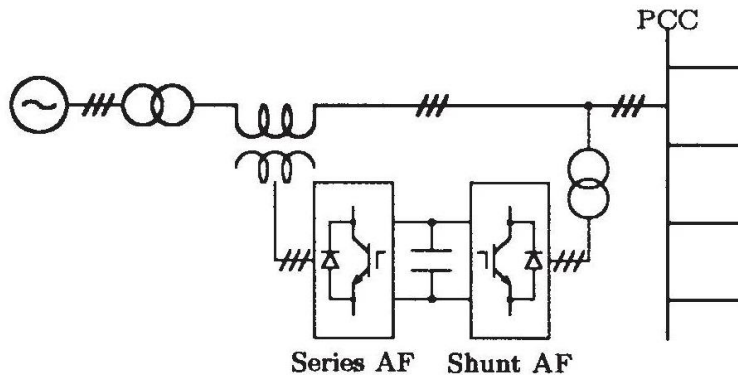
Съгласно БДС EN 50160:2003, колебания на напрежението за период от една седмица, 95% от ефективната стойност (средно за 10мин.), не трябва да превишава $\pm 10\%$ [20].

Бързите колебания на напрежението са предизвикани от бързи изменения на товара, причинени от мощни товари, с рязко променлив характер на консумираната мощност.

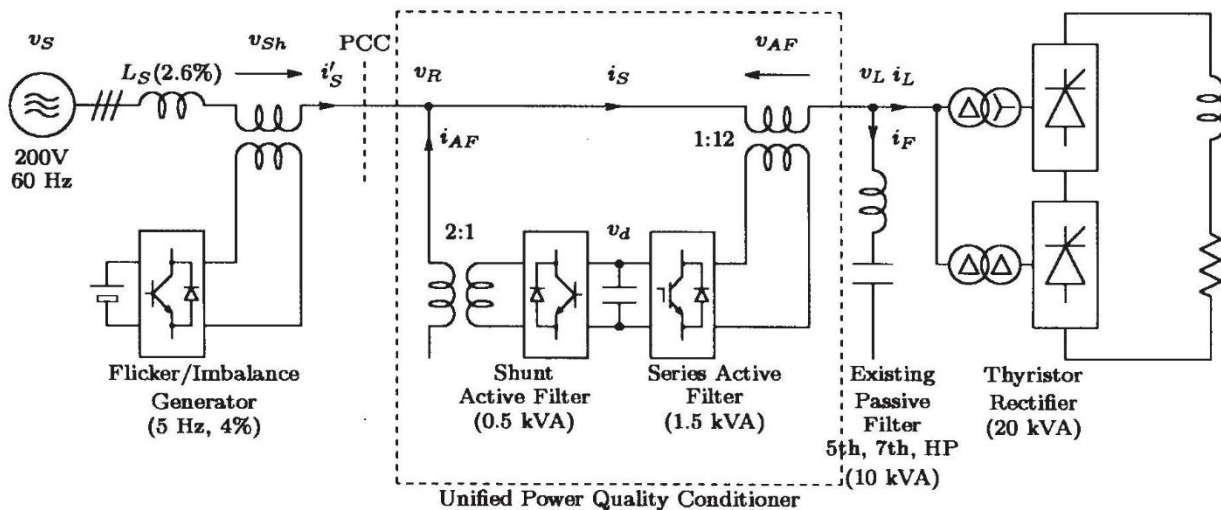
Негативните последици от колебанието на напрежението се изразяват в понижаване производителността и компенсиращата способност на филтрите [20], скъсява живота на светлинните източници и създава зрителен дискомфорт при хора работещи на изкуствено осветление „Фликер“ ефект (ФЕ) [12].

Един от начините за компенсиране колебанието на напрежението е чрез интегриране на устройства за подобряване на качеството на ЕЕ в точката на присъединяване към електрическите или промишлените енергийни системи [13]. Управлчват се чрез: следене на тока в системата (неподходящ за компенсиране на колебанието на напрежението), чрез следене на напрежението (неподходящ за компенсиране на хармониците) и комбиниран.

