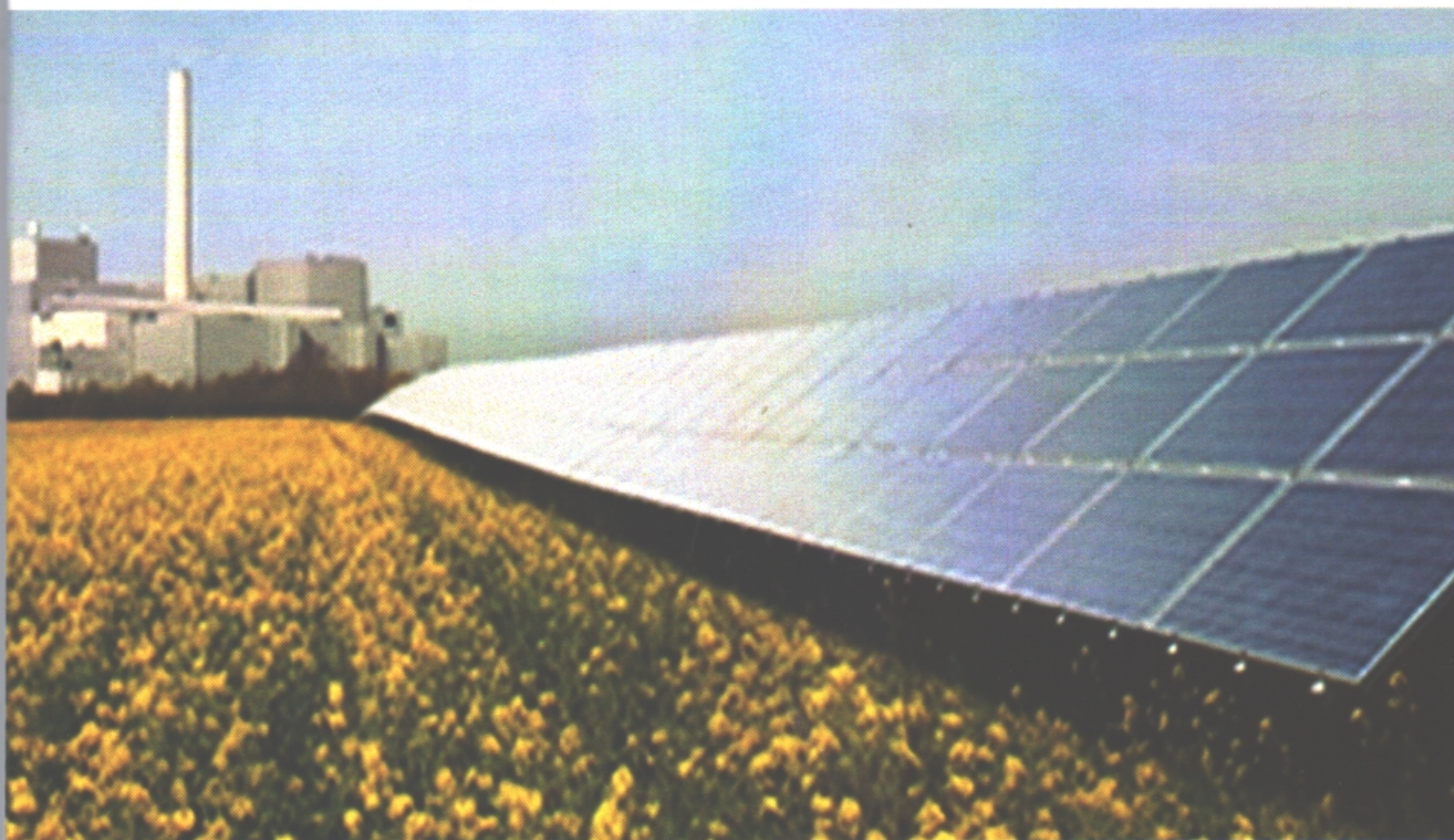




Технически университет - София

Атанас Червенков

**ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ СМУЩЕНИЯ И
ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ
В ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИТЕ
УСТРОЙСТВА И СИСТЕМИ**



София



Технически университет – София

Атанас Червенков

**ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ СМУЩЕНИЯ И
ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ
В ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИТЕ
УСТРОЙСТВА И СИСТЕМИ**

МОНОГРАФИЯ

София, 2023 г.

