В.Н. Довбыш
М.Ю. Маслов
Ю.М. Сподобаев

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Самара
2009

www.nilem.ru

УДК.621.396.67
ББК 32.84
Д 58

Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М.

Д 58 Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. –Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.

Ил. 123. Табл. 2. Библиогр. 200 назв.

Рассмотрены вопросы, связанные с электромагнитной безопасностью элементов региональных энергетических систем.

Описаны методологические подходы к организации и проведению электромагнитного мониторинга объектов энергетических систем, приводятся методики прогнозирования электромагнитной обстановки, а также представлены результаты численного анализа электромагнитных полей, полученные для реальных условий размещения объектов. Особое внимание уделено методологии комплексного контроля электромагнитных полей в региональной энергетической инфраструктуре.

Для научных работников, специалистов по проектированию и эксплуатации энергетических объектов и объектов энергоснабжения, работников санитарно-экологического надзора, аспирантов и студентов вузов электротехнических, электроэнергетических и радиотехнических специальностей.

Печатается по рекомендации Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений (выписка из решения РНКЗНИ от 29 октября 2008 года)

ISBN 978-5-91088-114-7

Рецензенты

Председатель РНКЗНИ, доктор медицинских наук, профессор Ю.Г. Григорьев
Доктор технических наук, профессор В.П. Кубанов

Научное издание

© Довбыш В.Н.
© Маслов М.Ю.
© Сподобаев Ю.М.

www.nilem.ru

V.N. Dovbish
M.Y. Maslov
Y.M. Spodobaev

ELECTROMAGNETIC SAFETY OF POWER SYSTEMS ELEMENTS

Samara
2009

www.nilem.ru

Dovbish V.N., Maslov M.Y., Y.M. Spodobaev

Electromagnetic Safety of power systems elements: Monograph / V.N. Dovbish, Maslov M.Y., Y.M. Spodobaev. – Samara: "IPK Sodrujestvo", 2009. – 198 p.

In that monograph the questions connected with electromagnetic safety of elements of regional power systems are considered.

Methodological approaches to the organisation and carrying out of electromagnetic monitoring of objects of power systems are described, techniques of forecasting of electromagnetic conditions are resulted, and also results of the numerical analysis of the electromagnetic fields, the placings of objects received for real conditions are presented. The special attention is given methodology of the complex control of electromagnetic fields in a regional power infrastructure.

For scientists, experts in designing and operation of power objects and objects of power supply, workers of sanitary-ecological supervision, post-graduate students and students of high schools of electrotechnical, power and radio engineering specialities.

ISBN 978-5-91088-114-7

Reviewers

doctor of medical sciences, professor Y.G. Grigoriev
doctor of technical sciences, professor V.P. Kubanov

ISBN 978-5-91088-114-7

© Dovbish V.N. 2009
© Maslov M.Y. 2009
© Spodobaev Y.M. 2009

www.nilem.ru

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемые читатели!

Перед вами монография, необходимость в которой возникла в связи с обострением экологических проблем вообще и проблем электромагнитной экологии в частности. Электромагнитные поля, как фактор энергетического загрязнения окружающей среды, стал зачастую определять не только стратегию хозяйственной деятельности человека, но и его образ мышления и жизни.

Проблемы электромагнитной экологии, которые особенно остро встали перед обществом где-то в 80-х годах прошлого столетия, во многом успешно решены. В России не без участия одного из авторов настоящей работы создана нормативно-методическая база электромагнитной безопасности, позволившая привести в порядок ситуацию с электромагнитным загрязнением, создаваемым бурно развивающимися инфокоммуникационными структурами. Созданная система электромагнитного мониторинга (анализ состояния, прогнозирование, измерение и оценка электромагнитной обстановки) позволила успешно развивать отрасль телекоммуникаций, избегая конфликтных ситуаций в обществе. Обоснованные медико-биологическими исследованиями санитарно-гигиенические критерии и предельно-допустимые уровни полей, научно-обоснованные методы прогнозирования и инструментального контроля, широкое обсуждение вопросов электромагнитной экологии в обществе, последовательное воспитание, просвещение и образование всех уровней населения и специалистов – все это явилось залогом гармоничного развития общества с учетом проблем электромагнитной экологии.

К сожалению, все вышесказанное можно было отнести только к антропогенному электромагнитному загрязнению, которое сопутствует некоторым технологическим процессам телекоммуникационных систем – радиовещание, эфирное телевидение, радиосвязь.

Отметим, что развитие цивилизации связано с бурным ростом потребления энергии, в том числе электрической, как за счет увеличения количества оконечных устройств, так за счет увеличения их мощностей. Это, в свою очередь, сопровождается интенсивным развитием энергосистем – умощнением имеющихся элементов, увеличением общей протяженности линий электропередач, ростом числа трансформаторных подстанций, освоением новых технологий транспортировки и распределения электроэнергии (подземные кабели, встроенные трансформаторные подстанции и прочее). Все эти процессы происходят, как правило, на селитебных территориях.

Известно, что процессы передачи и распределения электрической энергии сопровождаются возникновением вблизи элементов энергосистем

www.nilem.ru

электрических и магнитных полей, с которыми зачастую непосредственно контактирует человек. Опасность таких контактов подтверждается санитарно-гигиеническим нормированием полей – установлением предельно-допустимых уровней на электрические и магнитные поля промышленной частоты, как для населения, так и для производственных условий. Однако, методическая база электромагнитного мониторинга объектов энергосистем практически отсутствовала. Вопросы электромагнитной экспертизы территорий, зданий и помещений с точки зрения загрязнения полями элементов энергосистем рассматриваются лишь эпизодически.

Настоящая монография является обобщением исследований и опыта авторов в области создания технологий электромагнитного мониторинга окружающей среды по фактору электрических и магнитных полей промышленной частоты. В этой работе описываются электродинамические модели излучения элементов энергетических систем, приводятся алгоритмы и результаты исследований полей для конкретных объектов, дается оценка распространенным проектным решениям с экологической точки зрения. Предлагаемые математические подходы к решению модельных электродинамических задач, методики расчетов и визуализации полей не являются единственно возможными и не претендуют на законченность исследований, но, с точки зрения авторов, вполне могут стать основой создания методической базы для электромагнитного мониторинга полей промышленной частоты. Такая методическая база создается на региональном уровне в Самарской области. Являясь активными сторонниками автоматизированных систем проектирования, авторы ориентировали свои разработки на возможную алгоритмизацию и программирование решений соответствующих электродинамических задач современными программными средствами.

Методическая база электромагнитного мониторинга слабо связана с нормами на электромагнитные поля. При изменении предельно-допустимых уровней, которые являются критерием оценки качества окружающей среды, методология мониторинга практически не меняется.

Отметим, что в стороне пока остаются вопросы, связанные с электромагнитной обстановкой внутри помещений, создаваемой распределительными сетями, бытовой и офисной техникой в квартирах и на производстве. Эти вопросы являются предметом дальнейших исследований авторов.

Авторы отдают себе отчет в том, что книга не лишена недостатков, как по фактическому содержанию, так и по методике изложения, и с благодарностью примут все критические замечания и пожелания.

Авторы выражают благодарность аспиранту кафедры электродинамики и антенн ПГАТИ Семакову Л.М. за помощь, оказанную при подготовке рукописи.

www.nilem.ru

FOREWORD

Quickly humanity development in the twentieth century has led essential and, perhaps, to irreversible change of shape of a planet. The intensification of industrial production, agriculture, development of information technologies, a global computerisation of all fields of human activity is accompanied by great Increase of power consumption of vital processes and, obviously, essentially change environment of its dwelling.

The human society in the course of the activity directed, first of all, on creation of comfortable conditions of existence, influences various components of an environment. Now such influences get global character, mentioning everything, without an exception, continents of our planet. The analysis of a significant amount of publications of geoecological subjects of a domestic and foreign origin, allows to notice that circumstance, that among all variety of kinds of anthropogenous pollution of an environment it is possible to allocate one specific kind of power pollution, namely, electromagnetic - a kind which influence can be carried simultaneously practically to all components of an environment simultaneously.

Today sources of electromagnetic fields of an artificial origin continuously accompany the person throughout all his life.

Annually in megacities are placed in operation new and existing objects and means of system of power supply are reconstructed. This process has accepted avalanche character last decade. Distinctive feature of the present stage of development of regional power infrastructures is repeated growth of capacities, characteristic for typical cycles of a life of regions and megacities.

Modern buildings projected, under construction and placed in operation and constructions of different function differ considerable power consumption and consumption of electric energy. It leads to that the power equipment in considerable quantities concentrates on rather small areas, electric mains pass through areas of human live. The certain contribution to general electromagnetic conditions bring as also electrotransport power supply systems. In design decisions of electrosupply of various structures (apartment houses and office cases) the increasing distribution receives placing of power transformers of distributive networks in one of premises of this structure. New high-voltage electric mains are even more often realised in underground execution, at a lining of lines directly on селитебных territories.

The power equipment is well known, that, in particular, electric mains, and traction substations of electrotransport, power transformers, power distributive points create networks of a food ЭМП industrial frequency which bring essential, and frequently and the defining contribution to general electromagnetic conditions on селитебных territories.

Thus, now the problem of working out of technology of the control of an environment under the factor of electromagnetic radiation of objects of power systems and creations on its basis of systems of the automated forecasting is

www.nilem.ru

sharply actual. The present book also is devoted the decision of the given problem.

The present book is generalisation of researches and experience of authors in the field of creation of technologies of electromagnetic monitoring of environment under the factor electric and magnetic fields of industrial frequency. In this work electrodynamic models of radiation of elements of power systems are described, algorithms and results of researches of fields for concrete objects are resulted, the estimation is given to widespread design decisions from the ecological point of view.

Offered mathematical approaches to the decision of modelling electrodynamic problems, techniques of calculations and visualisation of fields are not unique and do not apply for completeness of researches, but, from the point of view of authors, can quite become a basis of creation of methodical base for electromagnetic monitoring of fields of industrial frequency.

www.nilem.ru

Введение

Бурное развитие человечества в двадцатом веке привело к существенному и, пожалуй, необратимому изменению облика планеты. Интенсификация промышленного производства, сельского хозяйства, внедрение информационных технологий, глобальная компьютеризация всех отраслей деятельности человека сопровождается колоссальным ростом общей энергоемкости жизненных процессов и, очевидно, существенно изменяют среду его обитания.

Реалии сегодняшнего дня диктуют необходимость учета последствий взаимодействия созданной человеком техносферы с окружающей природной средой при решении любых технических задач. Проблемы экологии и охраны окружающей среды становятся важнейшими и актуальнейшими как в научно-технической, так и в социально-экономической сферах, поскольку последствия хозяйственной деятельности человека все чаще и чаще приобретают глобальные масштабы. Сформировавшиеся на сегодняшний день методы решения проблем создания здоровых и безопасных условий труда и жизнедеятельности направлены на оптимизацию взаимодействия человека и созданных им технических средств с окружающей средой в целях сохранения его здоровья и работоспособности.

Многообразие переплетающихся между собой процессов, связывающих человеческий организм и среду его обитания, требуют комплексной оценки последствий как непреднамеренного воздействия на окружающую среду, так и целенаправленного преобразования природы [2,199]. Поэтому решение современных экологических проблем немыслимы без участия практически всех областей научного знания и отраслей техники.

Анализ народнохозяйственных планов развития большинства стран планеты, проведённый в соответствии с программой ООН по проблемам окружающей среды [17,20,29,30,82,95,150,182], показывает, что интегральные экономические показатели государств, а также их тенденции развития на ближайшие десятилетия, по многим позициям не обеспечены имеющимися на планете ресурсами. В связи с этим важным обстоятельством выбор *экологической стратегии* и формирование на ее основе общественного экологического сознания является на сегодняшний день необходимым, хотя и не достаточным, условием для устойчивого (квазиустойчивого) развития человеческого общества.

Традиционно к задачам экологии относят следующие направления:

– изучение закономерностей развития экологических ситуаций и факторов, на них влияющих, в историко-социально-техническом аспекте, в течение значительного временного интервала;

– анализ современного состояния экосистем и факторов, на него влияющих; здесь традиционно главенствующая роль отводится *экологическому мониторингу* с последующей системной обработкой его данных;

www.nilem.ru

– прогнозирование развития экологических ситуаций разного уровня локализации (локальных, региональных, субглобальных, глобальных) с выработкой рекомендаций по предотвращению неблагоприятных экосистемных изменений.

При этом очевидно, что достаточно устойчивое состояние экосистем возможно только при непрерывном системном контроле состояния природной среды по всем существенным факторам антропогенного воздействия.

Человеческое общество в процессе своей деятельности, направленной, прежде всего на создание комфортных условий существования, воздействует на различные компоненты природной среды: атмосферу, гидросферу и литосферу. В настоящее время такие воздействия приобретают глобальный характер, затрагивая все, без исключения, континенты нашей планеты. Анализ значительного количества публикаций геоэкологической тематики отечественного [17,20,30–32,35,44,51,82,86,88,133,140,154,165,170,176] и зарубежного [185,187,188,199,200] происхождения позволяет отметить то обстоятельство, что среди всего многообразия видов антропогенного загрязнения природной среды, можно выделить один специфический вид энергетического загрязнения, а именно, *электромагнитный* – вид, влияние которого можно одновременно отнести практически ко всем компонентам природной среды одновременно.

Прошедшее столетие вошло в историю как эпоха бурного развития науки и техники. Одним из величайших, эпохальных достижений человечества, в значительной степени обусловившим практически все достижения технического прогресса, является повсеместное использование электромагнитной энергии. Это привело к тому, что на сегодняшний день *источники электромагнитных полей искусственного происхождения* непрерывно сопровождают человека на протяжении всей его жизни.

И в быту, и в процессе трудовой деятельности человека окружают разнообразные технические средства, создающие электромагнитные поля (ЭМП), которые обладают различными пространственно-временными характеристиками. Причем для одних технических средств генерация электромагнитной энергии является технологической особенностью, диктуемой их функциональным назначением, а для других, напротив, побочным явлением. Однако, в обоих случаях генерируемые поля являются активным фактором загрязнения окружающей среды. Отмеченные вопросы относятся к специфической области знания – «*электромагнитной экологии*» [26,44,112,114,115,124,165–168,170,176,185–187, 200]. Традиционно проблемы, с ними связанные, решаются при помощи следующих основных подходов, являющихся основой электромагнитного мониторинга:

– *расчетное прогнозирование ЭМП*, что весьма важно для стадий разработки, проектирования и размещения технических средств, являющихся источниками ЭМП [24,112,121,165–168];

www.nilem.ru

– *инструментальный контроль* электромагнитной обстановки на стадии эксплуатации объектов и их комплексов [44, 80,111,114,124,200];

– *разработка мероприятий и рекомендаций по защите* от ЭМП и нормализации электромагнитной обстановки [165,168,170].

Современному этапу развития человеческого общества, соответствует *региональный характер развития всех инфраструктур* [125,133,162], в том числе и связанных с потреблением и излучением электромагнитной энергии. Действительно, все энергоемкие объекты промышленного производства и культурной деятельности человека в значительной степени, сосредоточены в локальных областях, поэтому требованиям более или менее полного контроля над состоянием природной среды по электромагнитному фактору может отвечать только система, основанная на *регионально–ориентированном подходе*.

Следует отметить, что в задачах электромагнитной экологии зачастую необходим анализ поля в непосредственной близости от технических средств с учетом реальных особенностей их размещения и наличия других технических средств и материальных тел [24,165–168], что накладывает известные трудности на корректное проведение эксперимента и воспроизводимость результатов, получаемых эмпирическим путем. Это обстоятельство, очевидно, и обуславливает повышенный, особенно в последние десятилетия, интерес к созданию методик расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки. Инструментальные же методы традиционно используются при проверке корректности расчетных методик, а также в случаях, когда получение исчерпывающей информации об объекте исследования, необходимой для построения корректной теоретической модели, невозможно. Данное обстоятельство существенно отличает электромагнитную экологию от других экологических направлений, в которых для оценки состояния природной среды используют в основном данные, получаемые в результате экспериментов.

Вопросы расчетного прогнозирования ЭМП излучающих технических средств телекоммуникаций достаточно хорошо изучены как в нашей стране [25–25,162,165–168], так и за рубежом [180,181,189,190,197]. Вопросам же загрязнения окружающей среды и контроля экологической безопасности по фактору ЭМП промышленной частоты в рамках решения общих проблем электромагнитной экологии уделялось явно недостаточное внимание. Существование такого «белого пятна» в электромагнитной экологии можно оправдать только тем обстоятельством, что строительство объектов энергоснабжения различного назначения и увеличение их характерных энергетических нагрузок приняло широкомасштабный характер именно в последние годы, и только сегодня эти проблемы приобрели особенную актуальность и социальную значимость.

Ежегодно в регионах России вводятся в эксплуатацию новые и реконструируются существующие объекты и технические средства системы энергоснабжения. Этот процесс принял в последнее десятилетие лавино-

www.nilem.ru

образный характер. Отличительной особенностью современного этапа развития региональных энергетических инфраструктур России является многократный рост мощностей, характерных для типичных циклов жизни регионов и мегаполисов.

Проектируемые, строящиеся и вводимые в эксплуатацию современные здания и сооружения различного назначения отличаются значительной энергоемкостью и потреблением электрической энергии. Это приводит к тому, что энергетическое оборудование в больших количествах сосредотачивается на сравнительно малых площадях, линии электропередач проходят через селитебные территории. Определенный вклад в общую электромагнитную обстановку вносят так же и системы питания электротранспорта. В проектных решениях электроснабжения различных строений (жилых домов и офисных корпусов) все большее распространение получает размещение силовых трансформаторов распределительных сетей в одном из помещений этого строения. Новые высоковольтные линии электропередач все чаще реализуются в подземном исполнении при прокладке линий непосредственно на селитебных территориях.

Известно [86,115,168,187], что энергетическое оборудование, в частности, линии электропередач, сети питания и тяговые подстанции электротранспорта, силовые трансформаторы, силовые распределительные пункты создают ЭМП промышленной частоты, которые вносят существенный, а зачастую и определяющий вклад в общую электромагнитную обстановку на селитебных территориях [2,154,166,168,200].

В условиях лавинообразного и часто неконтролируемого наращивания количества излучающих технических средств, в ситуациях, когда человека практически всегда и везде сопровождают ЭМП антропогенного происхождения, информация о возможных источниках и масштабах электромагнитного загрязнения связана с принятием *ответственных административных, природоохранных, финансовых, инвестиционных и коммерческих решений при градостроительстве и проектировании электроснабжения* в регионах.

Опыт показывает, что при ликвидации источников ЭМП значительно возрастает коммерческая цена расположенных вблизи земельных участков и строений, и наоборот. При появлении информации о назначении таких объектов и возможном вредном воздействии ЭМП наблюдается отток коммерческих интересов от строений и земель, расположенных не только на прилегающих территориях, но и расположенных на значительном расстоянии от излучающих объектов.

Следует отметить, что в то время, как для излучающих технических средств телекоммуникаций существует развитая система санитарной паспортизации, для энергетического оборудования подобной системы не существует, а контроль электромагнитной обстановки в настоящее время проводится эпизодически при помощи методик лишь в некоторых случаях, имеющих статус отраслевых стандартов [20,115,133]. Также

www.nilem.ru

для оценки состояния природной среды по факторам электромагнитного излучения телекоммуникационного оборудования нашей стране создан ряд автоматизированных программных комплексов анализа электромагнитной обстановки [167,168]. Для энергосистем подобных программных средств не существует.

Таким образом, несмотря на известные достижения в указанной области, в настоящее время сохраняет актуальность научно-техническая проблема разработки технологии регионального контроля природной среды по электромагнитному фактору объектов энергетических систем и создания на ее основе систем автоматизированного прогнозирования. Решению данной проблемы и посвящена настоящая монография.

В условиях усиливающегося антропогенного воздействия на природные экосистемы настоящая работа приобретает особую актуальность, поскольку направлена на создание такой технологии экологического контроля, которая на основе сбора сведений об исследуемом факторе антропогенного воздействия на окружающую среду позволяет проводить детальную оценку экологической ситуации в масштабах современного региона. Для эффективной систематизации, хранения и обработки таких сведений, которые представляют собой массивы многомерных данных, очевидно, требуются адекватные методы исследования, реализованные в рамках настоящей технологии.

Состояние вопроса в рассматриваемой области характеризуется следующими основными достижениями.

Как отмечалось выше, проблема электромагнитного мониторинга региональных энергетических инфраструктур является достаточно новой и плохо изученной, однако любая комплексная задача всегда может быть представлена в виде совокупности частных базовых задач, для решения которых существуют отработанные и в достаточной степени апробированные методы.

Так, методологические основы технологий регионально контроля природной среды развиты в работах Булгакова Н.Г., Левича А.П. и Максимова В.Н. [29,118,182,193]. Общие вопросы электромагнитного мониторинга антропогенных воздействий достаточно хорошо освещены как в отечественной [2,12,17,20,30–32,35,51,80,82,86,88,107,125,133, 140,142, 151,154,162,164,165 и др.], так и зарубежной [183,185,186, 188,199,200] литературе. Общие подходы к сбору и обработке экологической и геоэкологической информации, разработанные и представленные в указанных работах, могут быть с успехом использованы для целей настоящего исследования.

Проблемы, методы и средства численного анализа технических средств, являющихся источниками ЭМП, в том числе и тех, для которых данное свойство не продиктовано функциональным назначением (так называемых, нетрадиционных источников излучения), достаточно полно

www.nilem.ru

освещены в следующей литературе [4,5,9,18,21,23–25,27,41,42,49, 50,84,94,99–103,105,121,129,130,167,168,173,177–181,184, 189–191,194–197].

Следует отметить, что большинство подзадач, сходных с возникающими в данной работе, решено в рамках традиционной электромагнитной экологии [23–27,80,111,112,121–124,165–168,170,200]. При этом большинство авторов используют методы математического моделирования, хорошо себя зарекомендовавшие при решении задач вычислительной электродинамики и теории антенн [3–5, 9,18,21,23,27,36, 40–42,49,50, 84,85,93,99–103, 105,120,121, 129–132,134–139 143,144,153,163,167–169,178,179–181,184,189–191, 194–198].

Исследования биологического действия ЭМП промышленной частоты, выполненные в нашей стране в 60–70-х годах прошлого века [45,115], ориентировались в основном на действие электрической составляющей, поскольку экспериментальным путем значимого биологического действия магнитной составляющей при типичных уровнях не было обнаружено. В 70-х годах для населения по электрическому полю промышленной частоты были введены нормативы и по настоящее время являющиеся одними из самых жестких в мире [43]. Впоследствии, в 80–е годы XX столетия на основании массовых эпидемиологических обследований населения, проживающего в условиях облучения *магнитными полями* высоковольтных линий, как безопасный уровень для условий продолжительного облучения, не приводящий к онкологическим заболеваниям, независимо друг от друга шведскими и американскими специалистами была рекомендована величина плотности потока магнитной индукции [187, 200]. Этот зарубежный стандарт и послужил основой для введения норматива по магнитному полю в нашей стране. Данными сведениями практически исчерпываются современные достижения в области анализа биологического воздействия ЭМП энергетического оборудования. Тем не менее, в качестве критериев оценки электромагнитной обстановки в настоящей работе могут выступать именно результаты упомянутых исследований.

Проблемы электромагнитного мониторинга технических средств, являющихся источниками ЭМП различного происхождения, активно изучаются с середины прошлого века. Исследованиям в этой области посвящено немало работ. Однако большинство из них, опубликованных ранее 70–х годов, посвящены в основном проблемам биологического воздействия и гигиенического нормирования. Фундаментальными же в области расчета ЭМП различных технических средств стали работы Шередько Е.Ю., Сподобаева Ю.М., Кубанова В.П., Маслова О.Н., Бузова А.Л., Романова В.А., Казанского Л.С. и др. [19,23,28,74–77,101–103,133–139]. В этих работах предложены и обоснованы подходы к расчетному прогнозированию электромагнитной остановки вблизи широкого класса излучающих технических средств и их комплексов, сформулированы подходы к системному электромагнитному мониторингу. Основные результаты этих работ, подтвержденные многочисленными экспериментальными исследо-

www.nilem.ru

ваниями, нашли отражение в нормативно–методических документах, утвержденных государственными органами санитарно-эпидемиологического надзора [123–127]. На основе разработанных методик создан известный программный комплекс [168].

Очевидно, что общие подходы и ряд математических методов, примененные названными авторами для электромагнитного мониторинга комплексов излучающих технических средств, вполне применимы и для решения базовых задач комплексного анализа электромагнитной обстановки вблизи энергетического оборудования.

Решение задачи разработки технологии контроля состояния природной среды по электромагнитному фактору целесообразно разбить на несколько этапов:

– *систематизация сведений* о технических средствах, входящих в энергетическую инфраструктуру, их классификация и разбиение на качественно однородные группы, для которых применимы сходные подходы к анализу;

– *разработка электродинамических моделей* различных источников и групп источников, адекватных с точки зрения решения проблем, рассматриваемых в рамках монографии;

– *разработка методик измерения* ЭМП, позволяющих оценить корректность предложенных теоретических моделей;

– *исследование электромагнитной обстановки на реальных объектах* с использованием разработанной в монографии методологии;

– *анализ и систематизация критериев* оценки электромагнитной обстановки и *разработка средств хранения и визуального представления* полученных данных электромагнитного мониторинга.

Предварительная оценка качественного состава источников ЭМП, входящих в энергетическую инфраструктуру, позволяет сделать ряд заключений. Так, основными техническими средствами – «поставщиками» электромагнитной энергии, существенно влияющей на общую электромагнитную обстановку в масштабах региона, являются линии электропередач (ЛЭП), распределительные пункты системы энергоснабжения, силовые трансформаторные подстанции, а так же силовые установки и сети питания наземного и подземного электротранспорта и т.п. [200]. В связи с этим можно утверждать, что все рассматриваемые технические средства можно подразделить на две основные группы, исходя из особенностей их пространственной локализации, следующим образом:

– группу распределенных (протяженных) технических средств, один из характерных линейных размеров которых существенно преобладает над остальными – ЛЭП, линии питания электротранспорта и т.д.;

– группу сосредоточенных (локальных) технических средств – силовые трансформаторные установки, тяговые подстанции электротранспорта, распределительные пункты системы энергоснабжения.

www.nilem.ru

Названные технические средства, в основном, являются источниками либо статического ЭМП, либо ЭМП промышленной частоты (ПЧ). Так как для случая ЭМП ПЧ выполняется условие квазистационарности [137], то есть пространственный период изменения поля оказывается значительно больше общей длины рассматриваемых проводников, то распределение амплитуды тока во всей цепи в каждый момент времени можно считать равномерным, и электродинамическая задача при расчетном прогнозировании электромагнитной обстановки может быть сформулирована аналогично статическому случаю. Иными словами, моделирование для целей расчета электрического и магнитного полей может производиться раздельно.

Вопросы расчетов ЭМП электроустановок подробно рассмотрены в работах Колечицкого Е.С. [99–103], Меликова Н.А. [102], Филиппова А.А. [103], Тозони О.В. [173], Демирчана К.С. [49,50], Abou–Seada M.S. и Nasser E. [179], Silvester P. и Chari M. [197], а так же других авторов.

Известно, что любая электродинамическая проблема, в конечном счете, представляет собой краевую электродинамическую задачу для системы дифференциальных уравнений в частных производных – уравнений Максвелла, или иных, из них выводимых – однородных или неоднородных уравнений д`Аламбера и Гельмгольца, уравнений Пуассона или Лапласа. Таким образом, принципиальная возможность расчета ЭМП любым из известных методов возникает в случаях, в которых может быть сформулирована (явно или неявно) соответствующая полная система граничных условий [99,138]. Из них применительно к задачам, поставленным в исследовании, очевидно, необходимо рассмотреть следующие.

Первое и самое распространенное граничное условие состоит в том, что должны быть известны первичные потенциалы и токи во всех проводниках (на их поверхностях или в их объемах, в зависимости от конкретной постановки задачи), образующих модель. В некоторых задачах граничное условие сводится к тому, что значение потенциала или тока проводника подлежит определению при условии, что известен его полный заряд. Так, например, в конструкциях, содержащих промежуточные экраны, не имеющие гальванического контакта с токоведущими частями устройства, заряд экранов обычно полагают равным нулю. Указанные граничные условия могут быть заданы в различных комбинациях. В соответствующей литературе принято разделение статических и стационарных полей на плоские (двумерные), плоскомеридианные (псевдодвумерные) и трехмерные [49,100,197]. Такой способ классификации может быть распространен и на соответствующие расчетные модели, что позволит в значительной степени определить выбор адекватных для решения конкретной задачи расчетных методов. Так, поля, образованные объемными проводниками и содержащие тонкие незамкнутые витки тока, достаточно эффективно могут быть определены в результате решения задачи в двумерной (псевдодвумерной) формулировке (плоские и плоскомеридианные поля) [100,197]. Расчет трехмерных полей таких проводников, хотя и не пред-

www.nilem.ru

ставляет принципиальных математических трудностей, как правило, производится со значительно большими затратами машинного времени.

Практически все существующие на сегодняшний день методы расчета статических и стационарных полей вполне обеспечивают принципиальную возможность расчета потенциалов и напряженностей полей, впоследствии успешно верифицируемых. Однако, при применении различных методов оказывается существенно различным объем информации, получаемой при решении задачи, и, кроме того, различен объем вычислений, необходимых для получения численных значений искомых функций [197]. В связи с данным обстоятельством при выборе адекватного расчетного метода важно учесть, что при анализе поля наибольший интерес, как правило, представляет сравнительно небольшая область пространства вблизи источника. В большинстве рассматриваемых в настоящей работе задач это область вблизи точки, в которой искомая функция принимает максимальное значение – так называемая область «сильного поля». Такой подход позволяет ограничить область анализа до сравнительно небольших размеров, снижая при этом общую ресурсоемкость задачи в смысле потребности производительности центрального процессора и объема оперативной памяти ЭВМ.

Решение любой задачи по расчету ЭМП может производится аналитически или при помощи численных методов вычислительной электродинамики [36,137]. Содержание известных аналитических методов расчета статических и стационарных полей подробно изложено в [129,136]. Их эффективное применение возможно в тех случаях, когда форма проводников, несущих первичные токи, может быть достаточно простым образом представлена в какой либо системе координат (декартовой, цилиндрической и т.п.). Применительно к задачам, поставленным в настоящей работе, аналитический подход целесообразен при расчете поля *распределенных технических средств* – ЛЭП, цепей питания электротранспорта. При этом искомые выражения для компонент векторов поля могут быть получены их известных интегралов уравнений Пуассона и Лапласа. Исключения составляют задачи анализа ЭМП подземных ЛЭП, а так же цепей питания электротранспорта в непосредственной близости транспортного средства. В первом случае на структуру и уровни поля оказывают существенное влияние реальные условия размещения, во втором случае – расположенный вблизи токоведущих частей проводящий корпус транспортного средства. В указанных задачах целесообразно уточнение решения при помощи какого-либо численного метода.

Для случаев *локальных технических средств,* распределение первичных зарядов и токов которых весьма сложно, целесообразно применение универсальных численных методов.

В настоящее время в вычислительной электродинамике наибольшее распространение получили следующие численные методы [49,190,197]:

www.nilem.ru

- метод сеток или метод конечных разностей (МКР) [40,129,190];
- вариационные методы (ВМ) [94,105];
- метод конечных элементов (МКЭ) [38,49,50,85,128,139,161,190, 197];
- метод интегральных уравнений (МИУ) [21,27,36,41,99–103,135,153, 177,178,180,181,189,191,194,195];
- метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) [102,173,179].

Применительно к статическим и стационарным задачам упомянутыми методами осуществляется численное решение уравнений Пуассона или Лапласа или эквивалентных этим уравнениям задач. Численная процедура всех этих методов сводится к составлению и решению системы линейных уравнений [36,178,190]. Все необходимые характеристики поля в дальнейшем могут быть вычислены на основании решения соответствующей системы линейных уравнений. Различные методы различаются между собой способом составления такой системы, видом и размерностью матрицы коэффициентов этой системы, а также способом учета граничных условий.

Названные численные методы расчета ЭМП обладают различными функциональными возможностями, для их применения нужны разные способы подготовки исходных данных, различается для них и время счета. Следует отметить, что задача объективного выбора расчетного метода, наиболее пригодного для решения определенного класса задач электродинамики, до настоящего времени не может считаться окончательно решенной. Такое положение объясняется целым рядом причин. Одной из них является отсутствие общепризнанных критериев сравнения эффективности методов для однотипных задач [100]. Второй причиной служит тот факт, что один и тот же метод может быть реализован различным образом. И, наконец, нельзя утверждать, что возможности какого-либо метода на сегодняшний день раскрыты исчерпывающим образом, и каждый из них имеет свои перспективы развития.

Рассмотрим различные методы вычислительной электродинамики с точки зрения их функциональных возможностей и целесообразности применения для решения поставленных в монографии задач. В этом плане наиболее универсальными представляются МКР и МКЭ. Оба этих метода позволяют описывать поверхности границ раздела сред сравнительно точно, так как в них присутствует принципиальная возможность аналитического описания любых, сколь угодно сложных поверхностей. Учет объемного заряда и наличия внешнего поля обоими методами производится весьма эффективно [99,190]. При этом собственно характер его распределения не играет существенной роли – он может быть задан в виде точечных, объемных или поверхностных распределений. Точно так же внешнее поле может быть описано аналитической функцией произвольного вида или задано таблично.

Электродинамический анализ технических средств, относимых нами к группе сосредоточенных источников, неизбежно сопряжен с моделиро-

www.nilem.ru

ванием устройств, содержащих *обмотки и конструктивные элементы, выполненные из материала с нелинейными свойствами*.

Методы решения подобных электродинамических задач можно разделить на три группы. К первой группе можно отнести прямые методы, подробно описанные в работах Говоркова В.А. [40] и монографии Миролюбова Н.Н. и др. [129], основанные на интегрировании тока вдоль криволинейного контура, проходящего по осям всех токоведущих частей, и предполагающие получение решения в замкнутой аналитической форме. Применительно к настоящему случаю данный подход малоприменим, поскольку витки обмоток имеют сложную форму, специфическую для каждого устройства, а так же различную для каждого слоя намотки, что затрудняет вычисление возникающих при этом интегралов. Кроме того, практически невозможным становится учет нелинейных элементов конструкции.

Методы, которые мы отнесем ко второй группе, предполагают сведение исходной краевой задачи к интегральному уравнению (ИУ) (системе уравнений). Решение ряда подобных задач указанными методами продемонстрировано в монографиях Тозони О.В. [173], Колечицкого К.С. [99], а также Никольского В.В. и Никольской Т.Н. [138]. Реализаций МИУ, применительно к решению поставленной задачи, возможно множество, при этом искомой функцией может выступать и магнитный поток в магнитопроводе (эквивалентный магнитный ток), и тангенциальные компоненты векторов электрического и магнитного поля. Методы ИУ могут быть ориентированы как на аналитическое, так и на численное решение, и позволяют учитывать нелинейности. С точки зрения задач поставленных в монографии, основным недостатком МИУ является их не универсальность в смысле конфигурации токоведущих обмоток, то есть для каждого конструктивного элемента необходимо получение отдельного уравнения. Причем свойства этих уравнений могут быть различными из-за геометрических особенностей входящих в них подынтегральных выражений. Подобный недостаток имеют и прямые методы, относимые к первой группе.

Указанного недостатка лишены методы, в которых задача формулируется непосредственно для дифференциального уравнения (системы уравнений) (МКР и МКЭ). В качестве исходных могут выступать либо непосредственно уравнения Максвелла, либо получаемые из них уравнения второго порядка. Эти методы мы отнесем к третьей группе и признаем наиболее целесообразными для решения задач, поставленных в монографии, поскольку они позволяют раздельно анализировать поля в областях устройства, заполненных средами с различными макроскопическими параметрами. Сшивание решения возможно с использованием известных граничных условий [137].

Учитывая особенности анализируемых источников, при выводе исходных уравнений можно пренебречь электромагнитной связью между обмотками, токи в которых целесообразно определять методами теории электрических и магнитных цепей. При записи же исходных уравнений

www.nilem.ru

найденные токи будем считать сторонними. При такой постановке задачи уравнения поля получаются аналогичными статическому случаю. Описанный подход удобен тем, что позволяет исключить из уравнений члены, учитывающие взаимное влияние. Такой подход, очевидно, позволит существенно упростить исходную задачу.

Как отмечалось выше, численное решение дифференциальных уравнений удобно проводить либо МКР, либо МКЭ. Характерной особенностью обоих методов решения дифференциальных уравнений является весьма значительная вычислительная трудоемкость. Обзор и сравнительная характеристика разностных и конечно-элементных методов решения электродинамических задач дана в работе [190]. Отмеченная работа является обобщением опыта коллектива авторов, занимавшихся разработкой универсальных программных пакетов электродинамического моделирования, таких как XFDTD (производства компании Remcom), HFSS и Maxwell (производства фирмы Ansoft). В работе отмечается преимущество МКЭ при решении стационарных задач, как более гибкого и экономичного. Действительно, практически все программные комплексы, ориентированные на решение статических и стационарных задач, используют именно данный метод.

Метод конечных элементов, традиционно применяемый для решения дифференциальных уравнений в задачах сопротивления материалов, строительной механики [38,39,85,139], теории упругости и теплопроводности [85,96,161], в электродинамике появился сравнительно недавно. Причина - существенная ресурсоемкость многомерных задач, к коим относятся задачи электродинамики.

Сущность данного метода состоит в том [139], что анализируемая часть пространства разбивается на подобласти, в пределах которых решение аппроксимируется функциями специального вида. Сшивание отдельных функций на границах обеспечивается граничными условиями.

Следует также признать существенным, что в задачах анализа источников второго типа (в смысле пространственной локализации) возможно естественное или путем введения дополнительных ограничений упрощение исходных уравнений, заключающееся в раздельной формулировке задачи для электрической и магнитной составляющих ЭМП. В ряде случаев, в силу симметрии задачи возможно исключение одной пространственной координаты, то есть переход к псевдодвумерной задаче. Так, например, в задаче расчета поля соленоида, сформулированной в цилиндрических координатах, возможно исключение азимутального угла в силу аксиальной симметрии сердечника и обмотки. В целом МКЭ применительно к решению квазистационарных задач, сводимых к псевдодвумерным, в рамках настоящего исследования представляется весьма целесообразным и вполне перспективным.

Среди источников второго типа следует выделить такие устройства, для которых информация об их конструктивном исполнении не может

www.nilem.ru

быть получена в полной мере, по причине большого разнообразия вариантов конструктивного исполнения. К таким устройствам относятся, прежде всего, *силовые распределительные пункты.* Для построения их расчетных моделей представляется целесообразным приближенный подход, в основе которого лежат сведения, получаемые экспериментальным путем.

В ходе обобщения вышесказанного представляется необходимой дополнительная классификация технических средств, входящих в региональную энергетическую инфраструктуру, по применяемым в рамках технологии контроля состояния природной среды *методам моделирования*. При этом определим следующий ряд качественно однородных групп:

– *распределительные устройства сетей энергоснабжения* – объекты систем энергоснабжения, осуществляющие распределение электрической энергии, вырабатываемой первичными источниками (ГЭС, АЭС и т.д.), между потребителями всех уровней сетевой иерархии, кроме конечных – высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП), ЛЭП, класс напряжения которых не ниже 6 кВ; потребительские цепи низкого напряжения; линии питания электротранспорта;

– *оконечные устройства сетей энергоснабжения* – трансформаторные подстанции, осуществляющие преобразование электрической энергии, поступающей от высоковольтных линий электропередач, к напряжению, соответствующему следующей ступени сетевой иерархии;

– *первичные объекты сетевой иерархии* региональной энергосистемы – комплексы технических средств, производящие преобразование энергии неэлектромагнитной природы (механической, тепловой, гидродинамической) в энергию переменного электрического тока промышленной частоты (50Гц), и передающие ее посредством вторичных объектов сетевой иерархии распределительным устройствам сетей энергоснабжения;

– *вторичные объекты сетевой иерархии* региональной энергосистемы – комплексы технических средств, осуществляющие посредство в передаче электрической энергии от первичных объектов к распределительным устройствам сетей энергоснабжения (трансформаторные подстанции, осуществляющие первичное преобразование электрической энергии, а также концентраторы – распределители).

Выбор терминологии в данном случае обусловлен традициями, характерными для электромагнитной экологии, сформировавшимися под влиянием сложившихся понятий телекоммуникационных систем и сетей. Использование достаточно узкой номенклатуры устройств для целей анализа электромагнитной обстановки обусловлен, прежде всего, существенной вероятностью присутствия на селитебной территории в региональных масштабах.

Таким образом, для целей построения технологии регионального контроля природной среды по электромагнитному фактору энергетического оборудования практически всем устройствам, относящимся к элементам

www.nilem.ru

системы энергоснабжения, как источникам ЭМП, присущи ряд специфических признаков:

– ЭМП имеет ярко выраженный стационарный или квазистационарный характер, что позволяет рассматривать электрическое и магнитное поля, как независимые друг от друга функции;

– конфигурация излучающих токов, локализованных в электрических цепях узлов моделируемых объектов, вообще говоря, достаточно сложна, что обуславливает сложную пространственную структуру ЭМП; указанное обстоятельство в большей степени присуще трансформаторным подстанциям и распределителям-концентраторам;

– присутствует сильная зависимость структуры и уровней поля от взаимного расположения отдельных частей технических средств и влияния близкорасположенных проводящих тел и иных технических средств, возможно, иного функционального назначения;

– первичные и вторичные объекты иерархии энергосистемы строятся по индивидуальным проектам, и каждый из них имеет весьма специфическую конструкцию.

Отметим так же ряд соображений, на основе которых в дальнейшем будем строить элементы разрабатываемой технологии. Как отмечалось выше, при построении электродинамических моделей различных технических средств целесообразно выбирать те расчетные методы, которые с одной стороны обладают наибольшей экономичностью в вычислительном смысле, а с другой стороны позволяют адекватно описывать электромагнитные процессы, протекающие в моделируемых системах, с учетом указанных выше особенностей.

Так для ВЛЭП, ЭМП которых создается протяженными участками многопроводных линий, целесообразно применять метод расчета, основанный на использовании интегралов уравнений Максвелла, известных в замкнутой форме. Влияние подстилающей поверхности (поверхности Земли) на структуру и уровни ЭМП при этом учитываются введением соответствующих зеркальных изображений первичных токов [187]. Использование такого относительно простого подхода к построению электродинамических моделей оправдано тем обстоятельством, что ЛЭП содержат преимущественно линейные коллинеарные токи.

Электрическое поле ЛЭП практически не зависит от нагрузки и полностью определяется напряжением. Магнитное же поле, напротив, существенно зависит от нагрузки, и при расчете необходимо учитывать изменяющийся характер последней. Для оценки экологической безопасности ЛЭП необходим расчет магнитного поля с учетом максимальной за год средней нагрузки. Стандартные расчеты ЭМП воздушных ЛЭП целесообразно проводить с учетом последующего сравнения результатов с принятыми критериями [157–160] следующим образом:

– электрическое и магнитное поля рассчитываются на высоте 2 м от поверхности Земли в направлении, перпендикулярном оси ЛЭП на протяже-

www.nilem.ru

нии всего следования линии; при этом необходимо учитывать возможное совместное прохождение линий различного класса напряжений, а также их повороты и разветвления;

– магнитное поле рассчитывается при максимальной токовой нагрузке, которая определяется, исходя из временного графика работы линии;

– земная поверхность при расчетах электрического и магнитного полей считается идеально проводящей безграничной плоскостью, влияние которой учитывается при помощи метода зеркальных изображений;

– расчет проводится до расстояний, превышающих размеры зоны, в которой контролируемые параметры оказываются больше своих предельно допустимых значений.

ЭМП трансформаторных подстанций создается витками токов в обмотках силовых трансформаторов. Определяющее влияние на структуру и уровни ЭМП при этом оказывают размеры и конфигурация обмоток, конструкция и материал магнитопровода, а также стены и перекрытия, присутствующие в помещении, где расположено трансформаторное и электрощитовое оборудование.

Многочисленность влияющих факторов и сложность структуры первичных токов диктует целесообразность применения для расчета численных электродинамических методов, ориентированных на непосредственное решение уравнений Максвелла таких, как МКЭ.

Электрическое поле трансформаторных подстанций практически полностью экранируется арматурой помещения подстанции [200], поэтому расчет электрического поля целесообразно проводить только внутри технического помещения. Магнитное поле свободностоящих (внешних) трансформаторных подстанций рассчитывается в горизонтальном сечении на высоте 2 м от поверхности Земли до расстояний, превышающих размеры зоны, в которой контролируемые параметры оказываются больше своих предельно допустимых значений [157–160]. Магнитное поле встроенных трансформаторных подстанций рассчитывается в техническом помещении, а также в примыкающих помещениях на первом и далее этажах в горизонтальных сечениях в плоскостях, отстоящих на 0,5 и 1,5 м от уровня пола.

Основной особенностью первичных и вторичных объектов сетевой иерархии является то, что их конструкции специфичны и не унифицированы, что значительно усложняет систематическое расчетное прогнозирование электромагнитной обстановки.

Источниками ЭМП названных технических средств, в сущности, являются электрические токи и заряды, локализованные в электрической схеме анализируемой системы. Строгий расчет поля предполагает знание пространственного расположения и ориентации всех токоведущих частей и проводников, находящихся под напряжением. Обеспечить это в силу указанных выше причин не представляется возможным. Поэтому предлагается приближенный подход к моделированию, при котором реальное устройство

www.nilem.ru

представляется точечным источником в виде совокупности электрического диполя и витка тока (магнитного диполя), моменты которых, вообще говоря, различно ориентированы в пространстве. Основанием для такого подхода служат следующие соображения:

– расстояние до точки наблюдения, как правило, значительно превышает размеры областей, где локализованы токи и заряды (это дает возможность рассматривать источник как элементарный);

– во всех случаях контур тока замкнут, поэтому, какова бы ни была конфигурация токоведущих проводников, вся их совокупность представляет собой систему витков; такая система с точки зрения максимального значения поля может быть представлена эквивалентным магнитным диполем, магнитный момент которого является суперпозицией магнитных моментов отдельных витков;

– во всех случаях на токоведущих проводниках имеются парные точки, между которыми определяются напряжения; такие пары точек образуют систему электрических диполей, суперпозиция электрических моментов которых есть момент некоторого одного эквивалентного диполя.

Исходные параметры такой приближенной модели определяются при помощи некоторого набора экспериментальных данных. Собственно расчет ЭМП таких объектов, в силу сходного характера пространственной локализации источников ЭМП, необходимо проводить аналогично расчету трансформаторных подстанций, руководствуясь требованиями, изложенными выше. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что данные объекты создают как электрическое, так и магнитное поле, поскольку в их электрических цепях локализованы как высокие напряжения (сотни киловольт), так и весьма значительные по величине токи (сотни ампер).

Учет влияния материальных тел при анализе указанных выше исключительных случаев следует проводить отдельно, руководствуясь индивидуальными соображениями.

Следует также отметить, что воздушные ЛЭП и силовые трансформаторы, помимо ЭМП ПЧ, являются источниками высокочастотных полей. Причинами данных явлений являются, соответственно, коронирование проводов и частичные разряды в обмотках [152].

Оценка уровней ЭМП, создаваемых короной ЛЭП, возможна в силу простоты конфигурации первичных токов при помощи приближенного подхода, развитого в работах Казакова В.Н. [92], а так же Кима К.С., Лелевкина В.М., Токарева А.В., Юданова В.А. [98].

В случае с силовыми трансформаторами реальные устройства могут быть представлены для моделирования в виде сетки проводников с сосредоточенным возбуждением. Расчет распределения тока на проводниках такой модели требует решения одномерного интегрального уравнения. Подобные задачи широко известны в соответствующих областях теории антенн. Применительно к целям, поставленным в работе, наиболее

www.nilem.ru

удобным и перспективным представляется подход на основе, так называемого, тонкопроволочного приближения [27,36,191]. Действительно, сетка, аппроксимирующая реальное техническое средство, состоит из проводников, размеры и форма поперечного сечения которых не имеют значения, а методы решения электродинамических задач на основе тонкопроволочного приближения достаточно хорошо изучены и относительно легко алгоритмизируются.

Перечисленные задачи и выбранные методы их решения позволяют получить данные об электромагнитной обстановке, созданной комплексом технических средств, составляющих энергосистему региона.

Как отмечалось выше, данные об электромагнитной обстановке в масштабах региона представляют собой массивы данных значительного объема. При этом весьма существенным обстоятельством, отличающим такие данные от результатов, получаемых в иных формах экологического мониторинга, является «генетическая» привязанность к географическим координатам. Действительно, области «сильного поля» энергетического оборудования, очевидно, оказываются локализованными вблизи мест расположения технических средств – источников, а результирующая электромагнитная обстановка образует сложную пространственную картину, привязанную к рельефу местности.

Иными словами, неотъемлемой частью технологии регионального контроля природной среды по фактору ЭМП является частная технология *визуализации и графической обработки геоэкологической информации*.

Применение геоинформационных технологий при региональном экологическом контроле в последние годы стало стандартным решением. Вопросам, связанным с геоэкологическим картографирования повещены работы Берлянта А.М. [16], Полякова М.М. [140], Прогуловой Т.Б. [151], Мясоедова Б.В. [162], а так же ряду других авторов. Общие подходы и примененные способы представления векторных и матричных данных на электронных картах могут быть с успехом применены для реализации целей, поставленных в настоящей монографии.

Использование геоэкологического картографирования в рамках данной работы весьма целесообразно еще и ввиду того обстоятельства, что практически во всех крупных регионах России в настоящее время созданы и развиваются комплексные геоинформационные системы, в том числе и экологической направленности. Присутствие в данных системах компонентов, содержащих информацию об экологической обстановке по электромагнитному фактору, очевидно, крайне желательно.

Монография состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений.

Раздел 1 посвящен разработке методик расчета ЭМП распределительных элементов региональной энергетической инфраструктуры.

www.nilem.ru

В разделе проведен общий анализ объекта исследования, предложена классификация источников по критериям пространственной локализации и характеристикам излучаемого ЭМП. Также выявлены особенности соответствующих электродинамических задач, обоснованы общие подходы к электродинамическому моделированию источников ВЛЭП. Принят ряд допущений для моделирования и указаны границы применимости моделей. Разработаны электродинамические модели воздушных и подземных высоковольтных линий, проведены тестовые расчеты ЭМП реальных объектов, расположенных на территории г. Самары и Самарской области. Разработаны подходы к учету влияния подстилающей поверхности и разветвленного характера линий на структуру и уровни ЭМП ЛЭП.

В разделе также получены результаты оценочных расчетов высокочастотного излучения равновесной короны ЛЭП.

Для построения моделей силовых распределителей-концентраторов, осуществляющих передачу электромагнитной энергии между ступенями сетевой иерархии системы энергоснабжения региона, в разделе использована приближенная расчетно-экспериментальная методика электродинамического моделирования локальных источников квазистационарного поля.

Раздел 2 посвящен разработке методики электродинамического моделирования технических средств, входящих в состав силовых трансформаторных подстанций; выявлены и учтены особенности возникающей при этом электродинамической задачи. В частности, сформулированы критерии перехода от трехмерной задачи к псевдодвумерной, а также приняты допущения, позволяющие отказаться от учета взаимного влияния обмоток при решении электродинамической задачи. При этом собственно решению электродинамической задачи предшествует расчет распределения напряжений и токов по полюсам анализируемого устройства методами электрических и магнитных цепей.

Для моделирования подобных источников квазистационарного ЭМП применен метод непосредственного решения электродинамической задачи, сформулированной для неоднородных стационарных уравнений второго порядка эллиптического типа. Уравнения относительно векторов электрического и магнитного полей записаны раздельно, учитывая то обстоятельство, что электрическое и магнитное поле в квазистационарном случае независимы друг от друга. Численное решение этих уравнений проводится с использованием МКЭ, в котором вся анализируемая область пространства разбивается на конечное число дискретных подобластей, имеющих форму многоугольников. Решение уравнений аппроксимируется полиномиальными функциями, вообще говоря, различными для каждого элемента, при этом требуется максимальное приближение значения интерполяционного полинома к гипотетически точному решению. Коэффициенты полиномов определяются методом Галеркина.

Помимо квазистационарного ЭМП в настоящем разделе проведена оценка высокочастотного поля излучения силового трансформатора, воз-

www.nilem.ru

никающего в результате частичного разряда в магнитопроводе. Решение данной задачи находится путем численного решения интегрального уравнения с приближенным ядром.

В разделе 3 разработана методика расчета полей, создаваемых цепями питания электротранспорта. При этом использованы подходы, предложенные в предыдущих разделах, с указанием границ применимости последних. Проведены тестовые расчеты ЭМП вблизи систем питания электротранспорта различных типов, таких как троллейбус, трамвай, метрополитен.

Раздел 4 в целом посвящен результатам экспериментальных исследований ЭМП различных объектов системы энергоснабжения г. Самары и Самарской области. Особое внимание при проведении экспериментов уделяется проверке корректности результатов, полученных расчетным путем в предыдущих разделах.

В разделе 5 проведена разработка технологического алгоритма контроля состояния природной среды по электромагнитному фактору объектов энергетических систем. Предложен и детально обоснован геоинформационный подход к визуализации электромагнитной обстановки в регионе. Приведены скриншоты некоторых фрагментов ГИС электромагнитной безопасности региональной энергосистемы Самарской области.

В приложениях приведены некоторые математические выкладки, а так же результаты расчетов и измерений, не включенные в основную часть.

www.nilem.ru

РАЗДЕЛ 1. Электромагнитные поля распределительных элементов региональной энергетической инфраструктуры

1.1. Классификация технических средств систем по пространственной локализации и характеристикам создаваемых ЭМП

Основными техническими средствами, входящими в состав региональной энергосистемы – «поставщиками» электромагнитной энергии промышленной частоты (ПЧ), существенно влияющей на общую электромагнитную обстановку в регионе, являются высоковольтные ЛЭП, силовые трансформаторные установки, сети питания наземного и подземного электротранспорта и т.п. [168].

Контролируемыми параметрами ЭМП, создаваемых элементами энергетических систем при оценке их воздействия на окружающую среду, являются:

- напряженность электрического поля, E в В/м;
- напряженность магнитного поля, H в А/м.

Предельно допустимые уровни регламентированы следующими нормативными документами:

- Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты СН № 2971-84. – М.: Минздрав СССР, 1984;
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. СанПиН 2.1.2.1002-00. – М.: Минздрав России, 2001;
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Электромагнитные поля в производственных условиях. СанПиН 2.2.4.1191-03. –М.: Минздрав России, 2003.

Ввиду того, что в современном регионе присутствует значительное количество технических средств, являющихся источниками ЭМП ПЧ, при расчетном прогнозировании электромагнитной обстановки, целесообразно во всем их многообразии выделить классы и группы, для которых окажутся адекватными одни и те же или похожие электродинамические модели. Причем, критерием классификации в нашем случае послужат не конструктивные особенности или функциональное назначение конкретных объектов, а методы электродинамического моделирования. Так, например, практически одинаковыми моделями можно описать локальные участки ЛЭП и сетей питания электротранспорта. Все технические средства, основными источниками ЭМП которых являются обмотки, так же могут быть адекватно представлены моделями одного

www.nilem.ru

и того же типа. Следует отметить, что некоторые виды электротранспорта используют постоянный ток. Данное обстоятельство, как будет показано ниже, ни коим образом не влияет на общий подход к электродинамическому моделированию.

Электродинамическая модель представляет собой математический аппарат (а также его численную реализацию – алгоритмы, программы и прочее), позволяющий рассчитать ЭМП в заданных точках пространства по известным параметрам источников поля, включая их пространственное положение и ориентацию.

При полном решении электродинамической задачи, строго говоря, должны быть учтены все материальные тела, находящиеся в исследуемой области пространства. Применительно к данному случаю это означает, что должны быть учтены реальная конфигурация проводников, параметры подстилающей поверхности, а также все находящиеся вблизи источника предметы, макроскопические параметры которых (как сред существования ЭМП) отличаются от свободного пространства (воздуха).

Электродинамические задачи, подобные рассматриваемой в данном случае, традиционно решаются методами интегральных уравнений, поскольку при этом функция Грина, используемая при интегрировании соответствующих волновых уравнений, получается в замкнутой форме [36, 137]. Однако, такое интегрирование волновых уравнений может быть выполнено только в изотропной среде (макроскопические параметры как функции координат являются постоянными и не зависят от координат и направлений). Согласно пространственной теореме эквивалентности [136] переход к изотропной среде (в данном случае к воздуху) может быть выполнен путем замены реальных материальных тел соответствующими объемами (областями пространства такой же формы), внутри которых имеют место эквивалентные электрические и магнитные (для магнитных веществ) токи и заряды.

Решение электродинамической задачи в такой строгой постановке с учетом всех указанных выше факторов для произвольной конфигурации источников, даже учитывая современные достижения в области вычислительных методов электродинамики, не представляется возможным. Поэтому приходится в той или иной мере идеализировать объект исследования и использовать приближенные методы анализа. Применительно к данному случаю в качестве материальных объектов, влияние которых должно быть учтено, следует выделить поверхности, ограничивающие анализируемую область пространства – подстилающую поверхность, которая, в первом приближении может быть учтена методом зеркальных изображений, а также массивные проводящие тела, присутствующие в непосредственной близости источника в области «сильного поля».

В качестве следующего шага по идеализации объекта исследования следует принять положение, согласно которому все рассматриваемые в рамках настоящей работы источники поля могут рассматриваться как сто-

www.nilem.ru

ронние, то есть как источники, электромагнитные параметры которых не зависят от окружающей обстановки. Это также очевидным образом следует из того факта, что режимы работы систем электроснабжения практически не зависят от наличия иных материальных тел (здесь, разумеется, не идет речь об изменении нагрузок сетей и цепей электроснабжения).