Изграждат на база на последователни и паралелни активни филтри. Монтират се в системите за разпределение на енергия и промишлените електрически системи,



или от страната на потребителите на електрическа енергия.



Резултатите показват, че прилагането на UPQC намалява колебанието на напрежението в системата 10 пъти [13].

Несинусоидалност на тока и напрежението

Въпреки факта, че напрежението на клемите на генериращите мощности в електроенергийната система (ЕСС) е синусоидално, то в различните ѝ възли неговата форма е

различна от синусоидалната.

Основните характеристики на несинусоидалността на тока и напрежението са, коефициентите на хармониците на тока и напрежението, претеглените коефициенти на несинусоидалност на напрежението и тока и коефициентите на несинусоидалност (общо изкривяване на хармониците THD) на напрежението и тока. Общото хармонично изкривяване (THD), се използва се за оценка на топлинното нагряване и допълнителните загуби на активна мощност в елементите на електрозадвижването и определя по формулата:

$$UTHD = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_n^2}}{U_1} \quad ITHD = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n I_n^2}}{I_1}$$

Стандартът IEEE 519 препоръчва THD на напрежението да не превишава 5%, а на тока да се ограничи от диапазона от 2,5% до 20% в зависимост от вида на захранващата мрежа и големината на товара [20].

Източници на хармоници са: насищащите устройства (силови трансформатори, синхронни и асинхронни машини, флуоресцентни лампи с магнитни баласта и др.), електронните товари, електродъгови пещи, заваръчни агрегати, кондензаторни батерии, задвижвания с регулиране на скоростта и електронни силови захранвания.

Нежеланите ефекти върху товарите в електроенергийната система са разделени в две категории - краткосрочни и дългосрочни. Дългосрочните са: повишени загуби на енергия и претоварване на силовото оборудване, допълнително прегряване и ускорено стареене на изолацията на съоръженията и увеличаване отклонението на напрежението. Краткосрочните ефекти се изразяват във влошаване работата на системите за контрол, автоматика и телемеханика и нежелано изключване на чувствителни товари [21].

Методите за ограничаване на хармониците са:

- намаляване на нелинейните товари генериращи хармонични на тока и напрежението, чрез използване на специални трансформатори;
- чрез добавяне или премахване на кондензаторни батерии и добавяне на реактори с цел избягване на резонансни явления или използването на активни филтри;
- използване на многофазни изправители, силови резонансни филтри, филтро - симетриращи устройства, рационални схемотехнически решения и др..
- използване на статични компенсатори "STATCOM".

Несиметрия на тока и напрежението

Съгласно стандарт БДС EN 50160, оценката на несиметрията, се извършва за напрежението и тока на основната честота. Съгласно стандарта дисбаланса на напрежението, за период от 1 седмица, за 95% от времето, за средната стойност за 10 мин, несиметрията за отрицателния полупериод не трябва да превишава 0%, а за положителния 2% [20].

Съществуват три дефиниции на несиметрия на напрежението разработени от NEMA, IEEE и съответно енергийната общност.

Съгласно NEMA (Национална асоциация на производителите на оборудване), несиметрията на напрежението се отчита чрез коефициента на несиметрия на линейното напрежението (LVUR), в проценти и изчислява по формулата:

$$\%LVUR = \frac{\Delta U_{\text{ср.л.м.}}}{\Delta U_{\text{ср.л.}}} * 100$$

Определението на NEMA предполага, че средната стойност на напрежението е винаги равна на номиналната стойност и не се отчитат фазовите ъгли на величините.

Съгласно IEEE несиметрията на напрежението, се определя чрез коефициента на несиметрия на фазното напрежение (PVUR) в проценти и се изчислява по формулата:

$$\%PVUR = \frac{\Delta U_{\text{ср.ф.м.}}}{\Delta U_{\text{ср.л.}}} * 100$$

IEEE използва същата дефиниция за несиметрия на напрежението, като NEMA с единствената разлика, че IEEE използва фазови напрежения, а не линейни напрежения. Тук отново се губи информация за фазовите ъгли, защото се разглеждат само величините.