Автор: © Атанас Георгиев Червенков

Рецензенти:

© проф. д-р инж. Живко Георгиев

© проф. д-р инж. Никола Михайлов, DHC

ISBN: 978-619-167-523-4



Technical University of Sofia

Atanas Chervenkov

**ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AND
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN
ELECTROTECHNICAL DEVICES
AND SYSTEMS**

MONOGRAPH

Sofia, 2023

Author: © Atanas Georgiev Chervenkov

Reviewers:

© Prof. Eng PhD. Zhivko Georgiev

© Prof. Eng PhD. Nikola Mihailov, DHC

ISBN: 978-619-167-523-4

СЪДЪРЖАНИЕ

Резюме.....	7
Abstract.....	10
Предговор.....	13
Preface.....	20
Глава 1. Основни понятия за електромагнитна съвместимост. Видове електромагнитни смущения.....	25
1.1 Електромагнитни съвместимост на електротеническите устройства	25
1.2 Електромагнитни смущения в електротеническите устройства.....	26
1.3 Начини за разпространяване на електромагнитните смущения.....	29
Глава 2. Смущения по галванична връзка.....	33
2.1 Влияние чрез захранващата верига.....	33
2.2 Влияние чрез заземителния контур.....	34
2.3 Смущения в комуникационни линии.....	35
Глава 3. Смущения по капацитивна връзка.....	41
3.1. Електрическо поле създадено от еднопроводна линия при променлив ток.....	43
3.2. Електрическо поле създадено от трифазна линия за променлив ток	44
3.3. Електрическо поле създадено от многопроводна трифазна линия за променлив ток.....	51
3.4. Електрическо поле индуцирано в метални съоръжения разположени в близост до електропроводи	58
Глава 4. Смущения по индуктивна връзка.....	61

4.1 Определяне на взаимната индуктивност.....	61
4.2. Определяне индуктивното влияние на електропровод за високо напрежение.....	63
Глава 5. Нискочестотно електромагнитно излъчване. Влияние на магнитното поле.....	68
5.1. Анализ на магнитното поле на въздушна линия за високо напрежение.....	68
5.2. Анализ на магнитното поле на кабелна линия за средно напрежение	76
Глава 6. Електромагнитни смущения в електрически централи с децентрализирани източници.....	84
6.1 Анализ и моделиране на малка фотоволтаична система свързана с електрическата мрежа.....	84
6.2. Анализ и моделиране на хибридна електроцентрала.....	93
Заклучение.....	107
Използвана литература.....	109

РЕЗЮМЕ

Изследванията, изложени в настоящата монография имат за цел проучване влиянието на електромагнитните смущения в електротехническите съоръжения с цел осигуряването на електромагнитната им съвместимост и влиянието на тези смущения върху живота и здравето на човека. Изследват се електромагнитните смущения, предизвикани от електротехнически устройства и системи, работещи при високи напрежения и с големи токове и електромагнитната им съвместимост с други електротехнически устройства. Отделено е и внимание на влиянието на изследваните електротехнически устройства върху човека.

Във въведение се описват основните проблеми, разгледани в монографията и се дефинират основните понятия и основни сведения за електромагнитните смущения и електромагнитната съвместимост в електротехническите устройства и системи. Изложени са основните цели на изследванията, изложени в настоящата монография.

В глава 1 са дефинирани основните термини, използвани при изследване на електромагнитна съвместимост. Представена е основната концепция в теорията на електромагнитната съвместимост., Класифицирани са източниците на изкуствените електромагнитни смущения, причинени от електротехническите устройства. Изложени са основните начини за разпространението на електромагнитните смущения в техническите устройства и системи.