В соответствии с вышесказанным представляется целесообразным процедуру моделирования разделить на две последовательно выполняемые стадии:

- построение электродинамических моделей локальных участков цепей электроснабжения как сторонних источников, создающих ЭМП в свободном пространстве – ЛЭП, цепей питания электротранспорта;
- электродинамическое моделирование оконечных устройств силовых цепей – силовых трансформаторных подстанций, тяговых подстанций электротранспорта, концентраторов-распределителей.

Учет влияния расположенных вблизи источника материальных тел будем проводить, руководствуясь индивидуальными соображениями (данные вопросы будут рассмотрены в последующих разделах монографии).

В рамках разработки электродинамических моделей сторонних источников все рассматриваемые технические средства следует классифицировать, прежде всего, по критериям, относящимся к пространственной форме и характерным размерам соответствующих излучающих структур. В этом смысле будем различать (рис.1.1):

- линейные источники;
- локальные источники.

Первый класс образуют источники, пространственная форма которых характеризуется существенным преобладанием одного линейного размера над другими. Соответствующие технические средства – локальные участки цепей энергоснабжения, линии питания электротранспорта и т.п.

Второй класс образуют источники, локализованные в относительно небольшой (по сравнению с размерами помещения) области пространства. К ним относятся оконечные устройства сетей и цепей электроснабжения, силовые установки, тяговые подстанции и т.д.

Целесообразность первичной классификация по форме вызвана необходимостью применения различных подходов к расчету ЭМП.

Очевидно, что все названные ранее технические средства, относимые к линейным источникам ЭМП ПЧ, могут быть представлены для анализа, как источники квазистационарного поля [137].

Относительно линейных источников квазистационарного поля (цепей энергоснабжения) можно отметить следующие специфические особенности. Все источники этого типа могут рассматриваться как многопроводные линии передачи с расстоянием между проводами, заведомо существенно меньшим по сравнению с расстоянием до точки наблюдения. Все сети и цепи энергоснабжения с точки зрения пространственной формы представляют собой ломанные кривые. Это позволяет в качестве элементарного ис-

www.nilem.ru

точника (локального участка сети) рассматривать отдельный прямолинейный участок соответствующей многопроводной линии.

Рис.1.1. Качественный состав источников ЭМП ПЧ

При частоте электрического тока $f = 50$ Гц, длина волны электромагнитного излучения составляет:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 0.6 \cdot 10^7 \, м = 6000 \text{ км}.$$

Так как в этом случае выполняется условие квазистационарности, то есть длина волны значительно больше общей длины рассматриваемых проводников, то распределение амплитуды тока во всей цепи в каждый момент времени можно считать равномерным [138].

В уравнениях Максвелла [136]:

$$\text{rot}\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \tag{1.1}$$

можно пренебречь, вследствие малости, производными $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ и $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, так как поля изменяются во времени относительно медленно. Тогда, уравнения Максвелла примут вид:

www.nilem.ru

$$\text{rot}\,\vec{H} = \vec{j},\ \text{rot}\,\vec{E} = \vec{0}. \qquad (1.2)$$

Электрическое и магнитное поля в условиях задачи данного типа можно рассматривать, как независимые друг от друга функции, и полагать, что электромагнитные волны не излучаются.

При вычислении электрического поля линию следует рассматривать как распределенный вдоль отрезка прямой электрический мультиполь – систему параллельных заряженных нитей.

При вычислении магнитного поля линию следует рассматривать как систему параллельных противоположно направленных одинаковых по величине линейных токов.

1.2. Электродинамическое моделирование воздушных ЛЭП

1.2.1. Выбор и обоснование подходов к электродинамическому моделированию

Как отмечалось выше, при вычислении электрического поля участок протяженной воздушной ЛЭП будем рассматривать, как систему распределенных вдоль отрезка прямой параллельных заряженных нитей, несущих некоторый эквивалентный заряд, определяемый из погонных параметров и класса напряжения линии. При вычислении магнитного поля линию следует рассматривать, как систему параллельных линейных токов. При этом делается допущение о том, что нагрузка линии равномерно распределена между фазами, и ток в нулевом проводе отсутствует [6].

Рассмотрим модель прямолинейного участка цепи электроснабжения с точки зрения вычисления электрического поля.

Поскольку напряжение в сети не зависит от нагрузки, электрическое поле также оказывается независимым от потребляемого тока. ЛЭП, конфигурация проводов которой соответствует типовой опоре У-35 (см. Приложение 3), размещенная в декартовой системе координат, показана на рис.1.2. Нахождение электрического поля, с учетом перечисленных допущений и ограничений, сводится к решению двумерной квазистатической задачи [129]. Влияние подстилающей поверхности учтено введением зеркального изображения проводников, при этом делается предположение о металлическом характере электропроводности почвы, что, как известно [например, 100], вполне допустимо с точки зрения электротехнических расчетов.

Эквивалентные электрические заряды (см. рис. 1.2), соответствующие проводникам линии (отнесенные к единице длины проводника), определяются следующим образом:

$$q_1 = C_1 \cdot U_\phi,\ q_2 = C_2 \cdot U_\phi \cdot e^{j\Delta},\ q_3 = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{-j\Delta} = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{j2\Delta}, \qquad (1.3)$$

www.nilem.ru

где $U_ф$ – класс напряжения ЛЭП, $\Delta = 120^0$ - фазовый сдвиг, j – мнимая единица, C_i – погонная емкость электрической системы провод-Земля.

Упрощенная постановка эквивалентной электростатической задачи в виде (1.3) вполне оправдана с точки зрения целей, оценки электромагнитной обстановки.

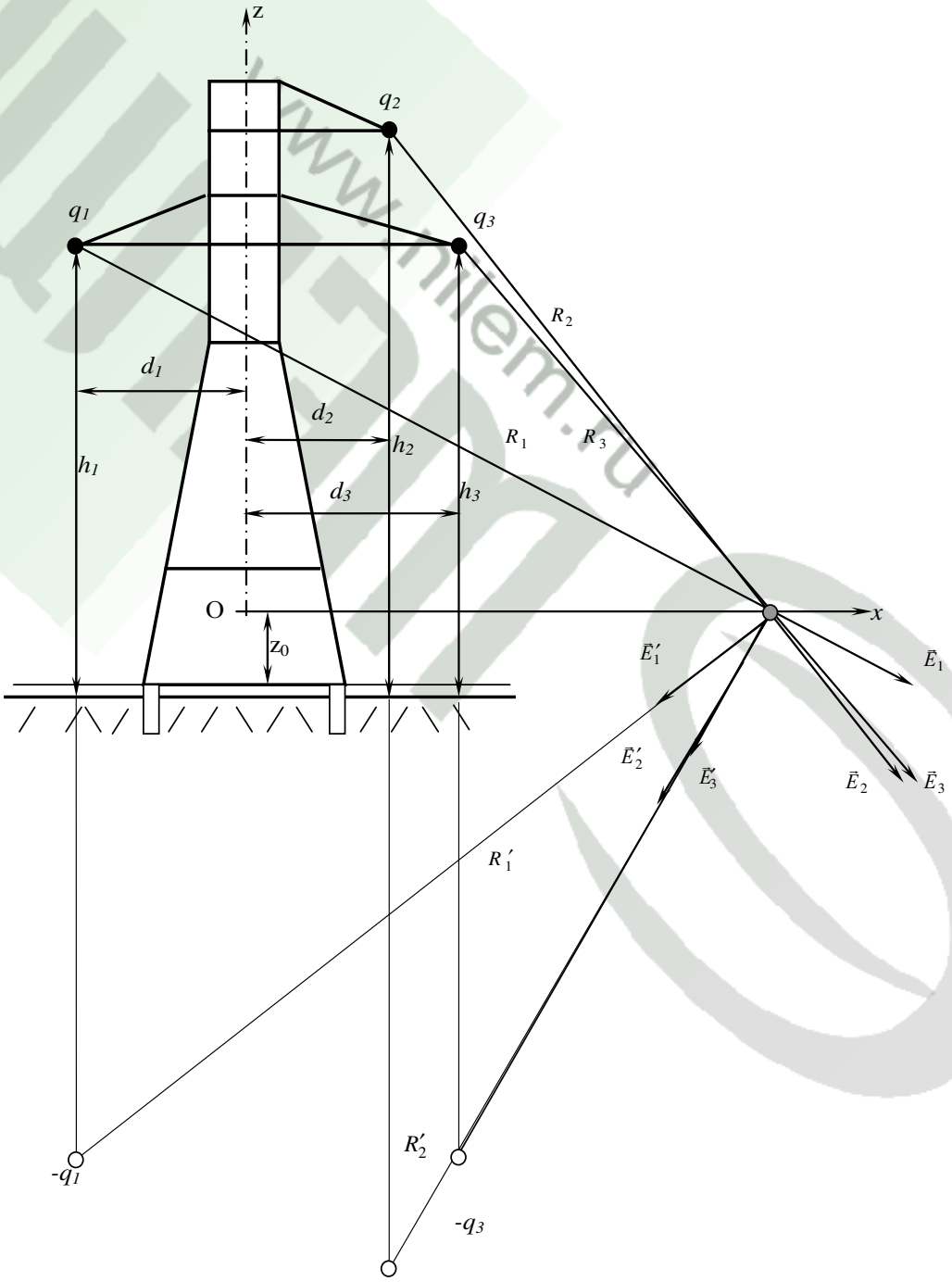


Рис.1.2. К расчету электрического поля многопроводной линии

www.nilem.ru

Геометрические параметры задачи и их обозначения очевидны из рис.1.2. Высота геометрического места точек, в которых проводится расчет, – z_0. Погонная емкость системы провод-Земля - C_i, для i–го провода ЛЭП определяется методом зеркального изображения. При этом вполне допустимо пренебречь влиянием соседних проводов и опор линии.

На рис.1.3 показан провод, ЛЭП, расположенный над поверхностью Земли и его зеркальное изображение. Система провод-зеркальное изображение образуют двухпроводную линию с расстоянием между проводами $2h_i$. Диаметр поперечного сечения проводов – $2a$.

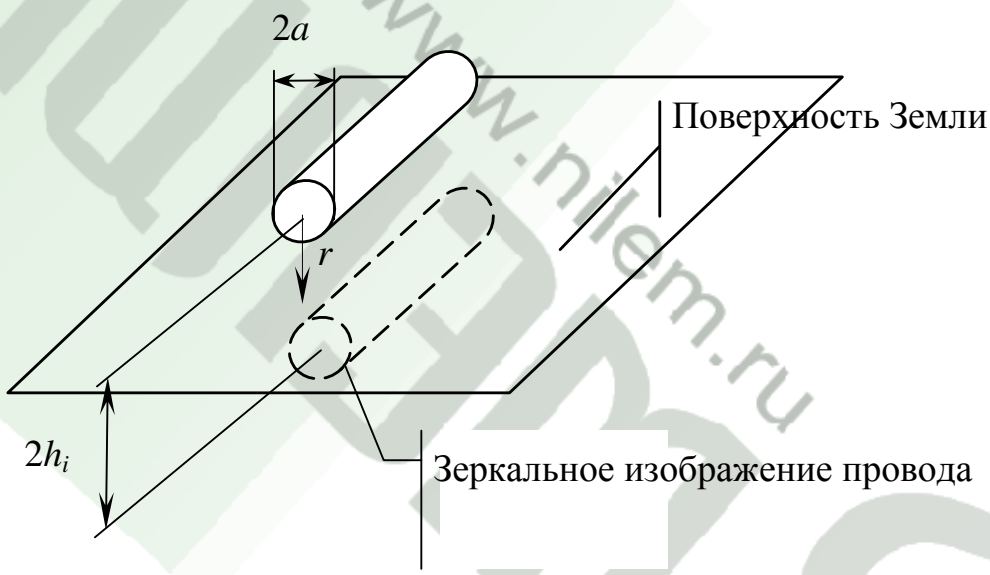


Рис.1.3. К определению погонной емкости провода ЛЭП

Для нахождения емкости C_i, вычислим разность потенциалов между i-ым проводом и его зеркальным изображением.

Напряженности поля, создаваемые между i-ым проводником единичной длины и его зеркальным изображением в точке, отстоящей на расстоянии r (см.рис.1.2) от i-го проводника соответственно равны [136]:

$$E_i'(r) = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0 r};\ E_i''(r) = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0(2h_i - r)}, \qquad (1.4)$$

где q_i^* – связанный с проводником эквивалентный погонный электрический заряд, $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная (учтено, что поле определяется в воздухе).

При записи (1.4) предполагалось, что электрическое поле создается цилиндрическим равномерно заряженным телом конечной длины.

Суммарное электрическое поле в точке с координатой r определяется алгебраическим суммированием (1.4) в результате чего приходим к выражению:

www.nilem.ru

$$E_i = E_i' + E_i'' = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2h_i - r}\right]. \qquad (1.5)$$

Разность потенциалов определится как интеграл, взятый от (1.5) по области, в которой определено электрическое поле:

$$U_i = -\int_{2h_i - a}^{a} E_i dr = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0}\int_{a}^{2h_i - a}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2h_i - r}\right]dr. \qquad (1.6)$$

Разбивая подынтегральное выражение в (1.6) на два слагаемых с последующей заменой во втором слагаемом переменной интегрирования, получим:

$$U_i = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0}\left[\int_{a}^{2h_i - a}\frac{dr}{r} - \int_{a}^{2h_i - a}\frac{d(2h_i - r)}{2h_i - r}\right] = \frac{q_i^*}{\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2h_i - a}{a}. \qquad (1.7)$$

С учетом (1.7) погонная емкость провода ЛЭП относительно Земли определяется следующим образом:

$$C_i = \frac{q_i^*}{U_i} = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\dfrac{2h_i - a}{a}}, \qquad (1.8)$$

или, принимая во внимание, что высоты подвеса проводов ЛЭП значительно больше их радиуса, то есть $h_i >> a$, можно окончательно определить:

$$C_i = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\dfrac{2h_i}{a}}. \qquad (1.9)$$

Данный результат может быть использован при определении зарядов, эквивалентных проводникам воздушной высоковольтной линии по формулам (1.3).

1.2.2. Вывод выражений для компонент векторов электрического и магнитного полей

Далее перейдем к определению электрического поля системы проводов протяженной ЛЭП.

Искомое электрическое поле определяется геометрическим суммированием полей, создаваемых каждым из проводников в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{N}\left(\vec{E}_i + \vec{E}_i'\right). \qquad (1.10)$$

Выражение, стоящее под знаком суммы в (1.10), определяет частичное электрическое поле, создаваемое i-ой системой проводзеркальное изображение; N – число проводов, соответствующее типу

www.nilem.ru

опоры ЛЭП (см. Приложение 3). Первичное поле i-го провода над поверхностью Земли определяется выражением:

$$E_i = \frac{q_i}{2\pi\varepsilon_0 R_i} = \frac{C_i \cdot U_\phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi\varepsilon_0 R_i}, \qquad (1.11)$$

где $R_i = \sqrt{(x-d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}$, z_0 – высота точки наблюдения.

Выражение (1.11) с учетом (1.9) принимает вид:

$$E_i = \frac{U_\phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\ln\frac{2h_i}{a}\sqrt{(x-d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}}. \qquad (1.12)$$

Аналогичным образом находится вторичное поле или поле зеркального изображения провода над поверхностью Земли:

$$E_i' = \frac{q_i}{2\pi\varepsilon_0 R_i'}, \qquad (1.13)$$

где $R_i' = \sqrt{(x-d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}$ (здесь и в дальнейшем в настоящем разделе штрихами будем обозначать величины, относящиеся к вторичным источникам поля).

С учетом (1.9) можно переписать (1.13) в виде:

$$E_i = \frac{U_\phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\ln\frac{2h_i}{a}\sqrt{(x-d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}}. \qquad (1.14)$$

Модуль вектора, стоящего под знаком суммы в (1.10), находится при помощи известной теоремы косинусов [104]:

$$\left|\vec{E}_i + \vec{E}_i'\right| = \sqrt{(E_i)^2 + (E_i')^2 + 2E_i' E_i \cos\psi}, \qquad (1.15)$$

где ψ – угол, образованный векторами $\vec{E}_i$ и $\vec{E}_i'$, косинус которого легко определяется из рис.1.2 следующим образом:

$$2\cos\psi = \frac{R_i}{R_i'} + \frac{R_i'}{R_i} - \frac{4h_i^2}{R_i R_i'}. \qquad (1.16)$$

С учетом принятых ранее обозначений, (1.15) может быть представлено в следующем виде:

$$\left|\vec{E}_i + \vec{E}_i'\right| = \frac{U_\phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\cdot\ln\frac{2h_i}{a}}\sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R_i')^2} + \frac{2}{R_i (R_i')}\cos\psi}. \qquad (1.17)$$

Геометрическое суммирование в (1.10) осуществляется, исходя из особенностей конфигурации и взаимного расположения проводов, соответствующих данному типу опоры ЛЭП.

www.nilem.ru

Расчёт напряжённости магнитного поля многопроводной линии следует начать с выбора условных положительных направлений токов в проводах. Так как токи в проводах и в их зеркальных изображениях в каждый момент времени направлены в противоположные стороны, то условные положительные направления токов удобно выбрать противонаправленными, а расчет напряжённости магнитного поля в этом случае ничем не отличается от соответствующего расчета при постоянном токе [136].

На практике удобно представлять поле, созданное сложной системой проводов, суперпозицией полей прямых отрезков проводов конечной длины. Следует отметить, что задача по нахождению напряжённости магнитного поля провода конечной длины не имеет чёткого физического смысла, так как в квазистационарном случае магнитные поля создаются токами проводимости, протекающими по замкнутым цепям. Поэтому искомый результат можно рассматривать как вклад, вносимый данным отрезком замкнутой цепи в общее магнитное поле. Геометрия задачи представлена на рис.1.4.

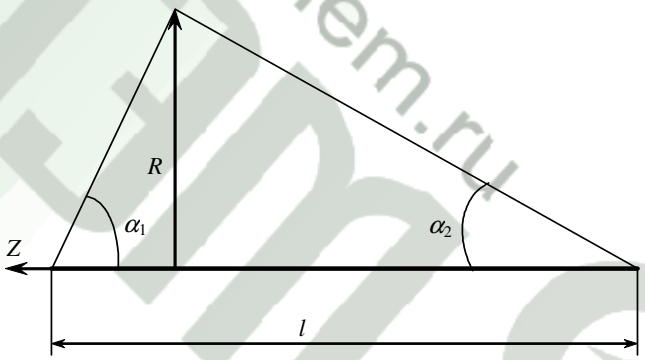


Рис.1.4. К вычислению магнитного поля прямого провода конечной длины

Напряжённость магнитного поля, создаваемого прямолинейным проводником длиной *l*, находится из известного интеграла закона Био-Савара-Лапласа и определяется выражением [136]:

$$H = \frac{I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)\,. \qquad (1.18)$$

Углы α_1 и α_2 выражаются через прямоугольные координаты R и Z следующим образом [104]:

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg}\frac{R}{Z}, \qquad \alpha_2 = \operatorname{arctg}\frac{R}{l-Z}. \qquad (1.19)$$

Задачи по нахождению магнитного поля системы проводов сложной конфигурации в общем случае не имеют осевой симметрии, и их решение удобнее проводить в декартовой системе координат. Геометрия такой задачи, применительно к типовой опоре ЛЭП показана на рис.1.5.

Результирующее магнитное поле находится геометрическим суммированием частичных полей, аналогично (1.10):

www.nilem.ru

$$\vec{H} = \sum_{i=1}^{N} \left(\vec{H}_i + \vec{H}'_i \right), \qquad (1.20)$$

где магнитное поле реального провода или его зеркального изображения находится по формуле (1.18) при подстановке вместо R, соответственно, R_i, или R'_i. Ток в i-ом проводе при подстановке в (1.18) находится следующим образом:

$$I_i = I \cdot e^{j(i-1)\Delta}. \qquad (1.21)$$

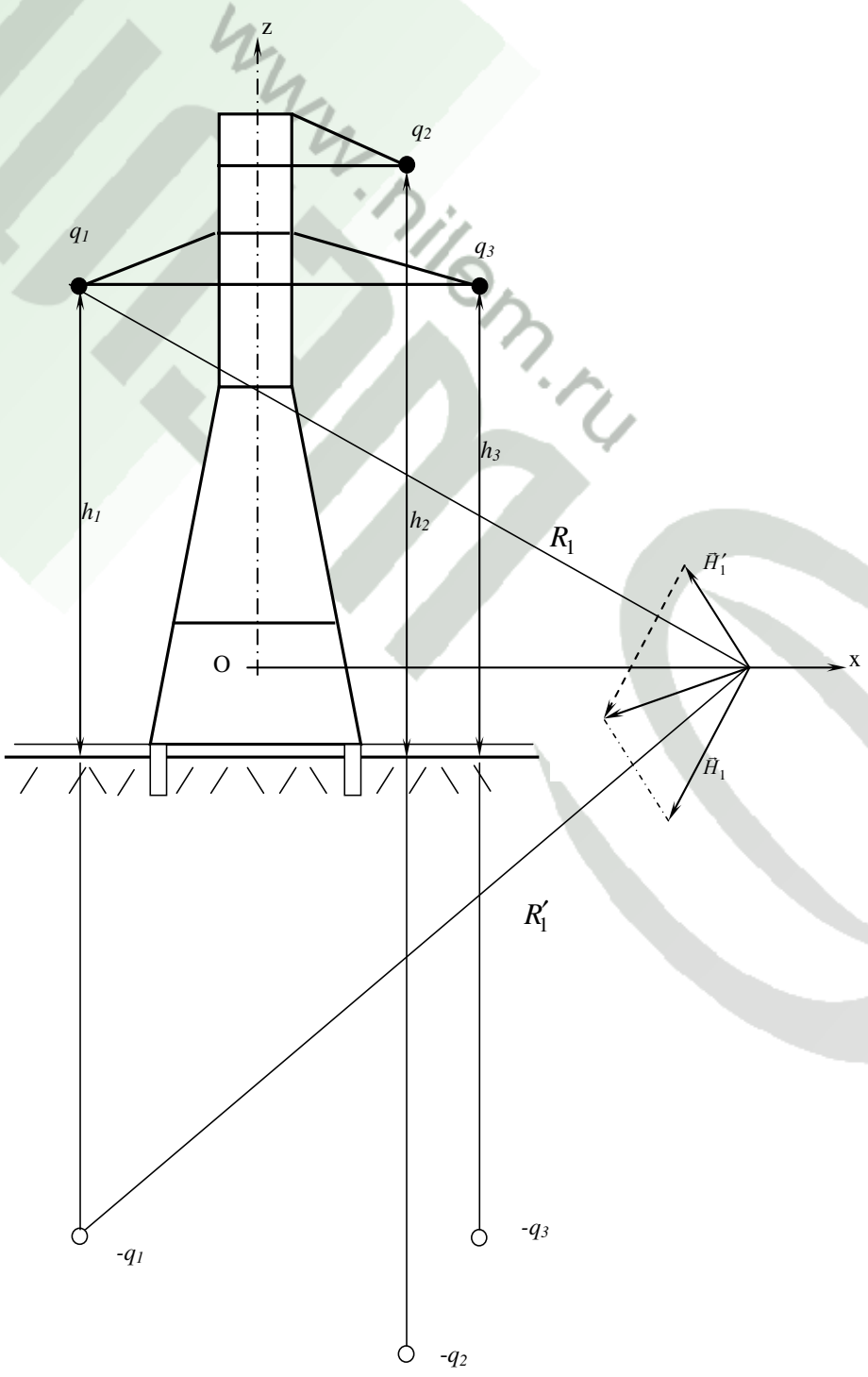


Рис.1.5. К определению напряжённости магнитного поля ЛЭП

www.nilem.ru

Выражение (1.21) записано в предположении о том, что ЛЭП нагружена сбалансировано, и ток в нулевом проводе равен нулю; амплитуда тока I может быть определена, например, по сезонному графику загрузки ЛЭП.

Напряженность магнитного поля, создаваемого проводом и его зеркальным изображением соответственно равны (аналогично (1.12) и (1.14)):

$$H_i = \frac{I \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi\sqrt{(x-d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}}\gamma, \qquad (1.22)$$

$$H'_i = \frac{I \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi\sqrt{(x-d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}}\gamma, \qquad (1.23)$$

где $\gamma = \frac{1}{2}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$ - коэффициент, учитывающий конечность длины проводника (см. (1.18)).

Модуль вектора, стоящего под знаком суммы в (1.20), аналогично (1.17) определяется выражением следующего вида:

$$\left|\vec{H}_i + \vec{H}'_i\right| = \frac{I \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R'_i)^2} + \frac{2}{R_i \cdot (R'_i)}\cos\psi}, \qquad (1.24)$$

Геометрическое суммирование в (1.20), так же как и в (1.10), осуществляется, исходя из особенностей конфигурации и взаимного расположения проводов, соответствующих типу конкретной опоры ЛЭП.

1.2.3. Учет разветвленного характера воздушных линий

На протяжении всего пути следования ЛЭП неоднократно претерпевают повороты и изменение геодезического уровня. Учет данных обстоятельств необходим при представлении электромагнитной обстановки в единой системе координат, например, на карте местности.

При решении задач рассматриваемого типа приходится осуществлять переход от одной декартовой системы координат к другой путём поворота осей на определённые углы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом возникает необходимость нахождения компонент вектора напряженности поля в одном из базисов по его компонентам в другом базисе.

Положение нового базиса относительно старого должно быть задано, а именно, должны быть заданы компоненты новых базисных (единичных) векторов $\vec{x}_0^2, \vec{y}_0^2, \vec{z}_0^2$ в старом базисе $\vec{x}_0^1, \vec{y}_0^1, \vec{z}_0^1$ [14]. Процедура изменения базиса при повороте ЛЭП проиллюстрирована на рис.1.6.

Пусть конечные базисные векторы выражаются через начальные следующим образом:

www.nilem.ru

$$\vec{x}_0^2 = a_{11}\vec{x}_0^1 + a_{12}\vec{y}_0^1 + a_{13}\vec{z}_0^1 \ ,$$
$$\vec{y}_0^2 = a_{21}\vec{x}_0^1 + a_{22}\vec{y}_0^1 + a_{23}\vec{z}_0^1 \ , \qquad (1.25)$$
$$\vec{z}_0^2 = a_{31}\vec{x}_0^1 + a_{32}\vec{y}_0^1 + a_{33}\vec{z}_0^1 \ .$$

Произвольный вектор $\vec{H}$ разложим по базису $\vec{x}_0^2, \vec{y}_0^2, \vec{z}_0^2$:

$$\vec{H} = H_X^2\vec{x}_0^2 + H_Y^2\vec{y}_0^2 + H_Z^2\vec{z}_0^2 \ . \qquad (1.26)$$

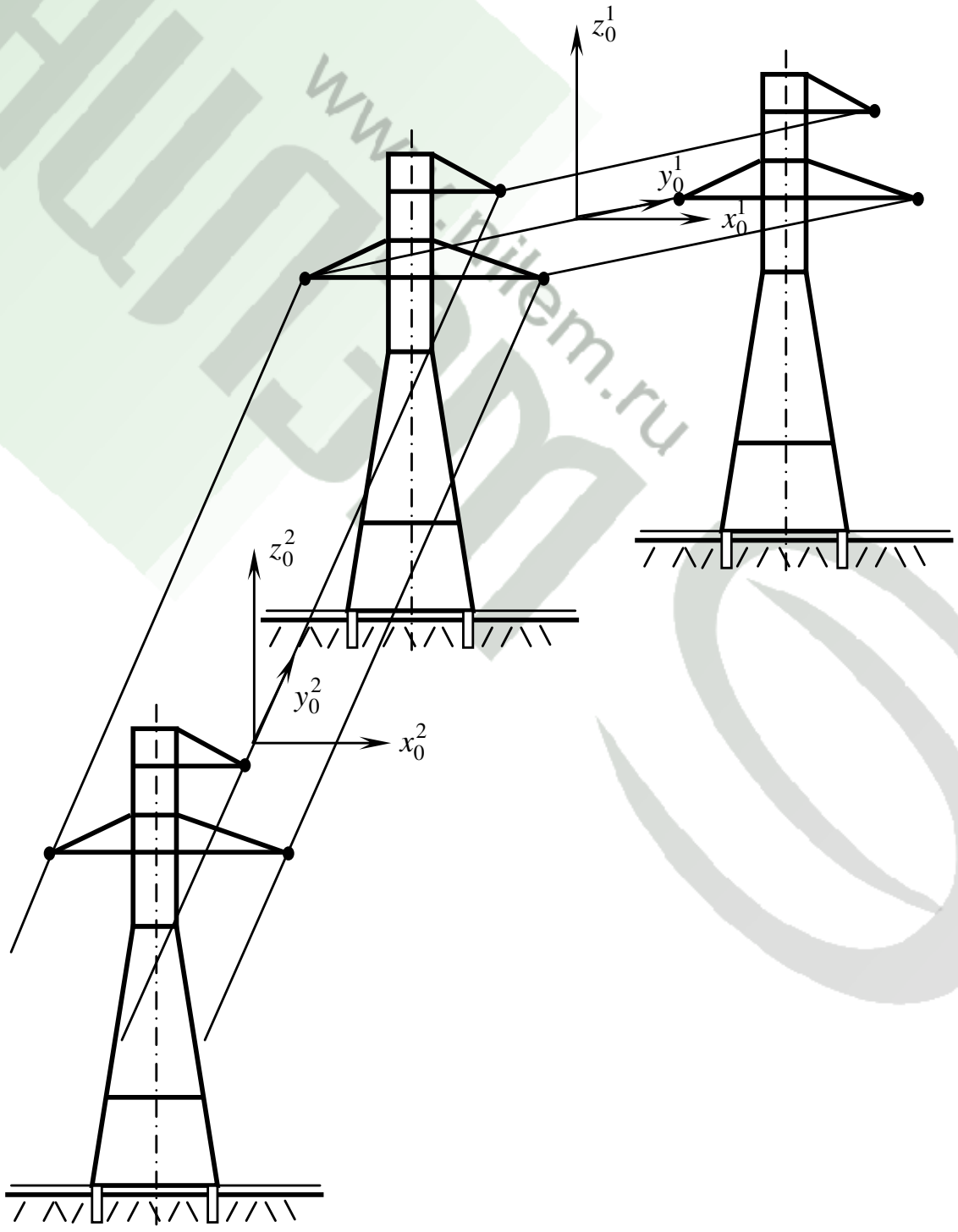


Рис.1.6. Преобразование базиса при поворотах ЛЭП

www.nilem.ru

Подставляя в (1.26) выражения (1.25), получим следующие соотношения:

$$\vec{H} = (a_{11}H_X^2 + a_{21}H_Y^2 + a_{31}H_Z^2)\vec{x}_0^1 + (a_{12}H_X^2 + a_{22}H_Y^2 + a_{32}H_Z^2)\vec{y}_0^1 + \\ + (a_{13}H_X^2 + a_{23}H_Y^2 + a_{33}H_Z^2)\vec{z}_0^1 . \quad (1.27)$$

Вследствие единственности разложения по базису [14], коэффициенты при векторах $\vec{x}_0^1, \vec{y}_0^1, \vec{z}_0^1$ равны компонентам вектора $\vec{H}$ в старом базисе:

$$\begin{aligned} H_X^1 &= a_{11}H_X^2 + a_{21}H_Y^2 + a_{31}H_Z^2 , \\ H_Y^1 &= a_{12}H_X^2 + a_{22}H_Y^2 + a_{32}H_Z^2 , \\ H_Z^1 &= a_{13}H_X^2 + a_{23}H_Y^2 + a_{33}H_Z^2 . \end{aligned} \quad (1.28)$$

Для нахождения выражений новых компонент вектора через старые необходимо решить систему уравнений (1.28) относительно неизвестных (H_X^2, H_Y^2, H_Z^2).

Сравним системы (1.28) и (1.25). Каждая из них представляет собой систему из трёх уравнений, коэффициенты которых могут быть записаны в следующие матрицы третьего порядка:

$$\|S\| = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{Vmatrix}, \quad \|S^T\| = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{Vmatrix}. \quad (1.29)$$

Строки матрицы $\|S^T\|$, состоящие из коэффициентов уравнений (1.25), являются столбцами матрицы $\|S\|$, составленной из коэффициентов уравнений (1.28), то есть одна матрица получается из другой транспонированием.

Таким образом, при переходе от одной системы координат к другой матрицей перехода является матрица, в столбцах которой стоят компоненты разложения новых базисных векторов по старому базису. Аналогичный результат можно получить и в случае использования криволинейных координат (цилиндрических, сферических и т.п.).

Для решения системы уравнений (1.28) относительно компонент вектора в новом базисе H_X^2, H_Y^2, H_Z^2, например, методом Крамера [119], необходимо найти главный определитель системы (1.28):

$$\Delta = \det\|S^T\| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad (1.30)$$

а так же вспомогательные определители:

www.nilem.ru

$$\Delta_X = \begin{vmatrix} H_X^1 & a_{21} & a_{31} \\ H_Y^1 & a_{22} & a_{32} \\ H_Z^1 & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}, \ \Delta_Y = \begin{vmatrix} a_{11} & H_X^1 & a_{31} \\ a_{12} & H_Y^1 & a_{32} \\ a_{13} & H_Z^1 & a_{33} \end{vmatrix}, \ \Delta_Z = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & H_X^1 \\ a_{12} & a_{22} & H_Y^1 \\ a_{13} & a_{23} & H_Z^1 \end{vmatrix}. \quad (1.31)$$

Компоненты вектора $\vec{H}$ определяются в новом базисе как:

$$H_X^2 = \Delta_X/\Delta, \quad H_Y^2 = \Delta_Y/\Delta, \quad H_Z^2 = \Delta_Z/\Delta. \quad (1.32)$$

Очевидно, что при поворотах коридора прохождения ЛЭП в горизонтальной плоскости матрица $\|S\|$ будет иметь нулевые третью строку и третий столбец, а при изменении геодезического уровня нулями заполняются первая строка и первый столбец. Ненулевые коэффициенты в обоих случаях представляют собой тригонометрические функции угла поворота направляющего вектора ЛЭП (в нашем случае $\vec{y}_0$).

1.2.4. Расчет уровней ЭМП высоковольтных ЛЭП

Рассмотрим пример расчета электрического и магнитного полей воздушной ЛЭП, расположенной на типовой опоре (см. Приложение 3.)

При расчетах предполагается, что ЛЭП расположена на опоре типа У-35-1, изображенной на рис.П3.1. Геометрические параметры опоры выберем следующими:

$h_1 = h_3 = 10$ м, $h_2 = 13$ м, $d_1 = d_2 = 2.8$ м, $d_3 = 3.5$ м.

Высота точек наблюдения над поверхностью Земли $z_0 = 0, 1, 2, 4, 6$ м.

Геометрия векторов электрического поля, соответствующих данному взаимному расположению проводов, показана на рис.1.7. Задача вычисления вектора суммарного поля сводится к определению косинусов углов α и β, образованных векторами $\vec{E}_{1\Sigma}$, $\vec{E}_{2\Sigma}$ и $\vec{E}_{3\Sigma}$. Сами векторы находятся при помощи методики, изложенной в подразделе 1.2.2.

При вычислении этих углов необходимо выбрать способ, наиболее удобный с точки зрения алгоритмизации и автоматизации на ЭВМ. Для этой цели определим сначала углы γ_1, γ_2 и γ_3, которые образуют соответственно векторы $\vec{E}_{1\Sigma}$, $\vec{E}_{2\Sigma}$ и $\vec{E}_{3\Sigma}$ с осью x.

Нетрудно видеть, что $\alpha = \gamma_2 - \gamma_1$, $\beta = \gamma_1 - \gamma_3$. При этом знаки углов роли не играют, вследствие четности функции косинуса [104].

Сами углы γ_i определяются следующим образом:

$$\gamma_i = \gamma_i' + \gamma_i'', \quad (1.33)$$

где $2\cos\gamma_i' = \dfrac{E_{i\Sigma}}{E_i} + \dfrac{E_i}{E_{i\Sigma}} - \dfrac{(E_i')^2}{E_{i\Sigma}E_i}$, $tg\,\gamma_i'' = \dfrac{h_i - z_0}{x - d_i}$.

www.nilem.ru

Найденные углы позволяют, используя теорему косинусов, вычислить суммарный вектор поля, также как это было сделано в (1.17) и (1.24).

Аналогичным образом поступим и при вычислении магнитного поля. Токовую нагрузку ЛЭП при вычислении магнитного поля определим из сезонного графика работы линии. Типичный вид такого графика для городской ЛЭП-35 кВ приведен на рис.1.8 [6].

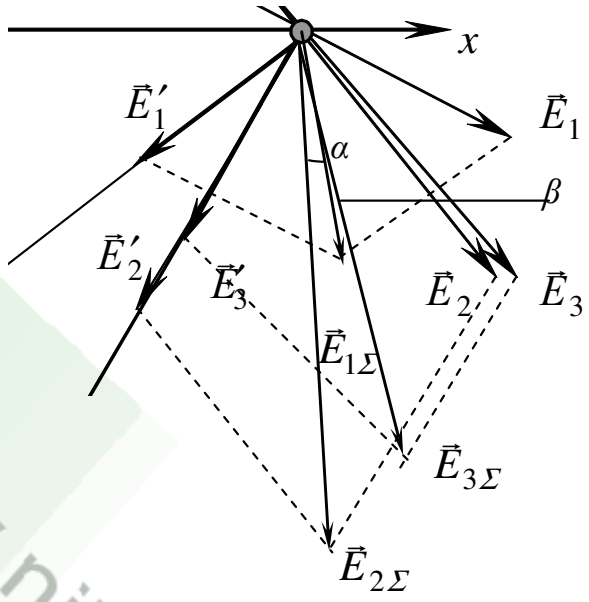


Рис.1.7. Геометрия векторов электрического поля опоры У-35-1

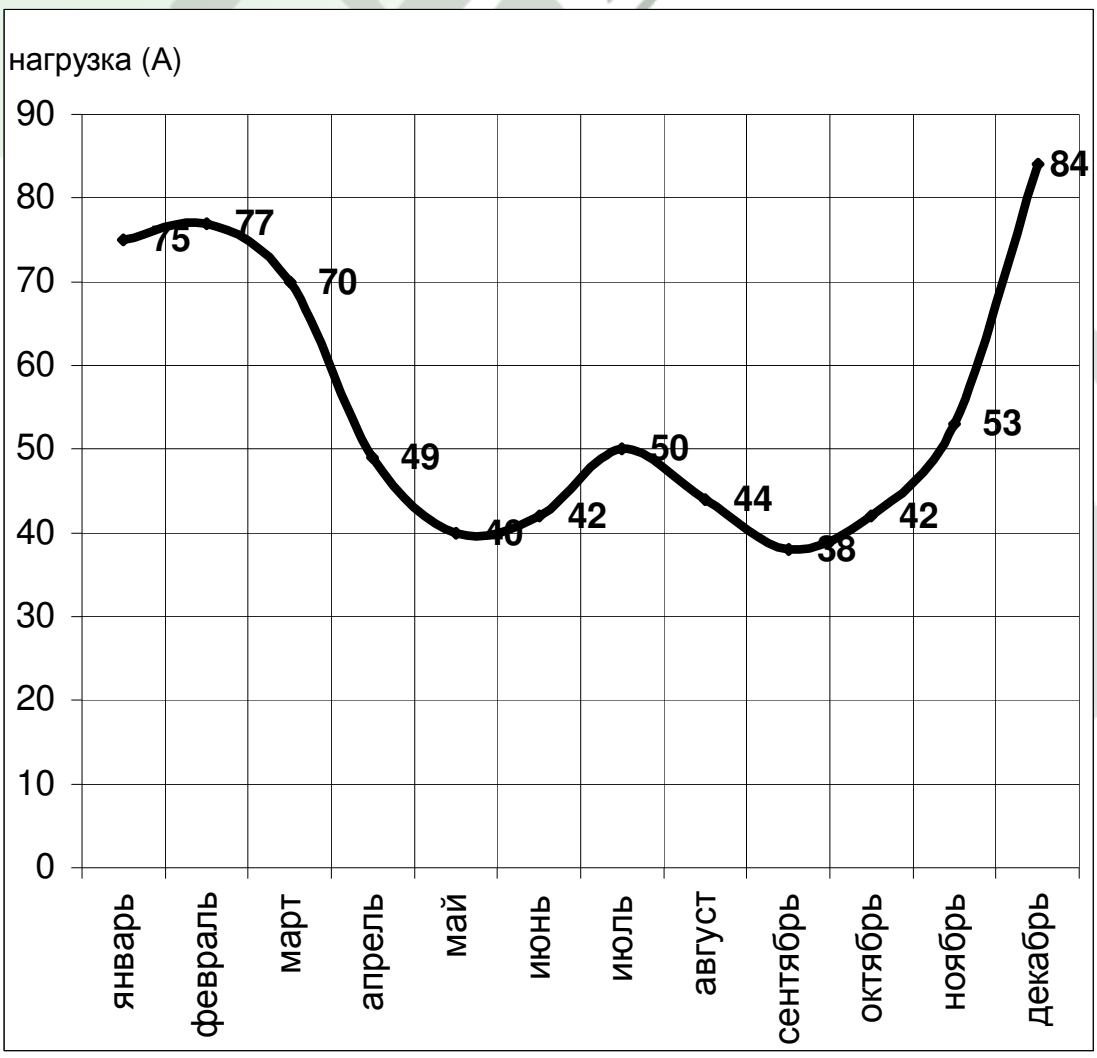


Рис.1.8. Типичный график загрузки ЛЭП 35 кВ

www.nilem.ru

Из графика, приведенного на рис.1.8 видно, что максимальная загрузка линии имеет место в декабре и равна в среднем 84 А.

На рис.1.9 приведены результаты расчета электрического поля ЛЭП 35 кВ, размещенной на опоре У-35-1. Расчет проведен в направлении? перпендикулярном коридору прохождения ЛЭП.

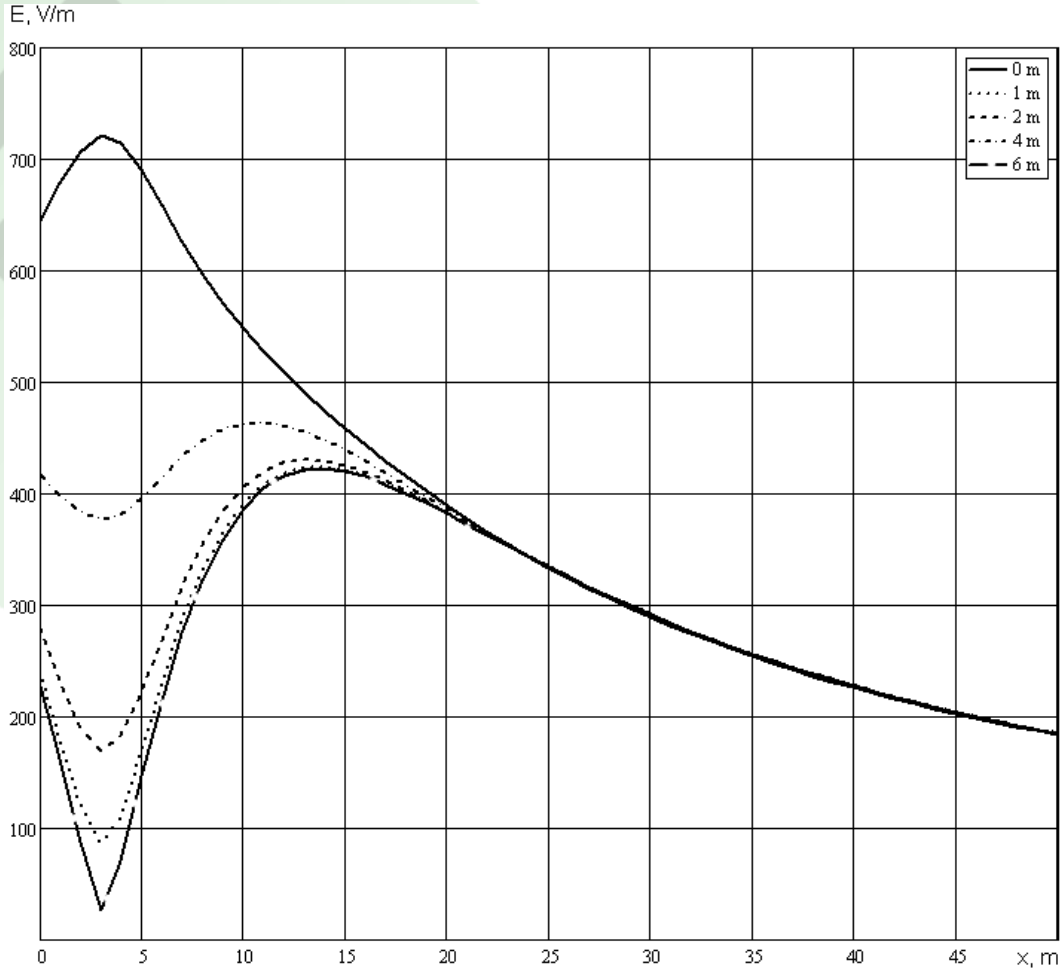


Рис.1.9. Результат расчета электрического поля ЛЭП 35 кВ

Из приведенных на рис.1.9 результатов видно, что закон изменения поля изменяется с высотой множества точек наблюдения. Данное обстоятельство обусловлено несимметричным расположением проводов ЛЭП. Максимальному уровню электрического поля на высоте 2 м соответствует величина 420 В/м.

Аналогичные результаты, построенные для ЛЭП 220 кВ, размещенной на опоре У-220-1 (рис.П.3.3), приведены на рис. 1.10.

Отличный от рис.1.9 вид дистанционной зависимости электрического поля обусловлен иным расположением проводов линии на опоре. Как видно из рис.1.10, максимальные уровни поля значительно превышают ПДУ, предусмотренные СанПиН, в отличие от предыдущего случая.

На рис.1.11 приведены результаты расчета магнитного поля ЛЭП 35 кВ (опора У-35-1), полученные для условий аналогичных тем, при которых рассчитывалось электрическое поле. Токовая нагрузка ЛЭП предполагалась

www.nilem.ru

равной 84 А (максимальная в течении сезона, согласно графику, приведенному на рис.1.8).

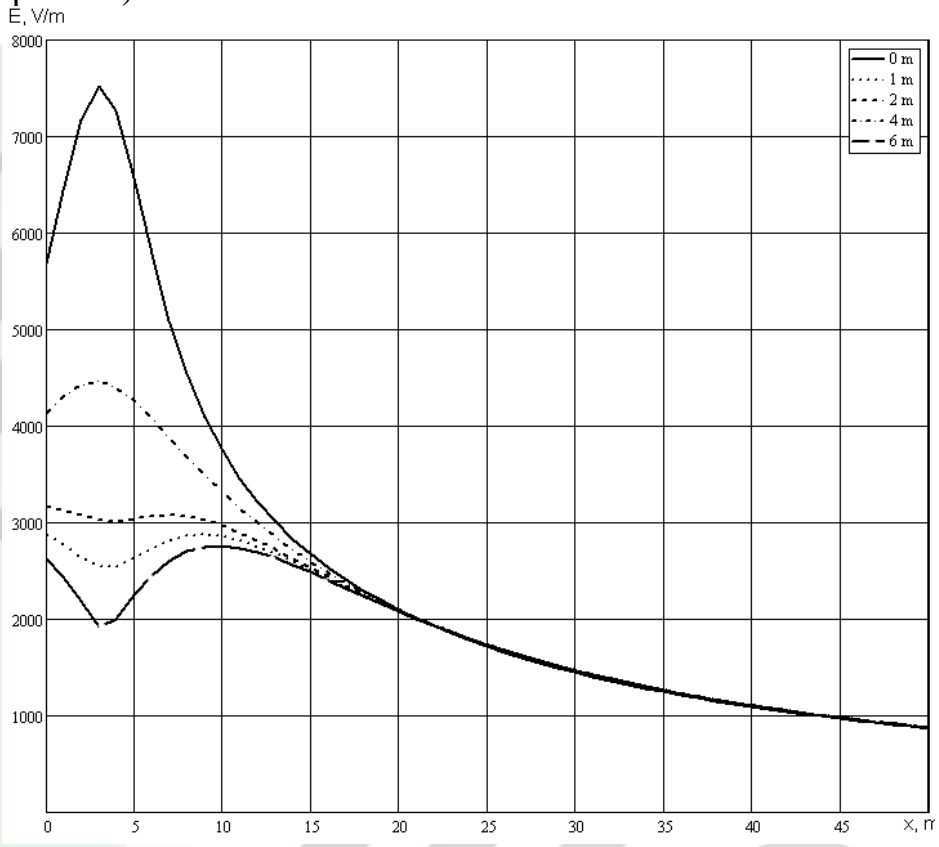


Рис.1.10. Результат расчета электрического поля ЛЭП 220 кВ

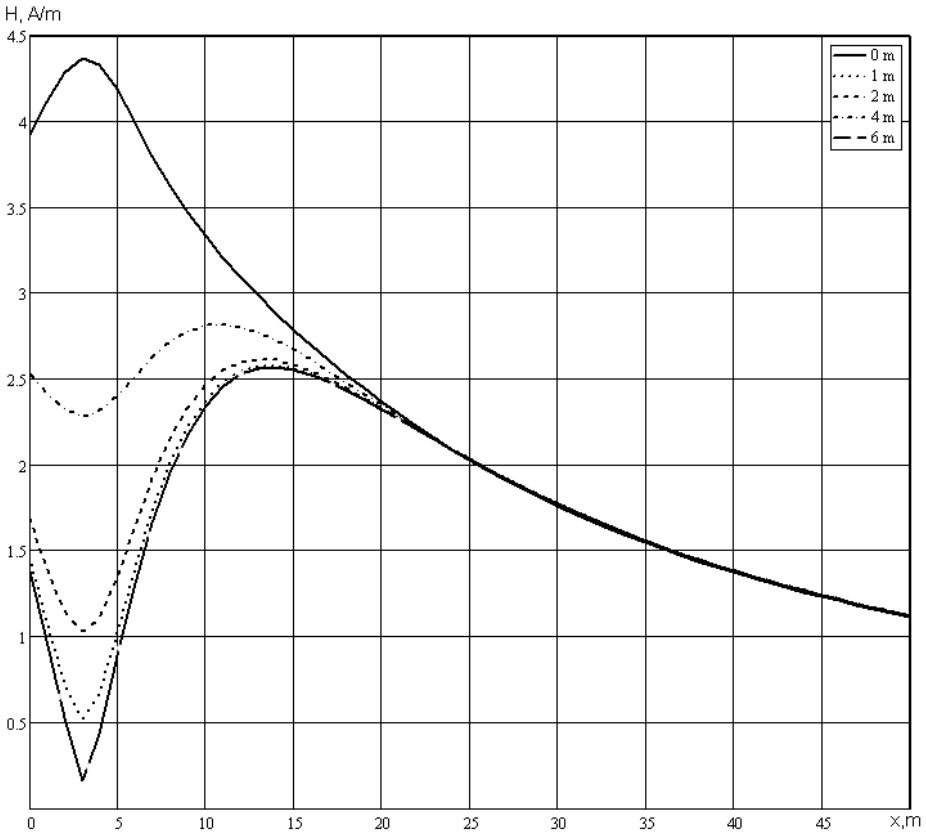


Рис.1.11. Результат расчета магнитного поля ЛЭП 35 кВ

www.nilem.ru

Слияние кривых изменения поля, построенных для различных высот над поверхностью Земли, в одну линию на значительном удалении от ЛЭП на рис. 1.9 – 1.11 обусловлено преобладанием линейного размера x по сравнению с размером z в треугольнике расстояний (см. рис.1.4). Это, в свою очередь, приводит к тому, что величина $2\cos\psi$ оказывается чрезвычайно малой и не оказывает существенного влияния на вид зависимости поля от расстояния, начиная с некоторых значений x.

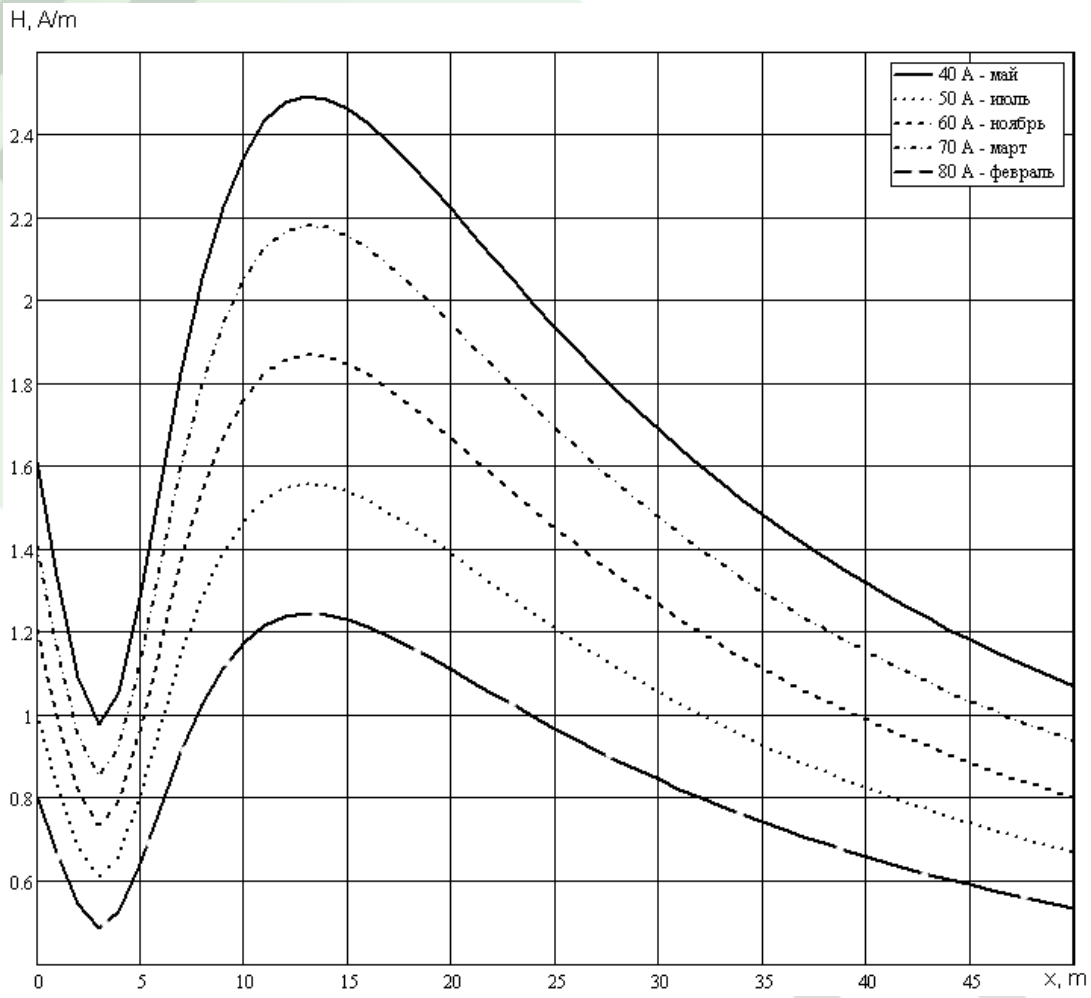


Рис.1.12. Динамика сезонного изменения магнитного поля ЛЭП 35 кВ

На рис.1.12 показана динамика сезонного изменения магнитного поля ЛЭП 35 кВ. Расчеты проведены для условий, аналогичных предыдущим случаям (высота точек наблюдения 2 м). Величины токовых нагрузок, соответствующих месяцам года, приведены на рис.1.8.

В ряде случаев при оценке воздействия на окружающую среду необходим анализ поля на отрицательных высотных отметках, то есть в толще почвы [62].

На рис..1.13 – 1.14 показаны расчетные распределения электрического и магнитного полей ЛЭП-35 кВ в толще почвы при загрузке, соответствующей режимам, отображенным на рис.1.8. При расчетах предполагается, что ЛЭП также, как и в предыдущих случаях, расположена на типовой опоре, У-35-1. Нулевая отметка соответствует поверхности Земли. Приведенные

www.nilem.ru

результаты представляют интерес, например, при оценке влияния полей ЛЭП на микрофлору почвы в коридоре прохождения. Подобные исследования проводились авторами и опубликованы в [62].