Истинското дефиниране се извършва, чрез метода на симетричните съставлящи, който разлага трифазната система на три симетрични (с права, обратна и нулева последователност) и се отчита с коефициента на несиметрия по напрежение в проценти (VUF).

$$\%VUF = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} * 100$$

От направен анализ, при несиметрия под 5%, разликата между определението на NEMA и истинската дефиниция е много малка (0,8%) и това може да окаже незначително влияние върху работата на асинхронните двигатели. При екстремни стойности коефициента на несиметрия обаче, разликата е висока (3,8%) [16].

Небалансираните напрежения могат да доведат до неблагоприятни последици за ЕСС, поради това че малък дисбаланс в напреженията може да доведе до пропорционално по - голям такъв във фазовите токове [8]. При небалансирани условия, системата за електрозахранване ще понесе по - големи загуби и топлинни натоварвания, както и ще се понижи нейната стабилност, защото е в по - лоша позиция, да понесе преноса на допълнителни, аварийни енергийни потоци [17].

Ефектите от несиметрията на напреженията също могат да бъдат тежки за асинхронните двигатели, силови електронни преобразуватели и двигатели с регулиране на оборотите, непрекъсваеми токозахранвания, изразени в повишаване на загубите и работната им температура [11]. При асинхронните двигатели напреженията с обратна последователност, генерират нежелан спиращ въртящ момент, което намалява ефективността им, понижава се въртящия им момент и скоростта на въртене, както се появяват пулсации и повишен шум в двигателя [8]. При нормални експлоатационни условия, небалансираните напрежения предизвикват небалансирани токове в линията от порядъка на 6 до 10 пъти дисбаланса на напрежението, което намалява ефективността и живота на двигателя [15]. Стандарта NEMA препоръчва мощността по двигателя да се завиши с коефициент определен на базата на степента на напреженовия дисбаланс. [15].

Причините за несиметрията са основно в следствие на несиметрии в консумирания ток от неравномерно натоварване на фазите. Енергоспестяващите устройства за регулиране оборотите на монофазните двигателите, водят до непрекъснато изменение на

небалансираните товари, а от там и непрекъснато изменение на несиметрията в големи часови диапазони [18]. Еднофазните задвижвания и електрическите железопътни системи, също могат да причинят значителен дисбаланс в комуналните трифазни системи, освен ако не са взети мерки срещу това при проектирането им [19].

Основната причина за несиметрията на напрежения в ЕСС е наличието на неравномерно разпределени еднофазни товари [2]. Друга причина за несиметрия са непълнофазните режими на работа в системи с изолиран звезден център. За мрежи ниско напрежение (НН), това е следствие на неравномерно разпределение на комунално – битовите товари. В мрежи средно напрежение (СрН), несиметрията се обуславя предимно от мрежите НН. В линиите високо напрежение (ВН), несиметрии могат да се създадат само при условие, че линиите са с различни фазни съпротивления [5]. Небалансираните импеданси, включително трансформаторите, са също големият донор за несиметрия на напреженията [9].

ЕСС могат да бъдат балансирани чрез промяна на конфигурацията им, чрез ръчно или автоматично прехвърляне на товари между фазите [18], или чрез поставяне на еднофазни регулатори на всяка от фазите [9]. Компенсация на несиметрията може да се постигне и чрез включване на пасивни електрически филтри, които балансират импеданса на товара [4]. За променливи натоварвания, несиметрията в електрозахранващите системи може да бъде коригирана с помощта на VAR компенсатори [4] и използване на статични компенсатори “STATCOM” [10]. Също така, много голямо внимание се обръща на транспонирането на проводниците за да се запази баланса между последователните индуктивни и паралелните капацитивни съпротивления на електропроводите. На практика несиметрията въведена от непълното транспониране на проводниците не е сравнително голяма [14].