В глава 2 са изследвани смущенията разпространяващи се по галваничен път при проникване на смущения през захранващата верига или през заземителния контур. Разгледани са редица публикации, в които се изследва галваничното предаване на електромагнитните смущения. Описано е разпространението по галваничен път на електромагнитните смущения в силови преобразователни устройства – преобразователи на постоянен ток DC/DC, изправители и инвертори. Разгледани са и смущенията разпространяващи се по галваничен път и в предавателни линии. Изследвани са смущенията в комуникационна линия, причинени от кабелен електропровод за средно напрежение 20 kV. Съставен е електромагнитен модел и са симулирани различни режими на работа на електропровода. Получени са резултати за разпределение напрежението на смущение при различни съпротивления на заземяване и влажност на почвата.

В глава 3 се разглежда капацитивното разпространението на електромагнитните смущения през паразитни капацитети. Разгледани са редица публикации, в които се изследва капацитивното предаване на електромагнитните смущения. Описано е разпространението по капацитивен път на електромагнитните смущения в електронни устройства с печатни платки, в електронни медицински апарати и безконтактна ЕКГ усъвършенствана сензорна техника. Извършени са изследвания на електромагнитните смущения, създавани

от въздушни електропроводи за високо напрежение за случаите на въздействие на еднопроводна и трифазна трипроводна въздушни линии за високо напрежение. Изследвани са трипроводни и шестпроводни въздушни линии за високо напрежение. Вниманието е съсредоточено върху електромагнитните смущения, създавани от многопроводни въздушни линии в мрежите за ниско напрежение и в линиите за пренос на данни, разположени в близост до електропроводите. Определят се взаимните капацитети и електрическото поле в близост до въздушни електропроводи за високо напрежение. Изчислява се напрежението на линия за ниско напрежение, възникнало от смущението посредством капацитивната връзка. Получено е разпределението на напрежението на смущение в околността на електропровода за високо напрежение. Определена е „условно безопасна зона“ при продължителен престой около електропровода, според изискванията на стандартите за електромагнитна съвместимост. Зоните, разположени в близост до въздушния електропровод, в които напрежението на смущение може да достигне относително високи стойности опасни за електрическите съоръжения за ниско напрежение, както и за хората, които работят в близост до въздушните линии, са определени за 2 типа електропроводи 220kV - с три и шест проводника съответно.

В глава 4 се изследват смущенията, разпространявани чрез индуктивна връзка. Анализира се вредното индуктивното смущение в линиите за комуникация и линиите за пренос на данни, създавано от въздушни електропроводи за високо напрежение. Определя се взаимната индуктивност на две успоредни линии и взаимната индуктивност между проводниците на трифазна линия за високо напрежение и комуникационна линия. Изчислява се индуктираното напрежение на смущение в проводниците на комуникационна линия, разположена в близост до въздушен електропровод за високо напрежение. Разгледани са случаите на смущения в нормален и аварийен режим на работа на електропровод за високо напрежение 220 kV.

В глава 5 се разглеждат смущенията, предизвикани при излъчване на нискочестотни електромагнитни полета. Разгледани са редица публикации от изследвания за влиянието на електромагнитното поле върху живи организми. Описано са изследвания за влиянието на магнитното поле върху биологични обекти и по специално върху човека. Посочени са специфични лабораторни експерименти за експозиции на електромагнитното поле върху животни и хора, които може да причинят сериозни заболявания като левкемия, рак и сърдечни заболявания. Особено чувствителни в това са отношение малките деца и възрастните хора. Извършен е анализ на магнитното поле, създадено от въздушна линия за високо напрежение. Изследвано е разпределението на магнитното поле, в околността на трифазна преносна мрежа 220 kV. Извършени са симулации при различни височини на окачване на проводниците над земята.