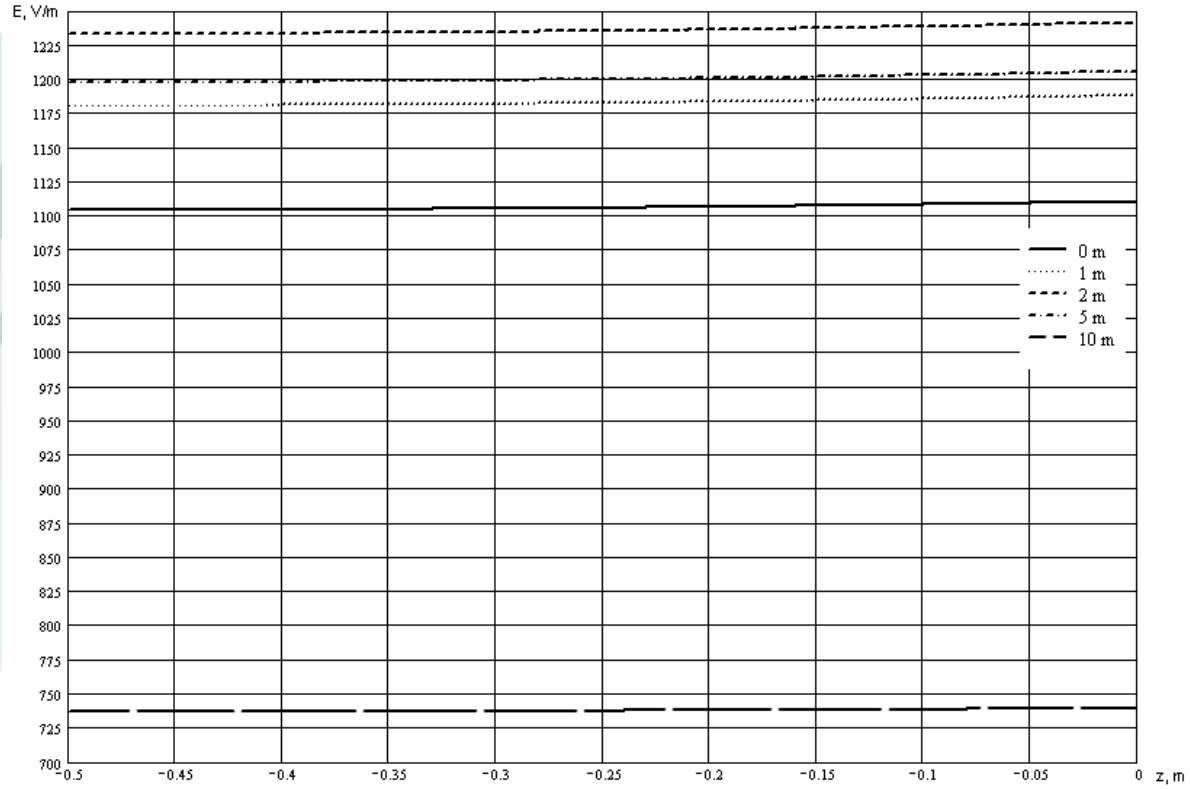


Рис.1.13. Распределение *E* по глубине на различных расстояниях от оси ЛЭП

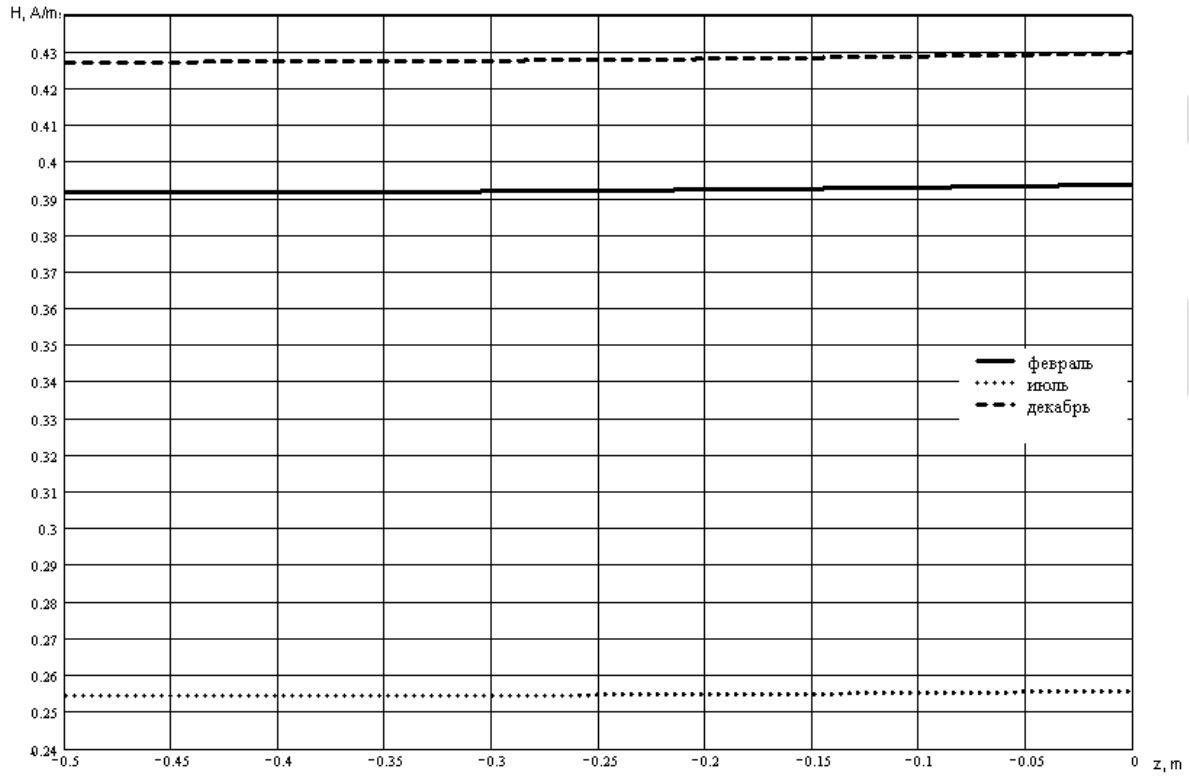


Рис.1.14. Распределение *H* по глубине при различных режимах работы ЛЭП

www.nilem.ru

1.2.5. Расчет высокочастотных полей высоковольтных линий

Известно, что воздушные высоковольтные линии электропередач являются источниками не только ЭМП промышленной частоты, но и в ряде случаев источниками высокочастотного излучения [149]. Очевидно, что при оценке электромагнитной обстановки в масштабах городов и регионов данное обстоятельство должно быть непременно учтено.

Основным источником высокочастотного излучения ЛЭП является электрическая корона [108], возникающая на токонесущих проводниках вследствие резко выраженной неоднородности электрического поля вблизи последних. Часто при коронном разряде проводники окружены характерным свечением, также получившим название короны или коронирующего слоя [152].

При коронном разряде происходит ионизация воздуха, и у поверхности токонесущего проводника образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения в данный момент времени [92]. Под действием электрических сил ионы, составляющие объемный заряд, движутся от провода. Для их передвижения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше. При переменном возбуждении коронный разряд зажигается при достижении начального напряжения, равного напряжению зажигания короны при определенном времени [92]. Вокруг провода образуется зона ионизации, называемая чехлом короны. Из чехла короны положительные заряды выносятся в окружающее пространство и образуют внешний объемный заряд.

Отличительной особенностью коронного разряда [98], определяющей его количественные закономерности, является характерная форма взаимодействия ионов, создаваемых в процессе разряда, и электрического поля у коронирующего провода ЛЭП. Знак заряда ионов, движущихся из зоны ионизации во внешнюю зону, совпадает со знаком заряда на коронирующем проводе, что обычно ведёт к ослаблению поля у провода до некоторой, практически постоянной величины - критической напряжённости поля, и к соответствующему усилению поля в остальной части пространства (внешней зоне). Эта особенность механизма образования короны обусловливает существенную зависимость от напряжения на проводе как тока коронного разряда, так и потерь на коронирование [92]. В коронном разряде электрическая энергия преобразуется главным образом в тепловую – в соударениях ионы отдают энергию своего движения нейтральным молекулам газа [117]. В доступной литературе приводится значительное количество результатов исследо-

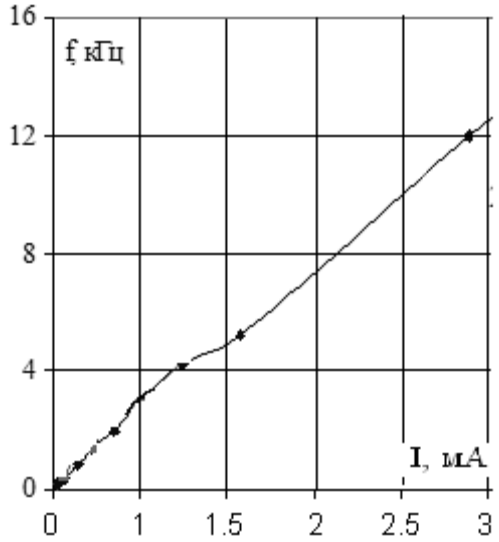


Рис.1.15. Эмпирическая частотная зависимость тока коронного разряда

www.nilem.ru

вания коронных разрядов, так, например, в [98] приведена частотная характеристика коронного разряда (см. рис.1.15).

Строгий анализ процессов, происходящих в коронном разряде, весьма сложен, и для него, как правило, используют различные подходы, основанные на тех или иных эмпирических данных [98].

Так, поскольку между каждым проводом ЛЭП и землей имеет место емкость C_i (см. формулу (1.9)), которая заряжается и разряжается с частотой переменного тока, между проводом и землей протекает электрический ток смещения i_c.

$$i_c = C_i \frac{dU}{dt}. \qquad (1.34)$$

Возникновение коронного разряда приводит к появлению тока короны $i_к$ который накладывается на емкостный ток линии и искажает его синусоидальную форму [146].

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное, чем при постоянном напряжении, и при прочих равных условиях затраты энергии существенно больше [146]. На характеристики коронного разряда значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки резко снижают начальное напряжение возникновения короны.

Распространенной формулой для расчета потерь на корону на переменном напряжении является эмпирическая формула Пика для одиночного провода [108]:

$$P = \frac{24.1}{\delta}(f + 25)\sqrt{\frac{r_0}{S}}(U_\phi - U_k)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км}, \qquad (1.35)$$

где δ - относительная плотность воздуха; f - частота, Гц; r_0 - радиус одиночного провода, см; S - расстояние между проводами, см; U_ϕ - действующее значение фазного напряжения, кВ; U_K - напряжение возникновения короны, кВ. Напряжение возникновения короны определяется выражением:

$$U_к = 21{,}2 \cdot \delta \cdot \ln\frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \text{ кВ}, \qquad (1.36)$$

где m_1 - коэффициент гладкости провода (для идеально гладкого провода m_1 = 1, для реального витого провода m_1 = 0.85-0.92, согласно эмпирическим данным, приведенным в [108]); m_2 - коэффициент погоды.

Используя формулу (1.35) нетрудно получить выражение для напряженности электрического поля короны в стационарном режиме:

$$E = \frac{1}{2\pi R l \sigma_a}\sqrt{\frac{P}{R_0}}, \qquad (1.37)$$

где σ_a - электропроводность атмосферы при данных погодных условиях,

www.nilem.ru

R_0 - электрическое сопротивление цилиндра, коаксиального проводнику, длиной l, радиуса R. Геометрия задачи, решаемой при помощи (1.37), показана на рис.1.16.

При расчетах, как правило, рассматривают несколько характерных случаев [108]: хорошая погода - ($m_2 = 1$), дождь, включая мокрый снег и изморось - ($m_2 = 2$), сухой снег - ($m_2 = 3$), изморозь, иней и наледь на проводах - ($m_2 = 4$).

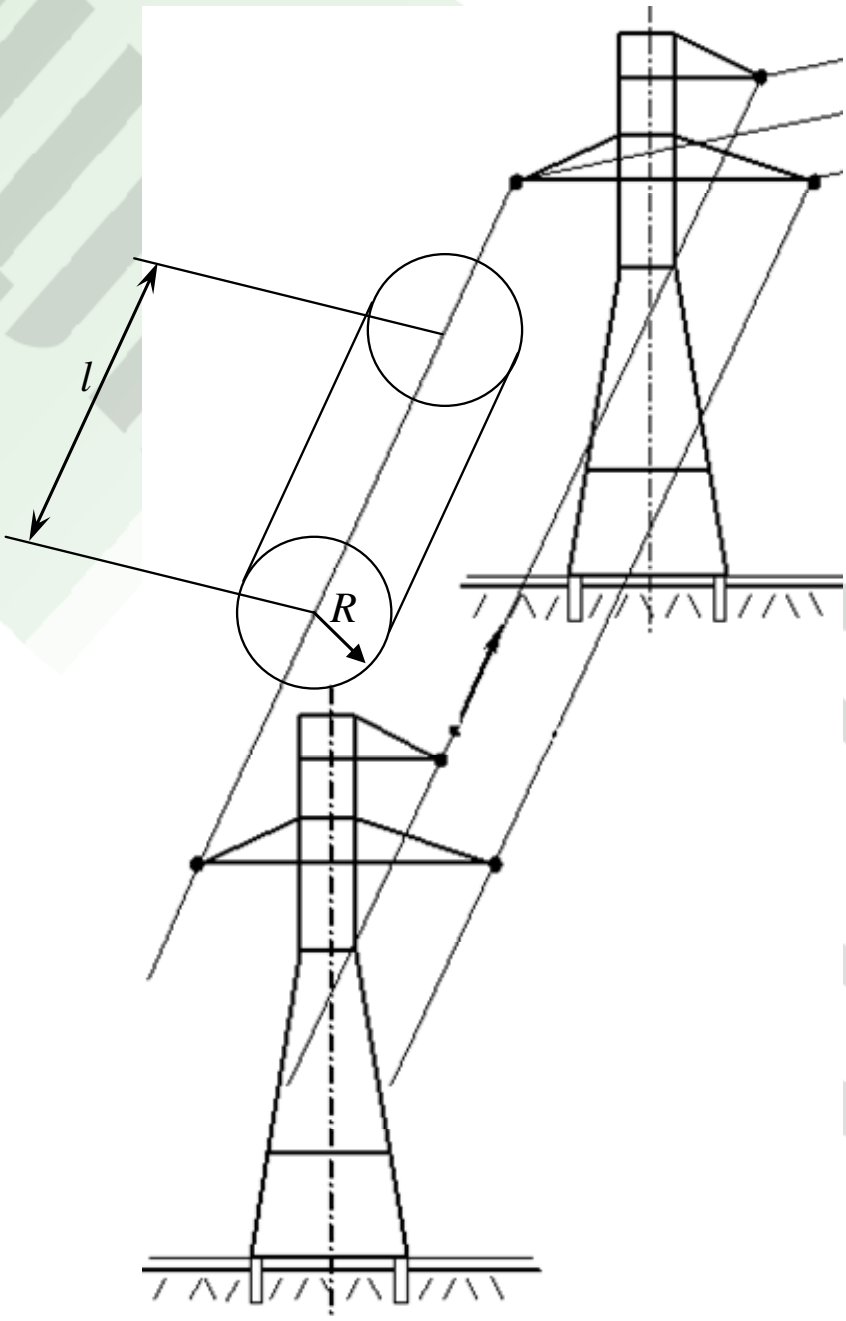


Рис.1.16. К расчету поля короны ЛЭП

На рис.1.17 представлены результаты расчета напряженности электрического поля коронного разряда вдоль оси коронирующего проводника ЛЭП 35кВ для названных характерных погодных условий.

www.nilem.ru

Из приведенных результатов видно, что погодные условия весьма существенно определяют уровни помехового излучения ЛЭП, причем различия максимальных уровней могут достигать целого порядка. Наибольшую интенсивность имеет поле короны при наличии наледи на проводах.

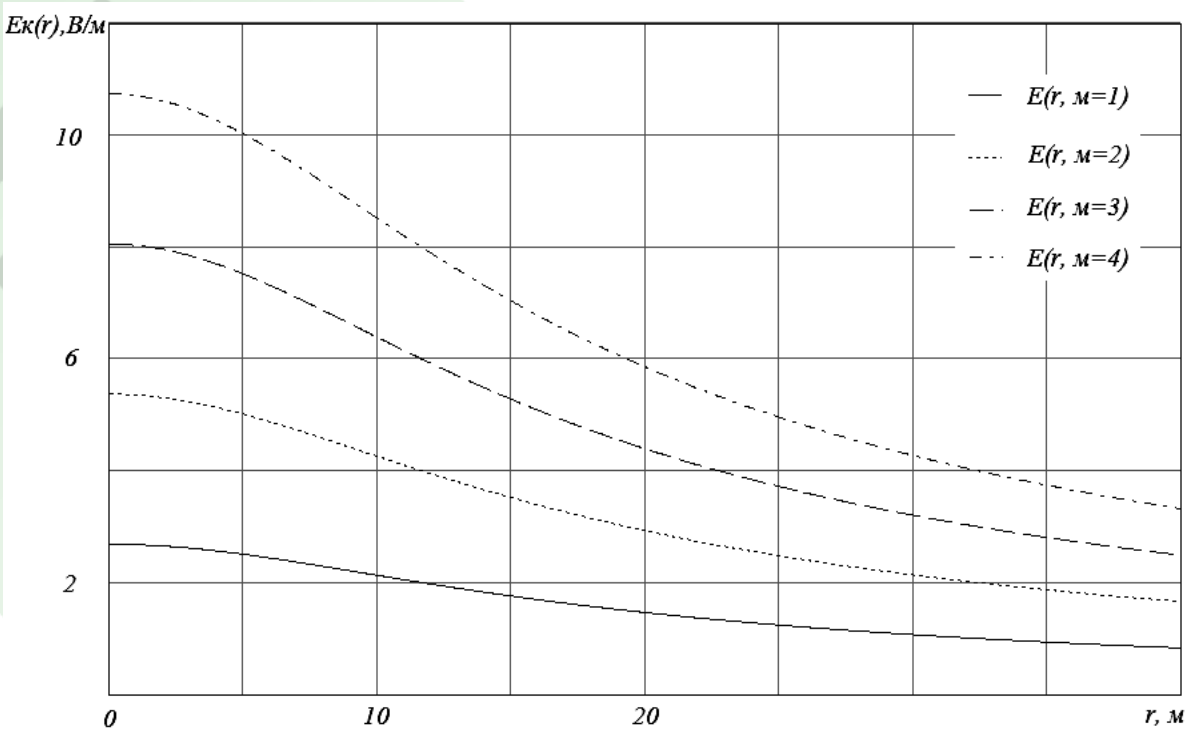


Рис.1.17. Распределение напряженности электрического поля коронного разряда токонесущего проводника ЛЭП 35 кВ для различных погодных условий

Рассмотренный выше подход может с успехом использоваться для оценочных расчетов уровней помехового излучения токонесущих проводников ЛЭП, однако более точные результаты дают методы, основанные на использовании реальной вольтамперной характеристики короны, определенной для конкретных условий [92].

Хорошо известно [92], что вольтамперная характеристика коронного разряда имеет нелинейный характер, зависящий от состояния атмосферы и геометрии электрического поля.

Большинство авторов публикаций [92, 98, 152], посвященных данному вопросу, применяют линейные аналитические выражения функционально связанных величин, определяемых физической природой коронного разряда. Так, например, в работе [98] представлено уравнение редуцированной характеристики коронного разряда в виде:

$$\frac{I}{U} = C\left(U - U_0\right), \qquad (1.38)$$

где U_0 – критическое напряжение зажигания короны, а $\frac{I}{U}$ - электропроводность атмосферы, являющаяся функцией напряжения или тока.

www.nilem.ru

Как утверждается в [92], функциональная зависимость электропроводности атмосферы от напряжения имеет ярко выраженный нелинейный характер, что обусловлено тем обстоятельством, что при увеличении напряжения, величина тока короны увеличивается экспоненциально, при этом зависимость электропроводности от тока оказывается значительно более линейной.

Для условий развития коронного разряда закон Ома можно представить в виде [92]:

$$I = \sigma_0 U e^{KU}, \tag{1.39}$$

где σ_0 - электропроводность атмосферы до возникновения короны, K - коэффициент, отражающий закономерность развития ионизационных процессов в чехле короны при данной геометрии первичного электрического поля.

Величина тока, определяемая выражением (6) может пониматься как интеграл [138] вида:

$$I = \int_S \sigma E dS, \tag{1.40}$$

где S - боковая поверхность цилиндра, показанного на рис.1.16.

При введении ряда допущений об азимутальном по отношению к проводнику распределению электрического поля короны выражение (1.40) может быть заменено алгебраическим, например, следующего вида:

$$I = 2\pi\left(\frac{I}{U}\right)E \cdot R \cdot l. \tag{1.41}$$

На рис.1.18 показано распределение электрического поля короны, рассчитанного по рассмотренной выше методике.

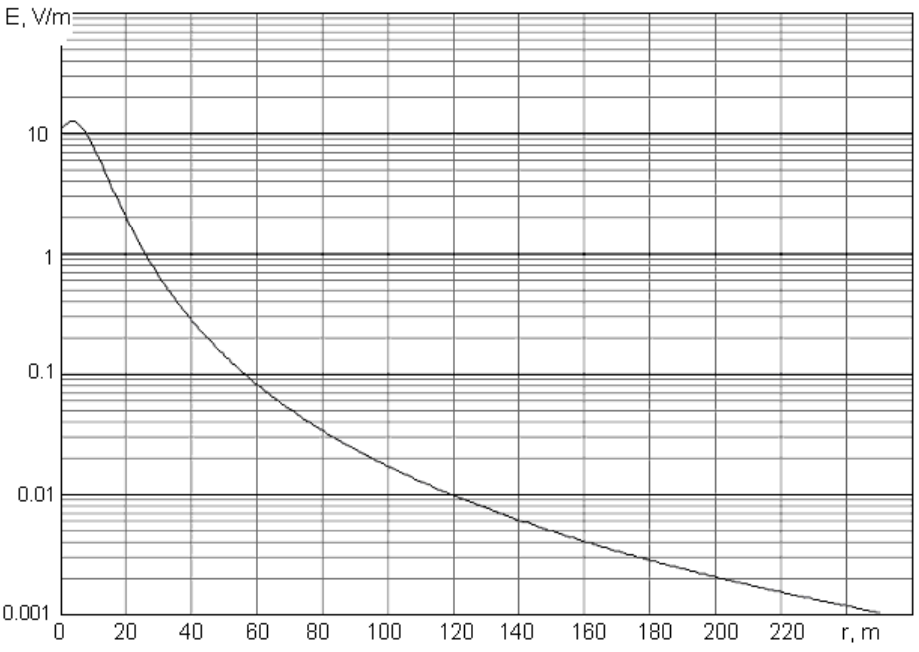


Рис.1.18. Распределение напряженности электрического поля коронного разряда рассчитанное с использованием нелинейной вольтамперной характеристики

www.nilem.ru

Для расчетов использовалась табулированная вольтамперная характеристика коронного разряда, приведенная в [98]. Результаты демонстрируют хорошее соответствие с данными, получаемыми по эмпирическим формулам (см. рис.1.17) как по уровням (для случая «хорошей» погоды), так и по структуре.

1.3. Электродинамическое моделирование подземных ЛЭП

1.3.1. Анализ поля частично экранированной многопроводной линии при помощи метода конечных элементов

В последние годы в проектных решениях реконструкции городских систем энергоснабжения все чаще используются реализации высоковольтных ЛЭП классов 35…220 кВ в виде подземных линий. Такие ЛЭП практически не препятствуют городской застройке, могут быть проложены вдоль автомобильных дорог и обладают рядом неоспоримых преимуществ в смысле удобства реализации в условиях значительной урбанизации территории [6].

Принципиальная возможность построения подземных ЛЭП возникла в связи с распространением специальных силовых экранированных кабелей, устойчивых к значительным внутренним перенапряжениям (десятки МВ/м). Такие линии, как правило, прокладываются внутри железобетонных коробов с гравийным заполнением.

При анализе электромагнитной обстановки в коридорах прохождения подземных ЛЭП возникает необходимость учета влияния условий прокладки кабелей на характеристики ЭМП. Данное обстоятельство не позволяет использовать предложенной в настоящей работе подход к анализу воздушных ЛЭП. Применительно к данной проблеме наиболее целесообразным является использование какого-либо универсального численного метода решения краевых электродинамических задач.

Как отмечено выше, в уравнениях Максвелла в правых частях останутся только первые члены [138]:

$$\operatorname{rot}\vec{H}=\vec{j},\ \operatorname{rot}\vec{E}=0,\ \operatorname{div}\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon},\ \ \operatorname{div}\vec{H}=0,$$

где плотность тока в проводах, образующих линию $\vec{j}=\vec{z}_0\dfrac{I}{\pi a^2}$; $\vec{z}_0$ – азимутальный орт декартовой системы координат (ось z совпадает с направлением прохождения ЛЭП); a – радиус провода; I – ток, определяемый формулами (1.21).

Первое и четвертое уравнения используем для расчета магнитного поля; второе и третье – для расчета электрического поля.

Систему уравнений Максвелла для квазистационарного случая нетрудно преобразовать в систему уравнений второго порядка [138]. Известно, что [104]:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\vec{E}=\operatorname{grad}\operatorname{div}\vec{E}-\nabla^2\vec{E}, \qquad (1.42)$$

www.nilem.ru

или с учетом второго и третьего уравнений Максвелла можно записать следующее уравнение:

$$\nabla^2 \vec{E} = \text{grad}\,\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \tag{1.43}$$

Аналогичным образом поступим с уравнениями для магнитного поля, используя первое и четвертое уравнения Максвелла:

$$-\nabla^2 \vec{H} = \text{rot}\ \ \vec{j}. \tag{1.44}$$

Систему, состоящую из уравнений (1.43) и (1.44), необходимо дополнить условиями, накладываемыми на искомое решение на границе области тока.

Для электрического поля это условия следующего вида [49]:

$$\begin{gathered} \varepsilon\, \vec{n}_0 \vec{E}_1 - \varepsilon\, \vec{n}_0 \vec{E}_2 = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\partial q}{\partial S}, \\ [\vec{n}_0 \vec{E}_1] - [\vec{n}_0 \vec{E}_2] = 0. \end{gathered} \tag{1.45}$$

Условия для магнитного поля имеют вид [49]:

$$\begin{gathered} \mu\, \vec{n}_0 \vec{H}_1 - \mu\, \vec{n}_0 \vec{H}_2 = 0, \\ [\vec{n}_0 \vec{H}_1] - [\vec{n}_0 \vec{H}_2] = \vec{l}_0 \frac{\partial i}{\partial l}. \end{gathered} \tag{1.46}$$

где $\vec{n}_0$ – вектор нормали к границе области тока, q – заряд, распределенный на границе, i –тангенциальная составляющая тока, на краевой линии элемента, ∂l – элемент контура (возможно разрывного), нормального линиям тока, $\vec{l}_0$ – орт линий тока.

Безусловно, аналитическое решение краевой задачи подобного типа для произвольной конфигурации элементов модели практически невозможно. Поэтому дальнейшим этапом по построению методики электродинамического анализа подземных ЛЭП, является численное решение уравнений (1.43) и (1.44) с учетом условий (1.45) и (1.46). Ориентация на численные методы решения дифференциальных уравнений оправдана, прежде всего их универсальностью (с известными ограничениями) по отношению к форме моделируемых материальных тел и конфигурации источников.

Уравнения (1.43) и (1.44) могут быть решены численно при помощи известного метода непосредственного решения краевых задач – метода конечных элементов (МКЭ) [8, 49, 50, 128, 139, 161, 197]. Этот метод получил весьма широкое распространение в вычислительной электродинамике в последнее время [190]. МКЭ составляет основу многих известных программных пакетов электродинамического моделирования, таких как ANSYS, Maxwell, QuickField, HFSS и др. Данные программы используются в исследовательской деятельности, за редким исключением, в основном зарубежными авторами. Последнее обстоятельство вызвано, очевидно, коммерческой направленностью данных программных средств, что известным образом ограничивает возможности их применения в отечест-

www.nilem.ru

венной научной практике. Программные коды названных пакетов являются закрытыми, поэтому представляется целесообразной для решения поставленных задач разработка оригинальной методики расчета поля с использованием МКЭ. При этом общим вопросам решения задач математической физики при помощи МКЭ посвящено значительное количество отечественных [40, 49, 50, 156] и зарубежных [38, 139, 161, 190] публикаций. Опыт авторов отмеченных работ, безусловно, может быть использован при решении рассматриваемой в рамках данной работы задачи.

В данном методе анализируемая область пространства, одна из границ которой совпадает с границей области тока, разбивается на элементы конечных размеров, вообще говоря, произвольной формы. В пределах каждого элемента решение задачи аппроксимируется кусочно-непрерывной полиномиальной функцией специального вида [156]. Разбиение непрерывной области на элементы целесообразно начинать с граничной поверхности анализируемой области пространства [40]. Процедура решения краевой задачи при помощи МКЭ может быть представлена в виде совокупности ряда этапов.

1. В начале выделяют достаточно крупные подобласти, границы между которыми проходят там, где изменяются геометрические или электрофизические свойства элементов модели, а также присутствуют сторонние источники или нагрузки [40].

2. Нумерация узлов элементов должна обеспечивать минимальную ширину полосы матрицы системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [156], получаемой из исходных дифференциальных уравнений. Этого можно достичь, минимизировав разность между соседними номерами узлов в каждом элементе. Например, в двумерной области узлы могут быть пронумерованы различными способами.

На рис.1.19 показаны два различных способа нумерации узлов в двумерной области. Причем, нетрудно видеть, что в случае рис.1.19б разность между соседними номерами узлов минимальна при одинаковом количестве узлов и элементов. Данное обстоятельство позволяет придать главной матрице СЛАУ структуру, благоприятную в смысле экономии памяти ЭВМ при численной реализации метода.

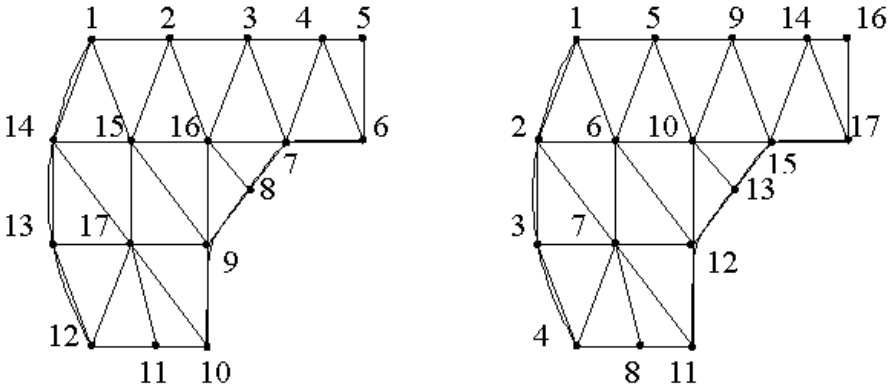


Рис.1.19. Различные способы нумерации узлов в двумерной области

www.nilem.ru

3. Для уменьшения затрат времени на вычисления размерность задачи целесообразно понизить. Иными словами для подземных линий электропередач возможен очевидный переход от трехмерной задачи к двумерной.

В настоящее время известно достаточно много реализаций МКЭ. Однако, задача электродинамического моделирования однородной линии передачи является достаточно простой в геометрическом смысле, поэтому на подробном выводе выражений для коэффициентов СЛАУ в настоящем разделе останавливаться не будем. Отметим лишь то, что коэффициенты СЛАУ при показанном на рис.1.19б способе нумерации узлов определяются методом Галеркина [13] с использованием линейных интерполяционных полиномов. Подробное изложение использованной авторами реализации МКЭ во избежание смысловых повторений в тексте данной работы будет приведено в разделе 2 на примере решения задачи вычисления ЭМП трансформаторной подстанции. Такая задача является значительно более сложной геометрически, поэтому детальные выкладки при ее решении являются более общими. Сама же рубрикация настоящей работы, как отмечалось во введении, обусловлена логическим следованием сетевой иерархии энергосистем.

1.3.2. Моделирование ЛЭП и оценка корректности конечноэлементных моделей

Тестовые расчеты проведем на примере объекта, проектируемого и вводимого в эксплуатацию на территории города Самара. Предполагаемый коридор прохождения исследуемой ЛЭП – вторая очередь набережной реки Волга. Класс напряжения ЛЭП – 110 кВ, предполагаемая номинальная загрузка - 100 МВА.

Численный анализ ЭМП проведем для трех вариантов конструктивного исполнения ЛЭП 110 кВ в соответствии с вариантами, проработанными при проведении конструкторских изысканий:

- воздушная линия на стандартных опорах;
- подземная линия, проложенная в армированном железобетонном лотке на глубине 1,5 м от поверхности Земли;
- подземная линия, проложенная в армированном железобетонном лотке на глубине 1,5 м от поверхности Земли с использованием высоковольтного коаксиального кабеля с заземленными оболочками.

Расчет ЭМП стандартной воздушной ЛЭП необходим для оценки корректности применяемой для решения поставленных задач реализации МКЭ путем сравнения с результатами расчетов, проведенных по методике, изложенной в подразделе 1.2.

Результаты расчета напряженности электрического и магнитных полей воздушной ЛЭП с указанными параметрами, размещенной на стандартной опоре У-110-1 (рис. П.3.5), приведены на рис.1.20 и 1.21. На рис.1.22 и 1.23 кривые получены в результате использования методики для воздушных ЛЭП (высота расчетной плоскости – 2 м).

www.nilem.ru

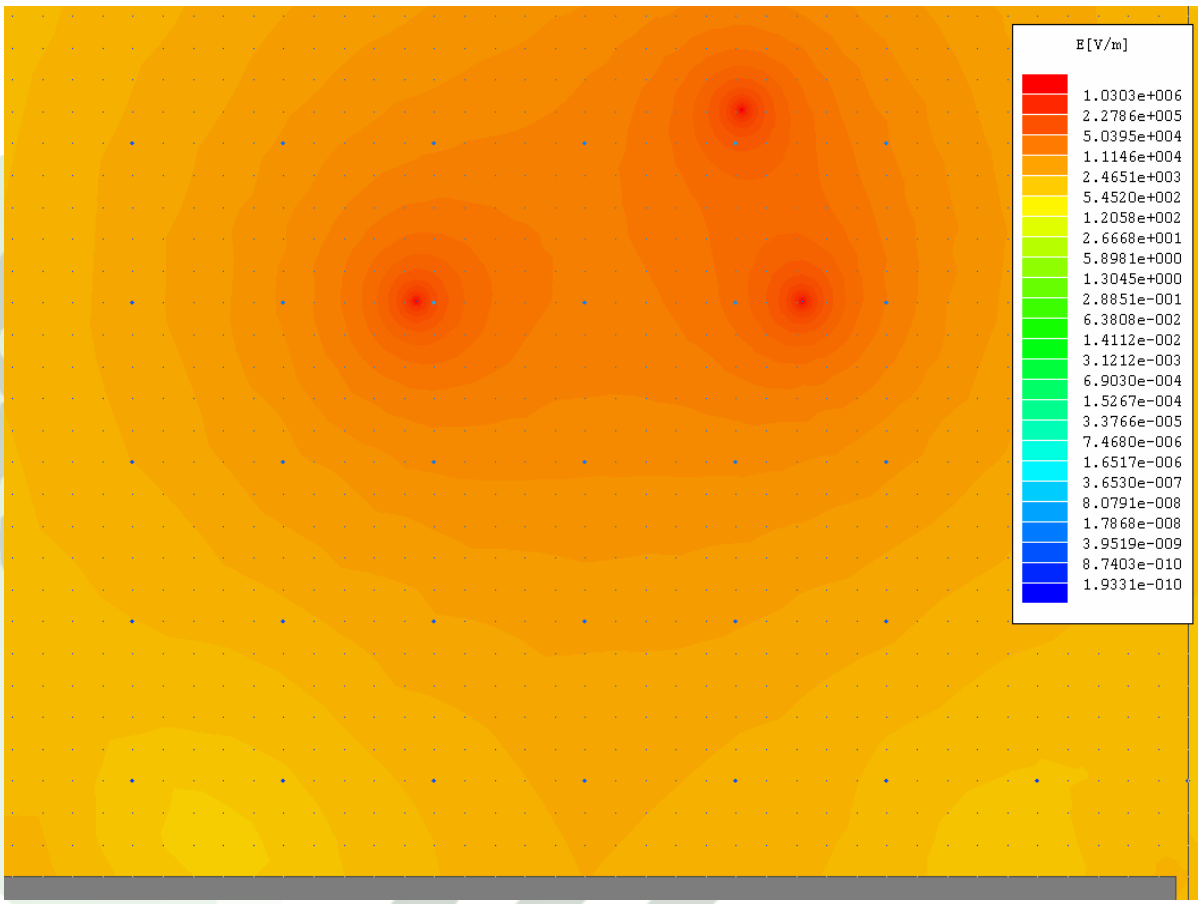


Рис.1.20. Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении воздушной ЛЭП 110 кВ

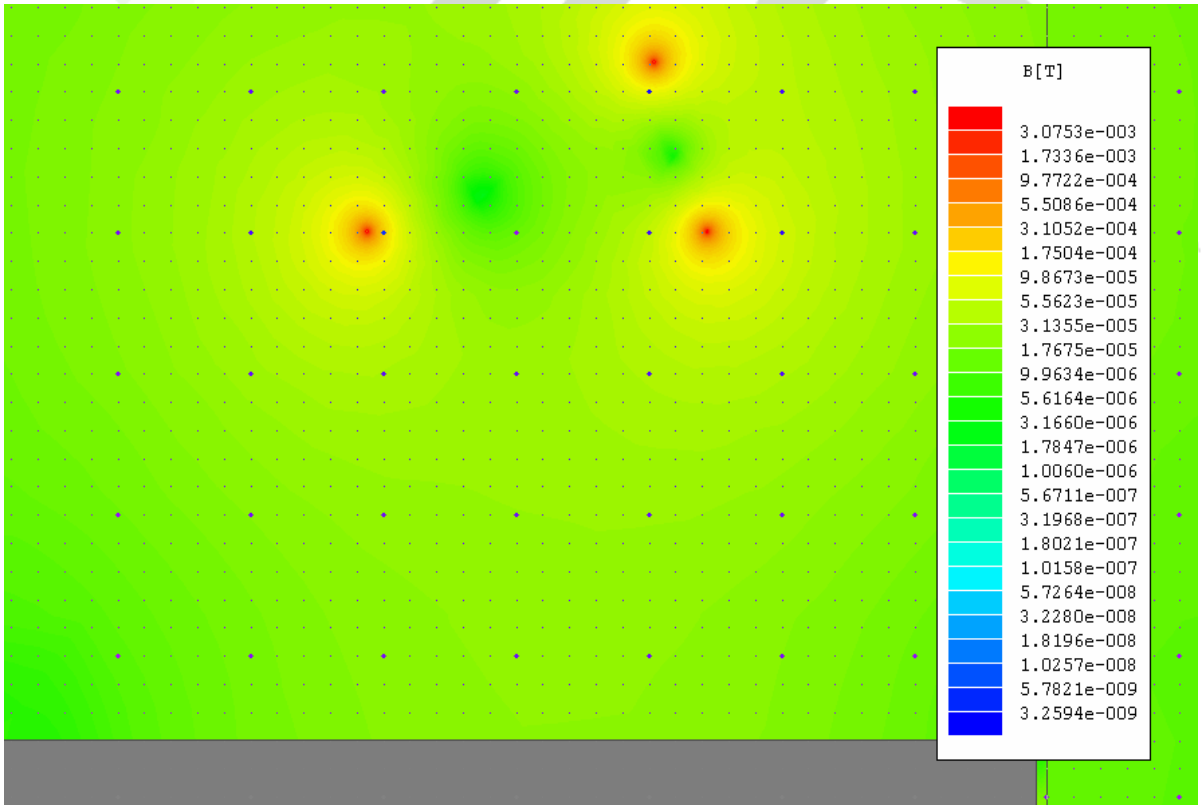


Рис.1.21. Распределение напряженности магнитного поля в вертикальном сечении воздушной ЛЭП 110 кВ

www.nilem.ru

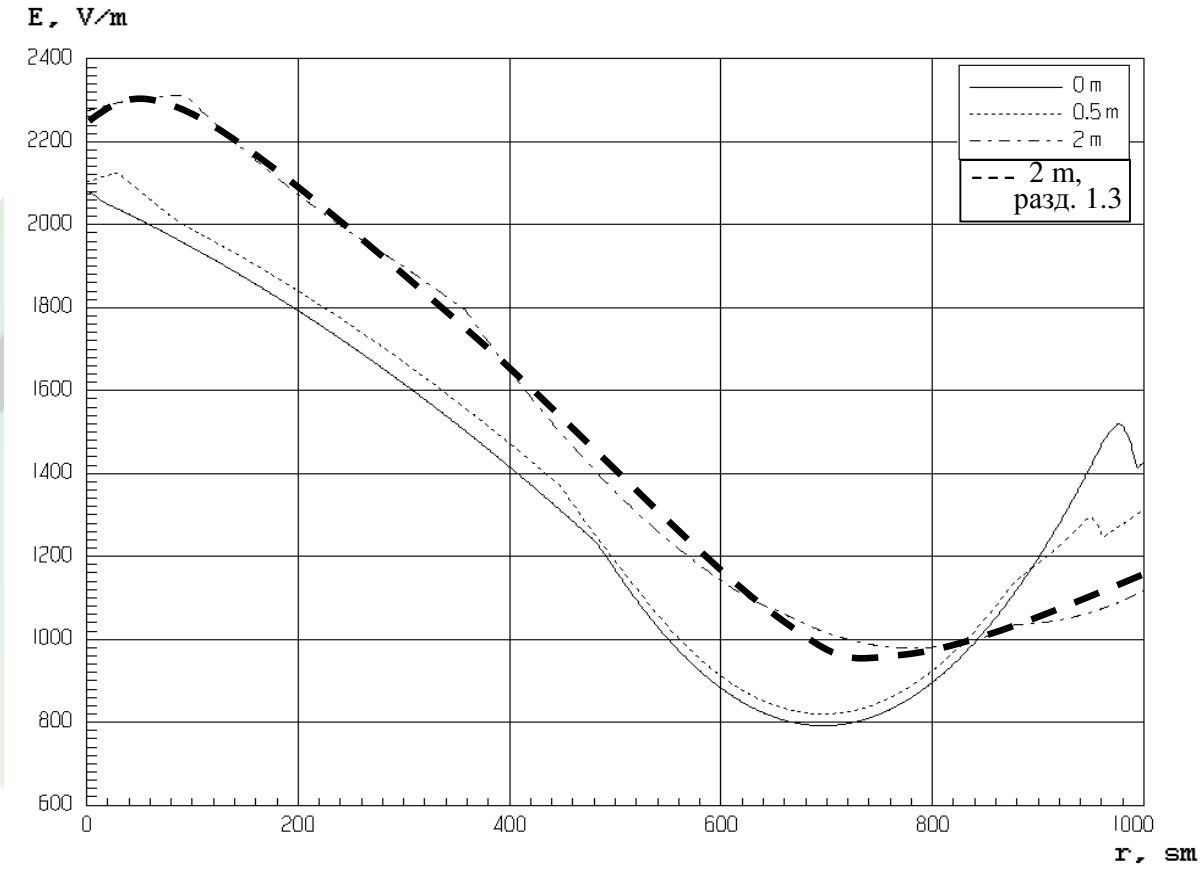


Рис.1.22. Распределение напряженности электрического поля воздушной ЛЭП 110 кВ над поверхностью Земли на различных высотных отметках

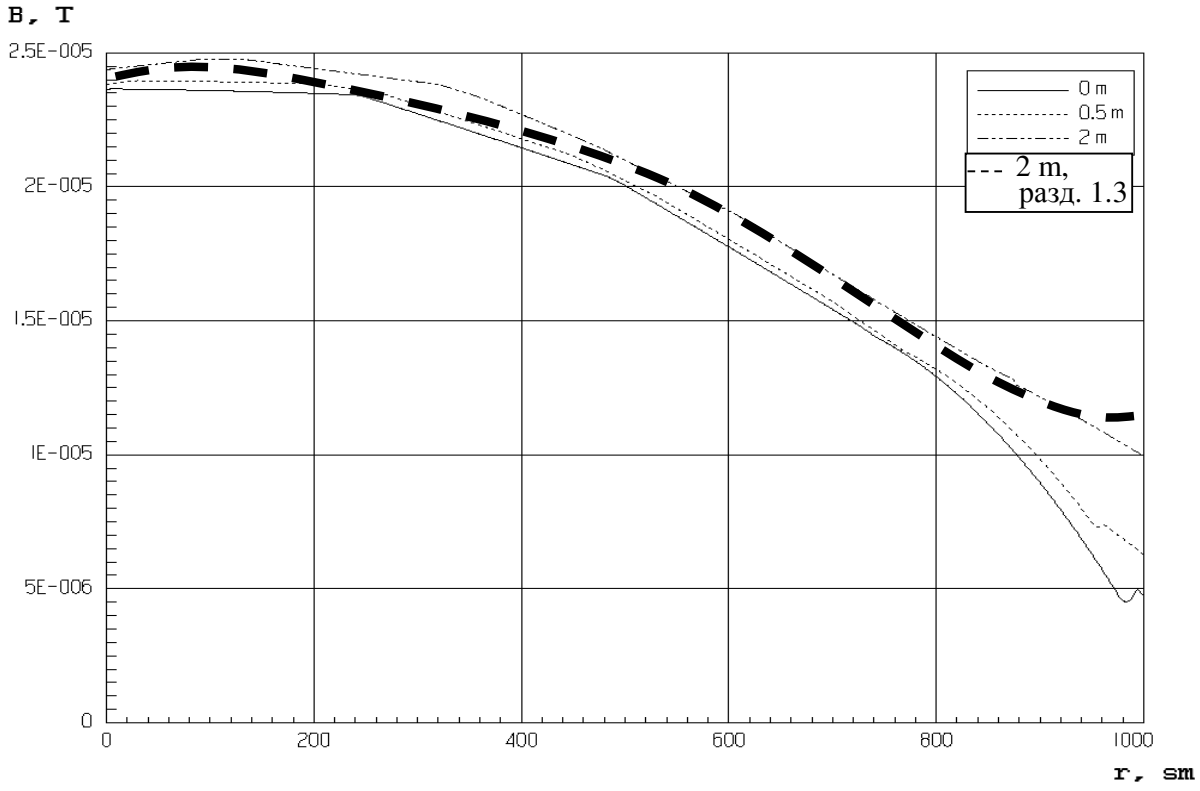


Рис.1.23. Распределение напряженности магнитного поля воздушной ЛЭП 110 кВ над поверхностью земли на различных высотных отметках

www.nilem.ru

Сравнение результатов, полученных с помощью различных методов, показывает количественное и качественное совпадение, что, безусловно, подтверждает корректность использованной конечноэлементной модели.

Далее приведены результаты тестовых расчетов полей подземной ЛЭП для первого варианта реализации, проведенные при помощи МКЭ. Конфигурация лотка и способ прокладки кабеля подземной ЛЭП показаны на рис.1.24 (размеры в мм). Железобетонный лоток ЛЭП заглублен на 1,5 м в грунт, планируемая загрузка - 100 МВА, тип кабеля АПвЭгаПУ 3 (1х500/95) – коаксиальный высоковольтный силовой кабель с промежуточной изоляцией из сшитого полиэтилена.

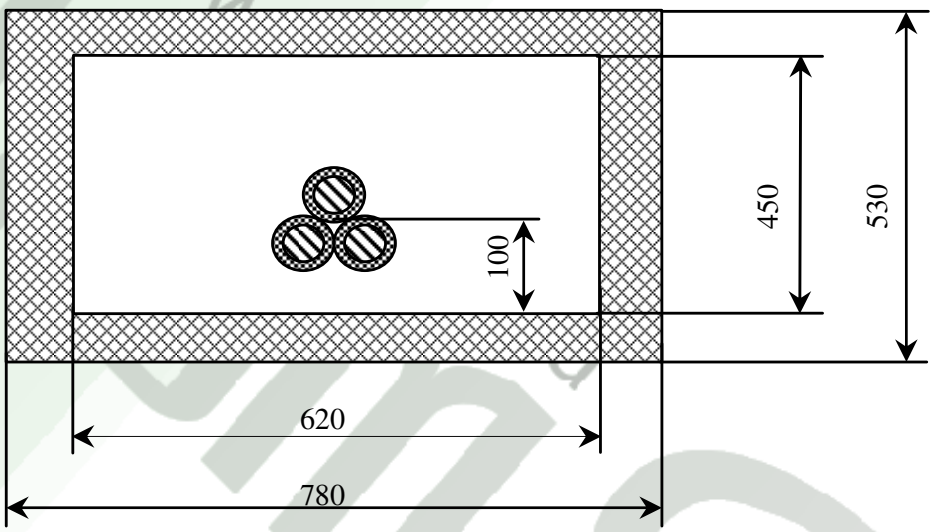


Рис.1.24. Поперечный разрез подземной ЛЭП

На рис.1.25 – 1.28 представлены результаты расчета напряженностей электрического и магнитного полей подземной ЛЭП. При расчетах намеренно не моделировалась система заземления, традиционная для современных подземных ЛЭП, в целях исследования его влияния на структуру и уровни ЭМП. Обсуждение полученных результатов будут представлены ниже.

1.3.3. Расчет уровней ЭМП заземленной подземной ЛЭП

Рассмотрим традиционный способ прокладки подземных ЛЭП с заземлением внешнего проводника силового кабеля (третий вариант прокладки ЛЭП).

При таком способе оболочки кабелей соединены с общими контурами заземления на оконечных пунктах магистрали. Сопротивление шины заземления согласно нормативам [6] составляет не более 0.5 Ом. Эквивалентная схема кабеля с заземлением представлена на рис.1.29.

Результаты расчета напряженностей электрического и магнитного полей подземной ЛЭП 110 кВ с заземлением приведены на рис.1.30 – 1.33. Условия для расчета и расчетные плоскости выбраны аналогично случаю, рассмотренному в подразделе 1.3.2.

www.nilem.ru

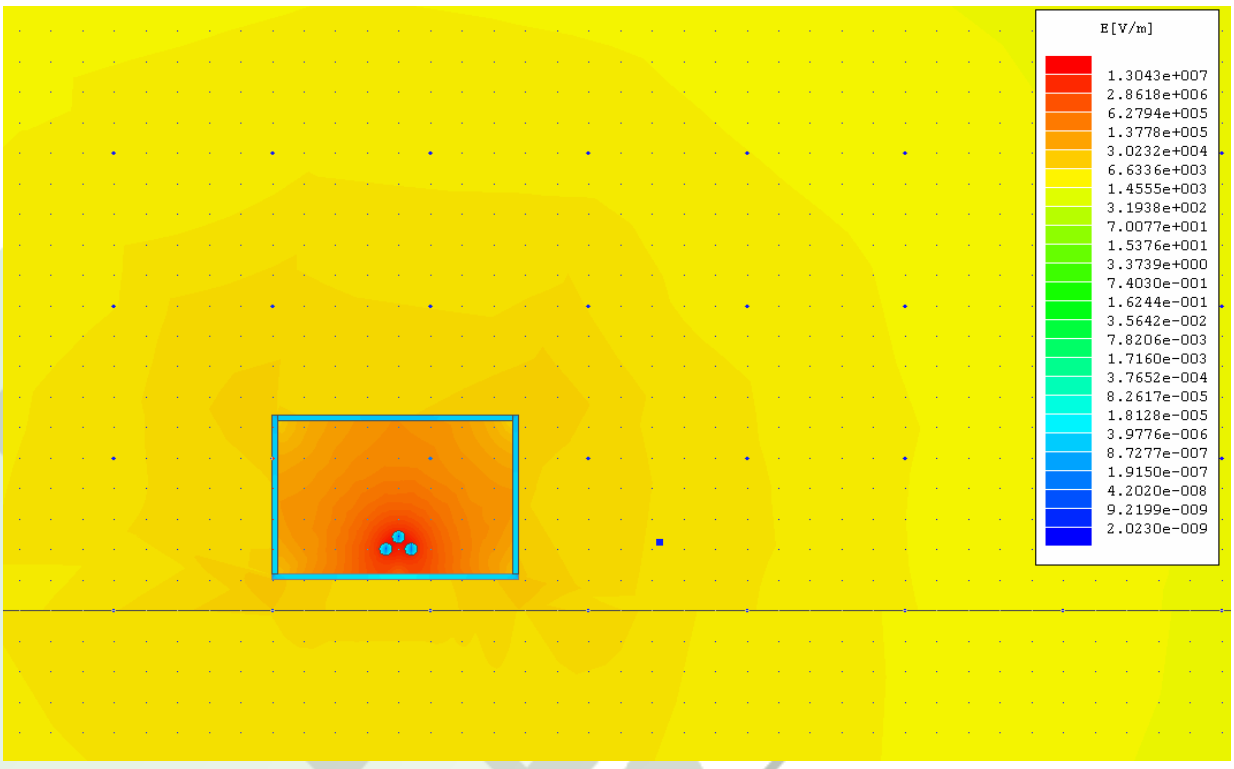


Рис.1.25. Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении подземной ЛЭП 110 кВ

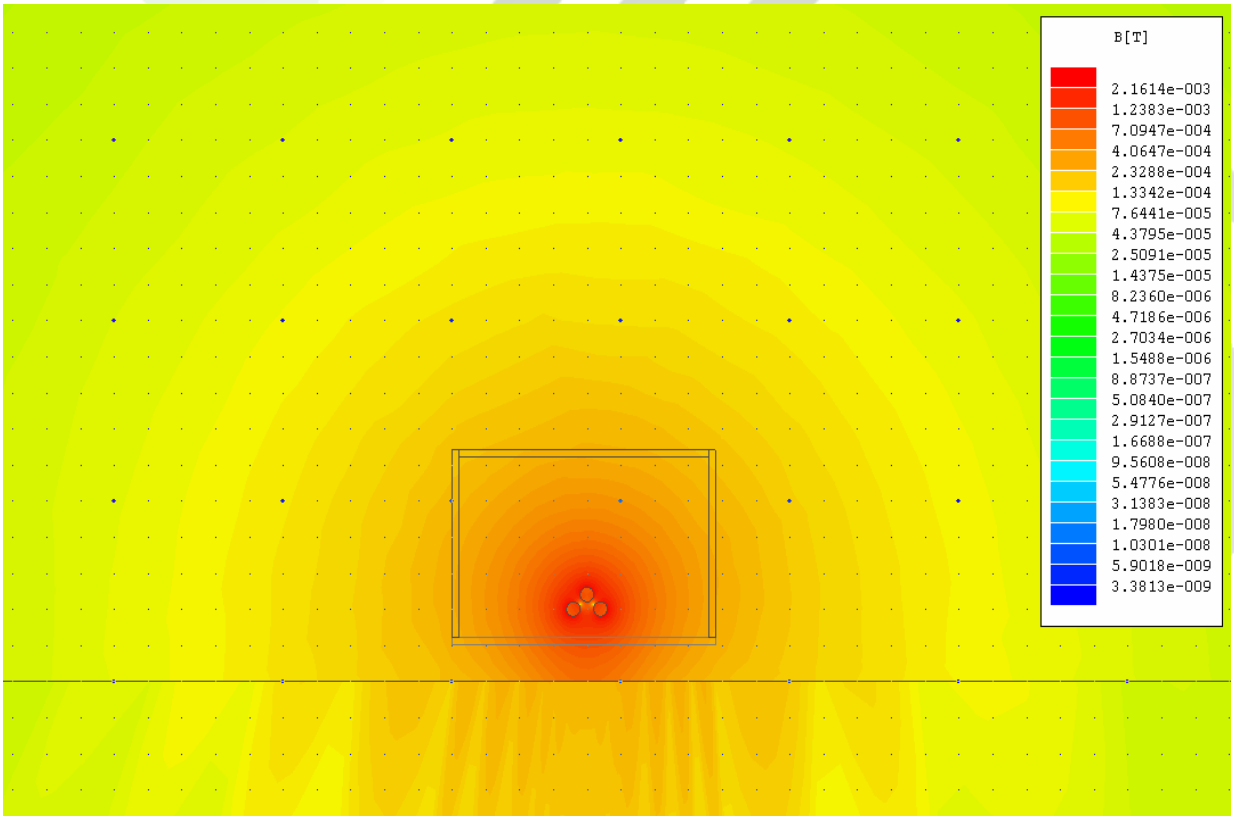


Рис.1.26. Распределение напряженности магнитного поля в вертикальном сечении подземной ЛЭП 110 кВ

www.nilem.ru

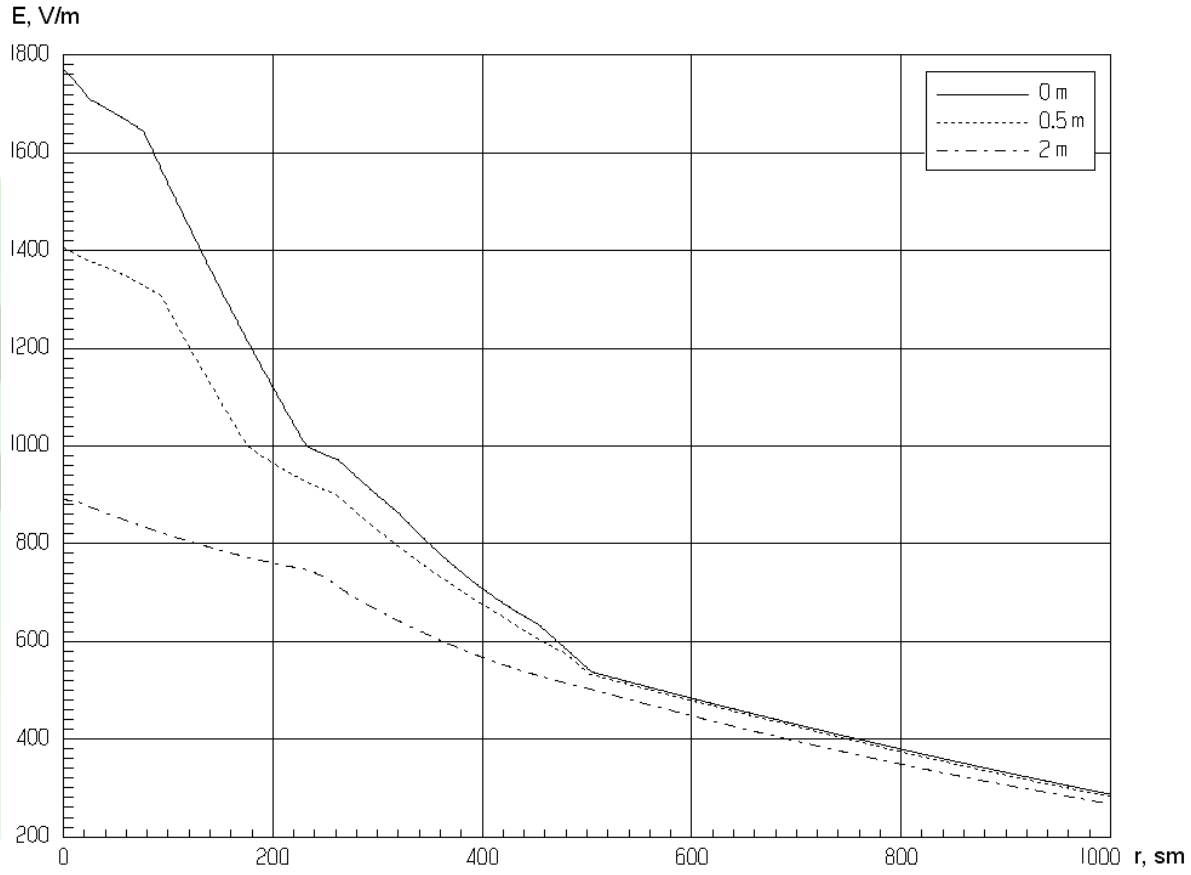


Рис.1.27. Распределение напряженности электрического поля подземной ЛЭП 110 кВ над поверхностью Земли на различных высотных отметках

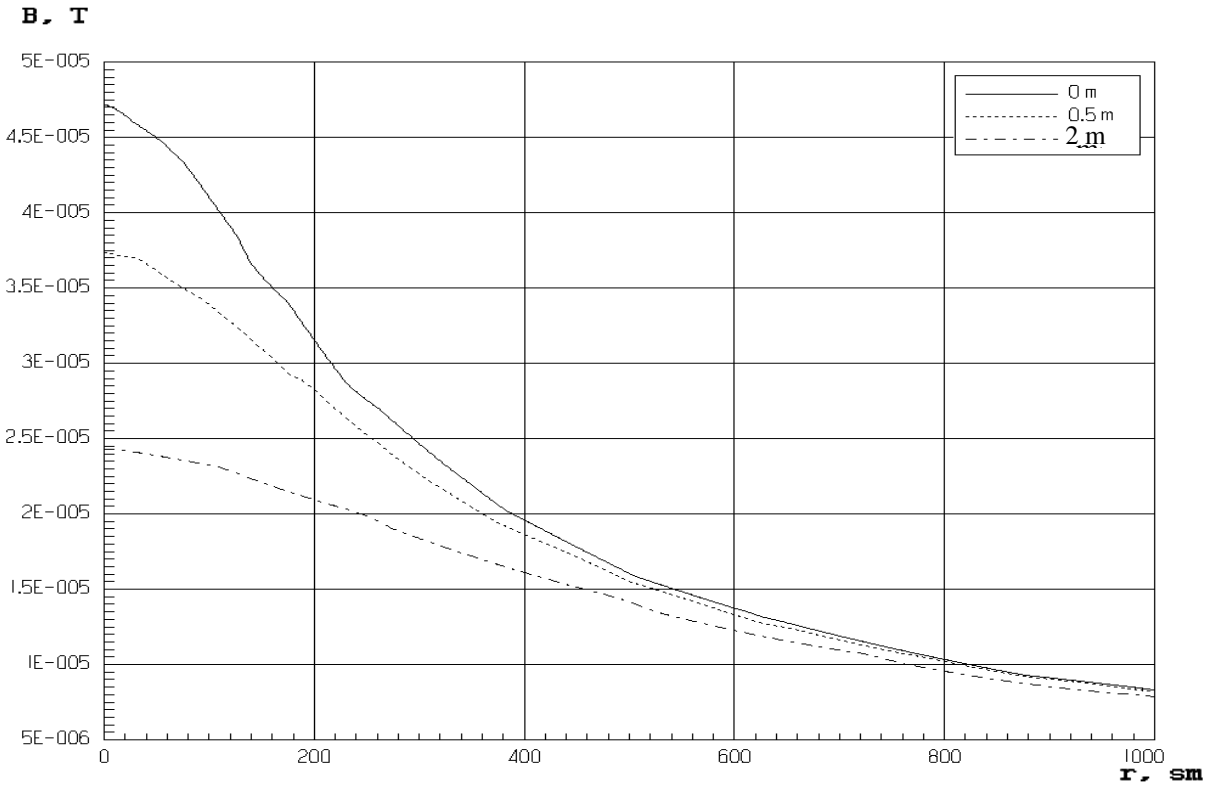


Рис.1.28. Распределение напряженности магнитного поля подземной ЛЭП 110 кВ над поверхностью Земли на различных высотных отметках

www.nilem.ru

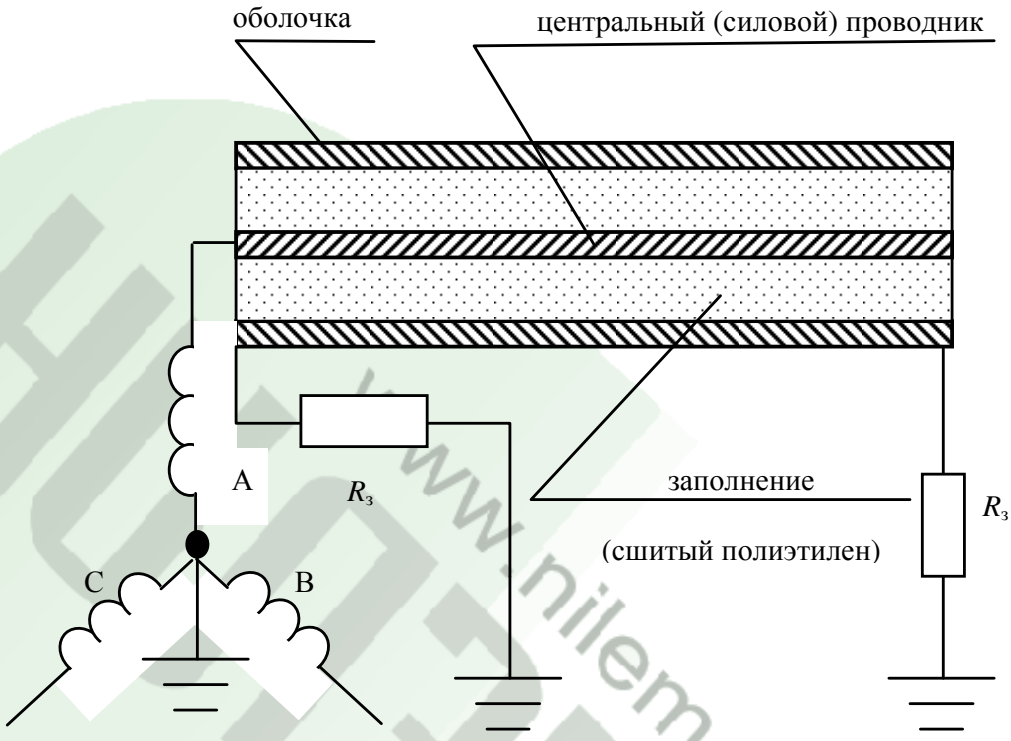


Рис.1.29. Схема силового подземного кабеля с заземлением

Обсудим результаты, полученные в пп. 1.3.2 и 1.3.3 с точки зрения критериев электромагнитной экспертизы.