Съществуват различни методи за намаляване влиянието на несиметрията върху ел. потребители. Всички пасивни и активни филтри, свързани към статични VAR компенсатори, може да се използват за компенсация на несиметрията на потребителските съоръжения [4]. Смекчаване на неблагоприятните последици от небалансираното напрежение върху регулируемите задвижвания могат да бъдат постигнати и чрез използването на подходящи АС и DC реактори, за намаляване на токовия дисбаланс [11].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Експерименталните изследвания се отнасят до изследване показателите на качеството на електрическата енергия за конкретно промишлено предприятие. и влиянието им върху работата на производствения процес и оборудването. На база на проведените експерименти и вероятно – статистическите подходи (теория на планиране на експеримента, корелационния и дисперсионния анализ), ще се създадат методики за изследване и анализиране влиянието на ПКЕЕ върху работата на производствения процес и оборудването.

ИЗВОДИ

1. Направен е литературен обзор на ПКЕЕ и действащите стандарти и нормативи.
2. Дадени са основните причини за влошаване на ПКЕЕ и последствията от тяхното въздействие върху оборудването, технологичните процеси и ЕСС.

3. Разгледани са мерките за подобряване на ПКЕЕ.
4. Начертани са и са разработени насоките за експерименталните изследвания относно показателите на качеството на електрическата енергия.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Ghosh and G. Ledwich, Compensation of Distribution System Voltage using DVR, IEEE transactions on Power Delivery, vol. 17, №. 4, october 2002.
2. A. von Jouanne and B. B. Banerjee, "Voltage unbalance: Power quality issues, related standards and mitigation techniques", Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, EPRI Final Rep., May 2000.
3. A. D. T. Le, K. A. Kashem, M. Negnevitsky & G. Ledwich, Minimising voltage deviation in distribution feeders by optimising size and location of distributed generation, Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC, 2005.
4. A. Campos, G. Joos, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, "Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three - phase VSI operating with unbalanced switching functions", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 9, no. 3, May 1994.
5. A. von Jouanne and B. B. Banerjee, "Voltage unbalance: Power quality issues, related standards and mitigation techniques", Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, EPRI Final Rep., May 2000.
6. B. Han, B. Bae, H. Kim, S. Baek, Combined operation of Unified Power – Quality Conditioner with DG, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, No. 1, 2006.
7. C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic compatibility - Second edition Design. New York: John Wiley & Sons Inc., 2006.
8. C. Y. Lee, "Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three -phase induction motor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, № 2, 1999.
9. D. R. Smith, H. R. Braunstein, and J. D. Borst, "Voltage unbalance in 3 and 4 - wire delta secondary systems", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, no. 2, Apr. 1988.
10. D. Khadse, K. N.Sawalakhe, N. A. Wanjari, Improvement of Power Quality by Enhancing the Voltage Stability by VSC - DSTATCOM, JNCET, Vol. 6, Issue 7, 2016.
11. EPRI Power Electronics Applications Center, "Input performance of an ASD with AC and DC reactors during supply voltage unbalance", PQTN Brief no. 29, 1996.
12. IEC 868-0, Flickermeter – Evaluation of Flicker, Severity, 1991.
13. H. Fujita, H. Akagi, The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, no. 2, 1998.
14. J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Power System Analysis: McGraw - Hill, Inc., 1994.
15. Motors and Generators, NEMA Standards Publication no. MG 1-1993.
16. P. Pillay, M. Manyage, Definitions of Voltage Unbalance, IEEE Power Engineering Review, May 2001.
17. R. P. Broadwater, A. H. Khan, H. E. Shaalan, and R. E. Lee, "Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, 1993.

Science & Technologies

18. R. P. Broadwater, A. H. Khan, H. E. Shaalan, and R. E. Lee, "Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, Jan. 1993.
19. R. Bergeron, "Voltage unbalance on distribution systems — Phase I, "Canadian Electrical Association, Montréal, Québec, Project no. 231 D 488, Jan. 1989.
20. БДС 50160:2010, Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически системи, 2006г.
21. Р. Киров, В. Чиков Електромагнитна съвместимост в промишлените предприятия, ТУ - Варна, 2012.