Получени са резултати за разпределението на магнитната индукция и магнитния интензитет в околността на стълб от линията за високо напрежение. Извършен е и анализ на магнитно поле в близката зона на кабелна линия за средно напрежение 20 kV, разположена до жилищни сгради и тротоари в нормални и аварийни режими. Създаден е електромагнитен модел. Направени са симулации на нормален и аварийен режим на късо съединение на кабелната линия. Получени са резултати за разпределението на магнитната индукция и магнитния интензитет в околността на кабелната линия за високо напрежение, разположена в близост до жилищни и обществени сгради.

В последната глава 6 на монографията се анализират електромагнитни смущения в електрически централи с възобновяеми източници. Разгледани са електромагнитните смущения от фотоволтаична централа с малка мощност, захранваща потребители чрез мрежата ниско напрежение. Получени са експлоатационните характеристики на централата в режим на нормална работа. Извършено е моделиране на работата на централата в режим на нормална работа и в аварийни режими, като е акцентирано върху изпълнението на изискванията за електромагнитната съвместимост на централата. Извършен е анализ за нивото на напрежение и ток, произведената активна мощност, фактора на мощността и напрежението, коефициентът на нелинейните изкривявания (Total Harmonic Distortion THD) и по-специално коефициентът на нелинейните изкривявания на тока (Current THD). Формите на напрежението и тока са близки до синусоидалната крива. Общото хармонично изкривяване на обекта е много ниско и отговаря на изискванията на стандартите. Изследвана е и хибридна електроцентрала с фотоволтаичен и вятърен генератор и система за съхранение на енергия. Разглеждани са множество варианта на работа на хибридната електроцентрала. Извършени са симулации на различни условия на работа на хибридната система, в зависимост от наличното количество възобновяема вятърна и/или слънчева енергия. Електромагнитната съвместимост на анализираната хибридна система е удовлетворена при различни случаи на натоварването на ветрогенератора и на фотоволтаика, включително при работата само на един от възобновяемите източници на електроенергия. В този случай се използва и оптимално акумулаторната батерия, благодарение на използваната система за съхранение на енергия на батериите.

ABSTRACT

The research, presented in this monograph, aims to investigate the influence of electromagnetic interference in electrotechnical devices in order to ensure their electromagnetic compatibility and the influence of this electromagnetic interference on human life and health. Electromagnetic interference caused by electrotechnical devices and systems operating at high voltages and high currents is investigated, as well as their electromagnetic compatibility with other electrotechnical devices.

In an introduction describes the main issues addressed in the monograph. The basic concepts and basic information about electromagnetic interference and electromagnetic compatibility in electrotechnical devices and systems are defined. The main objectives of the research presented in the present monograph are presented.

Chapter 1 defines the main terms used in electromagnetic compatibility research. The basic concept in the theory of electromagnetic compatibility, the artificial sources of electromagnetic interference and the ways of their propagation are presented. The sources of artificial electromagnetic interference caused by electrotechnical devices are classified. The main ways of electromagnetic interference propagation in technical devices and systems are presented.

In Chapter 2, interference propagating through a galvanic path is investigated, when interference penetrated through the power circuit and the ground loop. A number of publications, investigating the conductively transmission of electromagnetic interference, have been described. The conductively propagation of electromagnetic disturbances in power converters - DC/DC converters, rectifiers and inverters - is described. Disturbances propagating conductively in transmission lines are also considered. The interference in a communication line caused by a cable power line for medium voltage 20 kV is investigated. An electromagnetic model is created and different operating modes of the power line are simulated. Results for the distribution of the interfering voltage at different earthing resistances and soil moisture are obtained.