При любом варианте исполнения подземной ЛЭП при прочих равных условиях уровни электрических и магнитных полей оказываются значительно меньшими, чем в случае воздушной ЛЭП.

Для воздушной ЛЭП (такого класса напряжения) максимальный уровень электрического поля на оси ЛЭП составляет – 2300 В/м, а магнитного - 25 мкТ, что превышает предельно допустимый уровень более, чем в два раза. При этом санитарно-защитный коридор будет составлять более 20 метров.

Для подземной кабельной ЛЭП, размещенной в армированном железобетонном лотке без заземления на оконечных пунктах, расчеты показывают следующее:

- уровни электрического поля на поверхности Земли могут превышать 1 кВ/м в коридоре порядка 5 м от одной ветви кабельной линии;
- превышение уровня 5 кВ/м расчетами не выявлено;
- уровни магнитного поля на поверхности земли могут превышать 10мкТ в коридоре порядка 15 м от одной ветви кабельной линии.

Для подземной кабельной ЛЭП, размещенной в армированном железобетонном лотке с заземлением на оконечных пунктах, уровни электрического поля на поверхности земли не превышают 50 В/м, что значительно меньше нормируемого уровня. Уровни магнитного поля на поверхности земли не превышают 10 мкТ.

www.nilem.ru

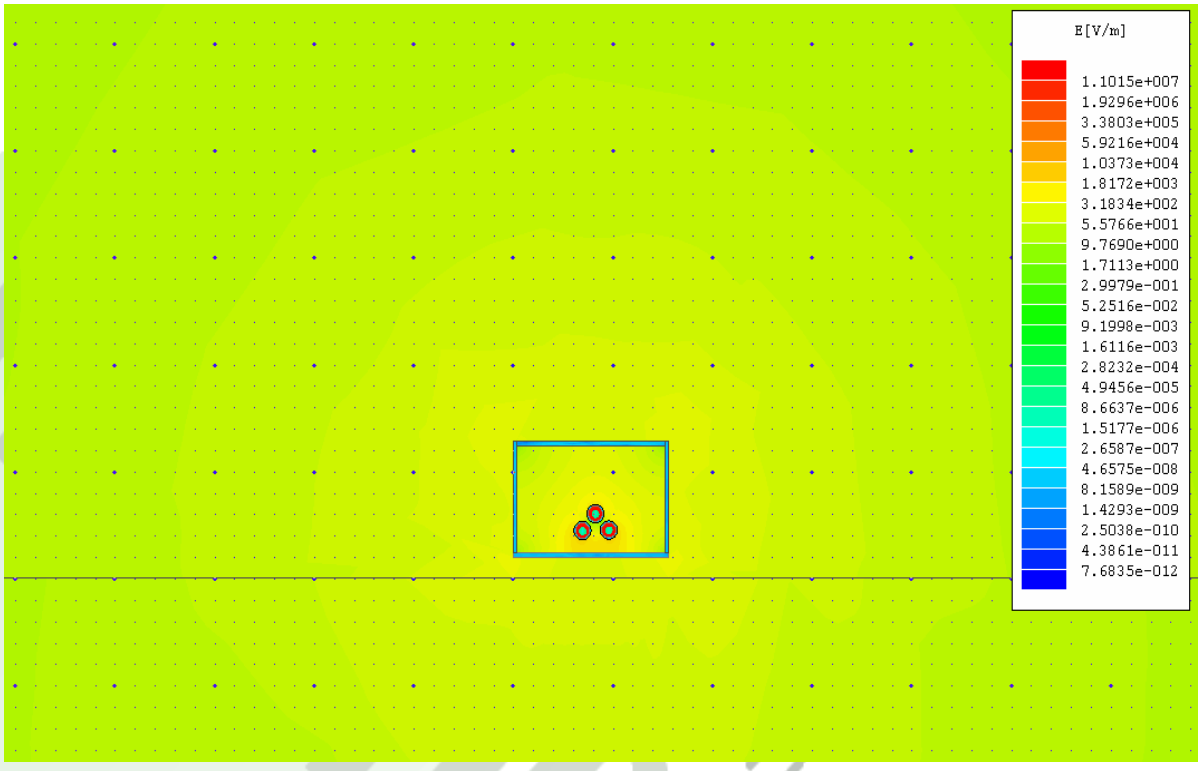


Рис.1.30. Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении ЛЭП 110 кВ

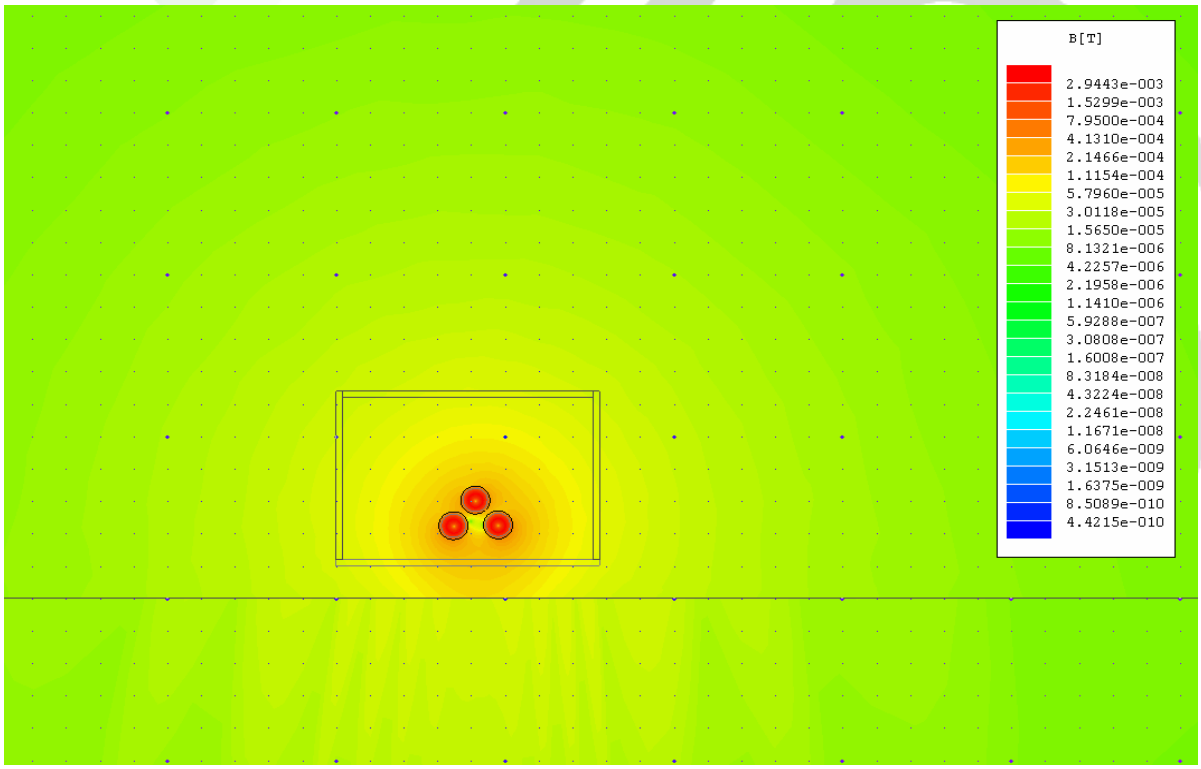


Рис.1.31. Распределение напряженности магнитного поля в вертикальном сечении ЛЭП 110 кВ

www.nilem.ru

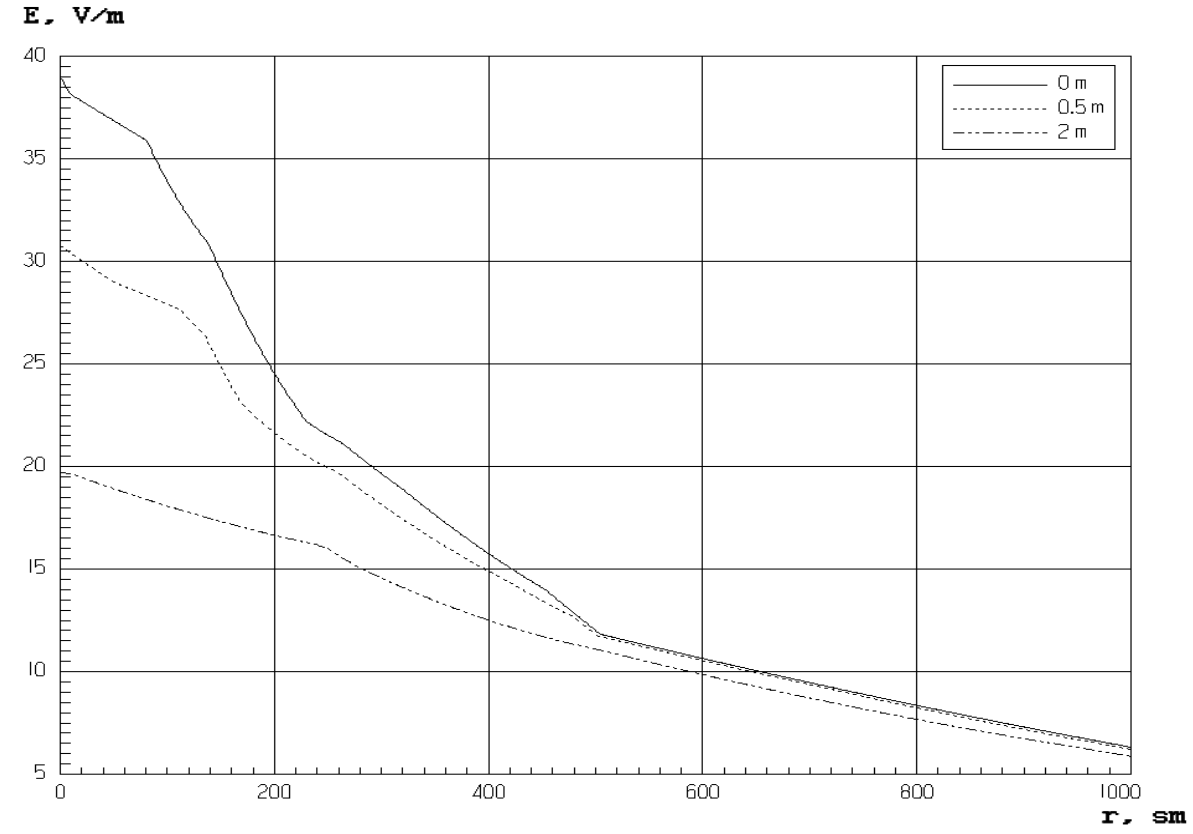


Рис.1.32. Распределение напряженности электрического поля ЛЭП 110 кВ над поверхностью Земли на различных высотных отметках

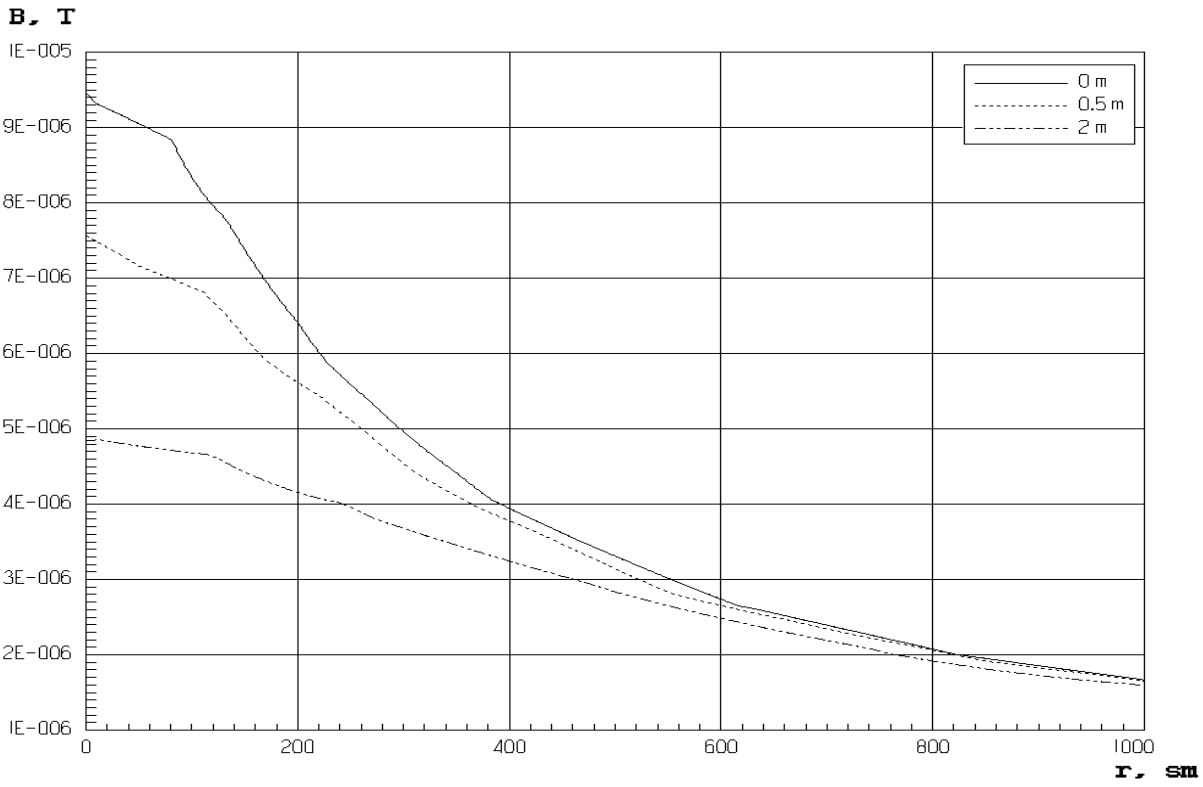


Рис.1.33. Распределение напряженности магнитного поля ЛЭП 110 кВ над поверхностью Земли на различных высотных отметках

www.nilem.ru

Результаты расчетов подтверждают существенное преимущество подземных ЛЭП с заземлением на оконечных пунктах в сравнении с подземными и воздушными такого же класса напряжения. Создаваемые уровни электрического и магнитного полей оказываются во много раз меньше предельно допустимых уровней. Это преимущество, очевидно, реализуется применением специальных кабелей, возможностью эффективного заземления оболочек кабелей и способами их прокладки.

1.4. Анализ ЭМП силовых распределительных пунктов системы энергоснабжения

1.4.1. Моделирование силовых распределительных пунктов расчетно-экспериментальным методом

Как отмечалось выше, первичные и вторичные объекты сетевой иерархии системы энергоснабжения региона, к которым относятся силовые распределительные пункты, построенные по индивидуальным проектам, при расчетах ЭМП в рамках настоящей работы моделируются системой эквивалентных элементарных излучателей.

Система электрического и магнитного диполей, локализованных в пределах некоторой области, на границе которой (набор координат $\vec{r}_0$) предполагаются известными уровни ЭМП для реальных устройств, определяемые экспериментально, показана на рис.1.34.

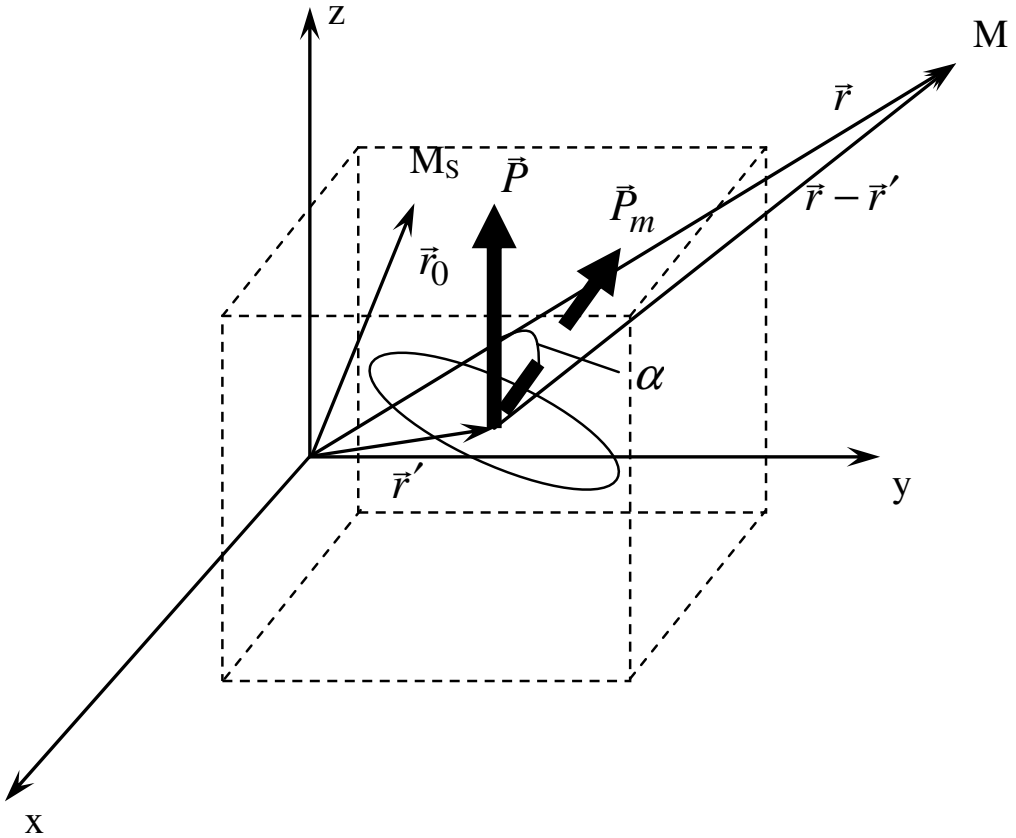


Рис.1.34. К расчету электромагнитного поля системы эквивалентных диполей

www.nilem.ru

При проведении экспериментальных исследований следует найти направления, в которых значения напряженностей полей максимальны (при одном и том же расстоянии). Это позволит определить ориентацию эквивалентных диполей, их геометрические размеры, а так же токи I и I_m, их возбуждающие.

Параметры эквивалентных диполей находятся по экспериментальным данным при помощи любого метода математической регрессии, например, метода наименьших квадратов, сущность которого подробно изложена в математической литературе (см., например [13]).

Согласно данному методу, если некоторая физическая величина *y* зависит от другой величины *x*, то эту зависимость можно исследовать, измеряя *y* при различных значениях *x*. В результате измерений получается ряд значений:

$x_1, x_2, ..., x_i, , ... , x_n$; $y_1, y_2, ..., y_i, , ... , y_n$.

По данным такого эксперимента можно построить график зависимости $y=f(x)$. Полученная кривая дает возможность судить о виде функции $f(x)$. Однако, постоянные коэффициенты, которые входят в эту функцию, остаются неизвестными. Определить их позволяет метод наименьших квадратов. Экспериментальные точки, как правило, не ложатся точно на кривую.

Метод наименьших квадратов требует, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от кривой, то есть $[y_i - f(x_i)]^2$, была наименьшей.

При этом утверждается, что следует выбирать такое значение неизвестного параметра, при котором имеет минимум производная функции квадрата разности по искомому параметру.

1.4.2. Выражения для компонент векторов ЭМП расчетно-экспериментальной модели

Компоненты векторов электрического поля системы эквивалентных диполей определяются следующими выражениями [137]:

$$E_x(\vec{r}, x', y') = \left[\frac{(x-x')(z-z')}{\omega\varepsilon_0} Il\, \Phi_1(\vec{r}, \vec{r}') - (y-y') i\omega\mu_0 I_m S\, \Phi_3(\vec{r}, \vec{r}') \right] \frac{G(\vec{r}, \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}, \tag{1.47}$$

$$E_y(\vec{r}, x', y') = \left[\frac{(y-y')(z-z')}{\omega\varepsilon_0} Il\, \Phi_1(\vec{r}, \vec{r}') - (x-x') i\omega\mu_0 I_m S\, \Phi_3(\vec{r}, \vec{r}') \right] \frac{G(\vec{r}, \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}, \tag{1.48}$$

$$E_z(\vec{r}, x', y') = \frac{1}{\omega\varepsilon_0} \frac{Il}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \Phi_2(\vec{r}, \vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}'), \tag{1.49}$$

где $\vec{r}$ - радиус-вектор точки наблюдения, $\vec{r}'$ - радиус вектор точки локализации диполей, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, ε_0 и μ_0 - соответственно, электрическая и магнитная постоянные, l и S - соответственно длина электрического диполя и площадь витка тока, $|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$.

Компоненты магнитного поля определяются выражениями вида:

www.nilem.ru

$$H_x(\vec{r},x',y')=\left[(x-x')(z-z')iI_mS\,\Phi_1(\vec{r},\vec{r}')-(y-y')Il\,\Phi_3(\vec{r},\vec{r}')\right]\frac{G(\vec{r},\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|},\quad(1.50)$$

$$H_y(\vec{r},x',y')=\left[(y-y')(z-z')iI_mS\,\Phi_1(\vec{r},\vec{r}')-(x-x')Il\,\Phi_3(\vec{r},\vec{r}')\right]\frac{G(\vec{r},\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|},\quad(1.51)$$

$$H_z(\vec{r},x',y')=\frac{iI_mS}{|\vec{r}-\vec{r}'|}\,\Phi_2(\vec{r},\vec{r}')G(\vec{r},\vec{r}')\,.\quad(1.52)$$

При записи выражений (1.47-1.52) предполагалось, что моменты диполей коллинеарны друг другу и оси *z*. В записанных выражениях использованы следующие вспомогательные функции координат [3]:

$$\Phi_1(\vec{r},\vec{r}')=\frac{3k}{|\vec{r}-\vec{r}'|^2}-\frac{3i}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3},\quad(1.53)$$

$$\Phi_2(\vec{r},\vec{r}')=\frac{3(z-z')^2-|\vec{r}-\vec{r}'|^2}{|\vec{r}-\vec{r}'|^2}k-i\frac{(z-z')^2-|\vec{r}-\vec{r}'|^2}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3},\quad(1.54)$$

$$\Phi_3(\vec{r},\vec{r}')=\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|^2}.\quad(1.55)$$

Функция Грина уравнения Гельмгольца для свободного пространства:

$$G(\vec{r},\vec{r}')=\frac{e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|},\quad(1.56)$$

где $k=\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ - волновое число свободного пространства.

1.4.3. Расчет уровней ЭМП силового распределительного пункта

Внешний вид объекта приведен на рис.1.35.

На рис.1.36 и 1.37 приведены результаты расчета напряженностей электрического и магнитного полей силового распределительного пункта. Измерения производились на расстоянии 5 м от периметра объекта (ограниченного металлическим заграждением) при помощи измерителя напряженности электрического поля П3-50.

Из множества полученных в результате эксперимента значений выбирались максимальные, по которым и определялись параметры расчетно-экспериментальной модели с использованием методики, изложенной выше. Результаты расчета электрического и магнитного полей построенной модели приведены на рис.1.36 и 1.37. Расчеты проводились для тех же высот, что для линий электропередач.

www.nilem.ru

Рис. 1.35. Силовой распределительный пункт

www.nilem.ru

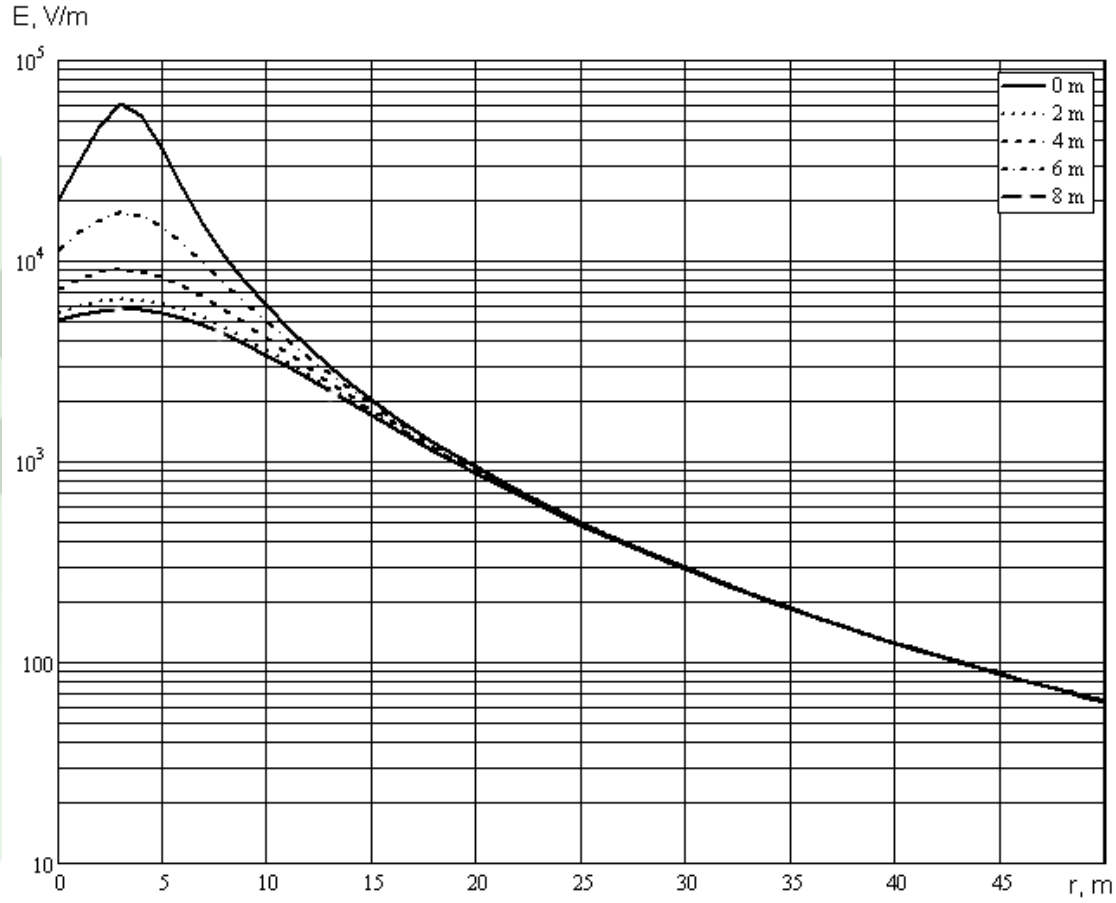


Рис.1.36. Электрическое поле силового распределительного пункта

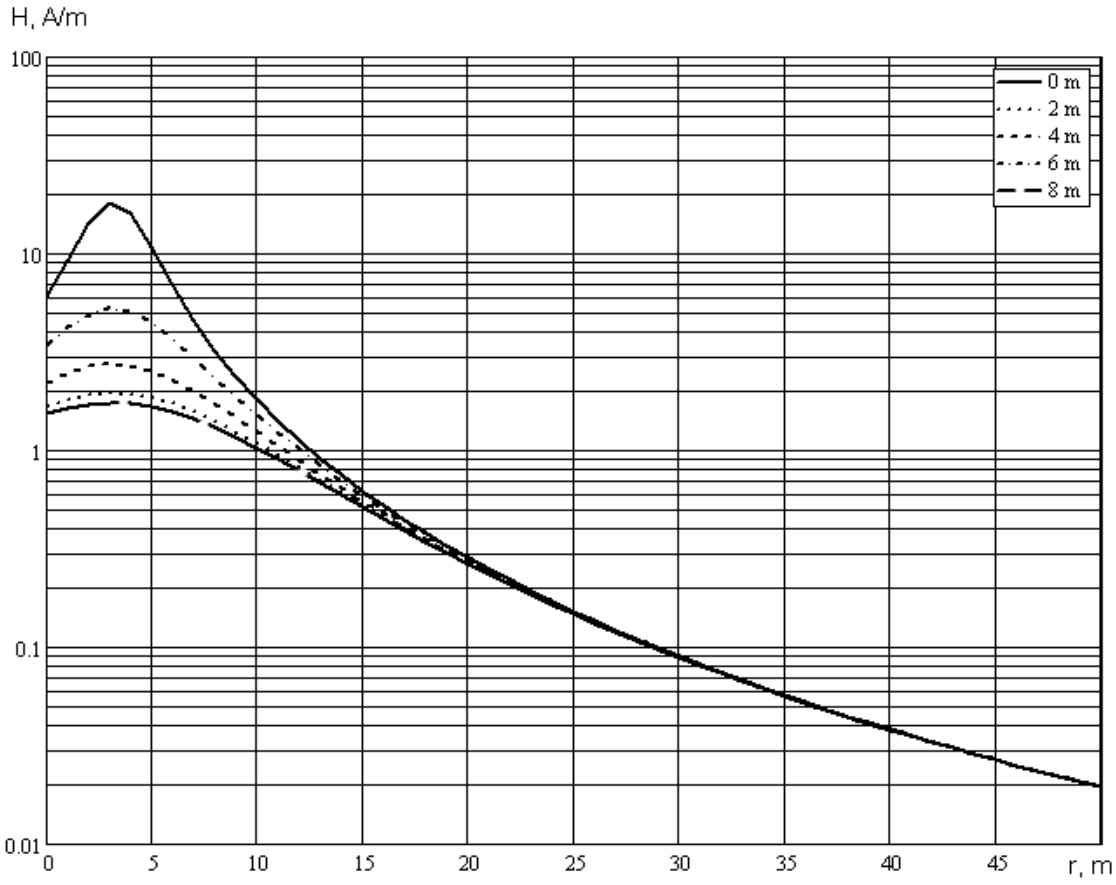


Рис.1.37. Магнитное поле силового распределительного пункта

www.nilem.ru

РАЗДЕЛ 2. Электромагнитные поля силовых трансформаторных подстанций

2.1. Моделирование силового электрооборудования с учетом условий размещения при помощи метода конечных элементов

2.1.1. Исходные уравнения и формулировка соответствующих краевых задач

Как отмечалось выше, оборудование трансформаторной подстанции является источником ЭМП промышленной частоты 50 Гц достаточно сложной пространственной конфигурации. Причем существенное влияние на структуру поля оказывают все материальные тела, расположенные вблизи оборудования.

Применительно к данному случаю в качестве материальных объектов, влияние на совокупное электромагнитное поле которых должно быть учтено, следует выделить поверхности, ограничивающие анализируемую область пространства – стены помещения и перекрытия [178].

Относительно ЭМП, создаваемых трансформаторной подстанцией, можно отметить то, что в анализируемой области пространства, также как и в случае ЛЭП, выполняется условие квазистационарности [137]. Таким образом, представляется целесообразным оценивать электромагнитную обстановку также, как и в случае линий электропередач раздельно по факторам электрического и магнитного полей.

Источниками электрических и магнитных полей являются заряды и токи, локализованные в конструктивных элементах оборудования трансформаторной подстанции. При этом необходимо учитывать нелинейный характер материала магнитопровода силового трансформатора.

Электродинамический анализ силовых трансформаторов с нелинейностями построим на основе непосредственного решения стационарной краевой электродинамической задачи. Численное решение сформулированной задачи Дирихле проводится с использованием метода конечных элементов (см. п. 1.3). Для упрощения исходной краевой задачи выберем следующий ряд допущений. В квазистационарном случае можно положить равными нулю производные по времени в правой части первых двух уравнений Максвелла вследствие их малости. В качестве следующего шага по упрощению исходных уравнений при построении модели трансформаторной подстанции исключим вторичный ток из решения электродинамической задачи, предварительно вычислив его методами теории магнитных цепей, и в последствии будем считать его равноправным сторонним источником.

Для уменьшения затрат времени на вычисления при реализации МКЭ размерность задачи целесообразно понизить. Нетрудно заметить, что ана-

www.nilem.ru

лизируемые в данной работе устройства имеют либо осевую (обмотки), либо плоскостную симметрию (трансформатор в целом), причем эта симметрия распространяется и на конфигурацию сторонних источников.

Иными словами, для моделируемых рассматриваемых устройств возможен переход от трехмерной задачи к двумерной, учитывающей геометрические особенности модели с сохранением пространственной трехмерной структуры решения. Задачи данного типа назовем псевдодвумерными, как частный случай плоскомеридиональной задачи [100].

Проиллюстрируем переход к псевдодвумерной задаче на примере трехфазного трансформатора с сердечником, сечение которого изображено на рис.2.1. В случае плоскостной симметрии следует использовать декартовы координаты.

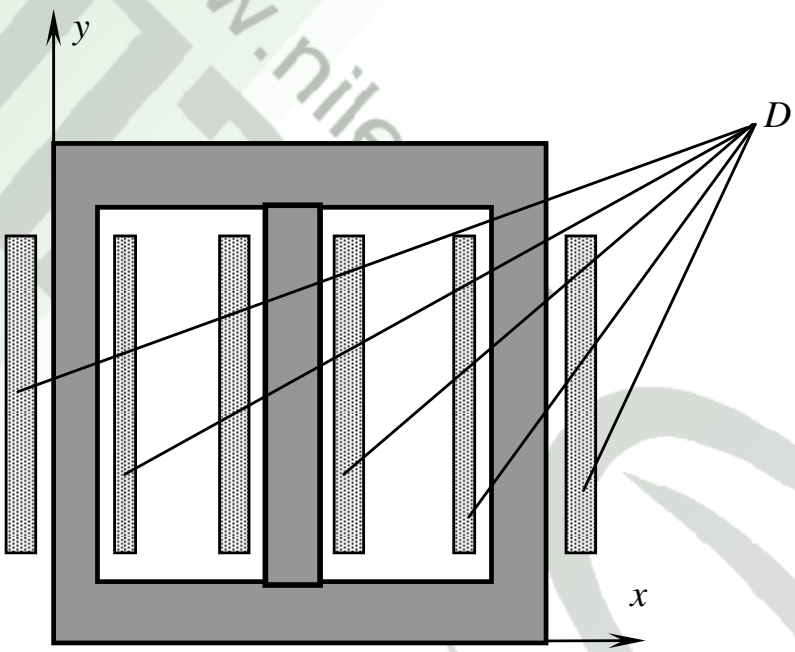


Рис.2.1. Трехфазный трансформатор в декартовых координатах

Сторонним источником в данном случае является функция $j_z(x, y)$, определенная в разрывной области *D*. При решении псевдодвумерной задачи поле вне плоскости ХОУ может быть найдено путем экстраполяции.

Уравнения (1.43) и (1.44) преобразуются из векторной к координатной форме с понижением размерности следующим образом.

Градиент, векторный и скалярный операторы Лапласа в декартовых координатах имеют вид [104]:

$$\text{grad}\ \ \rho = \vec{x}_0 \frac{\partial \rho}{\partial x} + \vec{y}_0 \frac{\partial \rho}{\partial y} + \vec{z}_0 \frac{\partial \rho}{\partial z}, \tag{2.1}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \vec{x}_0 \nabla^2 E_x + \vec{y}_0 \nabla^2 E_y + \vec{z}_0 \nabla^2 E_z, \tag{2.2}$$

$$\nabla^2 E_{x,y,z} = \frac{\partial^2 E_{x,y,z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{x,y,z}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_{x,y,z}}{\partial z^2}.$$

www.nilem.ru

Первое уравнение (1.43) преобразуется к системе скалярных уравнений:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial x},$$
$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial y}, \qquad (2.3)$$
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial z}.$$

Аналогичным образом поступим с уравнением для магнитного поля, учитывая, что ротор в декартовых координатах вычисляется следующим образом [104]:

$$\operatorname{rot}\vec{j}=\vec{x}_0\left(\frac{\partial j_z}{\partial y}-\frac{\partial j_y}{\partial z}\right)+\vec{y}_0\left(\frac{\partial j_x}{\partial z}-\frac{\partial j_z}{\partial x}\right)+\vec{z}_0\left(\frac{\partial j_y}{\partial x}-\frac{\partial j_x}{\partial y}\right). \qquad (2.4)$$

Итак, второе векторное уравнение (1.44) принимает вид системы следующих скалярных уравнений:

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2}=\frac{\partial j_y}{\partial z}-\frac{\partial j_z}{\partial y},$$
$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2}=\frac{\partial j_z}{\partial x}-\frac{\partial j_x}{\partial z}, \qquad (2.5)$$
$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2}=\frac{\partial j_x}{\partial y}-\frac{\partial j_y}{\partial x}. \qquad (2.5)$$

Переходя к псевдодвумерной задаче, необходимо учесть, что зависимость всех функций от z в плоскости XOY отсутствует, сторонний ток имеет только z-компоненту, которая зависит только от x и y. Тогда в системе координатных уравнений (2.3) и (2.5) исчезнут производные по координате z. Производные функций, описывающих сторонние источники по продольной координате, обратятся в ноль в силу сделанных выше предположений. В таком случае координатные уравнения для электрического и магнитного полей примут вид:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial x},\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial y},\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2}=0; \qquad (2.6)$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2}=-\frac{\partial j_z}{\partial y},\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2}=\frac{\partial j_z}{\partial x},\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2}=0. \qquad (2.7)$$

Таким образом, в псевдодвумерном случае искомые функции находятся только в зависимости от x и y, а уравнений, тем не менее, остается три. Граничные условия для случая декартовых координат определены формулами (1.45), (1.46), представленными в пп.1.3.

www.nilem.ru

Рассмотренный выше подход может быть применен и в случае, если моделируемое устройство (конструктивный элемент устройства) обладает осевой симметрией. Случай осевой симметрии характерен для обмоток силовых трансформаторов. Сторонние источники так же, как и в предыдущем случае, определены в разрывной области *D*. По очевидным причинам в данном случае целесообразно применить цилиндрическую систему координат. Сторонними источниками в этом случае являются функции вида $j_\varphi(r,z)$ или $j_r(r,z)+j_z(r,z)$, при этом ни источники, ни искомые функции не зависят от координаты φ. В цилиндрических координатах градиент и оператор Лапласа имеют вид [104]:

$$\operatorname{grad}\rho=\vec{r}_0\frac{\partial\rho}{\partial r}+\frac{\vec{\varphi}_0}{r}\frac{\partial\rho}{\partial\varphi}+\vec{z}_0\frac{\partial\rho}{\partial z}, \tag{2.8}$$

$$\nabla^2\vec{E}=\vec{r}_0\nabla^2E_r+\vec{\varphi}_0\nabla^2E_\varphi+\vec{z}_0\nabla^2E_z, \tag{2.9}$$

$$\nabla^2E_{r,\varphi,z}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_{r,\varphi,z}}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2E_{r,\varphi,z}}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2E_{r,\varphi,z}}{\partial z^2}. \tag{2.10}$$

С учетом (1.8)-(1.10) векторное уравнение (1.43) в координатной форме будет выглядеть как система:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_r}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2E_r}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2E_r}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial r},\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_\varphi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2E_\varphi}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2E_\varphi}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial\varphi},\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2E_z}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2E_z}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial\rho}{\partial z}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Ротор в цилиндрических координатах определяется выражением [104]:

$$\operatorname{rot}\vec{j}=\frac{\vec{r}_0}{r}\left(\frac{\partial j_z}{\partial\varphi}-r\frac{\partial j_\varphi}{\partial z}\right)+\vec{\varphi}_0\left(\frac{\partial j_r}{\partial z}-\frac{\partial j_z}{\partial r}\right)+\frac{\vec{z}_0}{r}\left(\frac{\partial}{\partial r}(rj_\varphi)-\frac{\partial j_r}{\partial\varphi}\right). \tag{2.12}$$

С учетом (2.12) векторное уравнение второго порядка (1.44) в скалярной форме преобразуется к системе:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_r}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2H_r}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2H_r}{\partial z^2}=\frac{\partial j_\varphi}{\partial z}-\frac{1}{r}\frac{\partial j_z}{\partial\varphi},\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_\varphi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2H_\varphi}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2H_\varphi}{\partial z^2}=\frac{\partial j_z}{\partial r}-\frac{\partial j_r}{\partial z},\\
&\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2H_z}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2H_z}{\partial z^2}=\frac{1}{r}\left(\frac{\partial j_r}{\partial\varphi}-\frac{\partial}{\partial r}(rj_\varphi)\right).
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Переходя к псевдодвумерной задаче, получим системы координатных дифференциальных уравнений следующего вида:

www.nilem.ru

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_r}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 E_r}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial \rho}{\partial r},$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial z^2}=0, \qquad (2.14)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial E_z}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2}=\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial \rho}{\partial z};$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_r}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2}=\frac{\partial j_\varphi}{\partial z},$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial z^2}=0, \qquad (2.15)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_z}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rj_\varphi).$$

Системы уравнений (1.14) и (1.15) записаны в предположении, что модель возбуждается азимутальным током (ось аппликат коаксиальна обмотке). Для случая, когда вектор стороннего тока лежит в плоскости чертежа, соответствующим образом изменятся правые части уравнений для магнитного поля.

В отличие от декартовых координат граничные условия в цилиндрических координатах требуют отдельного рассмотрения, так как их вид неочевиден.

Для формулировки граничных условий, определим вектор плотности поверхностного тока (смысл которого имеет производная $\frac{\partial i}{\partial l}$ в правой части (1.46)) применительно к предпосылкам, из которых получены системы (2.14) и (2.15), следующим образом:

$$I\cdot\vec{\varphi}_0 = 2\pi\cdot a\cdot j_S(r,z)\,, \qquad (2.16)$$

где $I = j_\varphi(r,z)\pi\cdot a^2$; $a-$радиус провода обмотки.

Выражая из (2.16) плотность поверхностного тока получим:

$$\vec{j}_S = \vec{\varphi}_0 j_\varphi(r,z)\frac{a}{2}\,. \qquad (2.17)$$

Вектор нормали между элементами определяется выражением:

$$\vec{n}_0 = \vec{r}_0 n_r + \vec{z}_0 n_z\,. \qquad (2.18)$$

Далее запишем условия, которым должно удовлетворять решение на границах конечных элементов. Граничное условие, связывающее векторы напряженности электрического поля при переходе через границу между $(i-1)-$ым и $i-$ым элементами имеет вид:

www.nilem.ru

$$\varepsilon_{i-1}\vec{n}_0\vec{E}_{i-1} - \varepsilon_i\vec{n}_0\vec{E}_i = \frac{C_{i-1,i}}{\varepsilon_0}\frac{\partial^2 U}{\partial r \partial z}, \qquad (2.19)$$

где U – приложенное к границе напряжение (разносить потенциалов); $C_{i-1,i}$ – относительная емкость элементов.

Производная в (2.19) может быть заменена отношением конечных разностей:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r \partial z} = \frac{\Delta_{i-1,i}\ U}{\Delta_{i-1,i} r \cdot \Delta_{i-1,i} z}, \qquad (2.20)$$

где приращения $\Delta_{i,j}\ \xi = \xi_i - \xi_j$ - разности значений параметра ξ при переходе через границу между элементами.

Граничное условие для магнитного поля с учетом введенного (2.17) поверхностного тока будет иметь вид:

$$2\left[\vec{n}_0, \vec{H}_{i-1} - \vec{H}_i\right] = \vec{\varphi}_0 \cdot j_\varphi \cdot a\,. \qquad (2.21)$$

Итак, проведенные выше выкладки позволяют вполне определить краевую задачу в координатной форме.

2.1.2. Выбор и обоснование вида аппроксимирующего элемента и порядка интерполяционного полинома

При численной реализации метода конечных элементов форма аппроксимирующего элемента, вообще говоря, может быть различной. Однако, выбираемые элементы должны удовлетворять ряду очевидных требований [139], которые применительно к двумерному случаю могут быть сформулированы в виде:

- элемент должен представлять собой фигуру, образованную замкнутой ломаной линией;

- каждый из пары соседних элементов должен иметь хотя бы одну вершину, не принадлежащую другому элементу;

- совокупность элементов должна обеспечивать простоту нумерации узлов при обеспечении минимальной ширины полосы главной матрицы СЛАУ, получаемой из исходных дифференциальных уравнений.

Последнее требование, очевидно, выполняется при минимальном количестве вершин у фигуры, удовлетворяющей первым двум требованиям.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразным представляется выбор элементов треугольной формы (симплекс-элементов [139]). Такой элемент в обобщенных ортогональных координатах изображен на рис.2.2. Следует отметить, что на рис.2.2 показан элемент в собственной системе координат. Координатная система, связанная с моделью в целом (глобальная система), вообще говоря, отличается от собственной как видом, так и ориентацией базиса [128].

www.nilem.ru

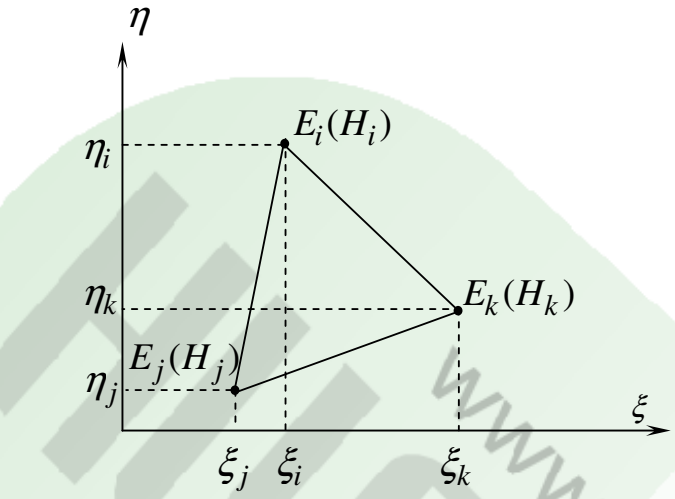


Рис.2.2. Симплекс-элемент в собственной системе координат

На рис.2.2 показаны обобщенные координаты ξ, η и третья, исключаемая из уравнений при переходе к псевдодвумерному случаю, координата θ.

i, j, k – номера элементов,

$E_i, E_j, E_k, H_i, H_j, H_k$ – узловые значения неизвестных величин, подлежащие определению.

Как отмечалось ранее, в пределах каждого элемента решение дифференциального уравнения аппроксимируется функцией специального вида. Как правило, для этих целей используются степенные полиномы [139]. Вид и порядок интерполяционного полинома (интерполянта) определяются из априорных соображений о характере решения. Поскольку в нашем случае искомое ЭМП имеет квазистационарных характер, можно с уверенностью предположить, что линейные размеры элементов окажутся значительно меньше пространственного периода изменения поля. Кроме того, решение будет в большинстве случаев монотонно убывать с увеличением расстояния от области определения сторонних источников. Поэтому удобно в качестве интерполянтов использовать линейные алгебраические полиномы следующего вида:

$$E_{\xi,\eta,\theta} = a_{0_{\xi,\eta,\theta}} + a_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi + a_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta\ , \tag{2.22}$$

$$H_{\xi,\eta,\theta} = b_{0_{\xi,\eta,\theta}} + b_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi + b_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta\ . \tag{2.23}$$

Выражения (2.21) и (2.23) представляют собой интерполяционные полиномы для электрического и магнитного поля, соответственно.

Граничные условия в местной системе координат порождают следующие наборы уравнений для электрического и магнитного полей, соответственно:

$$\begin{aligned} E_{i\xi,\eta,\theta} &= a_{0_{\xi,\eta,\theta}} + a_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi_i + a_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta_i, \\ E_{j\xi,\eta,\theta} &= a_{0_{\xi,\eta,\theta}} + a_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi_j + a_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta_j, \\ E_{k\xi,\eta,\theta} &= a_{0_{\xi,\eta,\theta}} + a_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi_k + a_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta_k; \end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned} H_{i\xi,\eta,\theta} &= b_{0_{\xi,\eta,\theta}} + b_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi_i + b_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta_i, \\ H_{j\xi,\eta,\theta} &= b_{0_{\xi,\eta,\theta}} + b_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi_j + b_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta_j, \\ H_{k\xi,\eta,\theta} &= b_{0_{\xi,\eta,\theta}} + b_{1_{\xi,\eta,\theta}}\xi_k + b_{2_{\xi,\eta,\theta}}\eta_k. \end{aligned} \tag{2.25}$$

www.nilem.ru

Индекс каждой из величин, входящих в выражения (2.24) и (2.25), последовательно пробегает значения ξ, η, θ (данный прием использован для сокращения записи). Коэффициенты, входящие в записанные выражения, в конечном счете, подлежат определению при численной реализации МКЭ.

Далее осуществляется переход к глобальным координатам и композиция элементов в модель. Данная процедура описана в Приложении 1.

Рассмотренная реализация МКЭ также использовалась при моделировании подземных ЛЭП (см. подраздел 1.3).

2.2. Построение модели трансформатора и трансформаторной подстанции

Первым этапом при построении модели трансформатора является электротехнический расчет, определяющий распределение сторонних токов в обмотках, проводимый методами теории электрических цепей с взаимной индуктивностью.

Учитывая, что все трехфазные трансформаторы содержат обмотки, между которыми существует взаимная связь, рассмотрим выражения, связывающие первичный и вторичный токи, принимая во внимание то обстоятельство, что обмотки рассматриваемого устройства не имеют непосредственной гальванической связи.

Две гальванически развязанные обмотки трансформатора, пронизанные общим магнитным потоком в магнитопроводе, показаны на рис.2.3.

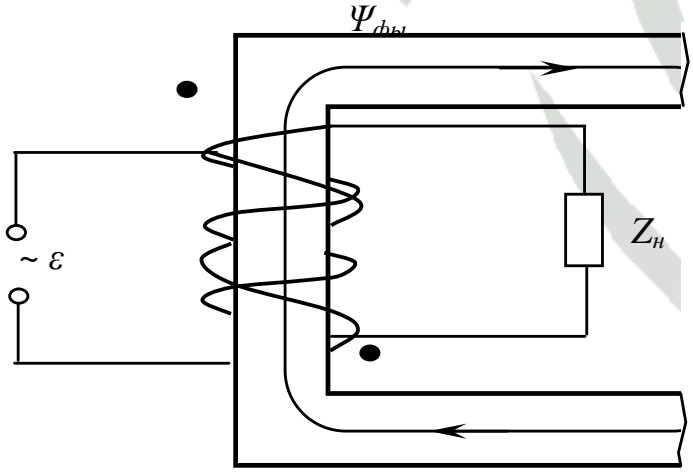


Рис.2.3. Система двух гальванически независимых магнитно-связанных обмоток трехфазного трансформатора

На рис.2.3 внутренняя обмотка возбуждается переменной гармонической ЭДС, а внешняя обмотка имеет нагрузку, вообще говоря, комплексную. Символ «•» обозначает одноименные зажимы, относительно которых магнитные потоки складываются при сонаправленных токах.

www.nilem.ru

Одноименные зажимы обладают следующими свойствами: повышение потенциала на одноименном зажиме одной обмотки при наличии тока, возрастающего во времени и направленного к соответствующему зажиму другой обмотки, приводит к соответствующему повышению потенциала на другом одноименном зажиме [134].

При возбуждении одной из обмоток переменной ЭДС во второй обмотке возникнет ЭДС индукции, определяемая общим магнитным потоком, пронизывающим витки обеих обмоток. Однако, при наличии магнитопровода, выполненного из материала с большим значением магнитной проницаемости, не весь магнитный поток замыкается в магнитопроводе – часть его все же рассеивается в пространстве. Обозначим ψ_{1S}, ψ_{2s} – потоки рассеяния, ψ_{21} - поток взаимной индукции, создаваемый током I_1 и сцепленный с витками вторичной обмотки ω_2, ψ_{12} - поток взаимной индукции, создаваемый током I_2 и сцепленный с витками первичной обмотки ω_1.

Собственные магнитные потоки, сцепленные с первичной и вторичной обмотками, соответственно равны: $\psi_{11} = \psi_{21} + \psi_{1S}$ и $\psi_{22} = \psi_{12} + \psi_{2S}$. При этом индуктивности первой и второй обмоток, а также коэффициент взаимоиндукции, очевидно, можно определить следующим образом:

$$L_1 = \frac{\omega_1 \psi_1}{i_1},\ L_2 = \frac{\omega_2 \psi_2}{i_2},\ M = \frac{\omega_2 \psi_{21}}{i_1} = \frac{\omega_1 \psi_{12}}{i_2}. \qquad (2.26)$$

Индуктивности рассеяния обоих обмоток находятся по формулам:

$$L_{1S} = \frac{\omega_1 \psi_{1S}}{i_1} \text{ и } L_{2S} = \frac{\omega_2 \psi_{2S}}{i_2}, \qquad (2.27)$$

или с учетом выше записанных выражений (2.27) можно записать:

$$\begin{aligned} L_{1S} &= \frac{\omega_1(\psi_{11} - \psi_{21})}{i_1} = \frac{\omega_1 \psi_{11}}{i_1} - \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_2 \psi_{21}}{i_1} = L_1 - \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot M, \\ L_{2S} &= \frac{\omega_2(\psi_{22} - \psi_{12})}{i_2} = \frac{\omega_2 \psi_{22}}{i_2} - \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_1 \psi_{12}}{i_2} = L_2 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot M. \end{aligned} \qquad (2.28)$$

Выражая из (2.28) собственные индуктивности обмоток, получим:

$$L_1 = L_{1S} + \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot M,\ L_2 = L_{2S} + \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot M. \qquad (2.29)$$

Напряжения на первичной и вторичной обмотках U_1 и U_2 определяются источником и эквивалентной нагрузкой трансформатора, соответственно.

Токи в обмотках в первичной и вторичной обмотках силового трансформатора определяются следующими выражениями:

www.nilem.ru

$$I_1 = \frac{U_1 - U_2}{r_1 - r_2 - i\omega(L_1 - L_2)},$$
$$I_2 = \frac{U_1(r_1 + i\omega L_1) - U_2(r_2 + i\omega L_2)}{i\omega M(r_1 - r_2) - \omega^2 M(L_1 - L_2)}. \quad (2.30)$$

Коэффициент магнитной связи, необходимый для расчета напряжений обмоток $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ [134], можно определить с учетом (2.28) следующим образом:

$$K = \frac{M}{\sqrt{(L_{1S} + \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot M)(L_{2S} + \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot M)}} = \frac{M}{\sqrt{M^2 + L_{1S}L_{2S} + M(\frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot L_{2S} + \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot L_{1S})}}. \quad (2.31)$$

В ряде случаев обмотки анализируемых устройств имеют непосредственный гальванический контакт (автотрансформаторы). Система гальванически связанных обмоток показана на рис.2.4.

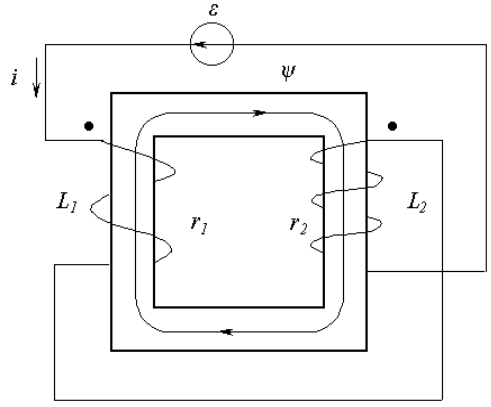


Рис.2.4. Система двух магнитно-связанных обмоток, имеющих контакт

Эквивалентные схемы со взаимными индуктивностями, соответствующие различным взаимным направлениям токов в обмотках для случая гальванически связанных обмоток, показаны на рис.2.5.

Рассмотрим случай, когда токи в обмотках на рис.2.4 имеют одинаковое направление относительно одноименных зажимов, а магнитные потоки самоиндукции и взаимоиндукции складываются. Эквивалентная схема такой магнитной цепи показана на рис.2.5а.

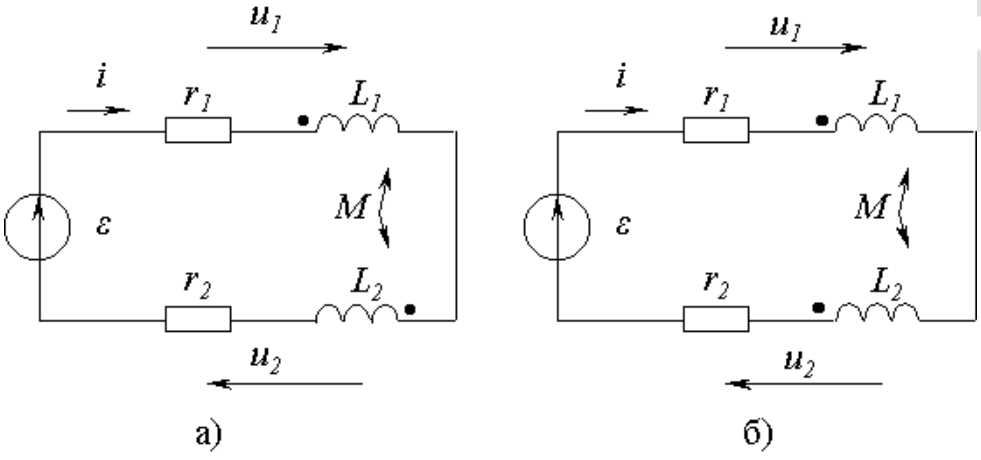


Рис.2.5. Эквивалентные схемы магнитных цепей

www.nilem.ru

Уравнение, записанное по второму правилу Кирхгофа для контура, содержащего возбуждение, будет иметь вид:

$$-\varepsilon = u_1 + u_2 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \qquad (2.32)$$

где u_1 и u_2, i_1 и i_2 – соответственно, напряжения и токи в первичной и вторичной обмотках; r_1 и r_2 – омические сопротивления первичной и вторичной обмоток; L_1 и L_2 – собственные значения индуктивностей обмоток; M – взаимная индуктивность индуктивно связанных обмоток.

Напряжения на зажимах обмоток можно найти следующим образом:

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \qquad (2.33)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}. \qquad (2.34)$$

Принимая равенство токов в обмотках $i_1 = i_2 = i$, выражение (2.32) можно переписать в виде:

$$-\varepsilon = (r_1 + r_2) i + (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt}. \qquad (2.35)$$

Для случая встречного включения обмоток магнитные потоки самоиндукции и взаимоиндукции вычитаются. Эквивалентная схема магнитной цепи для данного случая показана на рис.2.5б. Нетрудно видеть, что выражения для напряжений на зажимах при этом будут иметь вид:

$$u_1 = r_1 i_2 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \qquad (2.36)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}. \qquad (2.37)$$

Запишем (2.36) и (2.37) в виде контурного уравнения, аналогичного (2.35), для контура, содержащего возбуждение:

$$-\varepsilon = (r_1 + r_2) i + (L_1 + L_2 - 2M) \frac{di}{dt}. \qquad (2.38)$$

Итак, перед тем, как приступить к непосредственному решению электродинамической задачи расчета ЭМП силовых трансформаторов, следует произвести электротехнический расчет по рассмотренной выше методике. При реализации МКЭ найденные токи следует считать сторонними источниками ЭМП.

www.nilem.ru

Следующим этапом построения модели трансформаторной подстанции является формирование сетки симплекс-элементов. При этом необходимо максимально соблюсти перечисленные выше требования. Размер элементов и их густота могут варьироваться в зависимости от особенностей моделируемой области. Так, вблизи углов и острий, где структура поля наиболее сложная, необходимо сгущать сетку и уменьшать размер элемента. В любом случае при построении сетки необходимо обеспечить компромисс между временем счета и визуальной гладкостью решения. Пример сетки, аппроксимирующей трехфазный трансформатор, приведен на рис.2.6.

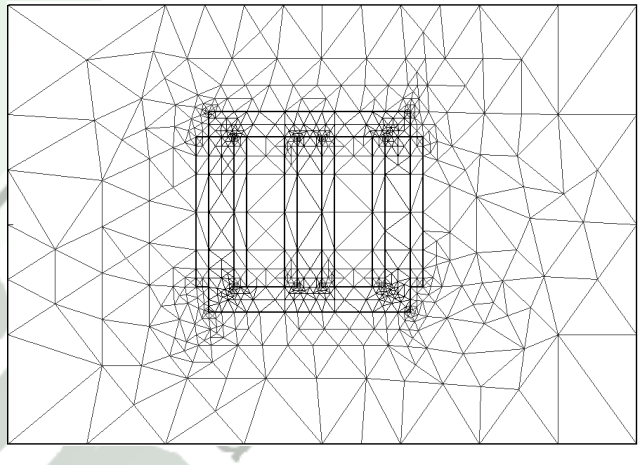


Рис.2.6. Сетка симплекс-элементов на модели трехфазного трансформатора

При анализе электромагнитной обстановки вблизи оборудования трансформаторной подстанции желательно учесть влияние стен и перекрытий помещения на структуру и уровни ЭМП.

Для этого в МКЭ-модель включаются соответствующие элементы с разумной степенью детализации. Предварительно необходимо определить геометрические размеры стен и перекрытий, а также электрофизические параметры материалов, из которых они выполнены.

Ориентировочные параметры некоторых строительных и конструкционных материалов приведены в табл.2.1.

Табл.2.1

Материал	**ε**	**μ**	**σ, См/м**
Кирпич	1	1	10-9
Бетон	1.8	1	10-10
Гипс	2.5	1	10-11
Стекло	5.5	1	10-12
Сталь	1	4000	1.5·107
Алюминий	1	1.000021	3.8·107
Медь	1	0.999991	5.8·107

www.nilem.ru

2.3. Вывод выражений для коэффициентов интерполяционных полиномов методом Галеркина

Как отмечалось ранее, расчет ЭМП при помощи МКЭ сводится, в конечном счете, к определению коэффициентов интерполянтов при заданных источниках и граничных условиях.

Коэффициенты интерполянтов, обеспечивающие требуемую точность аппроксимации, могут быть определены различными методами. Одним из наиболее известных и легко реализуемых является метод Галеркина.

В общем случае в обобщенных координатах уравнения (2.6), (2.7) и (2.14), (2.15) могут быть представлены в виде:

$$\alpha(\xi,\eta)\frac{\partial^2\Phi(\xi,\eta)}{\partial\xi^2}+\beta(\xi,\eta)\frac{\partial^2\Phi(\xi,\eta)}{\partial\eta^2}=F(\xi,\eta)\,, \qquad (2.39)$$

где $\alpha(\xi,\eta)$ и $\beta(\xi,\eta)$ - линейные функции или операторы, зависящие от типа выбранной системы координат; ξ,η - обобщенные координаты; $\Phi(\xi,\eta)$ – обобщенное решение уравнения (компоненты векторов $E_{\xi,\eta,\theta}$ или $H_{\xi,\eta,\theta}$); $F(\xi,\eta)$ – известная функция, определяемая сторонними источниками.

Как отмечалось ранее, в МКЭ решение $\Phi(\xi,\eta)$ аппроксимируется функцией, специфической для каждого элемента вида (2.22) и (2.23), что в общем виде можно представить как приближенное решение:

$$\tilde{\Phi}(\xi,\eta)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{3}A_m^{(n)}(\xi,\eta)\Phi_m\,, \qquad (2.40)$$

Где, так называемая, функция формы глобальной системы координат (см. Приложение 1) $A_m^{(n)}(\xi,\eta)$ имеет смысл базисной функции для разложения (2.40); Φ_1,Φ_2,Φ_3 – узловые значения искомой величины; $\Phi_m=\Phi(\xi_m^{(n)},\eta_m^{(n)})$ – принимают различные значения при различных индексах m; N – максимальный номер элемента.

При аппроксимации решения выражением (2.40) невязка решения определяется выражением [13]:

$$\varepsilon=\alpha(\xi,\eta)\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi^2}+\beta(\xi,\eta)\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\eta^2}-F(\xi,\eta)\,. \qquad (2.41)$$

В методе Галеркина минимизация невязки достигается путем обеспечения ортогональности невязки и каждой базисной функции, то есть требуется выполнение соотношения [13]:

$$\int_D A_m^{(n)}\cdot\varepsilon\cdot dD=0\,, \qquad (2.42)$$

www.nilem.ru

где D - область определения решения; dD – элемент этой области; индекс n принимает различные значения в различных элементах.

Преобразуем (2.42) с учетом (2.39) и (2.40):

$$\int_D A_m^{(n)}(\xi,\eta)\left[\alpha(\xi,\eta)\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi^2}+\beta(\xi,\eta)\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\eta^2}-F(\xi,\eta)\right]dD=0\,. \qquad (2.43)$$

Краевые условия для уравнения (2.39) в общем виде будут выглядеть как:

$$\gamma(\xi,\eta)\tilde{\Phi}_1(\xi,\eta)-\delta(\xi,\eta)\tilde{\Phi}_2(\xi,\eta)=G(\xi',\eta')\,, \qquad (2.44)$$

где ξ',η' – координаты на границе раздела двух элементов; $\gamma(\xi,\eta)$ и $\delta(\xi,\eta)$ - функции, определяющие ориентацию векторов поля относительно границы раздела (тригонометрические функции угла наклона вектора к границе при определении тангенциальных и нормальных составляющих).

Особенности слагаемых, входящих в подынтегральное выражение в (2.43), рассмотрены в Приложении 2.

2.4. Вывод выражения для баланса энергий и оценка точности вычислений

Точность расчетов будем контролировать, сравнивая значения энергии источников и вычисленного поля. Естественно, что большее число элементов, аппроксимирующих модель, обеспечивает лучшую гладкость решения и более точную аппроксимацию, однако при этом существенно возрастает время счета.

Энергию (мощность) источников электрического типа будем оценивать следующим образом:

$$W_{\text{ист}}=\sum_{k=1}^{K}U_kI_k\,, \qquad (2.45)$$

где U_k, I_k - напряжение и ток, подведенные к соответствующей паре полюсов устройства; K – число пар полюсов, включая нагруженные.

Энергию вычисленного поля определим непосредственно, используя теорему Пойнтинга [36]:

$$W=\frac{d}{dt}\int_V\left(\frac{\vec{E}\vec{D}}{2}+\frac{\vec{H}\vec{B}}{2}\right)dV+\int_V\sigma E^2dV+\int_{S_V}\left[\vec{E},\vec{H}\right]dS_V \qquad (2.46)$$

Первое слагаемое в (2.46) в стационарном приближении положим равным нулю вследствие того, что функции напряженностей электрического и магнитного полей изменяются сравнительно медленно, что, в свою очередь, обуславливает существенную малость производной в первом слагаемом.

Омические потери определим следующим образом:

www.nilem.ru

$$\int_V \sigma E^2 dV = \sum_{n=1}^{N} \sigma^{(n)} \int_{V^{(n)}} \left[\left(E_\xi^{(n)}\right)^2 + \left(E_\eta^{(n)}\right)^2 + \left(E_\theta^{(n)}\right)^2 \right] d\xi d\eta d\theta \,, \qquad (2.47)$$

где $\sigma^{(n)}$ – проводимость материала в *(n)*-м элементе; $V^{(n)}$ – объем *(n)*-го элемента; N – общее число элементов.

Последний интеграл в (2.46) можно представить как:

$$\int_{S_V} \left[\vec{E}, \vec{H}\right] dS_V = \sum_{n=1}^{N} \int_{S_V^{(n)}} \left[\vec{\xi}_0 \left(E_\eta^{(n)} H_\theta^{(n)} - E_\theta^{(n)} H_\eta^{(n)}\right) + \vec{\eta}_0 \left(E_\theta^{(n)} H_\xi^{(n)} - E_\xi^{(n)} H_\theta^{(n)}\right) + \right.$$
$$\left. + \vec{\theta}_0 \left(E_\xi^{(n)} H_\eta^{(n)} - E_\eta^{(n)} H_\xi^{(n)}\right) \right] \vec{n}_0^{(n)} dS_V^{(n)} . \qquad (2.48)$$

В (2.48) введены следующие обозначения: $\vec{n}_0^{(n)}$ – орт нормали к поверхности (*n*)-го элемента; $dS_V^{(n)}$ – определяется исходя из конкретного типа системы координат; (2.48) записано в предположении, что $\left[\vec{\xi}_0, \vec{\eta}_0\right] = \vec{\theta}_0$, то есть при правовинтовой ориентации системы координат.

Таким образом, получим выражение для оценки ошибки вычисления:

$$\Delta = \sum_{k=1}^{K} U_k I_k - \sum_{n=1}^{N} \left\{ \sigma^{(n)} \int_{V^{(n)}} \left[(E_\xi^{(n)})^2 + (E_\eta^{(n)})^2 + (E_\theta^{(n)})^2 \right] d\xi\, d\eta\, d\theta + \right.$$
$$+ \int_{S_V^{(n)}} \left[\vec{\xi}_0 \left(E_\eta^{(n)} H_\theta^{(n)} - E_\theta^{(n)} H_\eta^{(n)}\right) + \vec{\eta}_0 \left(E_\theta^{(n)} H_\xi^{(n)} - E_\xi^{(n)} H_\theta^{(n)}\right) + \qquad (2.49)$$
$$\left. + \vec{\theta}_0 \left(E_\xi^{(n)} H_\eta^{(n)} - E_\eta^{(n)} H_\xi^{(n)}\right) \right] \vec{n}_0^{(n)} dS_V^{(n)} \right\}.$$

При практических расчетах удобно оценивать величину относительной погрешности расчета, вычисляемую по следующей формуле [13]:

$$\xi = \frac{|\Delta|}{\sum_{k=1}^{K} U_k I_k} . \qquad (2.50)$$

Оценка (2.50) позволяет принимать решение о количестве и структуре элементов, составляющих модель технического средства.

2.5. Учет особенностей структуры матричного уравнения, возникающего в методе конечных элементов

Интерполяционные функции в нашем случае имеют кусочно-линейный характер, поэтому все интегралы в (2.43) можно представить как сумму интегралов для отдельных элементов (так как операция интегрирования тоже линейна [104], то есть интеграл суммы равен сумме интегралов):

www.nilem.ru

$$\sum_{n=1}^{N} I^{(n)} = 0 . \qquad (2.51)$$

При этом (2.43) порождает систему линейных алгебраических уравнений следующего вида [139]:

$$\|K\| \times \|\Phi\| = \|F\| , \qquad (2.52)$$

где $\|K\|$ - матрица, число строк в которой равно числу элементов, а число столбцов – на единицу больше числа узлов. Анализ выражений вида (2.43) показывает, что матрица $\|K\|$ сильно разряжена [156], то есть содержит много нулей и, кроме того, имеет диагональную структуру, аналогичную приведенной ниже:

$$\|K\| = \begin{Vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{41} & K_{42} & K_{43} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{51} & K_{52} & K_{53} \end{Vmatrix} . \qquad (2.53)$$

Для вычисления обратной матрицы, очевидно, неприменимы прямые подходы, а целесообразно использование специальных методов. Одним из наиболее распространенных итерационных методов для обращения разреженных матриц диагональной структуры является метод LDLT факторизации [145]. В данном методе диагональная матрица $\|K\|$ представляется в виде произведения нижней треугольной, диагональной и верхней треугольной матриц:

$$\|K\| = \|L\| \times \|D\| \times \|U\| . \qquad (2.54)$$

Разложение (2.54) справедливо, если $\|K\|$ и ее левые главные подматрицы не вырождены [145], что справедливо для (2.53) [156].

В подобных случаях, так как $\|K\|$ симметрична, верхняя треугольная матрица является ничем иным, как транспонированной нижней треугольной матрицей, то есть [145]:

$$\|U\| = \|L\|^T . \qquad (2.55)$$

Таким образом,

$$\|K\| = \|L\| \times \|D\| \times \|L\|^T . \qquad (2.56)$$

Уравнение (2.56), используя разложение (2.54), можно записать как:

$$\|L\| \times \left[\|D\| \times \|L\|^T \times \|\Phi\| \right] = \|F\| . \qquad (2.57)$$

www.nilem.ru

Итак, сначала решается уравнение (2.56) относительно матрицы $\|D\|\times\|L\|^T\times\|\Phi\|$, а затем находится матрица $\|\Phi\|$. Элементы матриц $\|D\|$ и $\|K\|$ вычисляются по следующим формулам [145]:

$$d_{ii} = k_{ii} - \sum_{m=1}^{i-1} l_{im}^2 d_{mm},\ l_{ii} = 1,$$
$$l_{ij} = \frac{1}{d_{jj}}\left[k_{ij} - \sum_{m=1}^{j-1} l_{im} l_{jm} d_{mm}\right],\ i > j,\ l_{ij} = 0,\quad i < j. \tag{2.58}$$

Элементы матрицы $\|C\| = \|D\|\times\|L\|^T\times\|\Phi\|$ определяются как:

$$c_i = в_i - \sum_{n=1}^{i-1} l_{in} c_n\,. \tag{2.59}$$

Далее находятся элементы неизвестной матрицы:

$$\Phi_i = \frac{1}{d_{ii}}\left[c_i - \sum_{m=i+1}^{n} d_{ii} l_{mi} \Phi_m\right]. \tag{2.60}$$

Предложенная методика численного решения неоднородного дифференциального уравнения второго порядка эллиптического типа экономична и легко реализуема на ЭВМ. Алгоритм расчета ЭМП при помощи МКЭ приведен на рис.2.7.

При вычислении обратной матрицы возможно использование иных методов, учитывающих свойство диагональной разреженности. Данным вопросам посвящено значительное количество публикаций, например, [145, 156].

Собственно величины электрического и магнитного полей находятся из набора данных (2.60) очевидным образом.

2.6. Расчет уровней ЭМП встроенной трансформаторной подстанции

В настоящем разделе, в качестве примера использования предложенной выше методики, приведены результаты расчета уровней электромагнитных полей встроенной трансформаторной подстанции, расположенной на первом этаже офисного здания.

Предметом исследования являются электромагнитные поля, создаваемые оборудованием встроенной трансформаторной подстанции офисного центра (г. Самара). Анализ полей проводился в технических помещениях и помещениях, к ним примыкающих первого и второго этажей, а также в офисных помещениях третьего и четвертого этажей. Расчет полей осуществляется с учетом наличия экранирующих перекрытий для различных способов загрузки трансформаторного оборудования.

www.nilem.ru

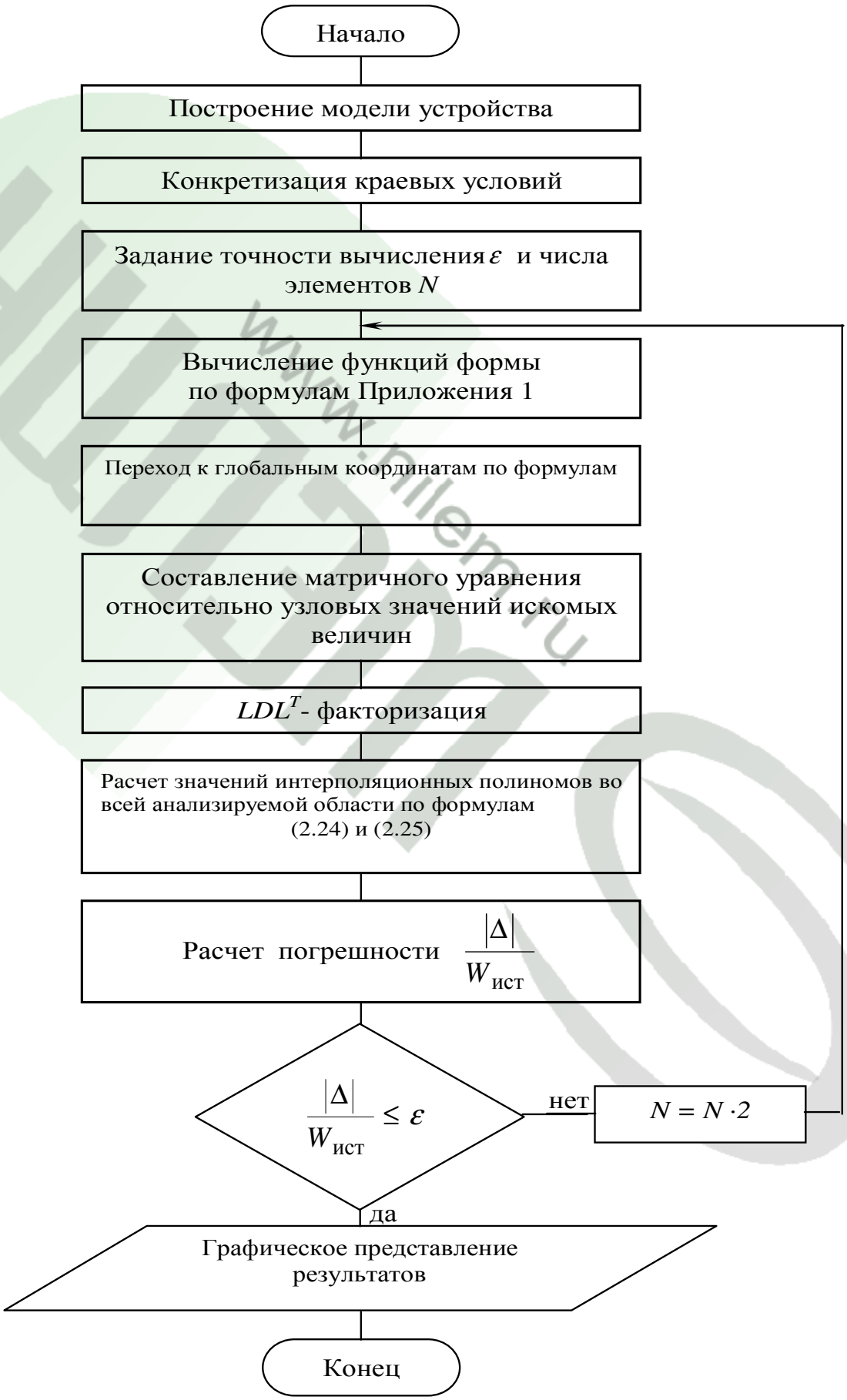


Рис.2.7. Алгоритм расчета ЭМП методом конечных элементов

www.nilem.ru

Трансформаторная подстанция исследуемого офисного центра оборудована двумя сухими трансформаторами ТСЗ-630/10/0.4 производства ЗАО «Электрофизика», каждый из которых рассчитан на номинальную нагрузку 630 кВА. Внешний вид и габаритный чертеж трансформатора ТСЗ-630/10/0.4 показан на рис. 2.8.

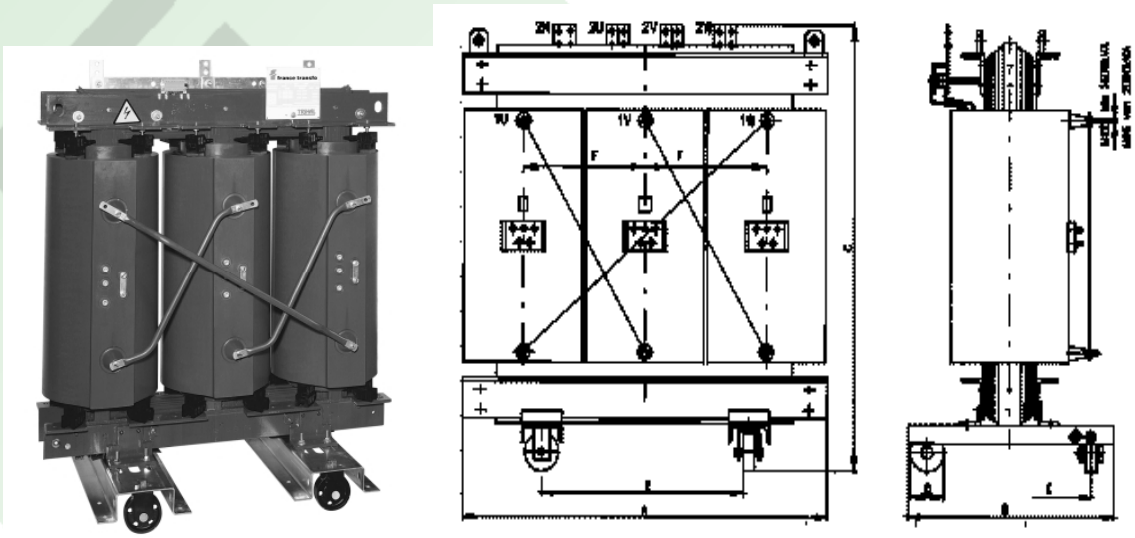


Рис. 2.8. Внешний вид и размеры трансформатора ТСЗ-630/10/0,4

Трансформаторная подстанция по высоте занимает два этажа. План первого этажа с трансформаторной подстанцией приведен на рис. 2.9. Места расположения трансформаторов обозначены символами Т1 и Т2.

Согласно сведениям, приведенным в документации на объект, трансформаторы Т1 и Т2 могут работать в трех вариантах загрузки:

- загружен один из трансформаторов в то время, как второй установлен в качестве резервного;
- первый трансформатор, рассчитан на номинальную нагрузку, второй загружен на 10% от номинала;
- оба трансформатора загружены полностью.

В соответствии с приведенными планами построена трехмерная модель трансформаторной подстанции со смежными помещениями на сетке симплекс-элементов для расчета по методу конечных подобластей. В модель включены также помещения первого, второго, третьего, четвертого этажей. Общий вид модели приведен на 2.10 (для удобства некоторые стены и перекрытия не показаны).

На первом и втором этажах здания рядом с трансформаторной подстанцией расположены офисные помещения. Офисные помещения также занимают этажи, расположенные выше.

Перекрытия, отделяющие трансформаторную подстанцию от смежных помещений, покрыты металлической сеткой с квадратной ячейкой размером 100х100 мм^2. Краевые линии сеток стен и потолка имеют надежный гальванический контакт друг с другом.

www.nilem.ru

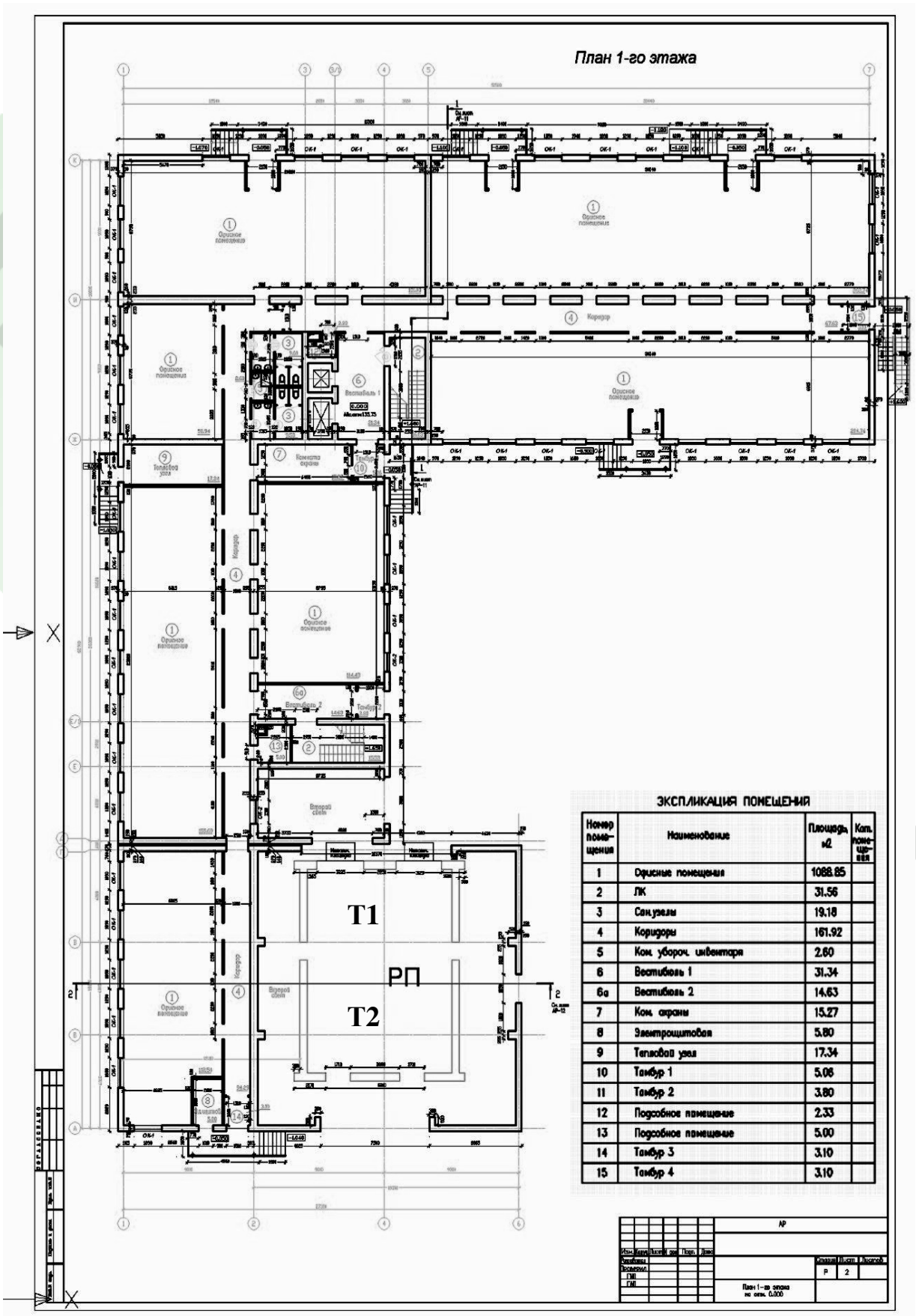


Рис. 2.9. План первого этажа офисного центра

www.nilem.ru

Полученный таким образом замкнутый экран соединен с контуром заземления трансформаторной подстанции. Данное обстоятельство учтено при построении модели.

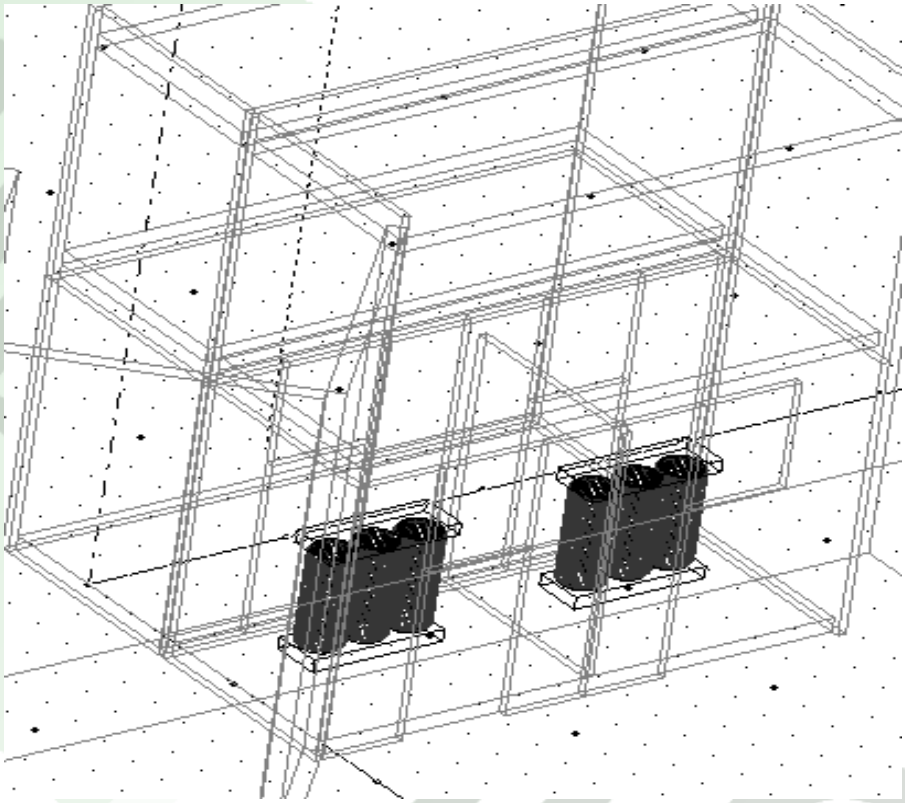


Рис.2.10. Модель трансформаторной подстанции

При вычислении магнитного поля учтена нелинейная зависимость между напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией в магнитопроводе. График этой зависимости приведен на рис.2.11 (аналог Новолипецкой стали).

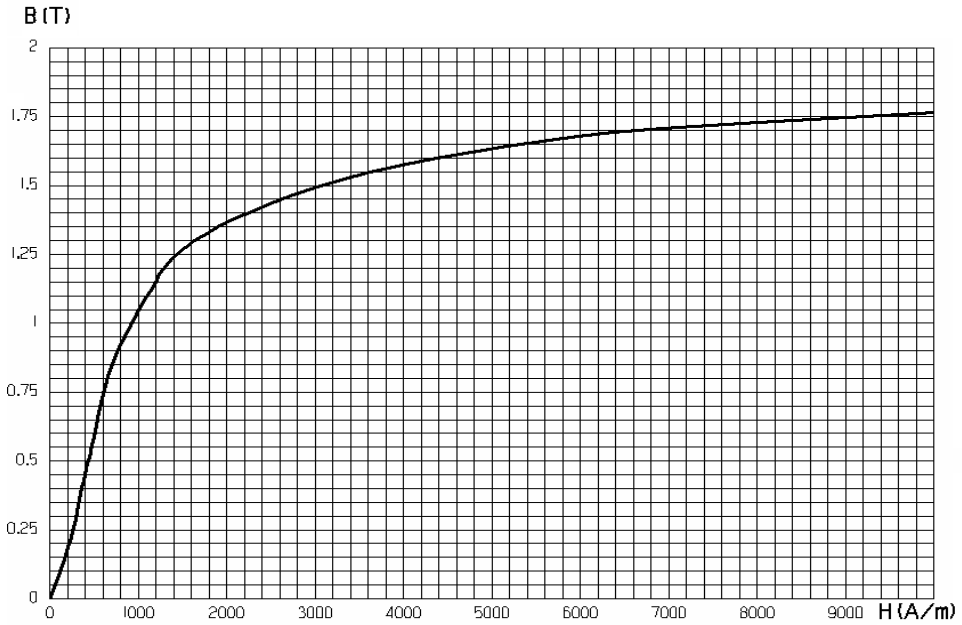


Рис.2.11. Характеристическая кривая материала магнитопровода трансформатора

www.nilem.ru

Результаты тестового расчета магнитного поля отдельного трансформатора приведены на рис.2.12. Цветная шкала показывает распределение уровней магнитной индукции. На рис.2.13 показано распределение силовых линий магнитного поля.

Из рисунков видно, что, несмотря на достаточно грубую аппроксимацию (малым числом элементов) гладкость решения вполне удовлетворительна. На рис.2.13 отчетливо видно рассеяние магнитного поля вблизи торцов магнитопровода и его сгущение в сердечнике. При расчетах предполагалось, что трансформатор работает в режиме нагрузки 200 кВА.

Результаты расчета электрического поля в помещении трансформаторной подстанции и помещениях второго этажа приведены на рис.2.14. Картина распределения напряженности электрического поля построена для вертикального сечения модели для условий номинальной загрузки обоих трансформаторов.

Из приведенных результатов видно, что электрическое поле концентрируется вблизи высоковольтных вводов и корпусов трансформаторов. При этом в самой трансформаторной уровни поля достаточно высоки (до 60 кВ/м). Однако на третьем этаже и выше, а также в прилегающих помещениях, уровень напряженности электрического поля невелик, значительно ниже предельно допустимых уровней (0,5 кВ/м) и составляет примерно 0,2 кВ/м. Значительное ослабление электрического поля обусловлено экранирующим действием стен помещения, покрытых сетчатым экраном. Поскольку уровни напряженности электрического поля в офисных и жилых помещениях удовлетворяют требованиям СанПиН, то дальнейший анализ электрических полей трансформаторной подстанции для целей контроля экологической обстановки представляется нецелесообразным.

Магнитное поле рассчитывалось на первом, втором, третьем и четвертом этажах в горизонтальных сечениях, в плоскостях отстоящих на 0,5 и 1,5 м от уровня поля. Расчетные плоскости выбраны согласно рекомендациям нормативной документации.

При расчете использовались следующие сведения о конструкциях трансформаторов: число витков трансформатора ТСЗ-630/10/0.4 НН - 60 витков; средняя толщина обмотки трансформатора ТСЗ-630/10/0.4: ВН – 350 мм, материал магнитопровода - сталь ГОСТ 21427.1-83, характеристика намагничивания которой приведена на рис.2.11.

Расчетные плоскости первого этажа с построенными распределениями поля показаны на рис.2.15. При расчетах предполагалась частичная загрузка обоих трансформаторов. На рисунке отчетливо видна концентрация поля вблизи корпусов нагруженных трансформаторов (левый трансформатор несет токовую нагрузку в два раза большую, чем правый).

www.nilem.ru

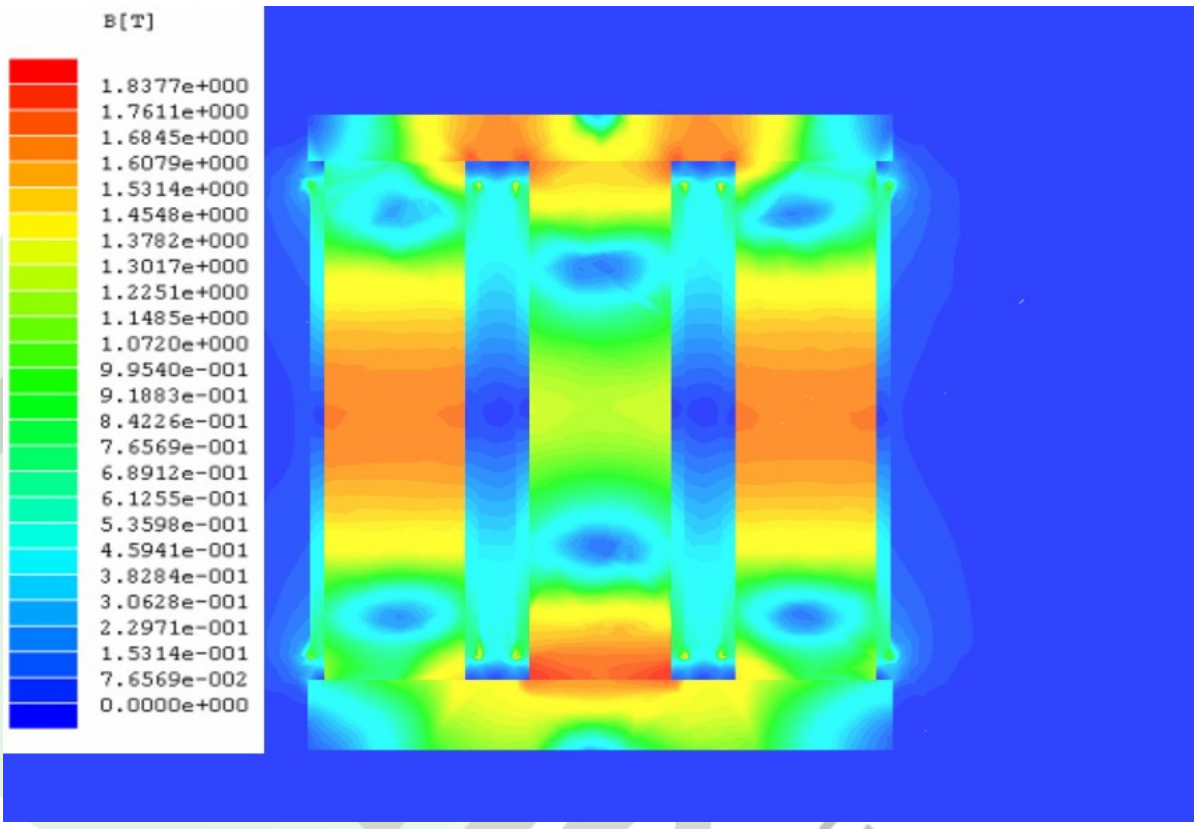


Рис.2.12. Распределение магнитной индукции силового трансформатора

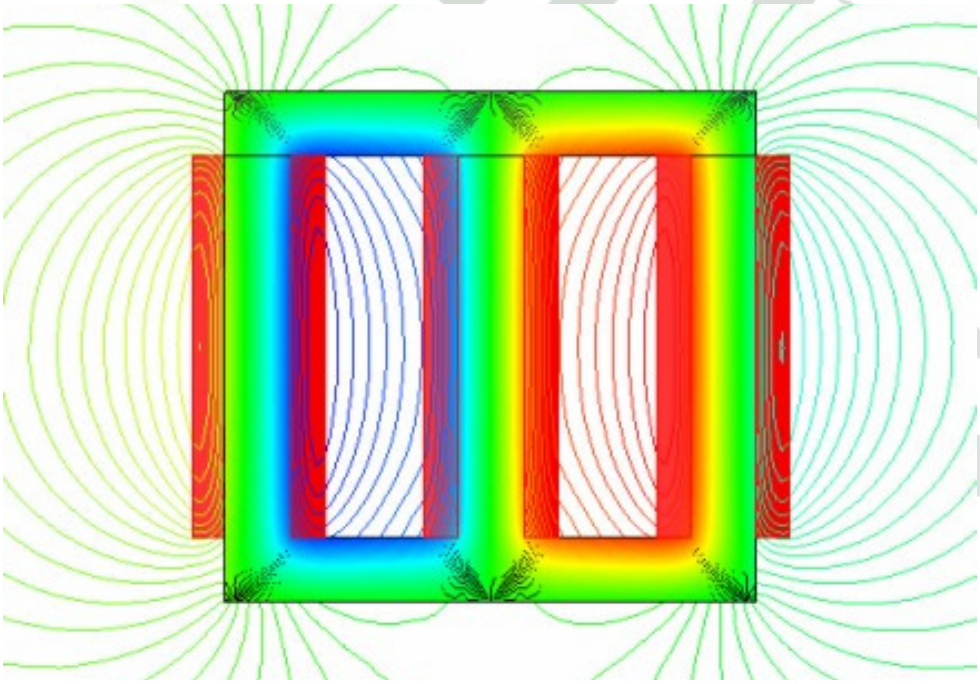


Рис.2.13. Магнитные силовые линии силового трансформатора

www.nilem.ru

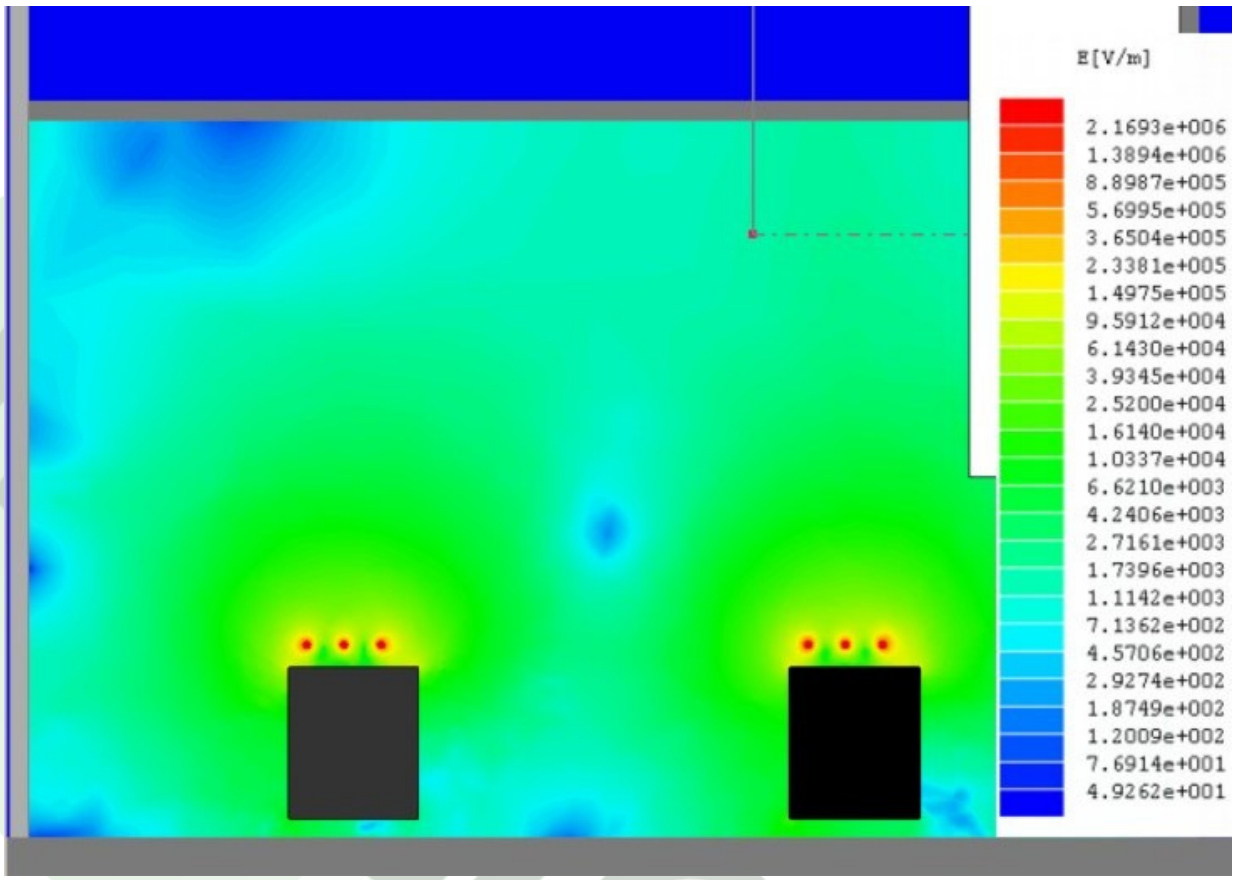


Рис.2.14. Распределение электрического поля в помещении трансформаторной подстанции

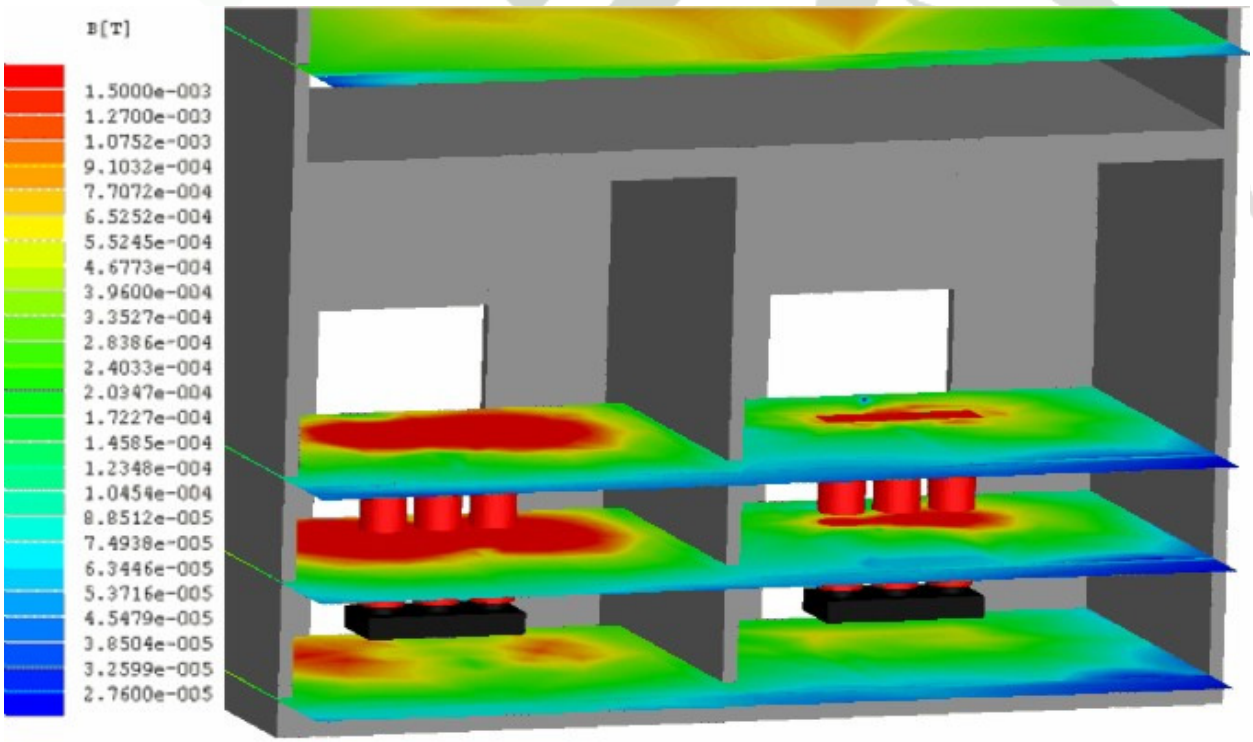


Рис.2.15. Распределение магнитного поля в расчетных плоскостях в помещении трансформаторной подстанции

www.nilem.ru

В качестве иллюстрации численного эксперимента на рис.2.18 и 2.19 показаны картины распределения индукции магнитного поля на некоторых этажах в расчетных плоскостях для случая загрузки одного трансформатора. Подобные распределения были построены для всех этажей для различных загрузок трансформаторов. Далее проводился комплексный анализ электромагнитной обстановки, в результате которого установлено:

- электрическое поле, создаваемое элементами трансформаторной подстанции, в офисных помещениях здания не превышает ПДУ, установленных для производственных (5 кВ/м) и жилых (0.5 кВ/м) помещений;
- уровни магнитного поля, создаваемого силовыми трансформаторами, в офисных помещениях первого второго, третьего и выше этажей не превышают предельно допустимого уровня, установленного для производственных помещений (100 мкТл) в случае работы только одного трансформатора на полной нагрузке или с частичной загрузкой второго (10% от максимальной);
- в случае полной загрузки обоих трансформаторов, уровень магнитного поля, создаваемого, в помещениях первого, второго и третьего этажей, примыкающих к трансформаторной подстанции, имеет локальные превышения ПДУ.

2.7. Расчет высокочастотных полей силовых трансформаторов

2.7.1. Общие замечания

Исследования, опубликованные в ряде источников, указывают на то, что силовые трансформаторы, рассчитанные на напряжения свыше 220кВ, являются источниками достаточно интенсивного высокочастотного электромагнитного излучения. Причинами высокочастотного излучения трансформаторов являются коронные разряды, поверхностные частичные разряды и частичные разряды во внутренней изоляции [15].

Очевидно, что детальный анализ названных процессов позволяет построить теоретическую модель, пригодную для использования в рамках разрабатываемой технологии.

Элементами конструкции силового трансформатора, существенно влияющими на характеристики излучения, являются магнитопровод, ввод высокого напряжения, выводы на низкие напряжения, блок контакторов, бак. Наиболее вероятными местами возникновения коронных разрядов являются шины и точки подсоединения шин к высоковольтным вводам трансформатора. Источники поверхностных частичных разрядов вероятнее всего будут распределены по поверхности фарфоровых рубашек высоковольтных вводов [100]. Частичные разряды во внутренней изоляции возникают как в основной изоляции обмоток трансформатора, так и в изоляции высоковольтных вводов [9].

www.nilem.ru

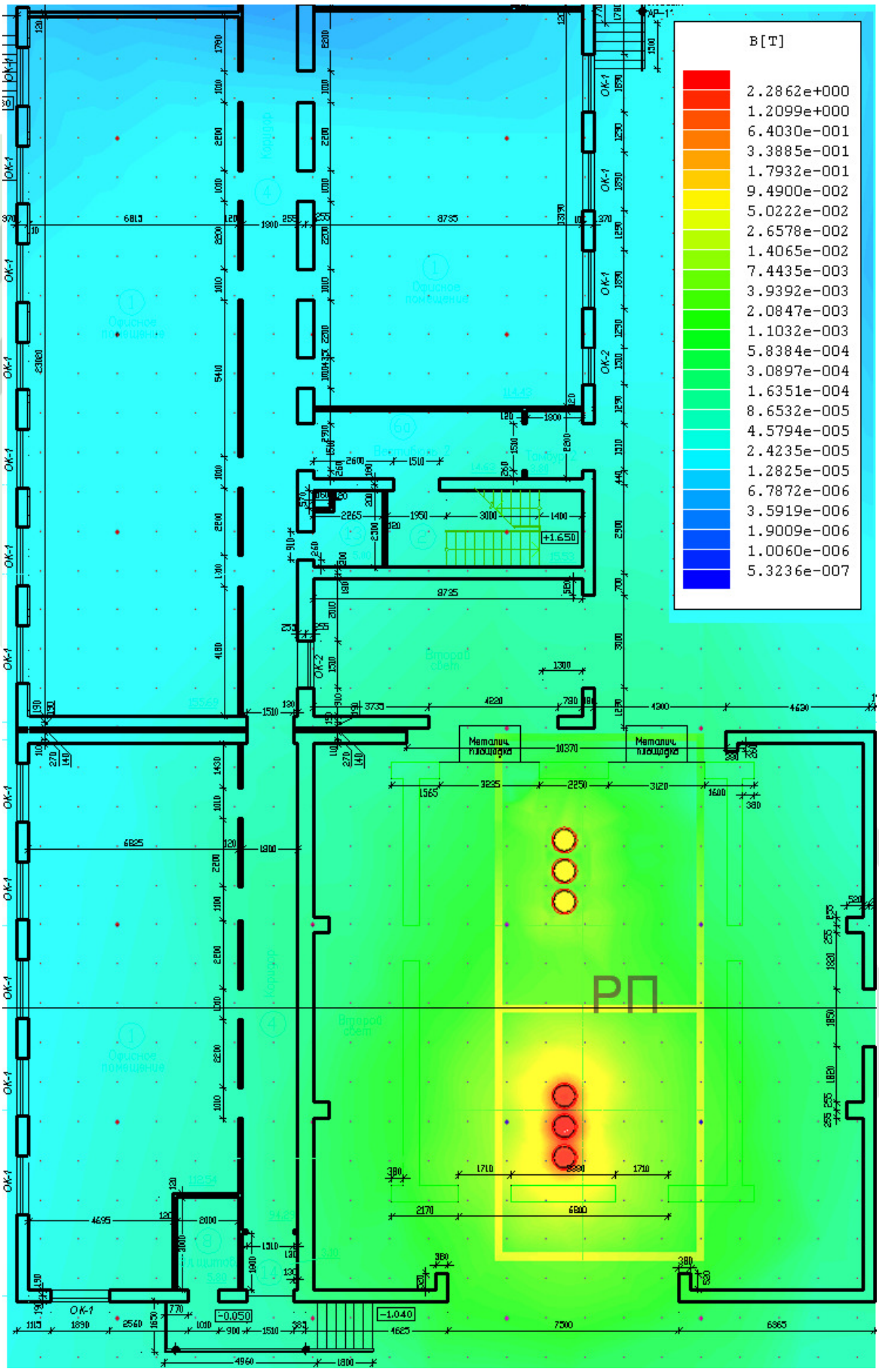


Рис.2.18.Распределение магнитного поля на высоте 0.5 м от пола первого этажа при загрузке одного трансформатора

www.nilem.ru

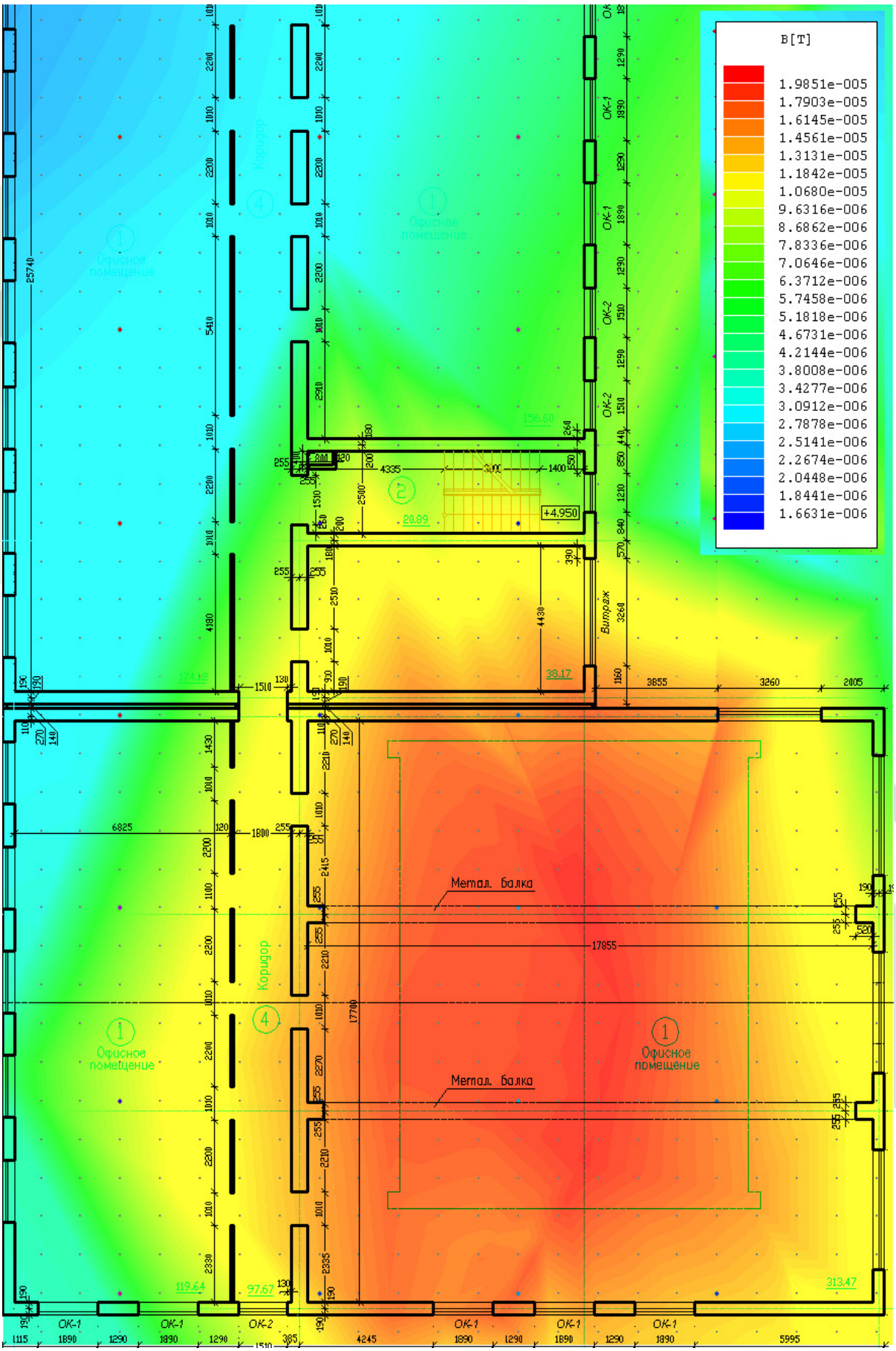


Рис.2.19. Распределение магнитного поля на высоте 0.5 м от пола четвертого этажа при загрузке одного трансформатора

www.nilem.ru

ЭМП, связанные с частичными разрядами во внутренней изоляции, будут излучаться в окружающее пространство через элементы конструкции, изолированные от корпуса трансформатора. Это обусловлено тем, что корпус трансформатора заземлен и является достаточно хорошим экраном для всех высокочастотных электромагнитных излучений, исходящих от источников частичных разрядов, расположенных внутри трансформатора.