In Chapter 3, the capacitive propagation of electromagnetic interference through parasitic capacitances is considered. A number of publications, investigating the capacitive transmission of electromagnetic interference, have been described. The capacitive path propagation of electromagnetic interference in electronic devices with printed circuit boards, in electronic medical devices and non-contact ECG advanced sensor technology is described. Research for the electromagnetic interference, created by overhead power lines for high voltage has been done for the cases of single-wire and three-phase, overhead lines. Three-conductor and six-conductor high-voltage overhead lines have been investigated. Attention is focused on the electromagnetic interference created by multi-conductor overhead lines in low-voltage networks and in data transmission lines, located near power lines. The mutual capacitances and the electric field in the vicinity of overhead power lines for high voltage are determined.

obtained. Modeling of the operation of the plant in normal operation mode and in emergency modes is carried out, emphasizing the fulfillment of the requirements for the electromagnetic compatibility of the photovoltaic system. An analysis was carried out for the voltage and current level, the produced active power, the power and voltage factor, the coefficient of nonlinear distortions -Total Harmonic Distortion THD and in particular the coefficient of nonlinear distortions of the current -Current THD. The voltage and current shapes are close to the sinusoidal curve. The total harmonic distortion of the site is very low and meets the requirements of the standards. A hybrid power plant with a photovoltaic and wind generator and an energy storage system is also being investigated. Different operating modes of hybrid power station are investigated. Simulations of different operating conditions of the hybrid system are carried out. The electromagnetic compatibility of the analyzed hybrid system is satisfied in different cases of the load of the wind generator and the photovoltaic, including the operation of only one of the renewable sources of electricity. In this case, the battery is optimally used, due to the used battery energy storage system.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основно внимание на изследванията, изложени в настоящата монография, е съсредоточено върху изследване влиянието на електромагнитните смущения в електротехническите съоръжения с цел осигуряването на електромагнитната им съвместимост и влиянието на тези смущения върху живота и здравето на човека.

Осигуряването на електромагнитната съвместимост е осигуряването на такова състояние на електрическите съоръжения, при което те са в състояние да функционират нормално, без да причиняват вредни въздействия върху останалите технически средства или върху човека.

Спазването на електромагнитната съвместимост е едно от необходимите условие за устойчивото развитие на икономиката на страната и за изграждане на едно съвременно общество, в което електротехническите устройства навлизат все по-дълбоко във всички сфери на човешкия живот и без които е невъзможно нормално ни съществуване.

Проблемите на електромагнитна съвместимост са свързани предимно с осигуряване на правилното функциониране на всички електрически и електронни устройства в една сложна система, каквито са почти всички съвременни автоматизирани системи. Тъй като степента на въздействие на електромагнитните смущения зависи от разстоянието между предавателя на електромагнитна енергия и приемника, разположените електротехническите устройства в непосредствена близост трябва да са съвместими.

Електрическото и магнитното поле са много силни фактори, влияещи върху състоянието на техническите съоръжения и върху биологичните обекти, включително човека. Електрическото поле е опасно за всички технически средства, тъй като може да наруши тяхната нормална работа поради възникване на допълнителни индуктирани токове в тях. То създава и вредно въздействие върху биологични обекти като хора, животни и растения, като предизвиква неприятни усещания или нарушава нормалната работа на различни органи и системи, когато те се намират в близост до електрическите съоръжения. Това е една от причините, да се изследват нивата на електрическия и на магнитния интензитет около електротехническите устройства.

Изследванията, представени в настоящата монография са съсредоточени върху различните начини на проникване на електромагнитните смущения и върху осигуряването на електромагнитната съвместимост на основни електротехнически устройства и системи.

Съществуват множество други електротехнически обекти и системи, работещи на промишлени, ниски, високи и свръхвисоки честоти, които не са

разгледани в настоящата работа и които ще бъдат цели на бъдещи изследвания.