Излучающими частями конструкции трансформатора можно считать высоковольтные вводы - источники поля частичных разрядов, возникающих из-за внутренних дефектов изоляции вводов, и также элементы конструкции, находящиеся внутри трансформатора. Также в пространство будет излучаться и ЭМП искровых разрядов, возникающих в дефектах магнитопровода. Для анализа излучающих свойств вводов удобнее всего их представить в виде линейных излучателей, работающих в следующих режимах [15]:

- вертикальный излучатель с произвольным подключением источника возбуждения по высоте вибратора;

- вертикальный излучатель с емкостной нагрузкой и произвольным подключением источника возбуждения по высоте вибратора. Емкостная нагрузка представляет собой шину, подключаемую к высоковольтному вводу.

На рис.2.20 представлена проволочная (вибраторная) модель силового трансформатора.

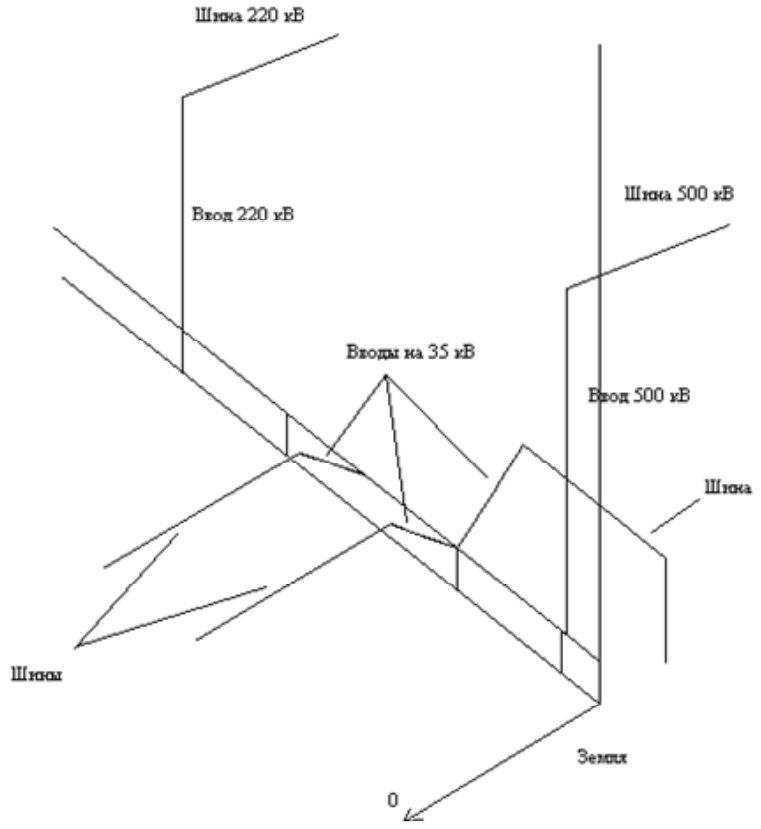


Рис.2.20. Проволочная модель силового трансформатора.

www.nilem.ru

В модели сохранены геометрические размеры элементов конструкции типового трансформатора 500/220/35 кВ, их взаимное расположение, соединение с шинами и землей.

2.7.2. Применение метода ИУ к электродинамическому моделированию силовых трансформаторов

С точки зрения электродинамического моделирования, рассматриваемые системы могут быть представлены как объемные проводящие тела сложной формы с сосредоточенным возбуждением. Такие тела могут быть аппроксимированы проволочными сетками или иными элементами, по проводникам которых протекают эквивалентные токи. Расчет ЭМП в этом случае потребует предварительного нахождения распределения тока по проводникам модели. Подобный подход широко известен в теории антенн и был применен независимо Брауде Л.Г. [21] и Бурком Г.И. (Burke G.I.) и Поджо А.Дж. (Poggio A.J.) [191] для электродинамического анализа самолетных антенн.

Конечным итогом электродинамического анализа является нахождение абсолютных значений напряженностей или иных характеристик полей. Поэтому необходимо изначально задаться некоторой мощностью возбуждения. При этом возможен подход, заключающийся в подборе амплитуды возбуждения (входного тока или напряжения) таким образом, чтобы излучаемая мощность соответствовала реальной ситуации (экспериментальным данным). Однако более удобным [27] является задание некоторой вполне определенной величины амплитуды возбуждения и нахождение в рамках электродинамической задачи мощности излучения. Поскольку ток изменяется пропорционально корню квадратному от мощности (это же относится и к напряженностям поля), то решение электродинамической задачи (функция распределения тока) должно быть домножено на величину $(P_0/P_{расч})/2$, где $P_{расч}$ – расчетная излучаемая мощность, найденная в рамках электродинамической задачи; P_0 – реальная мощность излучения исследуемой системы.

Таким образом, в данном случае электродинамическая задача заключается в нахождении функции распределения поверхностного тока, поле которого в сумме со сторонним полем, создаваемым сторонним током (напряжением) в активной области, ориентировано нормально к поверхности металлических элементов в любой точке этой поверхности. А поскольку решение найдено с точностью до множителя $(P_0/P_{расч})/2$, в рамках данной задачи необходимо найти мощность излучения $P_{расч}$, соответствующую заданной амплитуде возбуждения.

После нахождения функции распределения поверхностного тока напряженности электрического и магнитного полей в произвольной точке пространства могут быть найдены посредством известных соотношений, которые в самом общем виде записаны в [3].

www.nilem.ru

Для решения внешних электродинамических задач весьма широко применяется метод интегральных уравнений (ИУ) [178], поскольку известны выражения для функций Грина в замкнутой форме [36].

В рамках метода ИУ в некоторой точке наблюдения поле определяется интегральным выражением, где подынтегральная функция, включающая искомую функцию распределения тока (токовую функцию), имеет смысл поля, создаваемого элементом поверхности, на которой распределен ток. Перемещая точку наблюдения по этой поверхности и требуя, чтобы в ней всегда выполнялось граничное условие, можно определить токовую функцию, удовлетворяющую ИУ.

Граничное условие на идеально проводящей поверхности S может быть записано следующим образом [36]:

$$\left[\vec{n}(s), \vec{E}_0(s) + \vec{E}_S(s)\right] = \vec{0}\,, \qquad (2.61)$$

где $\vec{n}(s)$ – орт нормали к поверхности S, $\vec{E}_0(s)$ – первичное поле, $\vec{E}_S(s)$ – поле рассеяния.

Для сетчатых моделей, представляющих собой системы линейных проводников, поперечные размеры которых значительно меньше длины волны, широко применяется так называемое тонкопроволочное приближение [27, 36, 178, 191], в рамках которого поверхностный ток заменяется линейным нитевидным, текущим по оси провода, а граничное условие накладывается на его поверхности. При этом расстояние между точкой источника и точкой наблюдения не может быть меньше величины радиуса провода

Достоинства методов на основе тонкопроволочного приближения заключаются в том, что они к настоящему времени хорошо изучены, в достаточной степени апробированы (обширной практикой применения), просты в алгоритмизации и реализации на ЭВМ, в достаточной мере универсальны в смысле произвольности геометрии объекта и т.д.

Достаточно серьезным недостатком является некорректная (в смысле Адамара) постановка задачи отыскания решения возникающего при этом уравнения Фредгольма 1-го рода [178, 191]. В результате возникают определенные трудности, связанные с плохой сходимостью приближенного решения и низкой его устойчивостью. Это делает весьма проблематичным получение физически обоснованного решения для относительно «толстых» проводников, что, впрочем, ни коим образом не существенно в нашем случае, поскольку проволочные сетки, аппроксимирующие реальные устройства, состоят из достаточно тонких проводников, несущих нитевидные токи.

В работе [191] граничное условие для электрического поля (2.61) преобразовано к интегральному уравнению следующего вида (система координат аналогична рис.1.2):

www.nilem.ru

$$\vec{E}_{\tau 0}(\vec{r}) = -\frac{i}{\omega\varepsilon_0}\int_S \vec{j}_S(\vec{r}')\cdot G'(\vec{r},\vec{r}')dS' . \qquad (2.62)$$

Методика численного решения уравнения (2.61) использована для построения известных программных комплексов электродинамического анализа проволочных структур AMP и NEC.

Ядро уравнения (2.61) имеет вид [191]:

$$G'(\vec{r},\vec{r}') = [k^2\vec{n} + \text{grad}\ \text{div}]\cdot G(\vec{r},\vec{r}'), \qquad (2.63)$$

где $\vec{n} = \vec{x}_0 n_x + \vec{y}_0 n_y + \vec{z}_0 n_z$, $k = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$, $i^2 = -1$.

Очевидно, что использование (2.62) вполне отвечает целям настоящего исследования. Данное ИУ является одним из возможных преобразований граничного условия (2.61), и для решения поставленной задачи нет принципиальных ограничений на использование ИУ иного вида.

Запишем уравнение (2.62) в развернутой форме с учетом (2.63):

$$-\vec{n}(\vec{r})\times\vec{E}_0(\vec{r}) = -\frac{i}{\omega\varepsilon_0}\vec{n}(\vec{r})\times\int_S \vec{j}_S(\vec{r}')\cdot[k^2\vec{n} + \text{grad}\cdot\text{div}]\cdot G(\vec{r},\vec{r}')\cdot dS' . \qquad (2.64)$$

Уравнение (2.64) является интегро-дифференциальным уравнением, в котором неизвестная функция $\vec{j}_S(\vec{r}')$ находится под действием интегро-дифференциального оператора. Первичное тангенциальное поле $\vec{E}_{\tau 0}(\vec{r})$ предполагается известным.

Векторное уравнение (2.64) может быть записано в скалярной форме. В случае, когда поверхность S представляет собой тонкий цилиндрический провод, в соответствии с концепцией тонкопроволочного приближения:

– поверхностный ток заменяется осевым;

– азимутальные вариации тока не рассматриваются;

– граничное условие выполняется только на оси проводника.

Осевой и поверхностный токи связаны соотношением:

$$I(l')\cdot\vec{l} = 2\pi\cdot a\cdot\vec{j}_S(\vec{r}), \qquad (2.65)$$

где $I(l')$ – величина осевого тока (координата l отсчитывается вдоль криволинейного разрывного контура, проходящего по осям всех проводников системы); $\vec{l}$ – единичный вектор, тангенциальный к проводнику в точке с координатой $\vec{r}$; a – радиус проводника.

В скалярной форме уравнение (2.64) примет вид:

$$-\vec{n}(\vec{r})\times\vec{E}_0(\vec{r}) = -\frac{i}{\omega\varepsilon_0}\vec{n}(\vec{r})\times\int_L I(l')\cdot\left[k^2\vec{n}' - \text{grad}_{l'}\frac{\partial}{\partial l'}\right]\cdot G(\vec{r},\vec{r}')\cdot dl' . \qquad (2.66)$$

Смысл единичных векторов, входящих в (2.66), становится ясен из рисунка 2.21.

www.nilem.ru

Использование в (2.66) осевых граничных условий, описанных выше, приводит к уравнению (2.67).

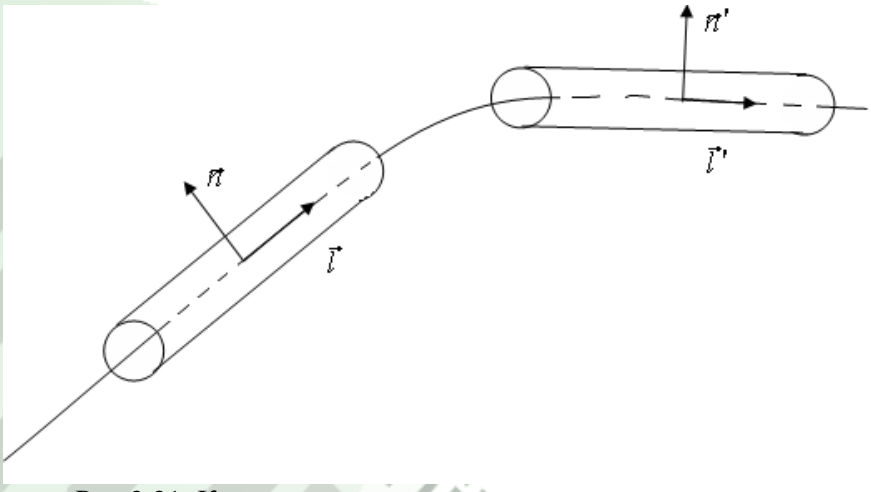


Рис.2.21. К пояснению смысла интегрального уравнения

$$-\vec{l}\cdot\vec{E}_0(\vec{r}) = -\frac{i}{\omega\varepsilon_0}\int_L I(l')\cdot\left[k^2\vec{n}\cdot\vec{n}' - \frac{\partial^2}{\partial l\cdot\partial l'}\right]\cdot G(\vec{r},\vec{r}')\cdot dl' \,. \qquad (2.67)$$

Методы численного решения уравнений, подобных (2.67), хорошо изучены, легко алгоритмизируются [36, 178, 191], и наиболее распространенным подходом к их решению является полуаналитический метод моментов, основные идеи которого подробно изложены в работе Харрингтона Р.Ф. [189].

Задача состоит в решении линейного уравнения вида:

$$e = L\cdot f, \qquad (2.68)$$

где $e-$ известная функция, f – искомая функция, L – линейный интегро-дифференциальный оператор, действующий на функцию f. Численное решение такого уравнения ищется в виде разложения искомой функции в функциональном базисе:

$$f = \sum_{j=1}^{N} a_j f_j \,. \qquad (2.69)$$

где f_j – базисные функции, a_j – коэффициенты разложения функции в базисе f_j.

При числе базисных функций $N \to \infty$ (2.69) стремится к точному решению (2.68). Задача численного решения сводится к отысканию коэффициентов a_j, при этом предполагается минимизация проекции невязки на конечномерное множество базисных функций.

Подставим разложение (2.69) с некоторым весом W_i в (2.68), причем потребуем, чтобы W_i удовлетворяло условию:

www.nilem.ru

$$\left\langle W_{i,} L \cdot f \right\rangle = \left\langle W_{i,} e \right\rangle, \ \ (i = 1,2,..., N). \qquad (2.70)$$

Фигурные скобки обозначают так называемое внутреннее (скалярное) произведение функций (операторов):

$$\left\langle f, g \right\rangle = \int_S f(\vec{r}) \cdot g(\vec{r}) \cdot dS \ , \qquad (2.71)$$

где D – область определения оператора L.

Из (2.69), в частности, вытекает равенство:

$$\sum_{j=1}^{N} a_j \left\langle W_i, L \cdot f_j \right\rangle = \left\langle W_i, e \right\rangle , \qquad (2.72)$$

которое в матричной форме принимает вид:

$$[G] \times [A] = [E], \qquad (2.73)$$

где $G_{i\,j} = \left\langle W_i, L \cdot f_j \right\rangle$; $A_j = a_j$; $E_i = \left\langle W_i, e \right\rangle$ [189].

Решение (2.73) в общем виде может быть записано как:

$$[A] = [G]^{-1} \times [E]. \qquad (2.74)$$

В качестве весовых функций можно выбрать, например, функции Дирака [38], как это сделано в работе [191]:

$$W_i(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \ , \qquad (2.75)$$

где $\vec{r}_i$ – точка на проводящей поверхности.

Для численной реализации метода моментов необходимо определить:

– вид базисных функций;

– вид весовых функций;

– способ формализации стороннего источника, излучение которого обусловливает неоднородность ИУ и свободные члены системы (2.74).

Известно большое число различных реализаций метода моментов, отличающихся видом базисных и весовых функций. Выбор той или иной системы функций определяется конкретными особенностями решаемой задачи.

Все возможные системы базисных функций (базисы) подразделяются на 2 класса [38]. Это, во-первых, базисы полной области (базисная функция отлична от нуля в пределах всей области определения искомой функции) и, во-вторых, базисы частичных подобластей (для каждой базисной функции существует свой короткий отрезок контура L' - сегмент, где она отлична от нуля, причем соседние сегменты могут частично перекрываться). Базисы полной области обеспечивают более быструю сходимость решения. Известно [38], что кусочно-синусоидальный базис частичной подобласти позволяет весьма просто описывать сложные структуры с разветвлением проводов и, кроме того, он не требует численного интегрирования по l', поскольку выражения для поля кусочно-синусоидального тока известны в замкнутой аналитической форме [178]. Указанные достоинства

www.nilem.ru

кусочно-синусоидального базиса в данном случае имеют решающее значение, поэтому именно он использован в решении поставленной задачи.

С точки зрения вида весовых функций наиболее распространены две реализации метода моментов [38, 191, 195]:

– метод Галеркина, в рамках которого $W_i(l)=b_i\,(l')$, $l \to l'$;

– метод сшивания в точках, в рамках которого $W_i(l)=\delta(l - l_i)$, где δ - дельта-функция Дирака, l_i – средняя точка i-го сегмента L_i (точка сшивания).

Физическая сущность метода сшивания заключается в наложении граничных условий в отдельных точках контура L – точках сшивания. Он обеспечивает наименьшие затраты машинного времени по сравнению с методом Галеркина, поскольку в силу известного свойства дельта-функции [13] в (2.72) исчезает интеграл по l.

По вопросу о формальном представлении сторонних источников (источников возбуждения) можно отметить, что в настоящее время известно несколько моделей [178]:

– модель типа «дельта-генератор», представляющая собой весьма узкий зазор в точке возбуждения, к которому подключен сторонний источник ЭДС;

– модель в виде кольца эквивалентного магнитного тока, соответствующего раскрыву коаксиальной линии, питающей несимметричный вибратор через отверстие в протяженном плоском экране;

– модель возбуждения источником тока, заключающаяся в том, что в определенной точке сплошного (то есть без зазора) проводника задана величина стороннего тока.

В настоящей работе исследуются несимметричные вибраторы с различной конфигурации. Поэтому, на первый взгляд целесообразнее всего использовать модель в виде кольца магнитного тока.

Выбранный в качестве основы метод моментов решения ИУ в тонкопроволочном приближении в общем случае не гарантирует сходимости решения. Поэтому при исследовании произвольных структур, вообще говоря, требуется проверка сходимости путем определения устойчивости решения к варьированию длин и, соответственно, числа сегментов (базисных и весовых функций) [36]. Однако, то обстоятельство, что в настоящей работе рассматриваются модели вполне определенных типов конфигурации, дает возможность определить заранее все необходимые параметры проволочных электродинамических моделей, обеспечивающие сходимость и устойчивость решения.

2.7.3. Численное решение интегрального уравнения

При построении методики численного решения ИУ для проводников провода будем моделировать в виде совокупности прямолинейных сегментов, причем на каждом сегменте введем три базисные функции (базис

www.nilem.ru

частичной области): постоянную функцию, синус и косинус. В [181] показано, что такое разложение токовой функции на сегменте обеспечивает достаточно быструю сходимость итерационного процесса отыскания решения.

Таким образом, ток в сегменте с номером j определяется соотношением:

$$I_j(s) = A_j + B_j \sin k(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j), \qquad (2.76)$$

где $s -$ точка на поверхности проводника в пределах сегмента; $s_j -$ средняя точка сегмента; $\left|s - s_j\right| < \frac{\Delta_j}{2}$; $\Delta_j -$ длина сегмента.

Зарядовую функцию можно выразить из закона сохранения заряда:

$$\frac{\partial I}{\partial s} = -i \cdot \omega \cdot q. \qquad (2.77)$$

В точке соединения двух сегментов одинакового радиуса ток должен быть непрерывен, и заряд не должен накапливаться [136]:

$$\left.\frac{\partial I(s)}{\partial s}\right|_{s \text{ (соединение)}} = \frac{Q}{\ln k \cdot a - \gamma}, \qquad (2.78)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\gamma \approx 0{,}5772 -$ постоянная Эйлера.

При переходе от осевого тока к поверхностному (для провода конечного радиуса) произведем следующие преобразования:

$$\left.\frac{\partial I(s)}{\partial s}\right|_{s \text{ (конец)}} = -\frac{\vec{l}_0 \cdot \vec{n}}{k} \cdot \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} \cdot \left.\frac{\partial I}{\partial s}\right|_{s \text{ (конец)}}, \qquad (2.79)$$

где J_1 и J_0 – функции Бесселя первого рода 1-го и 0-го порядков, соответственно. Очевидно, что $\vec{l}_0 \perp \vec{n}$, тогда:

$$I_j\left(s_j \pm \frac{\Delta_j}{2}\right) = \pm \frac{1}{k} \cdot \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} \cdot \left.\frac{\partial I_j(s)}{\partial s}\right|_{S = S_j \pm \frac{\Delta_j}{2}}. \qquad (2.80)$$

Для конца сегмента, не имеющего гальванического контакта с другими сегментами, справедливо (2.80). Для конца, имеющего гальванический контакт, очевидно, справедливо равенство:

$$\left.\frac{\partial I_j(s)}{\partial s}\right|_{S = S_j \pm \frac{\Delta_j}{2}} = \frac{Q_j}{\ln \frac{2}{ka_j} - \gamma}. \qquad (2.81)$$

На рис.2.22 показаны распределения базисных функций и их суммы на четырехсегментном проводе.

www.nilem.ru

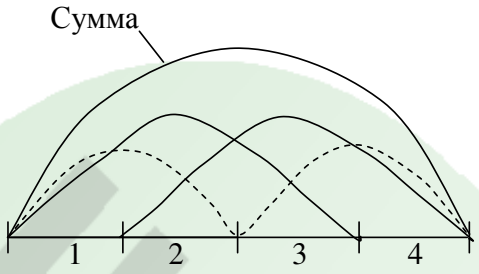


Рис.2.22. Базис разложения тока

На рисунке 2.23 показан *i*-й сегмент, имеющий гальванический контакт в точках $\langle 1 \rangle$ и $\langle 2 \rangle$ с N^- и N^+ сегментами, соответственно, стрелкой указано условное положительное направление тока.

Используем следующие обозначения для различных концов i-го сегмента:

$$a_i^- = a_i^+ = \left[\ln \frac{2}{k a_j} - \gamma \right]^{-1} ; \; x_i = \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} . \qquad (2.82)$$

На свободном конце, не имеющем гальванического контакта с другими проводниками, очевидно, $x_i \equiv 0$.

Часть *i*-х базисных функций на *i*-ом сегменте, обусловленная собственным (центральным) током, определяется выражением:

$$f_i^{\,0}(s) = A_i^0 + B_i^0 \cdot \sin k(s - s_i) + C_i^0 \cdot \cos k(s - s_i) , \qquad (2.83)$$

где $\left| s - s_i \right| < \frac{\Delta_i}{2}$ – точка внутри сегмента.

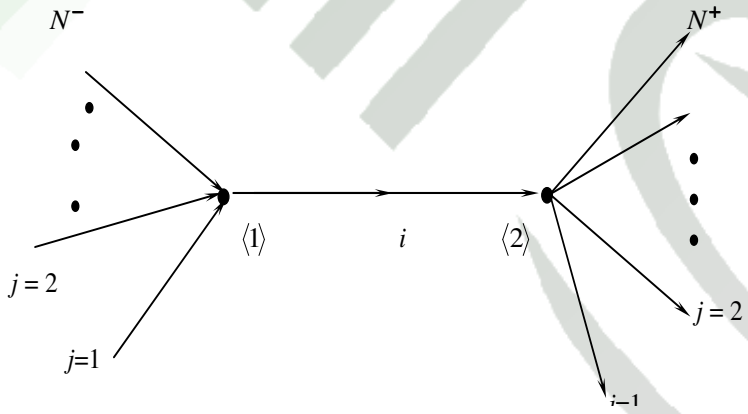


Рис.2.23.

Если точка 1 и точка 2 имеют гальванический контакт с другими сегментами ($N^- \neq 0$ и $N^+ \neq 0$), то закон сохранения заряда для концевых точек примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial s} f_i^{\,0}(s)\Big|_{S = S_i - \frac{\Delta_i}{2}} = a_i^- \cdot Q_i^- , \qquad (2.84)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} f_i^{\,0}(s)\Big|_{S = S_i + \frac{\Delta_i}{2}} = a_i^+ \cdot Q_i^+ . \qquad (2.85)$$

www.nilem.ru

Если точка 1 не имеет гальванического контакта с другими сегментами, а точка 2 – имеет ($N^- = 0$ и $N^+ \neq 0$), то закон сохранения заряда для концевых точек примет вид:

$$f_i^0(s_i - \frac{\Delta_i}{2}) = \frac{1}{k} \cdot x_i \cdot \frac{\partial}{\partial s} \cdot f_i^0(s)\Big|_{S=S_i-\frac{\Delta_i}{2}}, \qquad (2.86)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} f_i^0(s)\Big|_{S=S_i+\frac{\Delta_i}{2}} = a_i^+ \cdot Q_i^+ . \qquad (2.87)$$

Если точка 2 не имеет гальванического контакта с другими сегментами, а точка 1 – имеет ($N^- \neq 0$ и $N^+ = 0$), то закон сохранения заряда для концевых точек примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial s} f_i^0(s)\Big|_{S=S_i-\frac{\Delta_i}{2}} = a_i^- \cdot Q_i^- , \qquad (2.88)$$

$$f_i^0\left(s_i + \frac{\Delta_i}{2}\right) = -\frac{1}{k} \cdot x_i \cdot \frac{\partial}{\partial s} \cdot f_i^0(s)\Big|_{S=S_i+\frac{\Delta_i}{2}} . \qquad (2.89)$$

Все сегменты, присоединенные к $\langle 1 \rangle$ концу *i*-го сегмента, определяют часть базисной функции (- концевую базисную функцию):

$$f_j^-(s) = A_j^- + B_j^- \cdot \sin k(s - s_j) + C_j^- \cdot \cos k(s - s_j) , \qquad (2.90)$$

$$\left|s - s_j\right| < \frac{\Delta_j}{2} .$$

Условия на конце $\langle 1 \rangle$ имеют вид:

$$f_j^-\left(s_j - \frac{\Delta_j}{2}\right) = 0 , \qquad (2.91)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \cdot f_j^-(s)\Big|_{S=S_j-\frac{\Delta_j}{2}} = 0 . \qquad (2.92)$$

Все сегменты, присоединенные к концу $\langle 2 \rangle$ *i*-го сегмента, определяют часть базисной функции (+ концевую базисную функцию):

$$f_j^+(s) = A_j^+ + B_j^+ \cdot \sin k(s - s_j) + C_j^+ \cdot \cos k(s - s_j) , \left|s - s_j\right| < \frac{\Delta_j}{2} . \qquad (2.93)$$

Условия на конце $\langle 2 \rangle$ выглядят как:

$$\frac{\partial}{\partial s} f_i^+(s)\Big|_{S=S_i-\frac{\Delta_i}{2}} = a_i^+ \cdot Q_i^+ , \qquad (2.94)$$

www.nilem.ru

$$f_j^+\left(s_j+\frac{\Delta_j}{2}\right)=0, \tag{2.95}$$

$$\frac{\partial}{\partial s}\cdot f_j^+(s)\Big|_{S=S_j+\frac{\Delta_j}{2}}=0. \tag{2.96}$$

Выражения (2.83), (2.90) и (2.96) определяют полную базисную функцию, содержащую $3\cdot(N^-+N^++1)$ неизвестных величин. Кроме того, $3\cdot(N^-+N^+)+2$ неизвестных для определения Q_i^+ и Q_0^- на концах сегмента.

Концевые базисные функции могут быть выражены через центральные с помощью двух уравнений, составленных по первому правилу Кирхгофа:

$$\sum_{j=1}^{N^-} f_j^-\left(s_j+\frac{\Delta_j}{2}\right)=f_i^0\left(s_i-\frac{\Delta_i}{2}\right), \tag{2.97}$$

$$\sum_{j=1}^{N^+} f_j^+\left(s_j-\frac{\Delta_j}{2}\right)=f_i^0\left(s_i+\frac{\Delta_i}{2}\right), \tag{2.98}$$

Подставляя (2.83), (2.90), (2.96) в (2.97) и (2.98) получим уравнение, из которого можно выразить неизвестные коэффициенты концевых и центральных базисных функций:

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{N^-}\left\{A_j^-+B_j^-\cdot\sin k\left(s_i-s_j+\frac{\Delta_j}{2}\right)+C_j^-\cdot\cos k\left(s_i-s_j+\frac{\Delta_j}{2}\right)\right\}=\\&=A_i^0+B_i^0\cdot\sin k\left(s_i-s_j-\frac{\Delta_j}{2}\right)+C_i^0\cdot\cos k\left(s_i-s_j-\frac{\Delta_j}{2}\right),\end{aligned} \tag{2.99}$$

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{N^+}\left\{A_j^++B_j^+\cdot\sin k\left(s_i-s_j-\frac{\Delta_j}{2}\right)+C_j^+\cdot\cos k\left(s_i-s_j-\frac{\Delta_j}{2}\right)\right\}=\\&=A_i^0+B_i^0\cdot\sin k\left(s_i-s_j+\frac{\Delta_j}{2}\right)+C_i^0\cdot\cos k\left(s_i-s_j+\frac{\Delta_j}{2}\right).\end{aligned} \tag{2.100}$$

После несложных преобразований получим (с учетом введенных обозначений) выражения для коэффициентов разложения тока. Данный результат приведен в Приложении 4.

www.nilem.ru

2.7.4. Результаты расчета характеристик излучения высоковольтного силового трансформатора

Для тестирования изложенной в настоящем подразделе методики, проведены тестовые расчеты характеристик направленности силового трансформатора 500/220/35 кВ на частотах 80 и 250 МГц. Частоты для расчета выбраны по результатам исследований, опубликованных в [15]. Результаты численного эксперимента приведены на рис.2.24 и 2.25. Диаграммы направленности построены в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Так же приведен вид объемной диаграммы направленности.

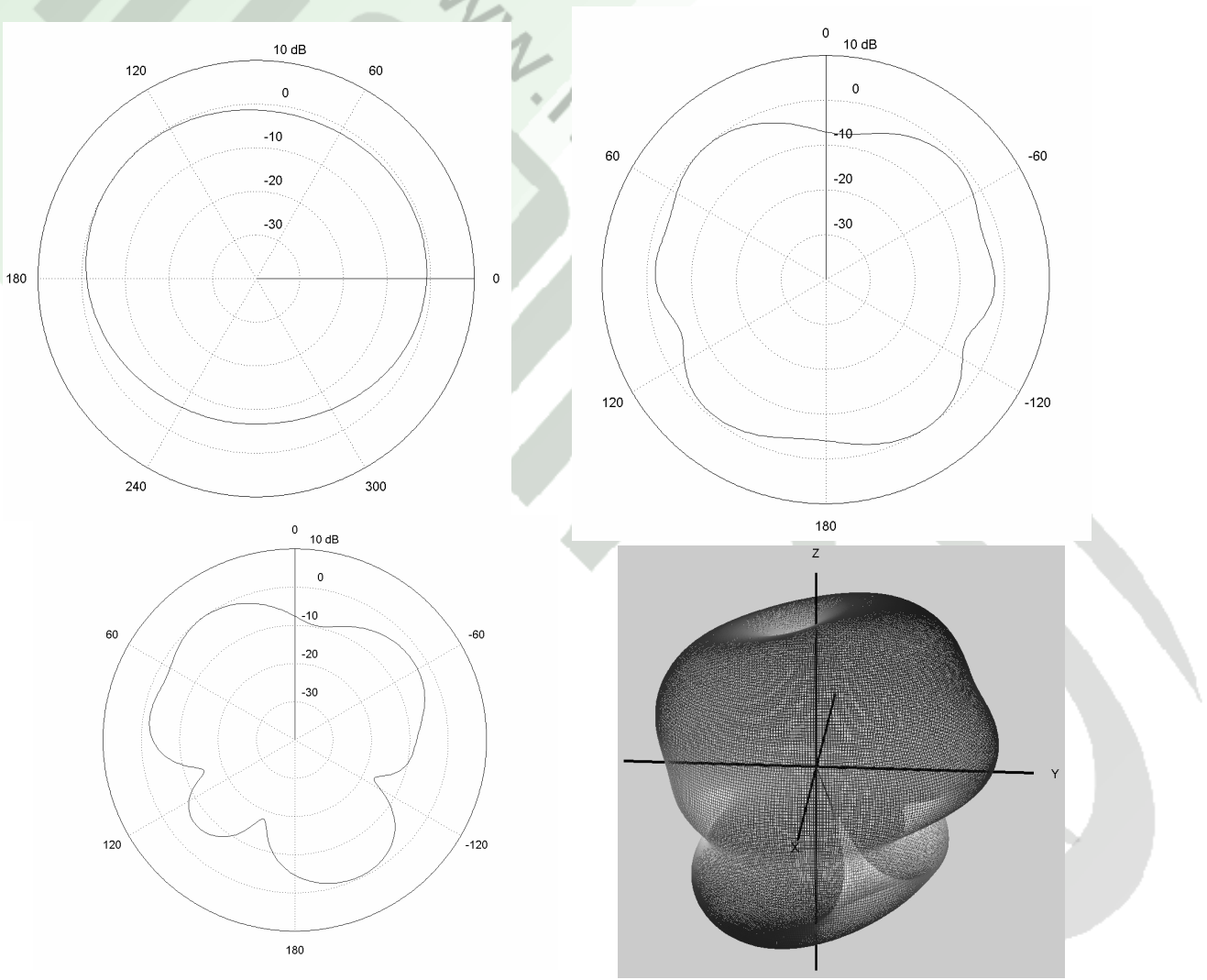


Рис.2.24. Диаграммы направленности силового трансформатора на частоте 80 МГц

www.nilem.ru

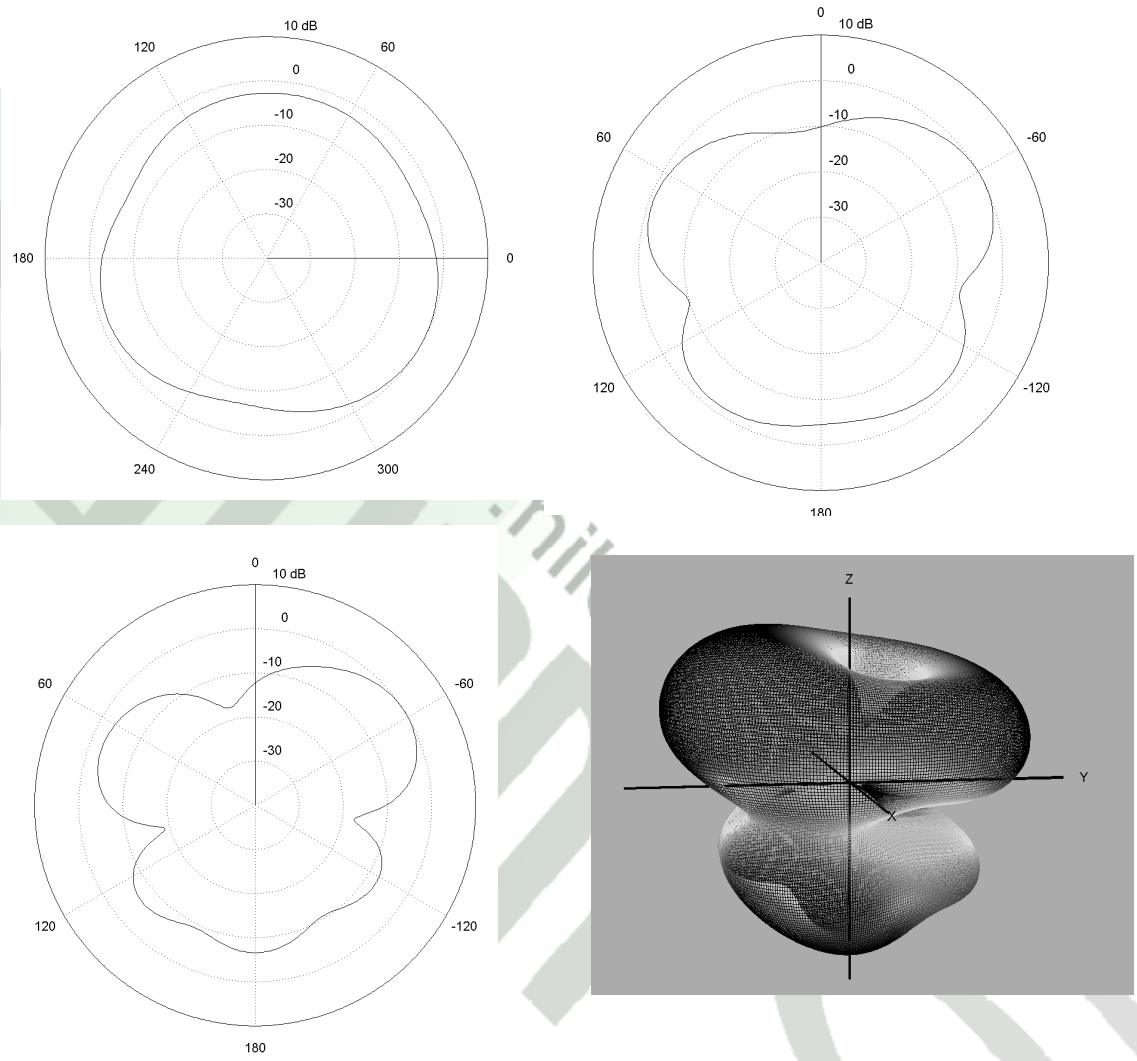


Рис.2.25. Диаграммы направленности силового трансформатора на частоте 250 МГц

Приведенные результаты дают информацию пространственном распределении поля излучения трансформатора. Абсолютные уровни поля для различных направлений могут быть получены при определении параметров возбуждения на основе некоторого набора экспериментальных данных, для каждого устройства в отдельности так, как это было сделано в п. 1.4

www.nilem.ru

РАЗДЕЛ 3. Электромагнитные поля цепей питания электротранспорта

3.1. Варианты технических решений и конструктивного исполнения энергоснабжения электротранспорта

Рельсовый и нерельсовый электротранспорт существует в России довольно давно (с конца XIX века). В середине прошлого столетия во время «автомобильного бума», сопровождавшегося лавинообразным увеличением количества автотранспортных средств, использующих двигатели внутреннего сгорания, применение электротранспорта в городских пассажирских перевозках казалось многим своеобразным выходом из тяжелой экологической ситуации в городах, в связи с загрязнением атмосферы ядовитыми продуктами сгорания.

Однако, на сегодняшний день именно электротранспорт стал еще одним существенным фактором загрязнения окружающей среды – загрязнения ЭМП. Действительно, для питания электротранспорта применяются пространственно распределенные сети высокого напряжения, несущие существенные по величине токи, причем коридоры прохождения этих сетей проходят по селитебным территориям.

Последнее обстоятельство, усугубленное и без того сложной электромагнитной обстановкой в городах, не позволяет исключать сети питания электротранспорта из рассмотрения при формировании системы регионального контроля электромагнитной обстановки.

В настоящее время самыми распространенными видами электротранспорта в городах России являются троллейбус, трамвай и метрополитен. Иные виды, такие как дуобус, электробус, монорельс и т.п. встречаются сравнительно редко. На пригородных маршрутах широко используются электропоезда.

С точки зрения электродинамического моделирования сети питания электротранспорта представляют собой линейные источники стационарного поля, и к расчету их полей целесообразно применять тот же подход, что и к воздушным линиям электропередач (пп.1.2). При моделировании цепей питания трамвая и метрополитена, один из проводов которых непосредственно находится на поверхности Земли, для целей оценки электромагнитной обстановки вполне оправдано пренебрежение блуждающими токами в толще земной поверхности. Тяговые электростанции трамвая и троллейбуса целесообразно рассматривать как распределительные пункты системы энергоснабжения и моделирование проводить аналогично трансформаторным подстанциям (раздел 2).

Отдельного рассмотрения требует вопрос, связанный с расчетом поля внутри и в непосредственной близости транспортного средства, поскольку находящиеся внутри последнего пассажиры испытывают непосредственное

www.nilem.ru

влияние этого поля. При этом очевидно требуется детальный учет элементов конструкции транспортного средства, существенно влияющие на характеристики излучаемого поля. К ним относятся, прежде всего, конструктивные узлы, находящиеся в непосредственном контакте с цепями питания – устройства токосъема, силовые цепи, цепи питания тяговых двигателей, пускотормозные реостаты. Кроме того, на характеристики ЭПМ внутри транспортных средств, очевидно, оказывают влияние вспомогательные электрические машины и цепи вторичного электричества – генераторы собственных нужд, цепи управления, контроллеры.

Рассмотрим некоторые особенности электрооборудования городского электротранспорта, их рабочие напряжения, токи и номинальные мощности.

На подвижном составе городского электрического транспорта применяют преимущественно электрические машины постоянного тока как с последовательным или параллельным, так и смешанным возбуждением. [107].

Все электрические машины, устанавливаемые на трамвайных вагонах и троллейбусах, можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся тяговые двигатели, предназначенные для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую, необходимую для приведения в движение трамвайных вагонов или троллейбусов. Ко второй группе относятся вспомогательные электрические машины – двигатели и генераторы. Вспомогательные двигатели служат для привода компрессоров, вентиляторов, генераторов низкого напряжения и других механизмов. Электрические машины с параллельным возбуждением получили большое распространение в качестве приводов групповых переключателей (контроллеров) и генераторов электроэнергии вспомогательных нужд, которые служат для питания электрооборудования низкого напряжения, цепей управления и для подзарядки аккумуляторных батарей.

Так, например, в троллейбусе обычно устанавливают один тяговый двигатель, рассчитанный на переменное напряжение контактной сети 550В [107]. На трамвайных же вагонах число тяговых двигателей зависит от числа ведущих осей. Наиболее распространенные сегодня четырехосные трамвайные вагоны чаще всего имеют четыре тяговых двигателя, которые соединены в две группы. В каждой группе по два двигателя соединяются последовательно. При пуске и движении на небольших скоростях группы двигателей могут включаться последовательно, а затем для увеличения скорости движения – параллельно. Двигатели четырехосных трамвайных вагонов рассчитаны на половину напряжения контактной сети – 275 В.

Электрические машины, входящие в состав электротранспорта, работают не непрерывно, что, очевидно, является причиной временной нестабильности электромагнитной обстановки. Различают три основных номинальных режима работы электрической машины в зависимости от характера и длительности работы: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный [107].

www.nilem.ru

Номинальным режимом тягового двигателя принято считать часовой либо длительный режим, так как тяговые двигатели работают с резко меняющимися нагрузками, и допустимое превышение температуры их частей может быть достигнуто как при кратковременном действии одной нагрузки, так и при длительном действии другой, несколько меньшей нагрузки. Номинальным режимом вспомогательного двигателя считают длительный или повторно-кратковременный режим, так как эти машины работают с практически неизменной нагрузкой непрерывно или с регулярными перерывами и последующими включениями.

Вспомогательные электрические машины постоянного тока работают от контактной сети на номинальном напряжении 550 В. К этим машинам относятся двигатели приводов генераторов собственных нужд и вентиляторов, пускотормозных реостатов, приводов компрессоров. Конструкции этих и тяговых двигателей аналогичны. Так, вспомогательный электродвигатель ДК-661А-1 используют в качестве привода генератора собственных нужд и вентилятора обдува пускотормозного реостата на весьма распространенных троллейбусе ЗиУ-9 и трамвайном вагоне КТМ-5М-3. Этот двигатель выполнен с последовательным возбуждением и самовентиляцией. Электродвигатель ДК-660А служит приводом вентилятора отопительно-вентиляционной системы трамвайного вагона РВЗ-6М-2. Это двигатель закрытого исполнения с последовательным возбуждением. Двигатель-генератор SMD-J6Ab устанавливают на трамвайных вагонах Т-3. Он состоит из двух электрических машин, смонтированных в одном корпусе и на одном валу: двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, получающего питание от контактной сети, и генератора собственных нужд постоянного тока. Электродвигатель ДК-408В служит приводом компрессора на троллейбусе ЗиУ-9. Двигатель ДК-408В рассчитан на повторно-кратковременный режим работы с продолжительностью цикла 10 мин. Электродвигатель 2SM-132L применяют на троллейбусе 9Тр в качестве привода компрессора.

Вспомогательные электрические машины постоянного тока работают на номинальном напряжении 24 и 12 В. К этим машинам относятся двигатели привода дверей, гидроусилителя рулевого управления, привода группового реостатного контроллера, ускорителя, стеклоочистителей, вентиляторов электропечей и кабины водителя и др. Конструкция этих двигателей аналогична конструкции высоковольтных электрических машин. Так электродвигатели Г-108А и Г-108Г применяют в качестве электроприводов дверей: Г-108А - на троллейбусе ЗиУ-9 и Г-108Г – на трамвайном вагоне КТМ-5М-3. Это двигатели двухполюсные, защищенного исполнения с самовентиляцией. Двигатель Г-108А имеет последовательное возбуждение, а Г-108Г – параллельное. Рабочий цикл их складывается из двустороннего вращения якоря. Причем каждому направлению вращения двигателя Г-108А соответствует возбуждение одной из двух обмоток четырех полюсов.

www.nilem.ru

Генераторы собственных нужд на электрическом подвижном составе городского транспорта приводятся в действие либо вспомогательным, либо тяговым двигателями. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором собственных нужд, расходуется на питание цепей освещения, сигнализации, управления, заряд аккумуляторной батареи, а также на питание электродвигателей.

Для питания цепей управления трамваев и троллейбусов обычно выбирают генераторы с номинальным напряжением 24 В.

С целью упрощения электрооборудования во многих случаях генератор собственных нужд и вентилятор отопительно-вентиляционной системы приводятся в действие от одного двигателя.

Иногда генератор выполняют в блоке с двигателем, как, например, на трамвайном вагоне Т-3 (якоря генератора и двигателя монтируют на один вал). Такой агрегат называют двигателем-генератором. На трамвайном вагоне КТМ-5М-3 применяют генератор Г-731; на троллейбусе ЗиУ-9 — генератор Г-263 или Г-263Л; на троллейбусе 9Тр — альтернатор 443 ИЗ 518 331.

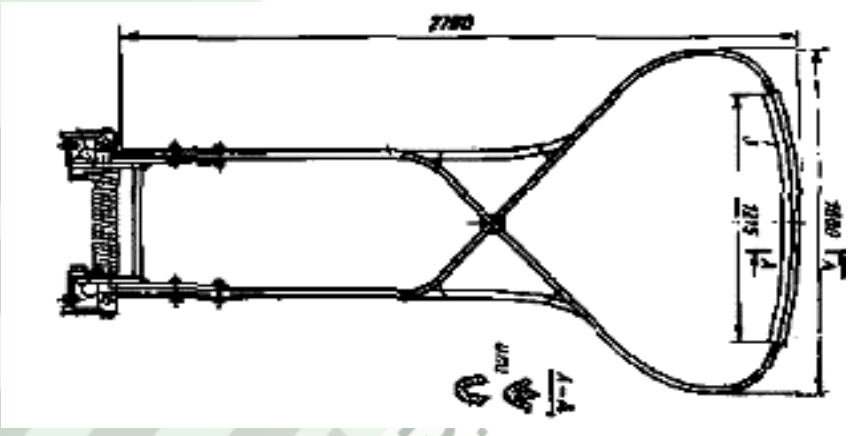
Генератор Г-731 с параллельным возбуждением представляет собой четырехполюсную электрическую машину закрытого исполнения. Номинальное напряжение генератора 26 В, длительная мощность 1,5 кВт, номинальный ток 52 А. Генератор Г-263 (Г-263А) трехфазный, синхронный, переменного тока, с электромагнитным возбуждением. Для выпрямления переменного тока в генератор вмонтирован выпрямительный мостовой блок с кремниевыми выпрямителями (диодами).

Токоприемники осуществляют электрическое соединение между контактными проводами и электрическим оборудованием подвижного состава. По конструктивному исполнению подъемного механизма токоприемники можно подразделить на однорычажные и многорычажные [107]. К одиорычажным токоприемникам относятся штанговые и дуговые, к многорычажным – пантографные. Штанговые токоприемники применяют на троллейбусах, на трамвайных вагонах – дуговые, пантографные (полупантографные) и штанговые. Основные конструкции токоприемников приведены на рис. 3.1.

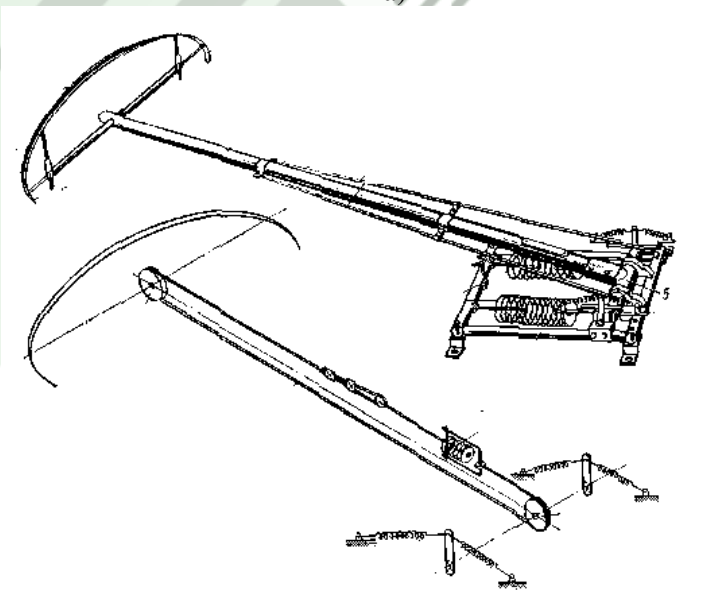
Вспомогательные электрические машины постоянного тока, применяемые на подвижном составе, работают на номинальном напряжении 550, 24 и 12 В. Электродвигатели для привода генераторов собственных нужд и вентиляторов пускотормозных резисторов, а также привода компрессоров выполняются с последовательным возбуждением и работают на поминальном напряжении 550 В. Приводной электродвигатель и генератор собственных нужд составляют единый агрегат – двигатель-генератор. Электродвигатель с вентилятором составляют агрегат двигатель-вентилятор. Он служит для вентиляции пассажирского салона и охлаждения пускотормозных резисторов, а также тяговых электродвигателей в том случае, если последние рассчитаны на независимую вентиляцию. С целью упрощения

www.nilem.ru

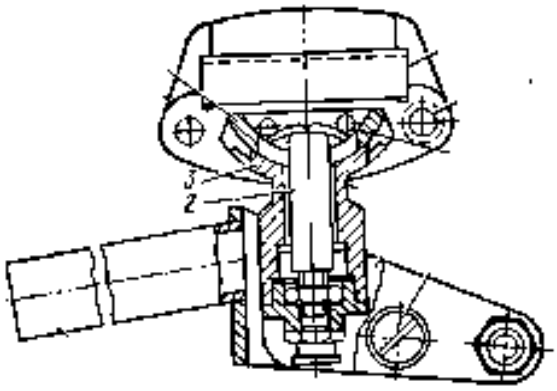
электрооборудования часто вентилятор и генератор собственных нужд приводятся в действие от одного электродвигателя. В этом случае требуется электродвигатель мощностью 2,5…5 кВт [107].



а)



б)



в)

Рис. 3.1. Дуговой токоприемник а), штанговый токоприемник б), токосъемная головка штангового токоприемника в)

www.nilem.ru

Для питания сжатым воздухом тормозной системы, пневмоподвески и других потребителей сжатого воздуха обычно устанавливают поршневой одноступенчатый компрессор с подачей 300…500 л/мин и максимальным давлением до 0,8 МПа. Электродвигатель с компрессором в сборе составляют агрегат-двигатель-компрессор. Мощность электродвигателя компрессора находится, как правило, в пределах 2…4 кВт [107].

Все вспомогательные электродвигатели получают питание через постоянно введенные в их цепь индивидуальные демпферные резисторы, которые служат для снижения максимальных значений переходных токов, возникающих при колебаниях напряжения в контактной сети и, в частности, при проездах пересечений, изоляторов и других спецчастей контактной сети.

Включение и выключение цепей вспомогательных двигателей осуществляются выключателями с ручным приводом или контакторами. На трамвайных вагонах и троллейбусах отечественного производства применяют выключатели ВУ-222 и ВУ-222А с дугогашением.

Освещение салона электрифицированного подвижного состава может осуществляться либо непосредственно от контактной сети, как на трамвайных вагонах РВЗ-6М-2, КТМ-5М-3 и Т-3, либо от аккумуляторных батарей, как на троллейбусах ЗиУ-9 и 9Тр. На трамвайных вагонах для освещения салона и маршрутных фонарей применяют лампы ТІ или ТР мощностью 60 Вт и напряжением 120 В и лампы мощностью 60 Вт и напряжением 50…55 В. Лампы имеют устройство, автоматически закорачивающее цепь при перегорании нити. На вагоне РВЗ-6М-2 пассажирский салон освещается двумя группами люминесцентных ламп, которые получают питание от контактной сети. В каждой группе по 13 ламп ПВ-1 (50 В, 60 Вт), соединенных последовательно. Из них в салоне устанавливаются 20 ламп (11 ламп на левой стороне потолка салона и 9 ламп на правой стороне), 5 ламп в маршрутном указателе и 1 лампа в маршрутном номере.

Рассмотренные технические характеристики некоторых распространенных конструктивных элементов подвижного состава электротранспорта будут использованы в дальнейшем для построения конечноэлементных моделей транспортных средств.

3.2. Учет объемных проводящих тел, присутствующих в непосредственной близости токоведущих частей. Учет вторичных вихретоковых полей

Электродинамическое моделирование электротранспорта будем проводить при помощи метода конечных элементов, численная реализация которого был подробно описана в разделе 2 настоящей монографии.

Следует отметить, что корпус электрического транспортного средства находится в непосредственной близости от токоведущих частей контактной

www.nilem.ru

сети. В связи с этим, очевидно, окажутся значительной величины вторичные поля, созданные вихревыми токами, наведенными в проводящих элементах кузова. Учет вихревых токов требует модификации исходных уравнений (1.43) и (1.44).

Источниками вторичного поля являются токи, наведенные в толще металла переменным электрическим полем, созданным токами контактной сети.

Первичное переменное магнитное поле в подобных случаях [49] оказывает незначительное влияние на вторичное поле, в связи с чем его учет при электродинамическом моделировании необязателен.