Резултатите от изследванията на електромагнитната съвместимост на електротехнически устройства и системи, изложени в настоящата монография са представени в следните авторски публикации:

1. Червенков А., Червенкова Т., Христова И., 2013. Изследване индуктивното влияние на въздушна линия за високо напрежение върху електротехническите съоръжения, *Енергетика*, 6 2013 ноември-декември, с.31-34, ISSN 0324-1521.
2. Червенков А., Т. Червенкова, И. Христова., 2014-1. Изследване на капацитивното влияние на въздушна линия за високо напрежение върху електротехническите съоръжения, *Годишник на Технически Университет София*, том 64, кн. 1, стр. 467-464.
3. Червенкова Т., Червенков А., Христова И., 2014-2. Анализ на магнитното поле на въздушна линия за високо напрежение, *Енергетика*, бр. 3 май-юни, с.17-21, ISSN 0324-1521.
4. Chervenkov A., Cherevnkova T., 2016-1. Modelling of the conductive impact of medium-voltage power line on the communication line. *Proceedings of 11th Summer School Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering -Sofia' 16*, pp. 174-179.
5. Червенков А., Т. Червенкова., 2016-2. Изследване на капацитивното влияние на многопроводна линия за високо напрежение. *Годишник на Технически Университет София*, том 66, кн. 2, стр. 383-392.
6. Chervenkov A., Cherevnkova T., 2016-2. Investigation of the magnetic field in the vicinity of the medium voltage cable line. *Proceedings of 11th Summer School "Advanced Aspect of Theoretical Electrical Engineering"*, Sofia'16, pp. 144-150, ISSN: 1313-9487.
7. Chervenkov A., Yanev A., Chervenikova T., 2018. Modelling and Analysis of Hybrid Power Station, *Proceedings of Technical University of Sofia*, vol. 68, issue 2, pp. 69-78, ISSN 1311-0829.
8. Chervenkov A., Yanev A., Chervenikova T., 2019. Performance analysis and modelling of gridconnected small photovoltaic system 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA.2019.8771511.

Електромагнитни смущения и електромагнитна съвместимост в електротехническите устройства и системи

Монография

Автор: Атанас Георгиев Червенков

Рецензенти:

© проф. д-р инж. Живко Георгиев

© проф. д-р инж. Никола Михайлов, DHC

Дизайн на корицата: Атанас Червенков

Поръчка No 42, юни 2023 г.

Формат: 70/100/8

ISBN: 978-619-167-523-4

Издателство и печат - Технически университет – София
гр. София, бул. Климент Охридски 8, тел. 02 965 22 26

Цена: 10.50 лв.

Доц. д-р инж. Атанас Червенков преподава по дисциплините „Теоретична електротехника“ в Технически университет - София от 1990 г. до 2001 г. и от 2005 г. досега. Преподавал е и по „Физика“ и „Приложна електротехника“ в Университета по архитектура, строителство и геодезия в София от 2001 г. до 2005 г. Завършил е специалността „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ в Русенски Университет през 1985 г. Защитил е дисертация за образователна и научна степен д-р на тема „Приложение на четиримерните потенциали в задачите на синтеза на електромагнитни системи“ през 2002 г. Има 80 публикации в списания и конференции у нас и в чужбина по анализ и синтез на електромагнитни системи, изследване на нелинейни електромагнитни вълни и солитони, и в областта на електромагнитната съвместимост.

Изследванията, изложени в настоящата монография, имат за цел проучване на влиянието на електромагнитните смущения в електротехническите съоръжения с цел осигуряването на електромагнитната им съвместимост и влиянието на тези смущения върху живота и здравето на човека. Изследват се електромагнитните смущения, предизвикани от електротехнически устройства и системи, работещи при високи напрежения и с големи токове и електромагнитната им съвместимост с други електротехнически устройства. Отделено е и внимание на влиянието на изследваните електротехнически устройства върху човека.

Изследвани са смущенията, разпространяващи се по гальванически път през захранващата верига или през заземителния контур, капацитивното разпространение на електромагнитните смущения през паразитни капацитети, смущенията разпространявани чрез индуктивна връзка и смущенията предизвикани при излъчване на нискочестотни електромагнитни полета. Анализирани са електромагнитните смущения в електрически централи с възобновяеми източници.

Издателство на Технически университет – София

ISBN: 978-619-167-523-4