Таким образом, следует подвергнуть модификации лишь уравнение (1.44), исходя из предпосылки, что $\operatorname{rot}\vec{E} \neq 0$.

Иными словами, переходя к уравнению Пуассона, применим операцию ротора к обеим частям уравнения:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \qquad (3.1)$$

В результате чего получим:

$$\operatorname{grad}\operatorname{div}\vec{H} - \nabla^2 \vec{H} = \operatorname{rot}\vec{j} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\operatorname{rot}\vec{E}. \qquad (3.2)$$

Учитывая то обстоятельство, что электрическое поле изменяется во времени по гармоническому закону ($\sim \cos \omega t$), а так же используя материальное уравнение $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, придем к соотношению:

$$-\nabla^2 \vec{H} = \operatorname{rot}\vec{j} - \varepsilon_0 \varepsilon \sin \omega t \operatorname{rot}\frac{\vec{j}}{\sigma}. \qquad (3.3)$$

Или, группируя однородные слагаемые в правой части (3.3), можно записать конечный вариант уравнения:

$$-\nabla^2 \vec{H} = \left[1 - \frac{\cos \omega t}{\operatorname{tg}\delta}\right] \operatorname{rot}\vec{j}, \qquad (3.4)$$

где $\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь материала корпуса [136].

В правых частях координатных уравнений (2.7) и (2.13) появится дополнительный множитель, зависящий от времени по гармоническому закону, в результате чего системы уравнений примут вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = -\left[1 - \frac{\cos \omega t}{\operatorname{tg}\delta}\right] \frac{\partial j_z}{\partial y}, \\
&\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} = \left[1 - \frac{\cos \omega t}{\operatorname{tg}\delta}\right] \frac{\partial j_z}{\partial x}, \qquad (3.5) \\
&\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = 0.
\end{aligned}$$

www.nilem.ru

Аналогичным образом изменится система координатных уравнений для цилиндрической системы координат:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_r}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_r}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2}=\left[1-\frac{\cos\omega t}{\operatorname{tg}\delta}\right]\left[\frac{\partial j_\varphi}{\partial z}-\frac{1}{r}\frac{\partial j_z}{\partial \varphi}\right],$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_\varphi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial z^2}=\left[1-\frac{\cos\omega t}{\operatorname{tg}\delta}\right]\left[\frac{\partial j_z}{\partial r}-\frac{\partial j_r}{\partial z}\right], \qquad (3.6)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial H_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2}=\frac{1}{r}\left[1-\frac{\cos\omega t}{\operatorname{tg}\delta}\right]\left(\frac{\partial j_r}{\partial \varphi}-\frac{\partial}{\partial r}(rj_\varphi)\right).$$

В остальном вычислительные процедуры, выполняемые в рамках метода конечных элементов, не отличаются от приведенных в разделе 2 и приложении 2.

3.3. Расчет уровней ЭМП электротранспорта

3.3.1. Электромагнитные поля системы питания троллейбуса

На рис.3.2 и 3.5 приведены результаты расчета электрического поля, создаваемого цепью питания троллейбуса в присутствии вагона типа ЗиУ-9, оснащенного двумя тяговыми двигателями, суммарной мощностью 260 кВт. Троллейбус оснащен штанговым токоприемником.

На рис.3.3 и 3.6 показано распределение магнитного поля троллейбуса. Рис.3.4 иллюстрирует распределение магнитных силовых линий. Графики, приведенные на рис.3.5 и 3.6 показывают зависимости напряженностей, соответственно, электрического и магнитного полей на высотах 0, 0,5 м, 1 м, 1,5 м и 2 м от уровня земной поверхности.

Приведенные результаты подтверждают, что уровни электрического и магнитного полей внутри салона троллейбуса достаточно высоки (0,2 кВ/м и 60 мкТл), и в ряде случаев приближаются к ПДУ, установленному для населения.

Относительно структуры поля отметим то обстоятельство, что области «сильного поля» и по электрической и по магнитной компонентам локализованы вблизи проводов контактной сети и практически не «касаются» салона. Уровни поля вне салона, оказываются небольшими и уже на расстоянии 1…1,5 м от расположения контактной сети не превышают ПДУ. Следует также заметить, что присутствие вагона очевидным образом приводит к увеличению уровней поля, следовательно «чистая» контактная сеть (даже несущая нагрузку) создает поля, уровни которых можно признать безопасными.

www.nilem.ru

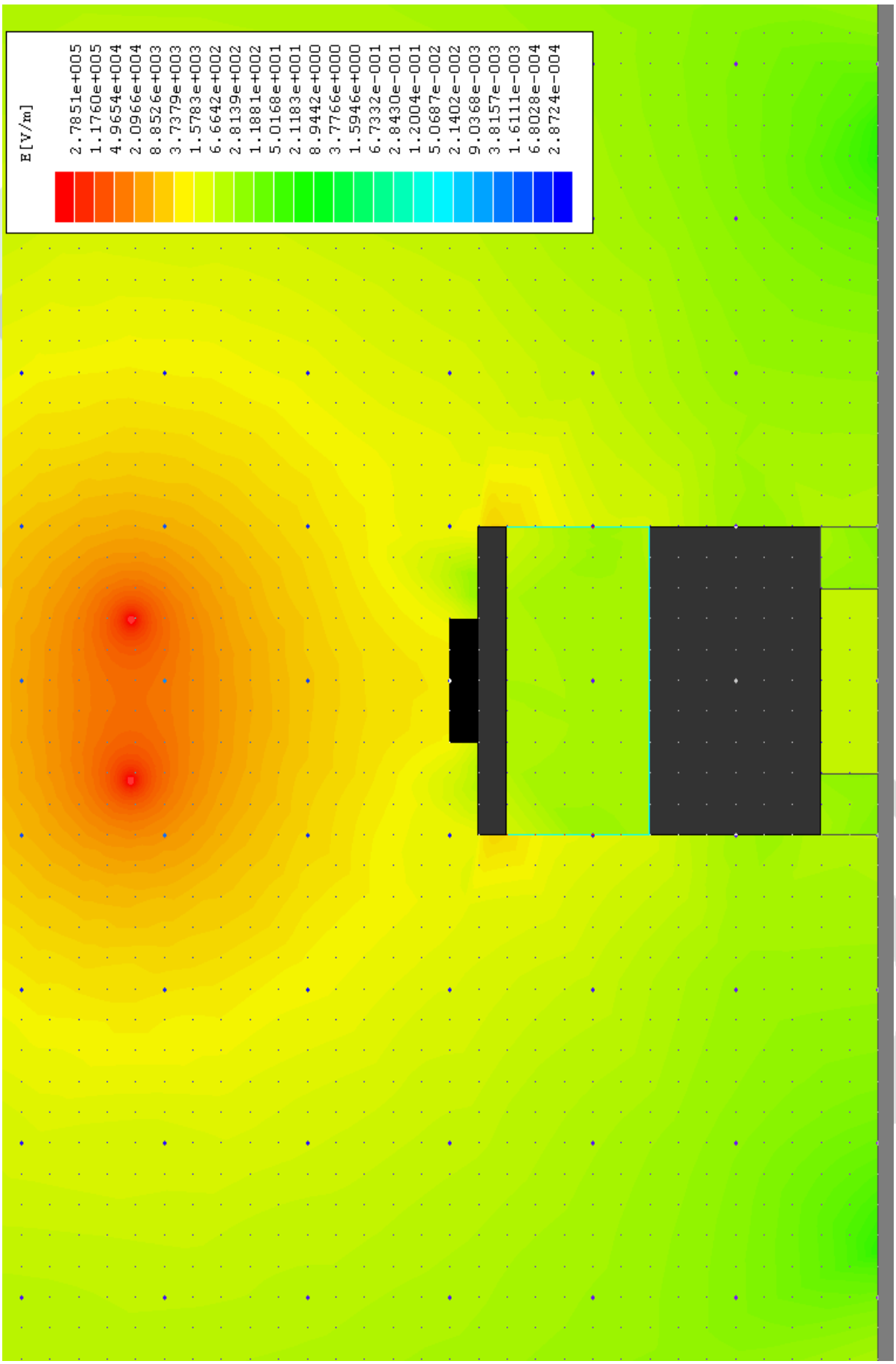


Рис.3.2. Распределение электрического поля цепи питания троллейбуса в вертикальном сечении

www.nilem.ru

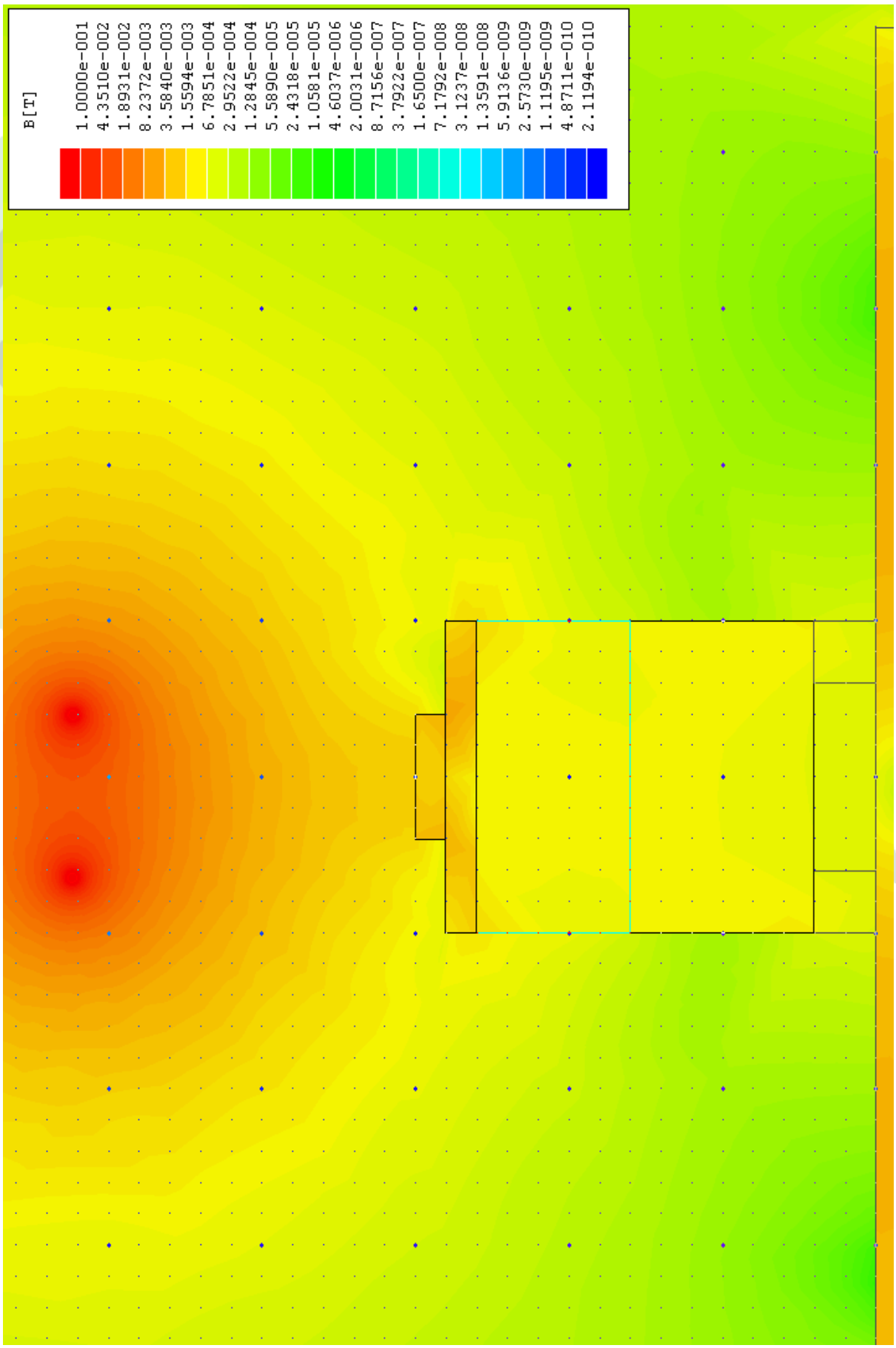


Рис.3.3. Распределение магнитного поля цепи питания троллейбуса в вертикальном сечении

www.nilem.ru

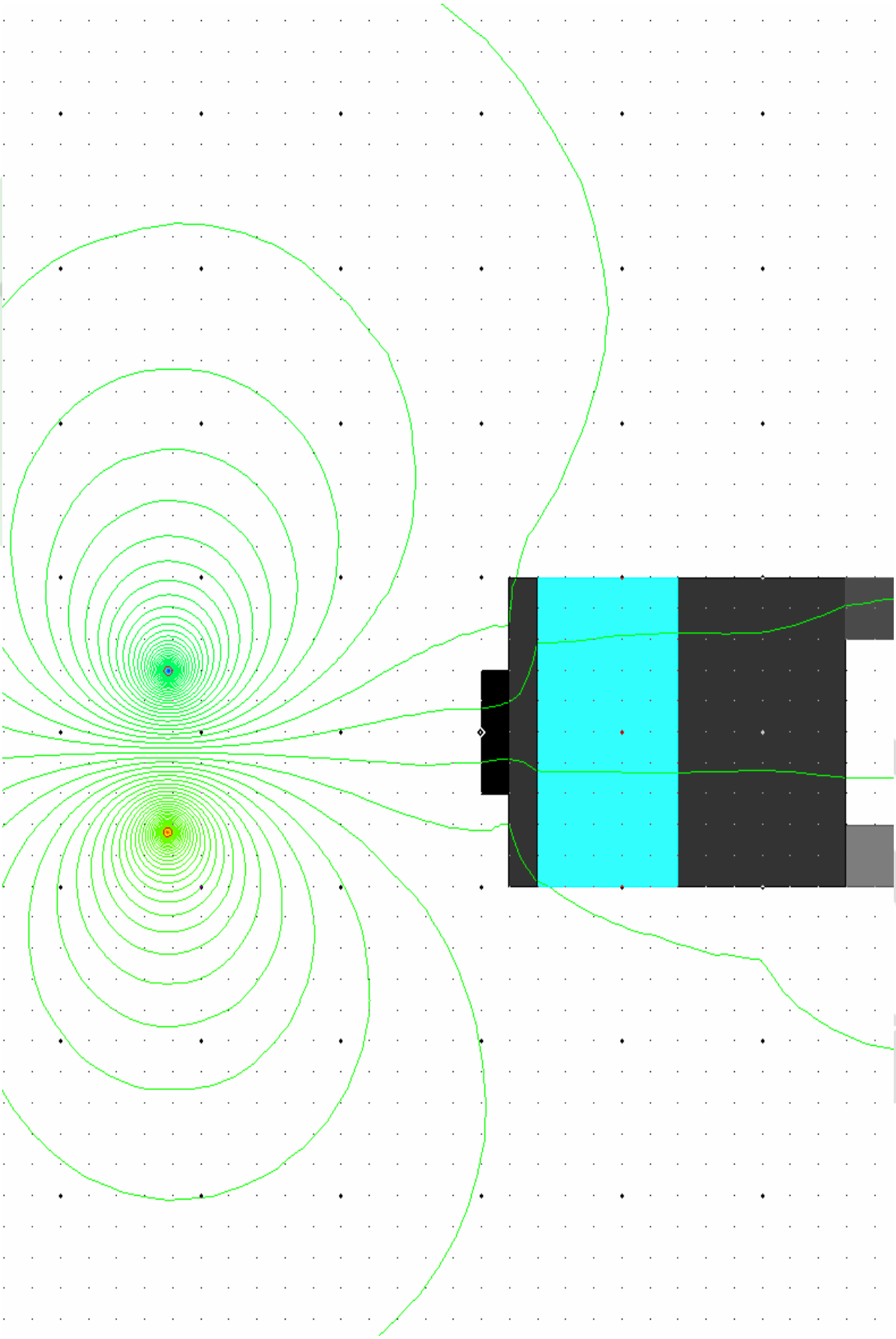


Рис.3.4. Распределение магнитных силовых линий цепи питания троллейбуса в вертикальном сечении

www.nilem.ru

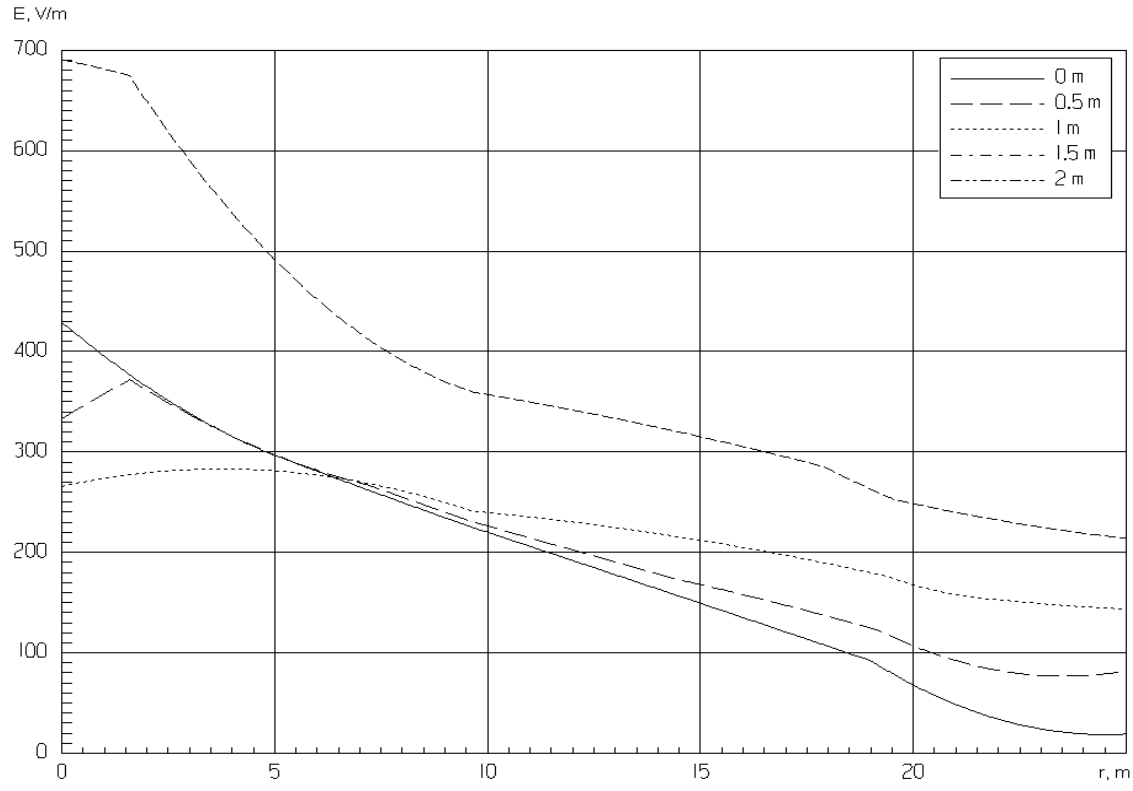


Рис.3.5. Распределение электрического поля цепи питания троллейбуса на различных высотах

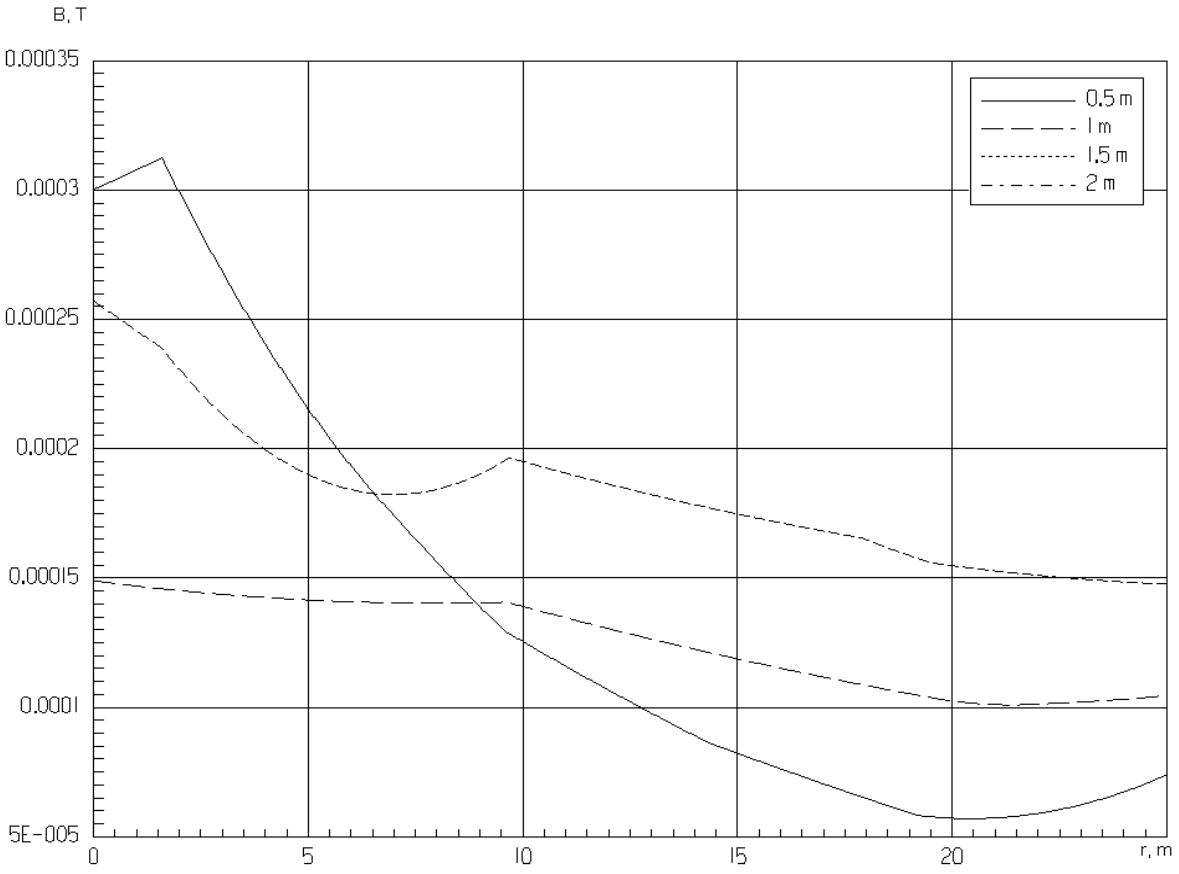


Рис.3.6. Распределение магнитного поля цепи питания троллейбуса на различных высотах

www.nilem.ru

3.3.2. Электромагнитные поля системы питания трамвая

На рис.3.7 и 3.9 приведены результаты расчета электрического поля, создаваемое цепью питания трамвая, в присутствии вагона типа КТМ-5М-3, оснащенного четырьмя тяговыми двигателями, суммарной мощностью 400 кВт. Трамвай оснащен дуговым токоприемником. На рис.3.8 – 3.11 показано распределение магнитного поля трамвая. Рис.3.11 иллюстрирует распределение магнитных силовых линий в непосредственной близости вагона. Графики, приведенные на рис.3.9 и 3.10, показывают зависимости напряженностей, соответственно, электрического и магнитного полей на тех же высотах, для которых анализировалось поле троллейбуса.

Приведенные результаты показывают, что уровни электрического и магнитного полей внутри салона трамвая оказываются достаточно высокими (0,5 кВ/м и 500 мкТл), и в ряде случаев превышают даже ПДУ, установленный для производственного персонала.

Структура поля вблизи трамвайного вагона существенно отличается от аналогичного случая с вагоном троллейбуса. Данное обстоятельство вызвано прежде всего тем, что ввиду значительного пространственного разнесения токоведущих частей контактной сети область «сильного поля» локализована в значительно большем объеме, включающим сам вагон. Причем корпус вагона не обеспечивает эффективного экранирования, вследствие чего уровни поля в салоне оказываются большими, чем в троллейбусе. Уровни поля вне салона так же, как и в предыдущем случае, невелики.

3.3.3. Электромагнитные поля системы питания метрополитена

При моделировании ЭМП в метрополитене необходимо учитывать не только специфическое расположении проводов контактной сети, но и то обстоятельство, что вся электродинамическая система оказывается помещенной в замкнутый короб, в большинстве случаев имеющий качественную заземленную арматуру. На рис.3.12 – 3.16 приведены результаты расчета для условий, аналогичных предыдущим случаям.

Достаточно близкое расположение проводов контактной сети приводит к локализации области «сильного поля» вблизи стены метрополитена, противоположной платформе. Уровни поля, однако, превышают ПДУ практически повсеместно и значительно (до 5 раз). Данное явление обусловлено также в значительной степени экранирующим действием арматуры стен помещения метрополитена.

Однако данные превышения ПДУ могут иметь место лишь при наличии вагона, потребляющего полную нагрузку от контактной сети, то есть, очевидно, во время интенсивного разгона.

www.nilem.ru

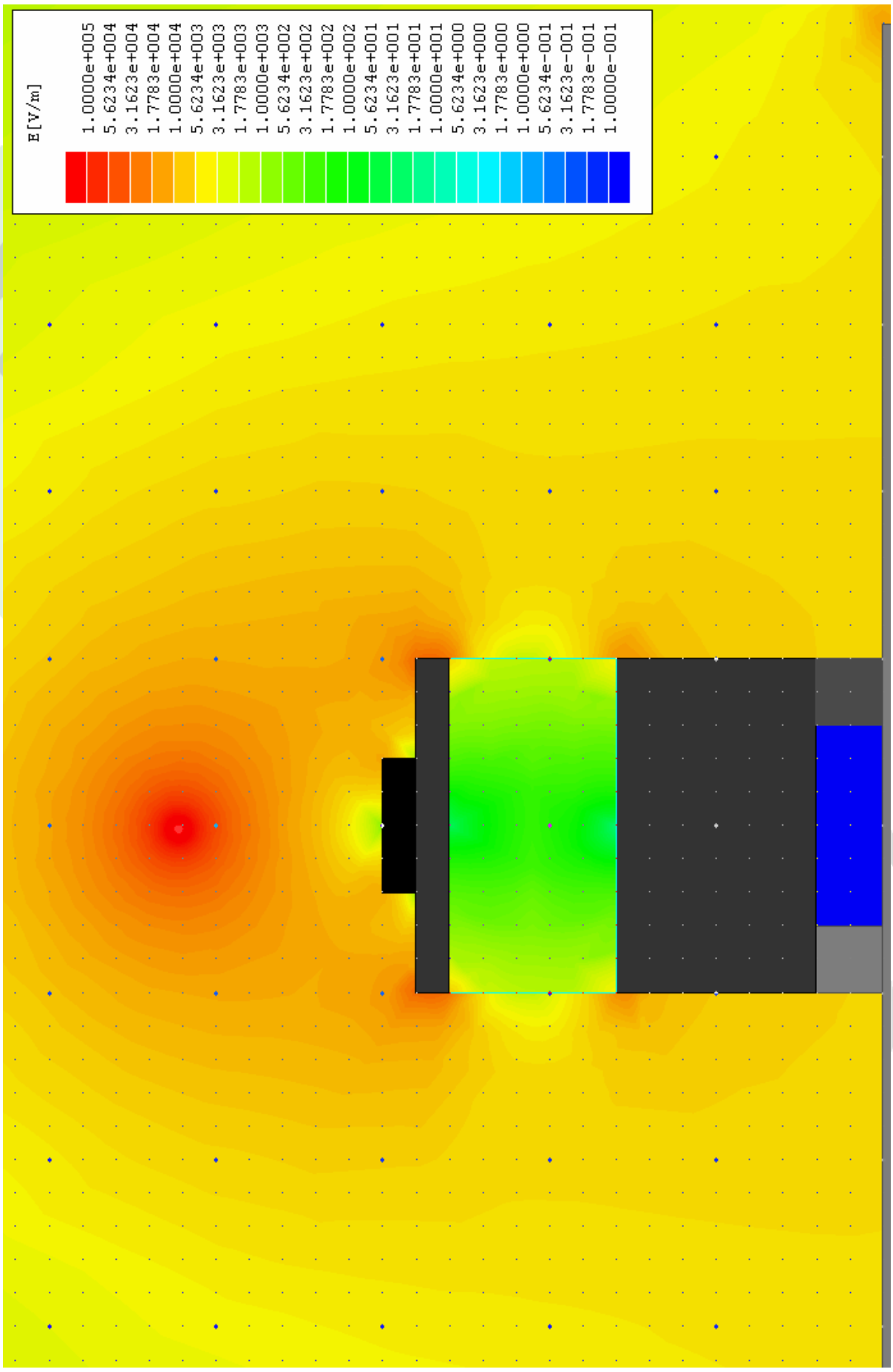


Рис.3.7. Распределение электрического поля цепи питания трамвая в вертикальном сечении

www.nilem.ru

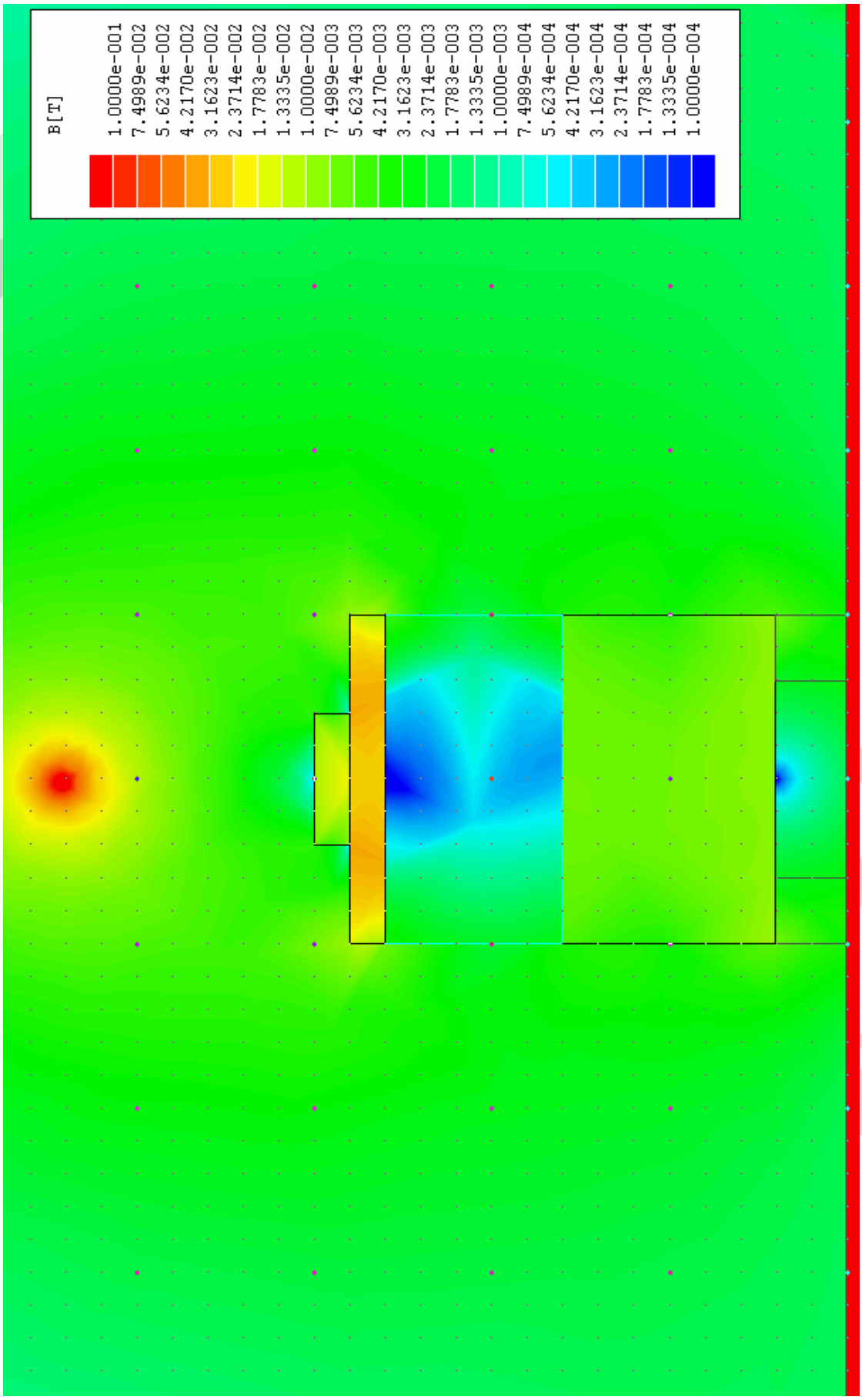


Рис.3.8. Распределение магнитного поля цепи питания трамвая в вертикальном сечении

www.nilem.ru

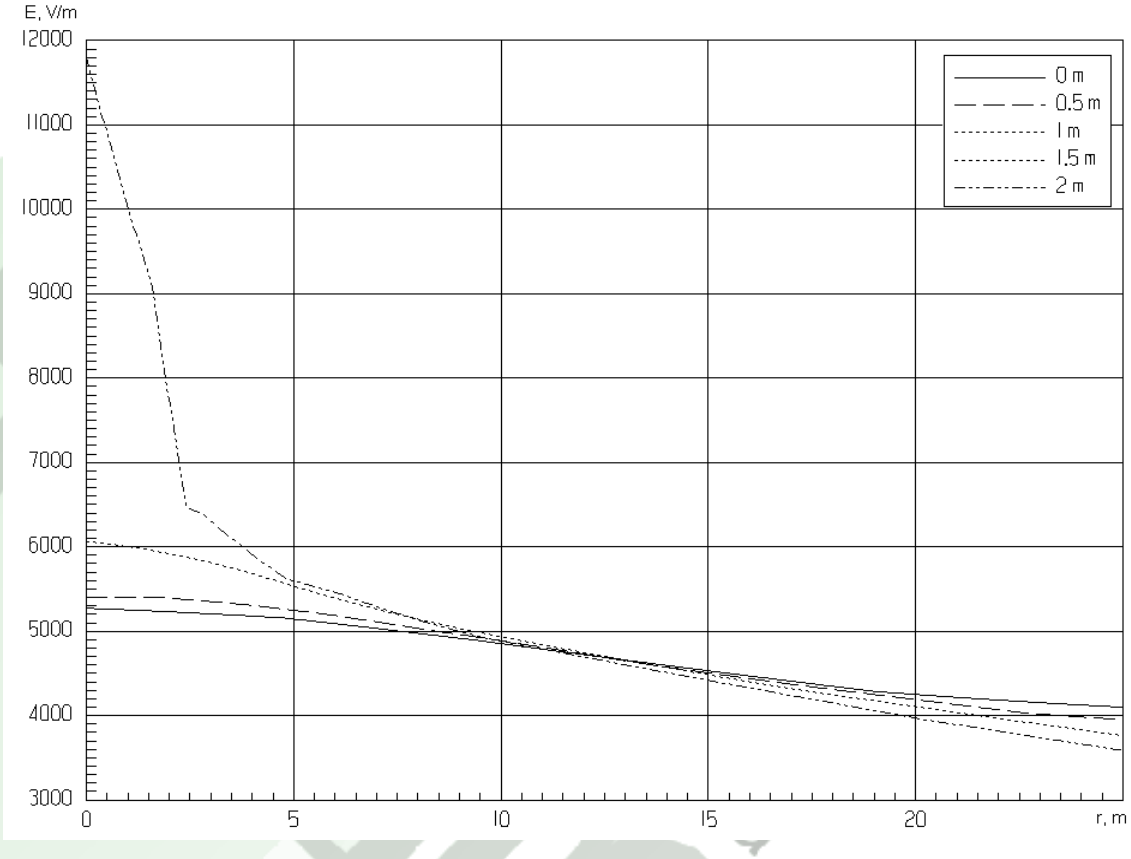


Рис.3.9. Распределение электрического поля цепи питания трамвая на различных высотах

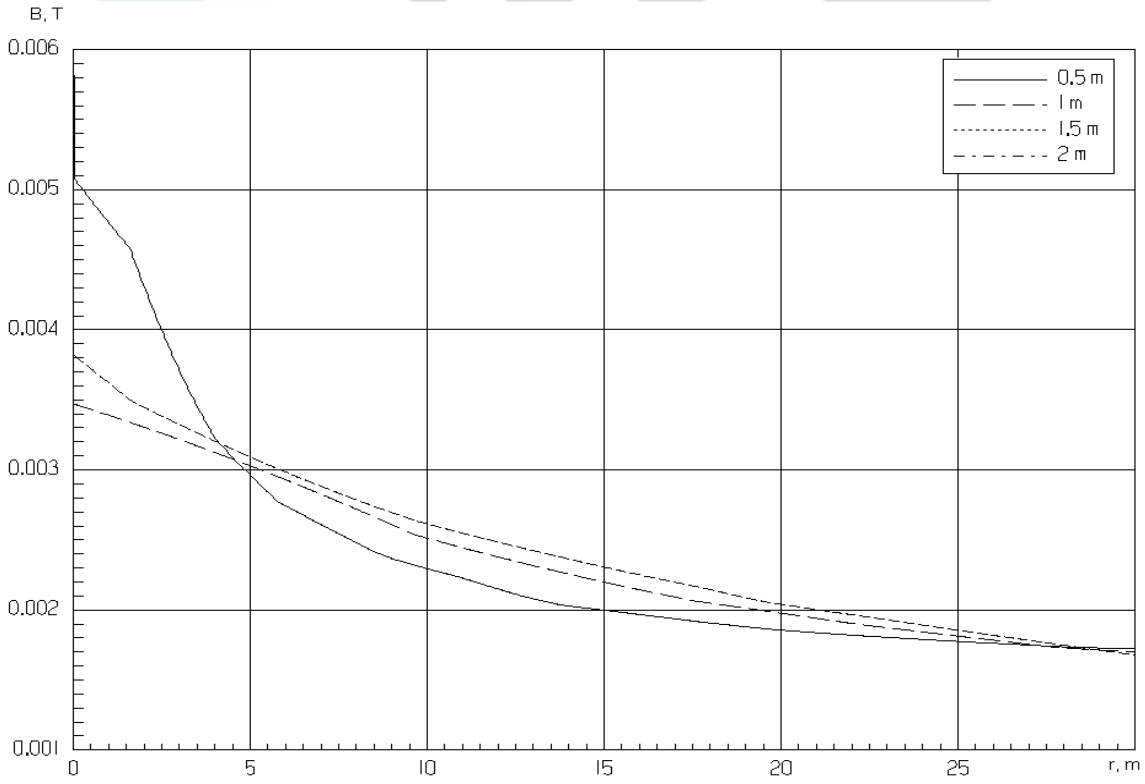


Рис.3.10. Распределение магнитного поля цепи питания трамвая на различных высотах

www.nilem.ru

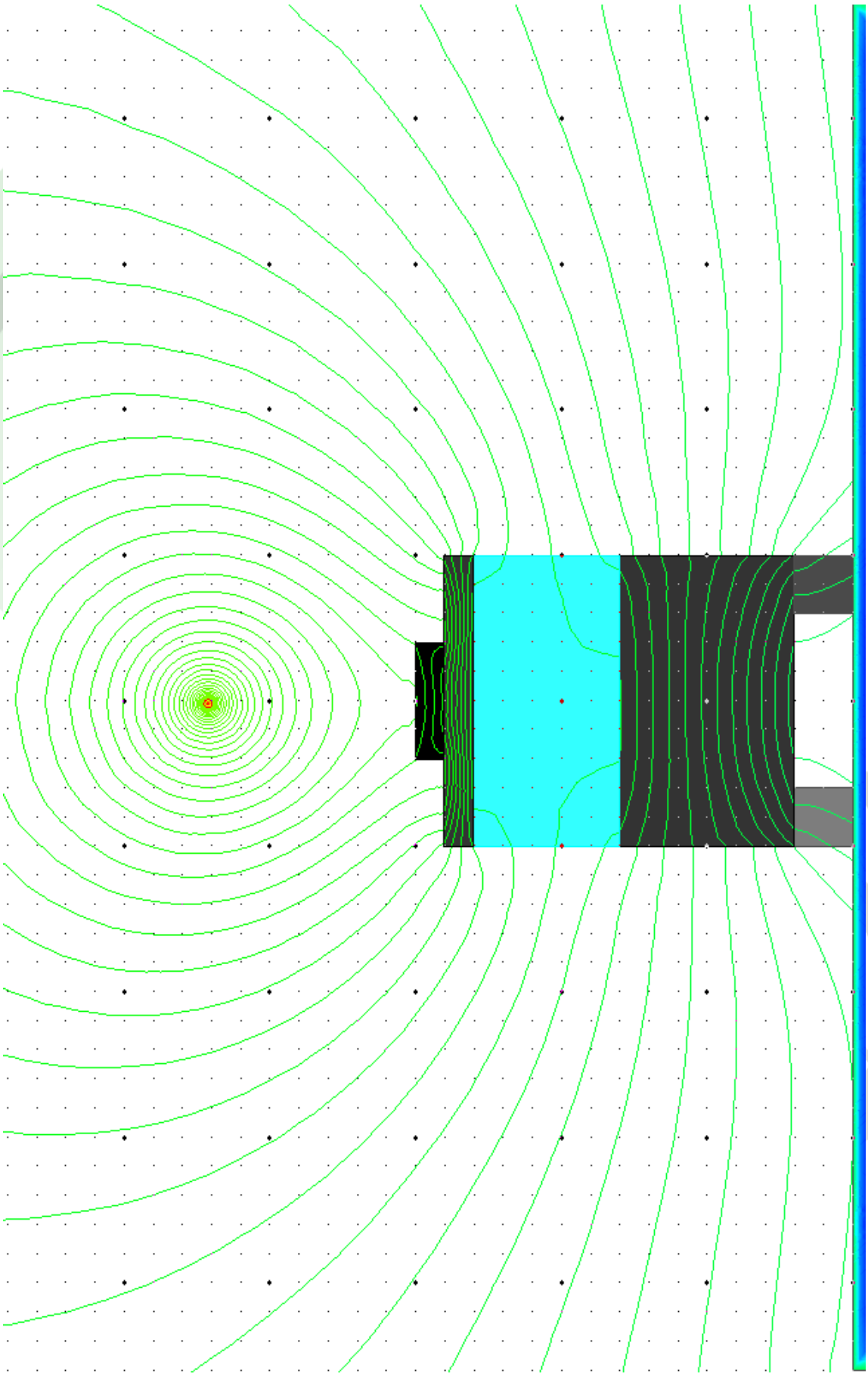


Рис.3.11. Распределение магнитных силовых линий цепи питания трамвая в вертикальном сечении

www.nilem.ru

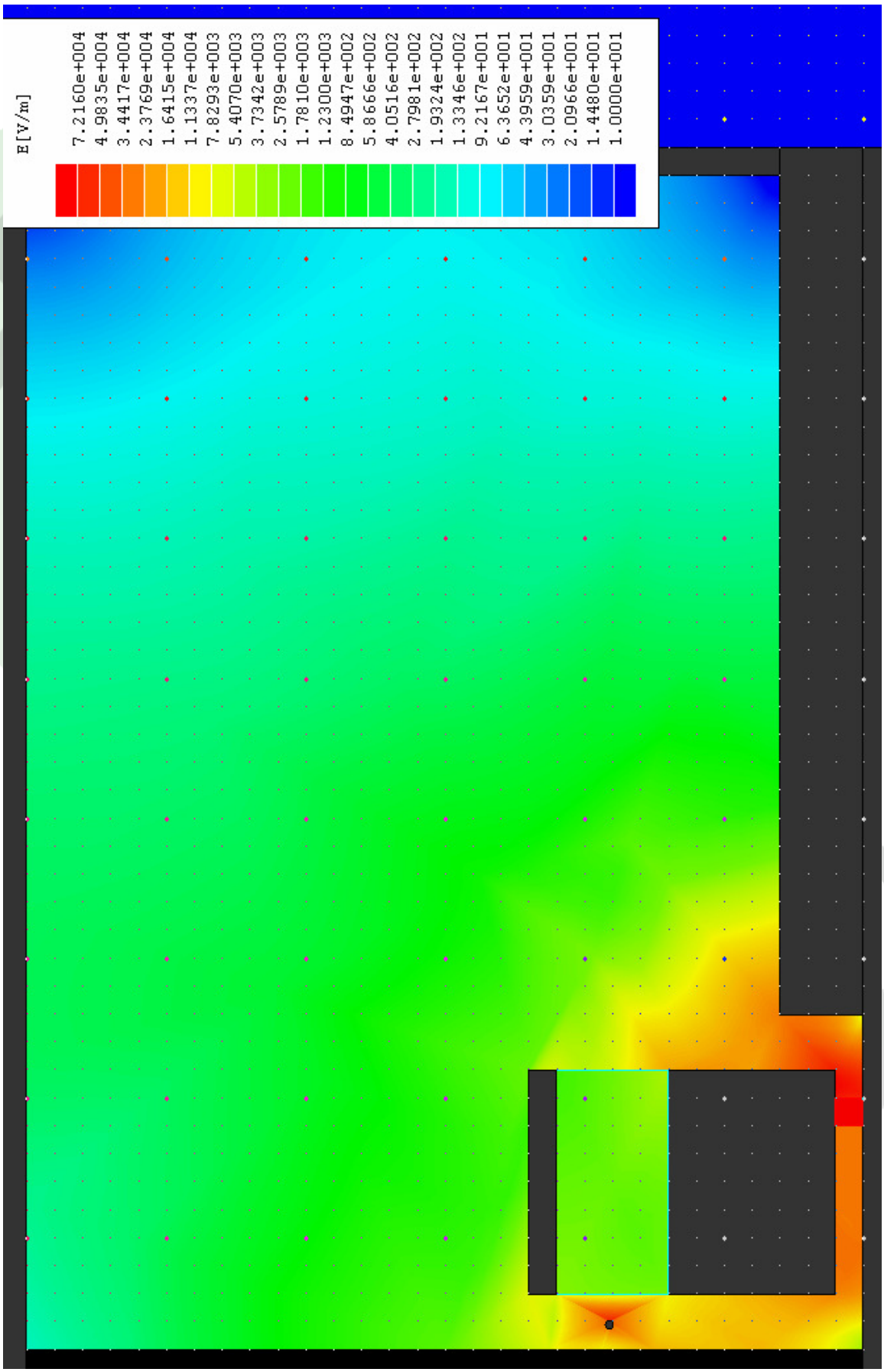


Рис.3.12. Распределение электрического поля цепи питания метрополитена в вертикальном сечении

www.nilem.ru

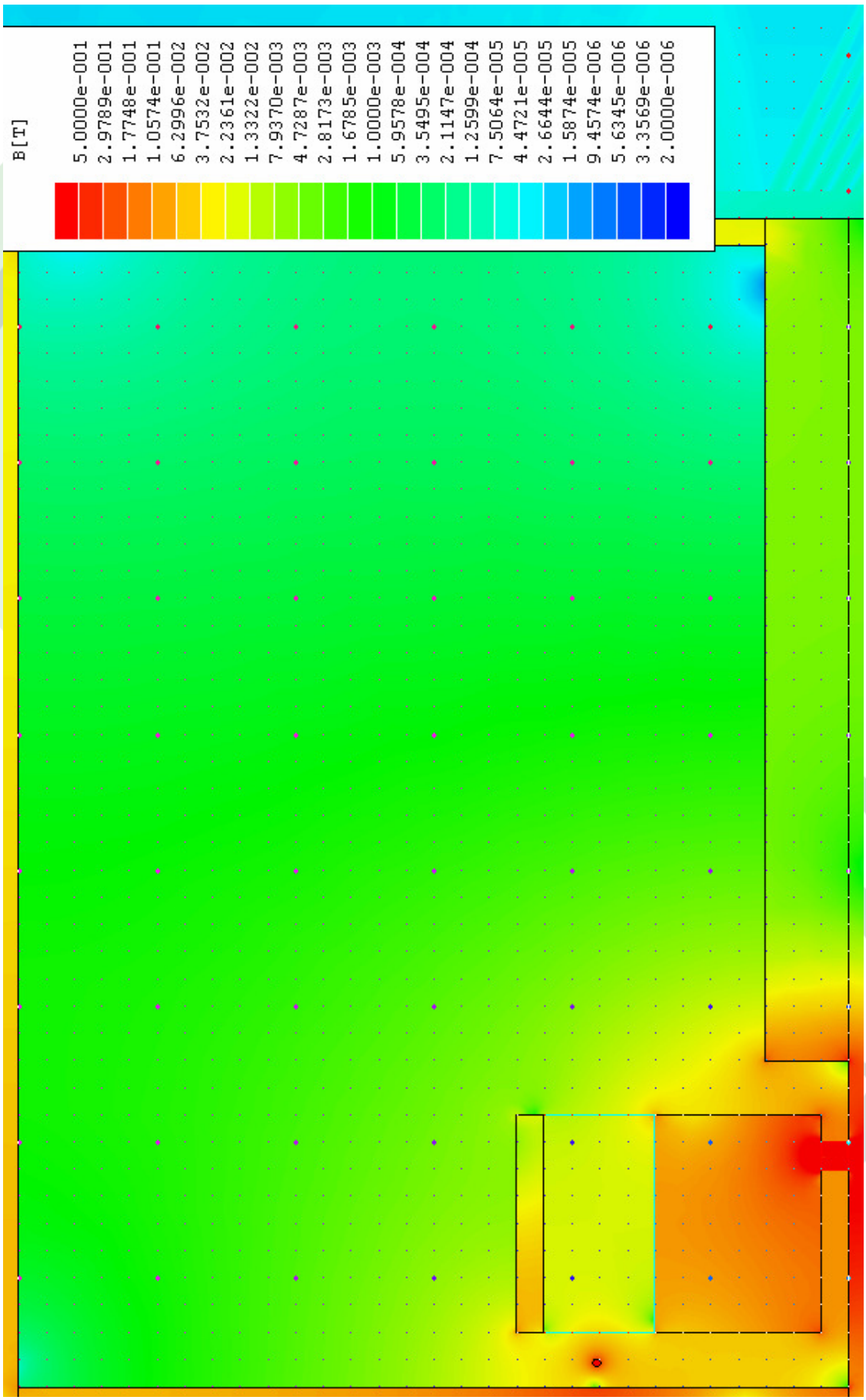


Рис.3.13. Распределение магнитного поля цепи питания метрополитена в вертикальном сечении

www.nilem.ru

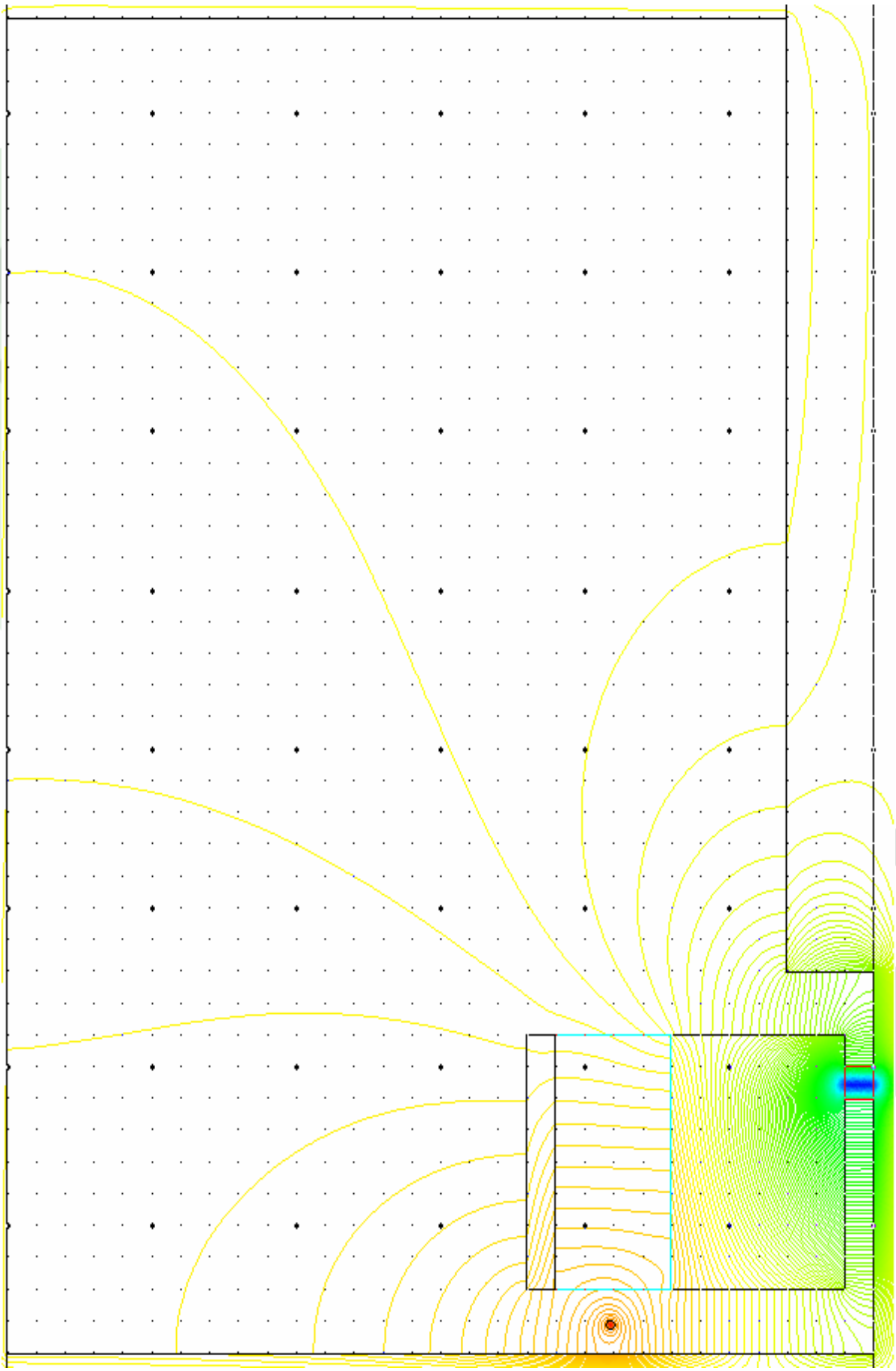


Рис.3.14.Распределение магнитных силовых линий цепи питания метрополитена в вертикальном сечении

www.nilem.ru

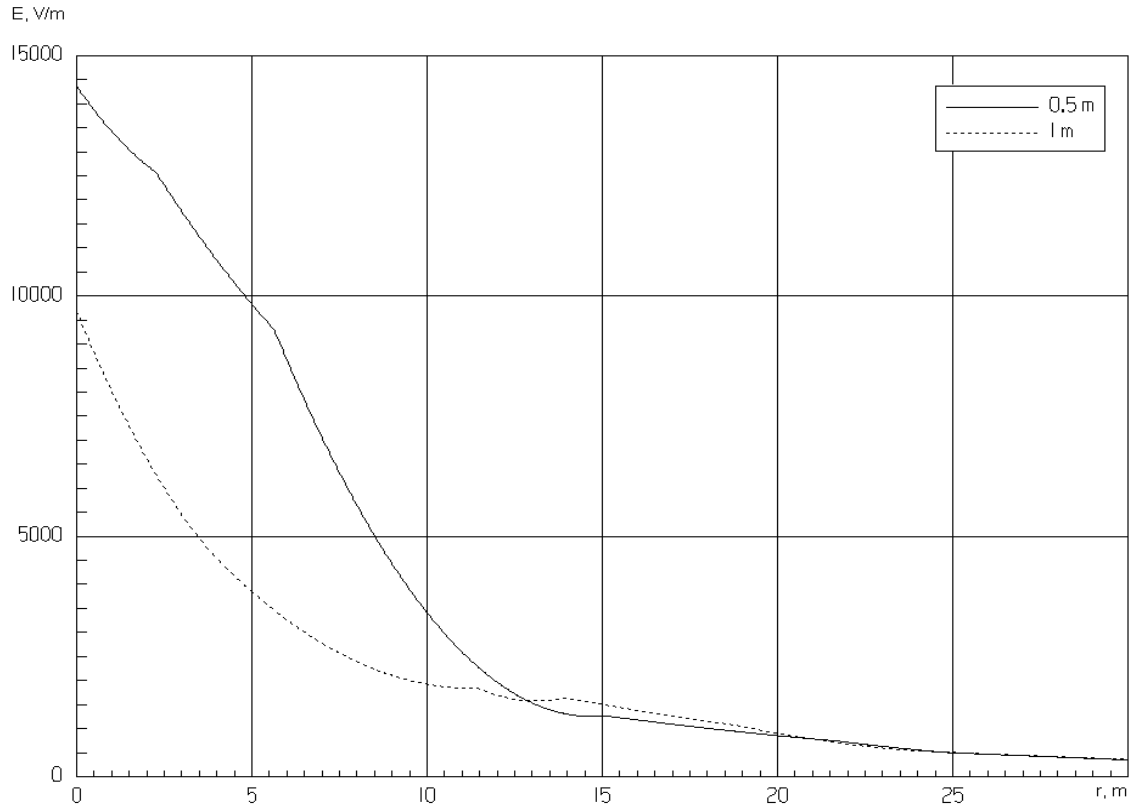


Рис.3.15. Распределение электрического поля цепи питания метрополитена на различных высотах

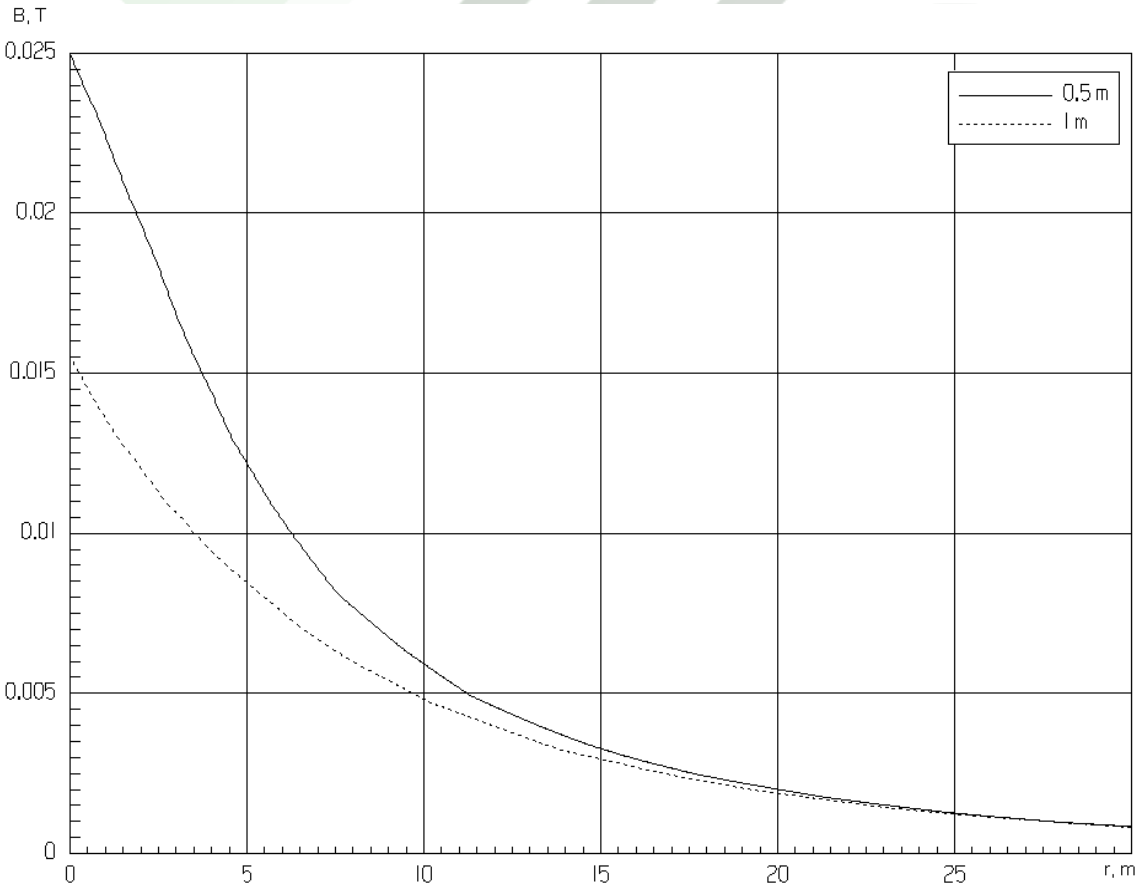


Рис.3.16. Распределение магнитного поля цепи питания метрополитена на различных высотах

www.nilem.ru

Такой режим имеет место лишь в течение коротких промежутков времени. Данное утверждение справедливо и для остальных видов электротранспорта, рассмотренных выше.

Однако, поскольку рассмотренные случаи являются наихудшими в смысле электромагнитной безопасности, именно полученные здесь результаты представляют наибольший интерес с точки зрения оценки экстремальных параметров электромагнитного мониторинга элементов энергосистем.

www.nilem.ru

РАЗДЕЛ 4. Экспериментальные исследования ЭМП энергетической инфраструктуры региона

4.1. Методика проведения эксперимента и обработки результатов

Несмотря на очевидные преимущества расчетных методов применительно к решению проблем электромагнитного мониторинга, экспериментальные исследования прочно сохраняют свои позиции в случаях:

- когда информация об устройстве объекта исследования отсутствует или недостаточна для построения корректной расчетно-теоретической модели;
- когда параметры, характеризующие режим работы объекта, оказываются труднопредсказуемыми;
- когда исходные параметры расчетной модели могут быть определены лишь на основе экспериментальных данных.

И, наконец, корректно поставленный эксперимент в адекватных условиях является лучшим критерием проверки точности результатов, получаемых расчетным путем.

Экспериментальные исследования ЭМП элементов региональной энергосистемы построим таким образом, чтобы условия проведения эксперимента были аналогичны условиям, моделируемым при расчете.

Ввиду существенного зашумления спектра вблизи промышленной частоты в городах, с одной стороны, и влияния побочных статических полей, с другой стороны, для измерений ЭМП ПЧ целесообразно использовать селективный прибор с закрытым входом. В качестве такого прибора может выступать, например, измеритель напряженности поля промышленной частоты П3-50.

Прибор П3-50 (см. рис.4.1) предназначен для измерения среднеквадратического значения напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты 50 Гц, возбуждаемых вблизи электроустановок высокого напряжения. В комплект прибора входят две измерительные антенны Е3-50 и Н3-50. Измерительная антенна Е3-50 представляет собой симметричную дипольную антенну электрически малых размеров (полный размер диполя 100 мм). Измерительная антенна типа Н3-50 представляет собой экранированную рамочную антенну электрически малых размеров (полный размер рамки 80 мм, число витков 5600).

Измерения ЭМП высоковольтных ЛЭП и цепей питания электротранспорта проводятся следующим образом:

www.nilem.ru

Рис.4.1. Измеритель напряженности поля промышленной частоты П3-50 и измерительные антенны Н3-50 (слева) и Е3-50 (справа)

www.nilem.ru

- электрическое и магнитное поля измеряются на высоте 2 м от поверхности Земли в направлении, перпендикулярном линии электропередач, в нескольких сечениях на протяжении всего следования линии; при этом необходимо учитывать возможное совместное прохождение линий различного класса напряжений и корректно интерпретировать результаты для этих случаев;

- магнитное поле измеряется систематически в течении некоторого времени (месяц, полгода, год) с целью проверки корреляции с соответствующим графиком загрузки линий;

- измерения контрольных точек корректируются в соответствии с характером рельефа местности;

- измерения проводятся до расстояний, превышающих размеры зоны, в которой контролируемые параметры оказываются больше своих предельно допустимых значений, регламентированных СанПиН.

Для трансформаторных подстанций целесообразно проводить измерения только магнитного поля. Магнитное поле свободностоящих (внешних) трансформаторных подстанций и тяговых подстанций электротранспорта измеряется в горизонтальном сечении на высоте 2 м от поверхности Земли до расстояний, превышающих размеры зоны, в которой контролируемые параметры оказываются больше своих предельно допустимых значений, регламентированных СанПиН. Магнитное поле встроенных трансформаторных подстанций измеряется в примыкающих помещениях на первом и далее этажах в горизонтальных сечениях, в плоскостях, отстоящих на 0,5 и 1,5 м от уровня поля, или иных условиях, моделируемых при расчете.

Электрическое поле силовых концентраторов-распределителей измеряется аналогично полю ЛЭП, а магнитное поле – аналогично полю трансформаторных подстанций.

Измерения необходимо проводить в каждой точке раздельно для трех ортогональных компонент векторов поля с последующим вычислением модуля результирующего вектора. Для каждой компоненты целесообразно проводить не менее трех измерений с последующим вычислением среднего значения.

4.2. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей высоковольтных ЛЭП

Измерения, результаты которых приведены ниже, проводились для ряда ЛЭП, эксплуатирующихся на территории Самарский области – ЛЭП-500 кВ, ЛЭП-200 кВ, ЛЭП-110 кВ. Измерения проводились с целью оценки уровней электромагнитных полей и, одновременно, проверки корректности расчетов, проведенных ранее.

Уровни напряженности электрического и магнитного полей определялись на высоте 2,0 м от поверхности Земли. С помощью прибора П3-50 и антенны Е3-50 определялись уровни электрического поля, соответст-

www.nilem.ru

вующие трем ортогональным составляющим вектора $\vec{E}$ (см. рис.4.2.а). С помощью прибора П3-50 и антенны Н3-50 определялись уровни магнитного поля, соответствующие трем ортогональным составляющим вектора $\vec{H}$ (см. рис.4.2.б).

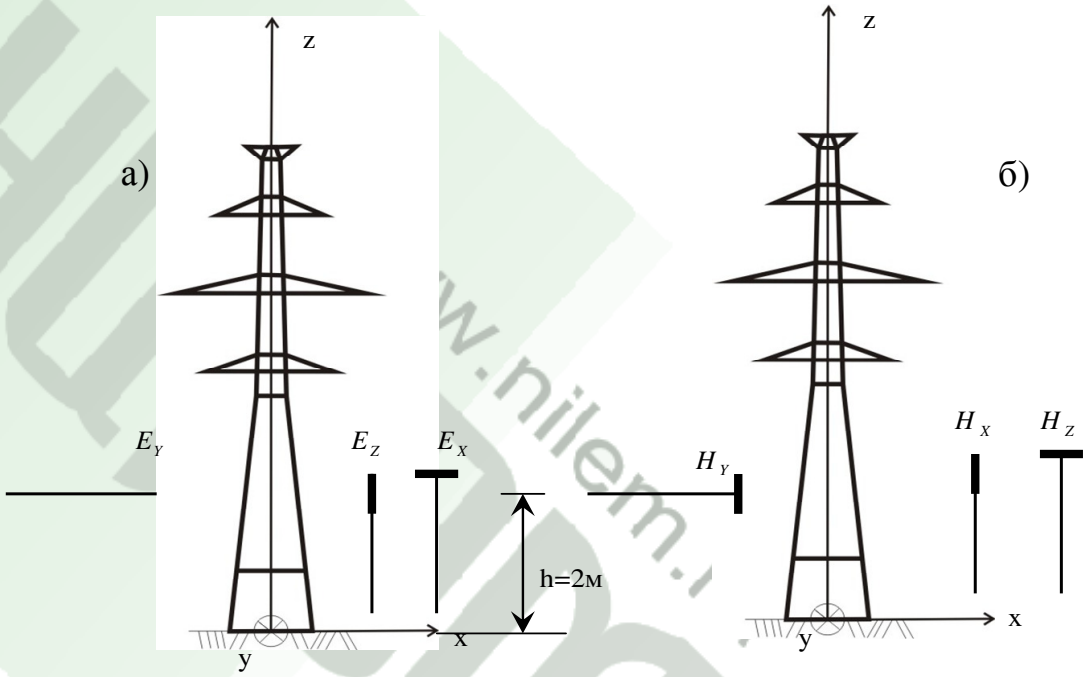


Рис.4.2. Пояснения к проведению измерений

Измерения проводились на отметках 0, 2, 5, 10, 15 , 20 , 50 метров от оси проходящей вдоль направления следования каждой ЛЭП; в каждой точке производилось не менее трех измерений, в протокол занесены максимальные значения полученных уровней.

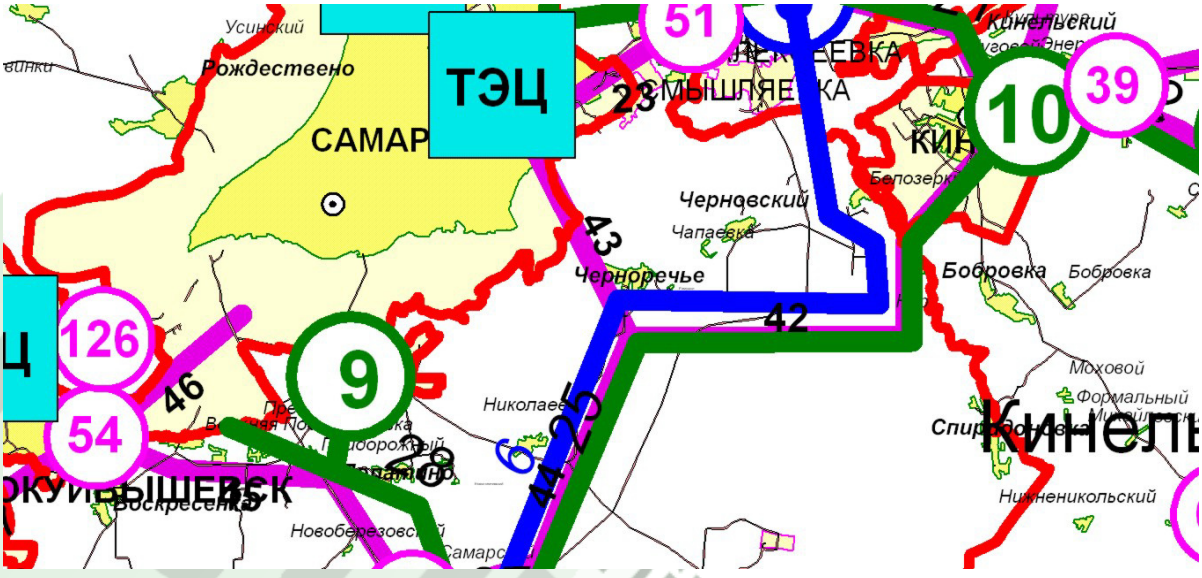
Фрагменты коридоров прохождения ЛЭП на карте Самарской области показаны на рис.4.3.

Процесс проведения измерений электрического поля ЛЭП при помощи прибора П3-50 и антенны Е3-50 показан на рис.4.4.

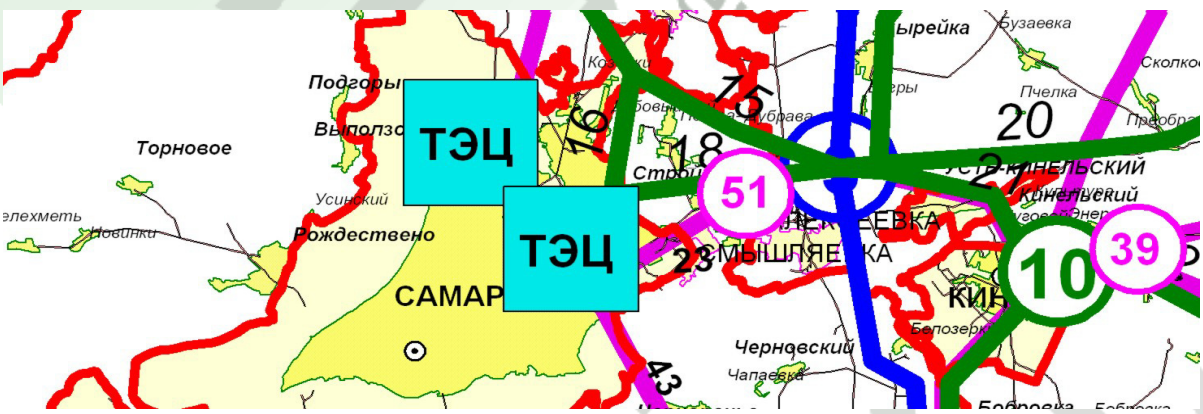
На рисунках, приведенных ниже, показаны распределения электрического и магнитного полей ЛЭП. Там же построены графики, полученные теоретическим путем. На рисунках приведены только средние значения, полученные экспериментальным путем.

Приведенные результаты измерений в указанных точках территории на различных расстояниях от объекта, полученные с помощью прибора для измерения напряженности поля промышленной частоты П3-50 в целом хорошо соответствуют результатам прогнозирования электромагнитной обстановки, полученными расчетно-аналитическим путем по разработанной ранее методике. Некоторые количественные расхождения между расчетными и экспериментальными результатами, очевидно, объясняются влиянием случайных факторов, которые не учитываются в методиках проведения расчетных и экспериментальных исследования.

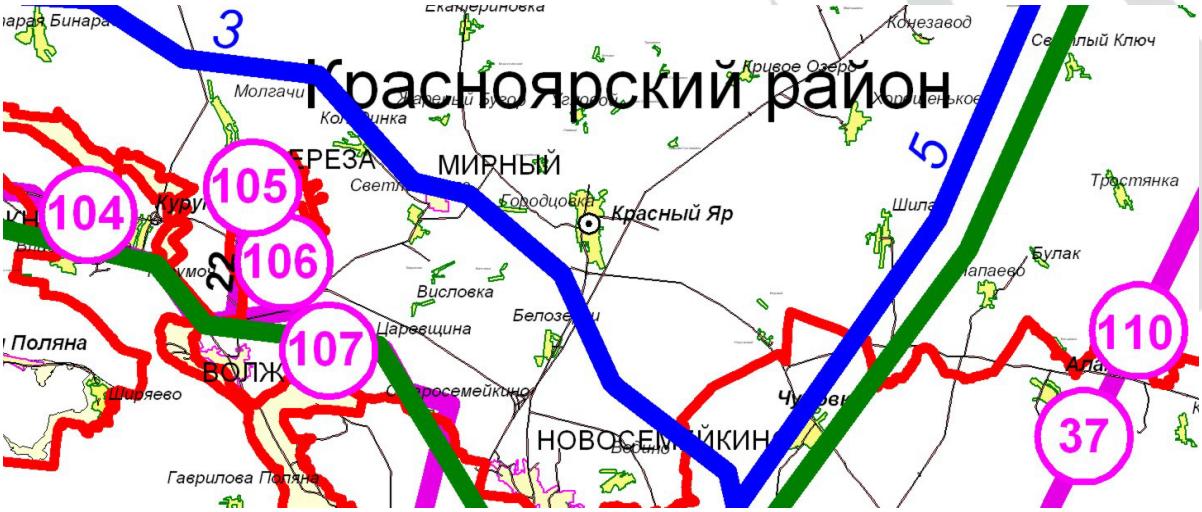
www.nilem.ru



110 кВ



220 кВ



500 кВ

Рис. 4.3. Фрагменты коридоров прохождения ЛЭП

www.nilem.ru

Рис.4.4. Измерения при помощи ПЗ-50

www.nilem.ru

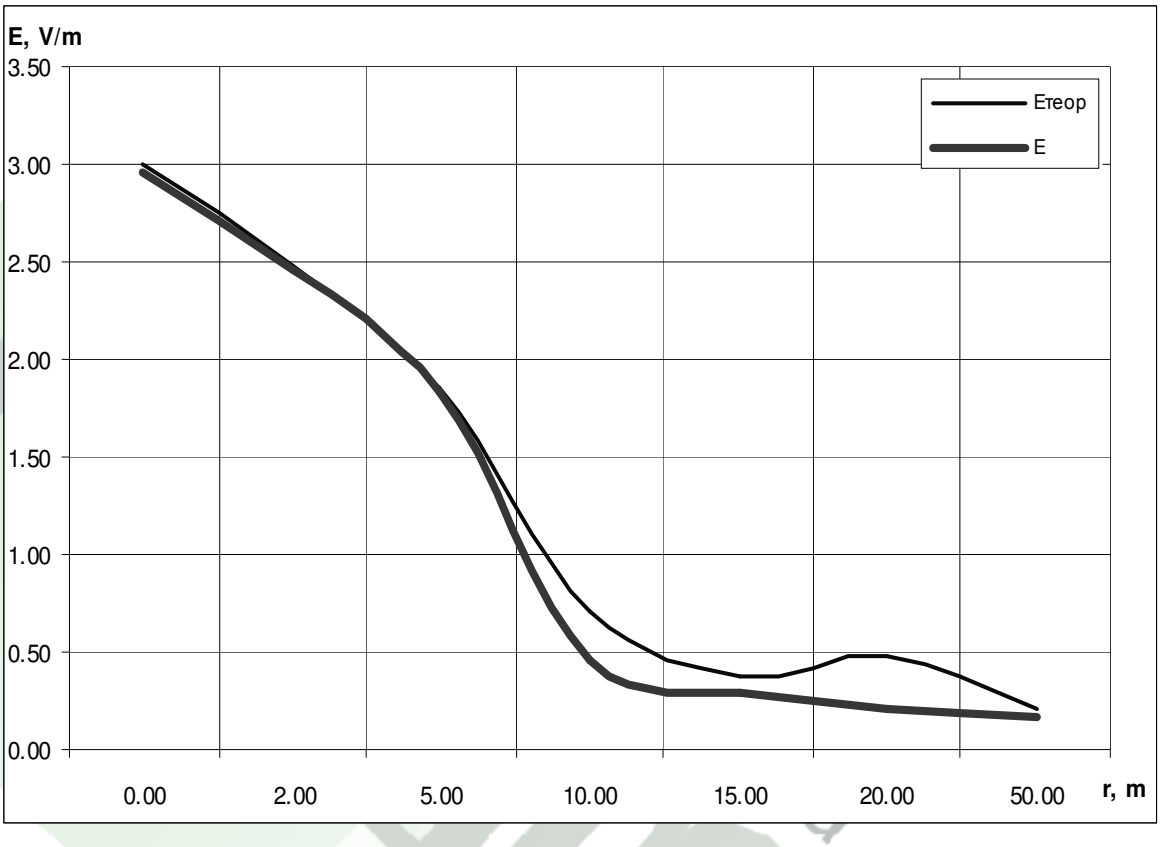


Рис.4.5. Электрическое поле ЛЭП 110 кВ

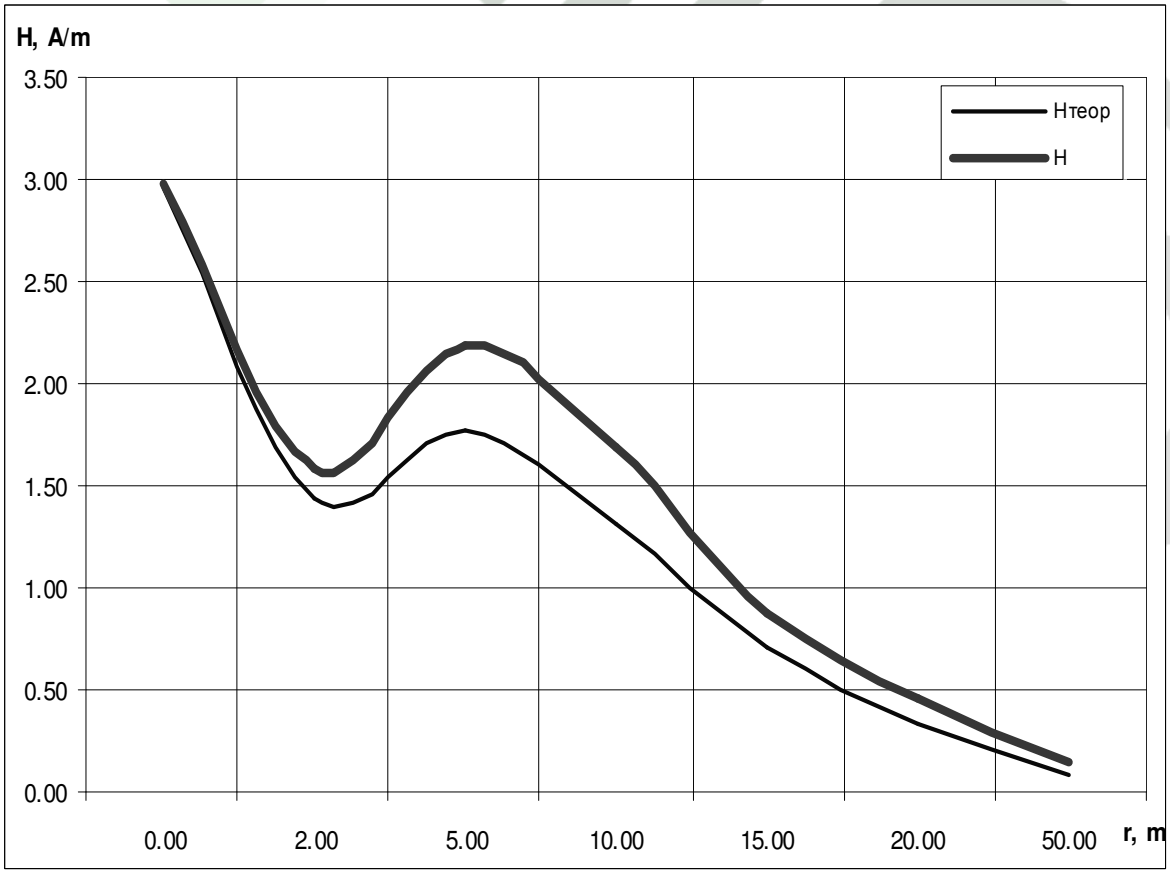


Рис.4.6. Магнитное поле ЛЭП 110 кВ

www.nilem.ru

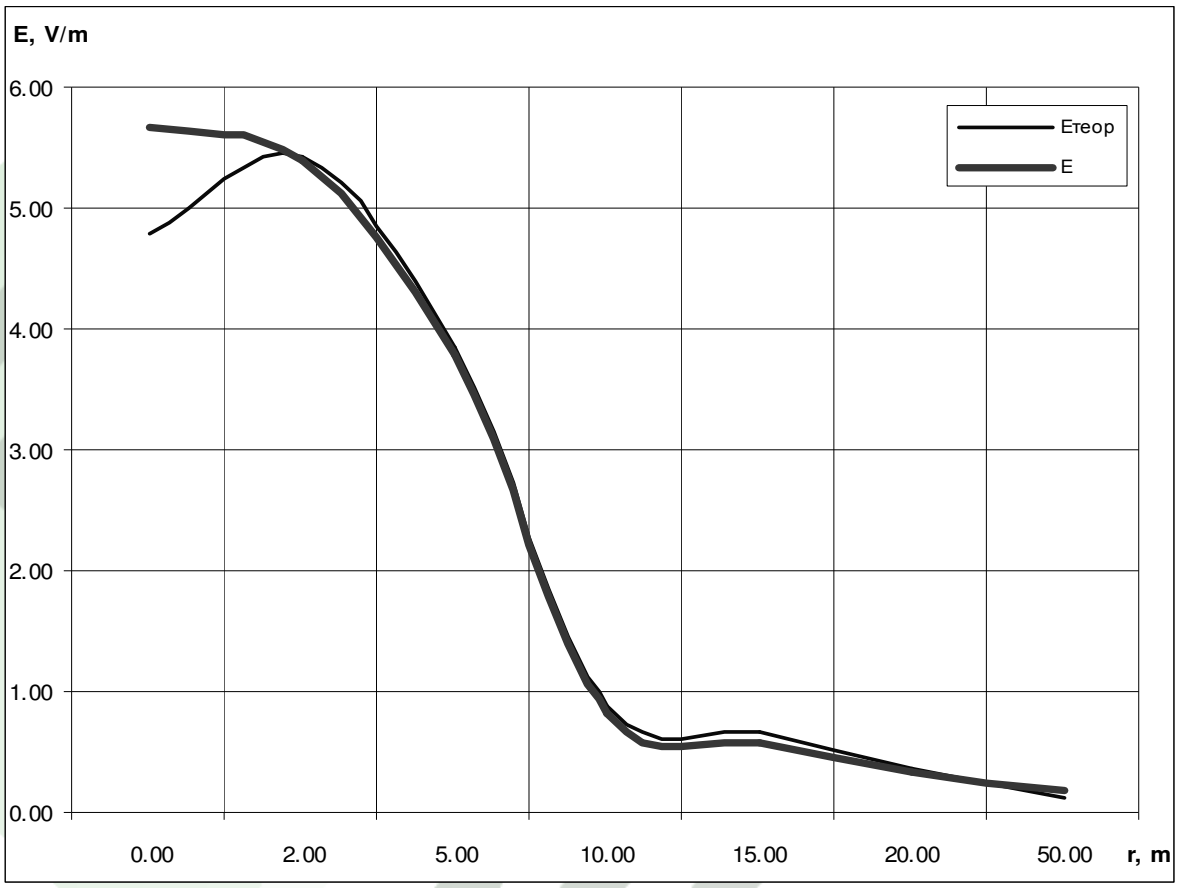


Рис.4.7. Электрическое поле ЛЭП 220 кВ

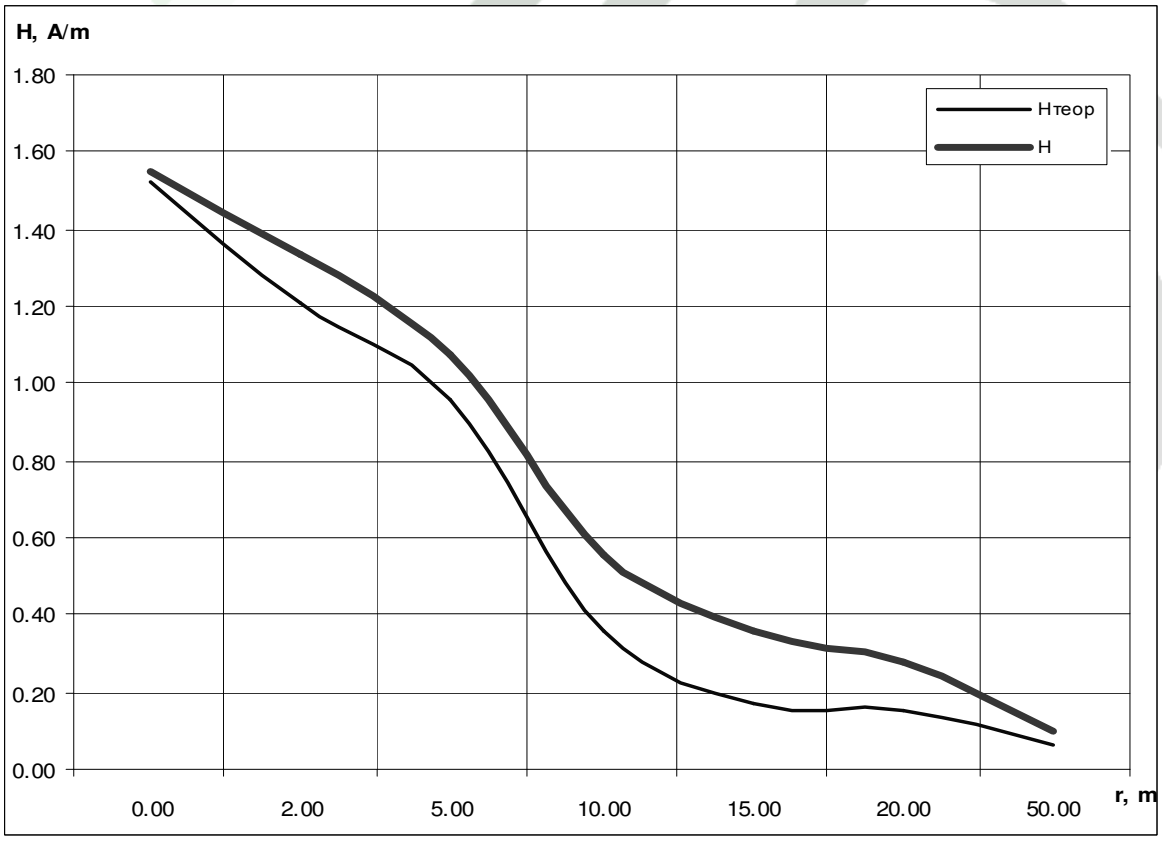


Рис.4.8. Магнитное поле ЛЭП 220 кВ

www.nilem.ru

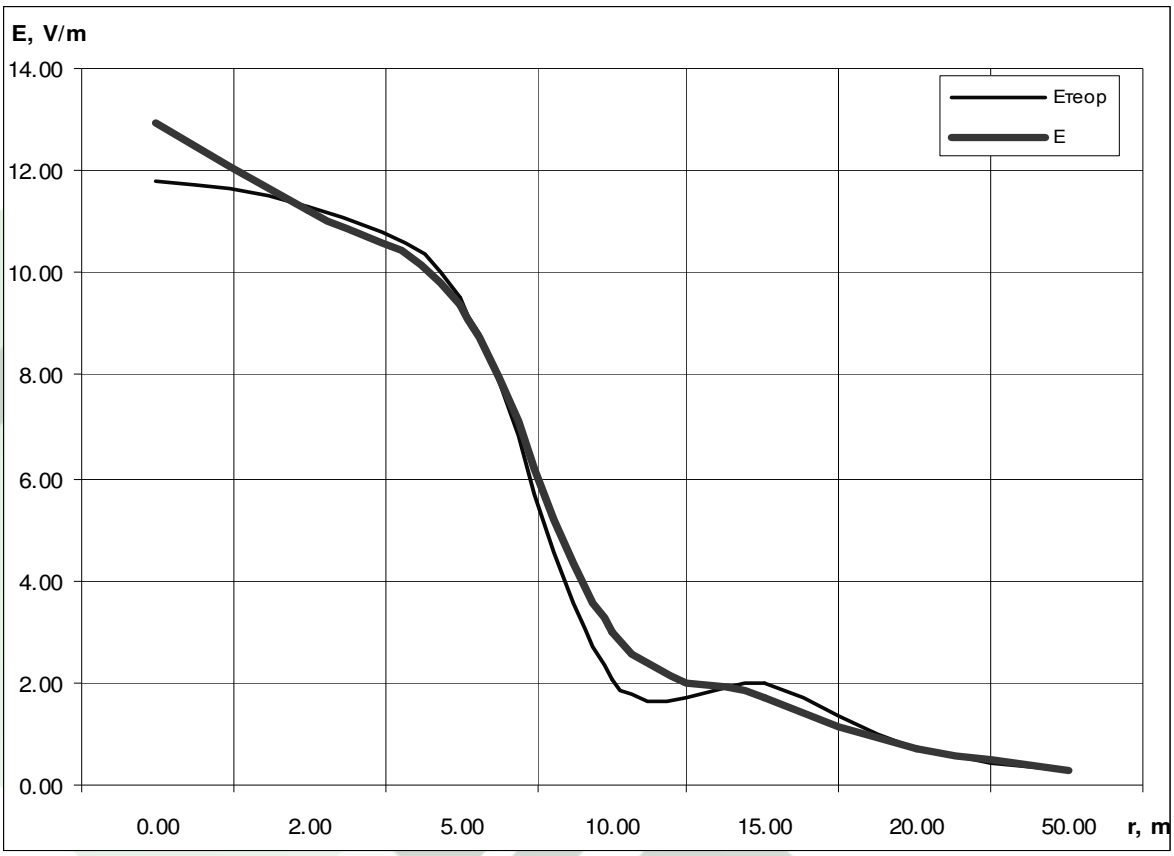


Рис.4.9. Электрическое поле ЛЭП 500 кВ

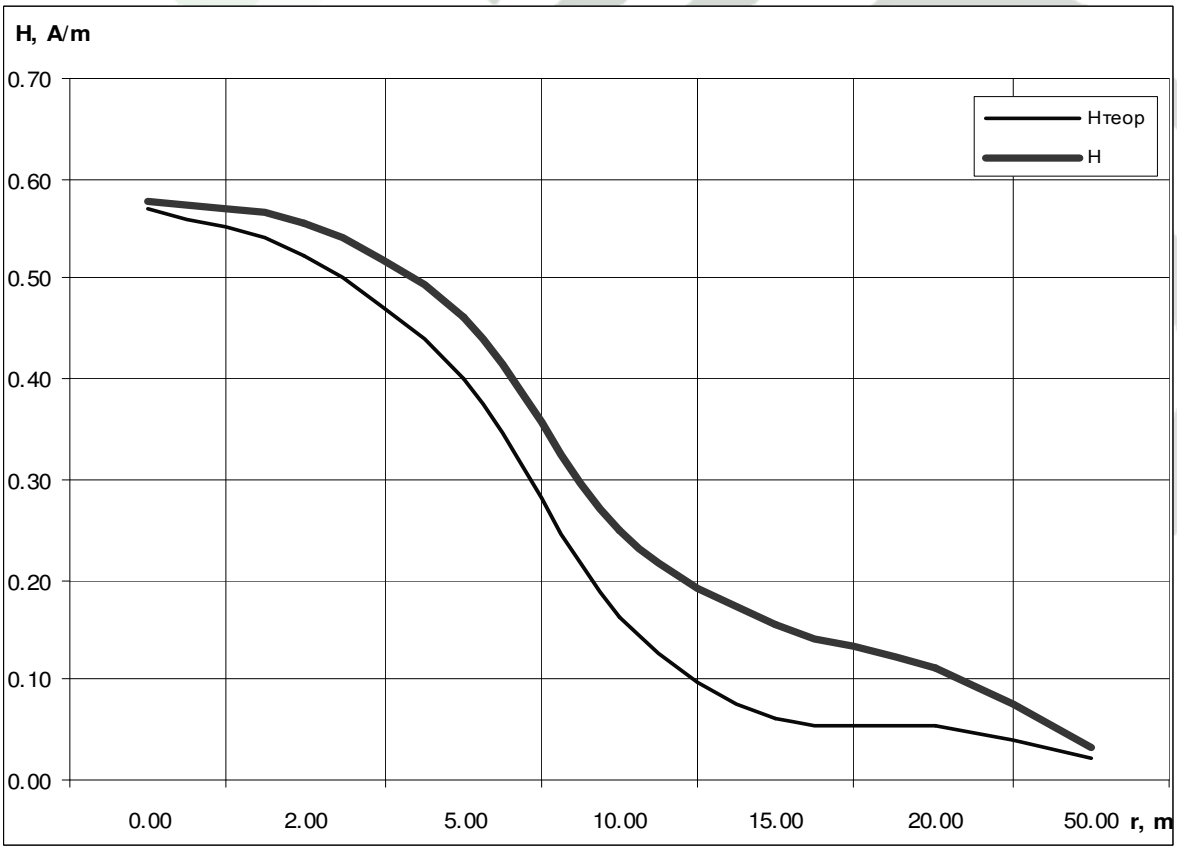


Рис.4.10. Магнитное поле ЛЭП 500 кВ

www.nilem.ru

4.3. Результаты экспериментальных исследований ЭМП трансформаторной подстанции

Объектом исследования являлось оборудование трансформаторной одстанции, расположенной вблизи жилого дома в г. Самара. Подстанция оборудована двумя трансформаторами, каждый из которых рассчитан на номинальную нагрузку 640 кВА. Текущая загрузка подстанции на момент проведения измерений 750 кВА.

Уровни напряженностей электрического и магнитного полей определялись на высоте 0,5 и 1,5 м от плоскости установки трансформаторов. С помощью прибора и антенны Е3-50 определялись уровни электрического поля, соответствующие трем ортогональным составляющим вектора $\vec{E}$. С помощью прибора и антенны Н3-50 определялись уровни магнитного поля, соответствующие трем ортогональным составляющим вектора $\vec{H}$.

Внешний вид трансформаторной подстанции приведен на рис.4.11.

Измерения электрического поля не выявили сколько-нибудь существенных уровней, отличимых от уровня фона, создаваемого соединительными линиями. Данный факт, очевидно, обусловлен тем обстоятельством, что электрическое поле в трансформаторной подстанции концентрируется вблизи высоковольтных вводов и корпусов трансформаторов.

При этом значительное ослабление электрического поля вне помещения трансформаторной подстанции вызвано экранирующим действием стен помещения, имеющего заземленную арматуру. В связи с этим дальнейшие измерения электрического поля было признано нецелесообразным.

Измерения магнитного поля проводились на различных азимутальных направлениях (см. рис.4.12). В каждой точке производилось не менее трех измерений, в протокол занесены средние значения полученных уровней

На рис.4.13 – 4.14. приведены результаты измерений напряженности магнитного поля трансформаторной подстанции, проведенных на различных высотах для различных азимутальных направлений.

Результаты измерений на указанных азимутах на различных расстояниях от объекта, полученные с помощью прибора для измерения напряженности поля промышленной частоты П3-50, по структуре поля хорошо соответствуют результатам прогнозирования электромагнитной обстановки, получаемым расчетно-аналитическим путем для аналогичных объектов (см. раздел 2). В частности, видна характерная асимметрия магнитного поля в вертикальной плоскости, параллельной трансформаторам. Абсолютные уровни поля определяются реальной загрузкой подстанции. Следует отметить, что распределение общей нагрузки между двумя трансформаторами было неизвестно, что, очевидно, послужило причиной получения плохо предсказуемых результатов по уровню поля.

www.nilem.ru

Рис. 4.11. Внешний вид исследуемой трансформаторной подстанции

.

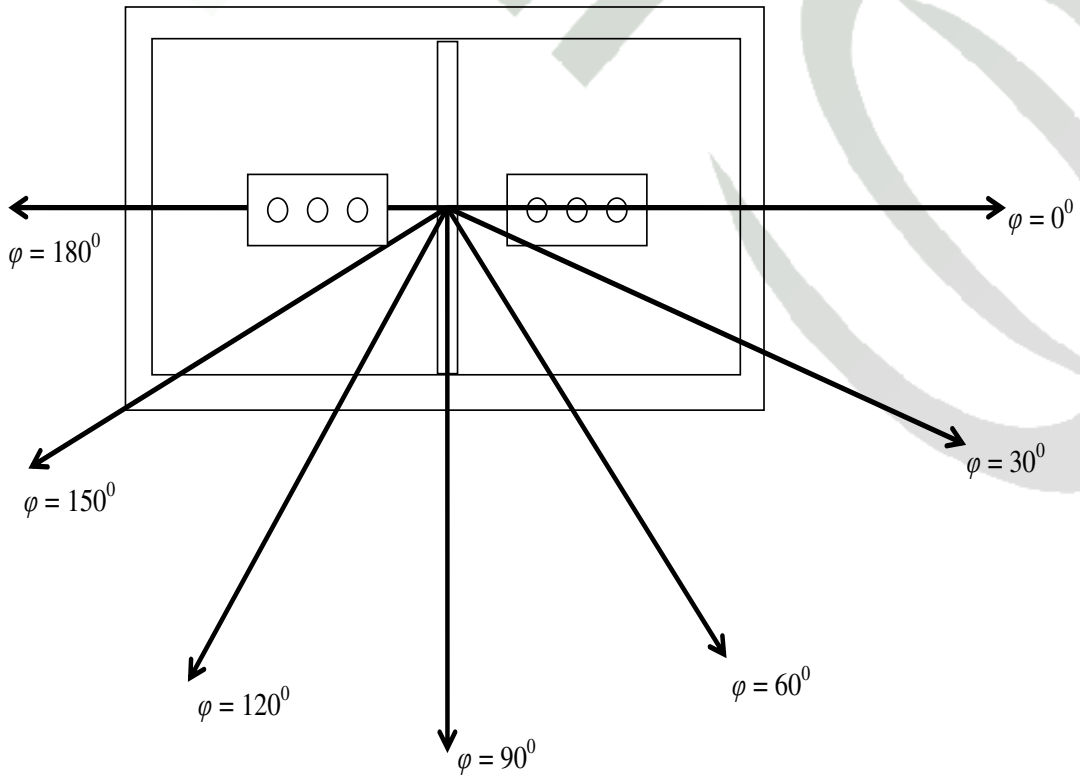


Рис.4.12. Диаграмма выбора контрольных точек измерения магнитного поля

www.nilem.ru

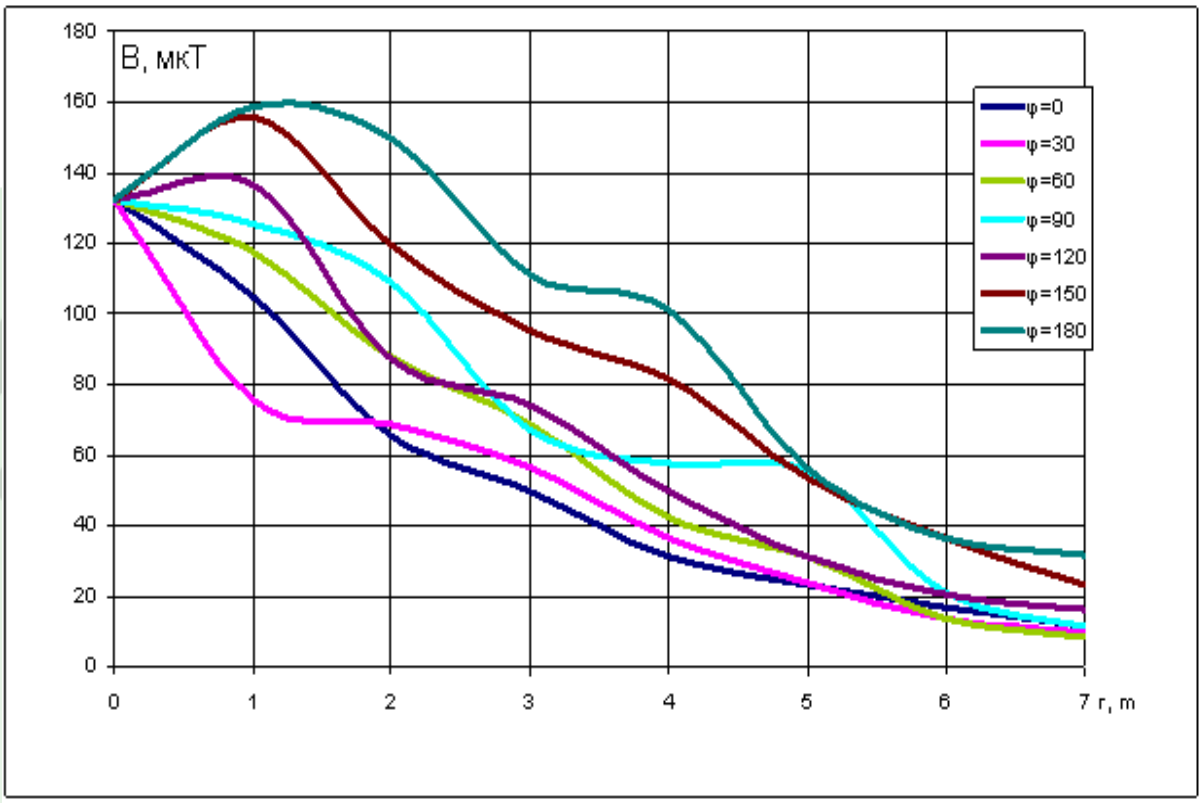


Рис.4.13. Распределение магнитного поля трансформаторной подстанции на высоте 0.5 м от плоскости пола

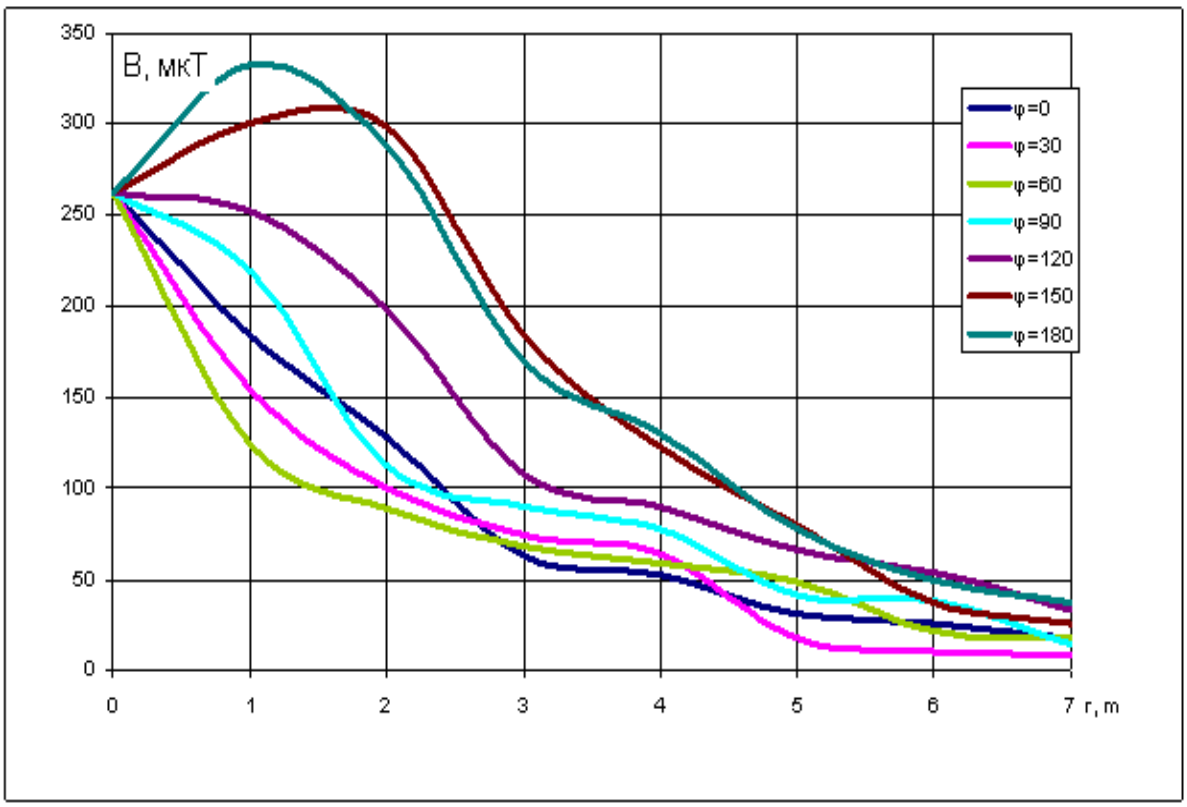


Рис.4.14. Распределение магнитного поля трансформаторной подстанции на высоте 1.5 м от плоскости пола

www.nilem.ru

РАЗДЕЛ 5. Систематизация подходов к контролю природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергетических систем

5.1. Алгоритм комплексного анализа электромагнитной обстановки

В предыдущих разделах работы были определены подходы к электродинамическому анализу и разработаны отдельные электродинамические модели технических средств, входящих в региональную энергосистему. В настоящем разделе ставится целью объединение предложенных ранее подходов в единую технологию регионального контроля состояния природной среды по фактору электромагнитного излучения, которая составит основу перспективной системы автоматизированного прогнозирования.

Первым шагом в построении такой технологии, очевидно, должно быть определение критериев оценки исследуемого феномена. Так как целью работы является моделирование и исследование ЭМП, создаваемых различными техническими средствами, входящими в энергосистему региона, в интересах электромагнитной экологии, то критерии оценки электромагнитной обстановки и способы ее визуализации, безусловно, будут определяться этим научным направлением.

Следует отметить, что в настоящее время практически отсутствует какая-либо нормативная база электромагнитной экологии, а существуют лишь нормы и стандарты электромагнитной безопасности. Таким образом, определение критериев оценки электромагнитной обстановки в регионе целесообразно проводить на данном этапе на основе этих стандартов.

Электромагнитная безопасность (ЭМБ) является весьма специфической областью знания, так как с одной стороны данной проблеме в последние десятилетия наблюдается повышенный интерес со стороны большого числа исследователей, с другой стороны мировой наукой не определены единые универсальные критерии оценки ЭМБ технических средств и их комплексов. Последнее обстоятельство обусловлено принципиальным различием подходов к определению предельно допустимых уровней ЭМП в различных странах.

В то же время, универсальность разрабатываемой комплексной методики требует возможности оценки расчетного прогноза с точки зрения различных критериев.

Рассмотрим некоторые аспекты систем гигиенического нормирования в нашей стране и за рубежом. Так в российской системе в человеческой популяции с учетом специфики контакта с нормируемым фактором различают три контингента лиц [168]:

www.nilem.ru

- контактирующие с электромагнитными полями в контролируемой ситуации в рамках своих служебных обязанностей (профессиональные группы);

- подвергающиеся воздействию ЭМП на производстве, что не связано непосредственно с выполняемой ими работой (непрофессиональная группа);

- население, которое, находясь дома, в местах отдыха и т.д., подвергается неконтролируемому воздействию ЭМП (к населению так же относятся лица, находящиеся на рабочем месте, в случаях когда их профессиональная деятельность не связана со взаимодействием с техническими средствами, создающими ЭМП).

В рамках настоящей работы рассматриваются вопросы обеспечения электромагнитной безопасности 3-й, наиболее многочисленной группы лиц – населения, так как для данной категории не устанавливаются временные рамки воздействия ЭМП, что непринципиально с точки зрения разрабатываемой технологии.

Так, на относительно низких частотах поле квазистационарно, то есть в течение периода колебания картина его пространственного распределения практически не изменяется (с точностью до множителя), которое, в свою очередь оказывается таким же, как и в случае полного отсутствия временной зависимости, то есть в случае электростатического или стационарного полей [138]. Поэтому электрическое и магнитное поля в квазистационарном режиме могут приближенно считаться независимыми. Это находит отражение, при построении теоретических моделей источников (см. разделы 1, 2, 3).

В соответствии с вышеизложенными принципами в рамках разработки электродинамических моделей все технические средства, входящие в энергосистему региона, следует классифицировать и группировать прежде всего по пространственному критерию. При этом возникают две группы (подсистемы) в качестве объектов разрабатываемой технологии:

- группа распределенных источников ЭМП (РИЭМП);

- группа локальны источников ЭМП (ЛИЭМП).

В состав первой группы входят два типа РЭМП: воздушные и подземные линии электропередач, и цепи питания электротранспорта.

Разработанные и исследованные в разделах 1 и 3 электродинамические модели линейных источников позволяют непосредственно вычислить напряженности электрического и магнитного полей ими создаваемых. При этом каждый источник вполне характеризуется набором параметров, включающим погонную емкость, расстояние между проводниками, их пространственную ориентацию, взаимное расположение, координаты концов участка, а так же некоторые специфические характеристики, индивидуальные для каждого объекта.

Второй тип образуют источники квазистационарных полей, локализованные в пространстве. Источниками поля в этом случае являются электрические токи и заряды, локализованные в электрической схеме уст-

www.nilem.ru

ройств. Подходы к моделированию устройств данного типа разработаны в разделах 1 и 2.

Для каждого источника, в целях осуществления процедур разрабатываемой технологии, должны быть известны:

- дислокация - пространственные декартовы координаты начала и конца источника;
- расстояние между проводами линии и их взаимное расположение;
- погонная емкость или исходные данные для ее расчета, например, геометрические размеры сечения линии;
- напряжение в источнике и максимальный ток в источнике, а так же динамика регулярного изменения токовой нагрузки в процессе работы;
- дислокация точек подключения источников (собственно, точки энергоснабжения).

Для каждого технического средства, представляемого локальным источником квазистационарного поля, должны быть известны:

- дислокация - пространственные декартовы координаты геометрического центра источника;
- ориентация - пространственное положение лицевой стенки прибора;
- габариты - длина, ширина и высота объекта;
- эквивалентные дипольные электрический и магнитный моменты (ЭЭМ и ЭММ), определенные экспериментально или по данным эксперимента, режима работы объекта;
- напряжение и ток потребления для каждого режима работы объекта;
- среднее время работы отдельно для каждого режима работы объекта.

Для составления комплексного прогноза электромагнитной обстановки необходимо знать так же фоновые интенсивности ЭМП, обусловленные иными причинами.

Кроме того, необходимо задать критерии оценки расчетного прогноза. В качестве таковых могут быть приняты предельно допустимые уровни интенсивностей (напряженностей электрического и магнитного полей) для каждого вида объекта.

Укрупненный алгоритм комплексного прогнозирования электромагнитной обстановки по фактору электромагнитного излучения объектов энергосистем, приведен на рисунке 5.1.

На основании основных исходных данных формируется ситуационная модель энергетической инфраструктуры региона, представляющая собой достаточно полное формализованное описание системы энергоснабжения, с находящейся в нем системой источников и учитывающая характеристики рельефа местности, локализацию источников, а также системные связи и ограничения (главным образом по дислокации и тактике работы объектов).

www.nilem.ru

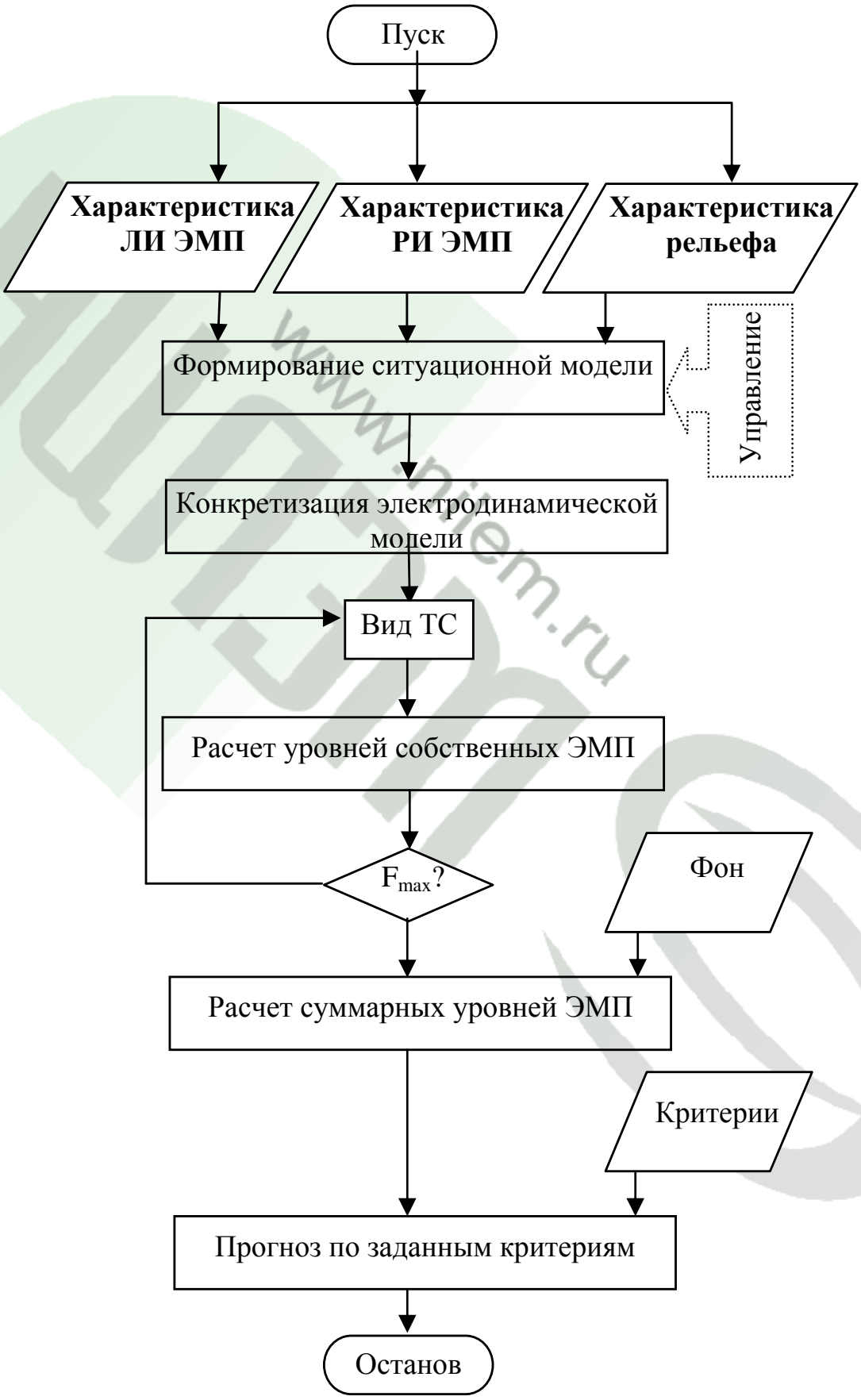


Рис.5.1. Алгоритм технологии регионального контроля состояния природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергосистемы

www.nilem.ru

Ситуационная модель полностью описывает всю совокупность факторов, определяющих электромагнитную обстановку в части, связанной с собственными полями объектов энергосистемы, поэтому любая целенаправленная корректировка результатов прогноза (оптимизация электромагнитной обстановки) связана именно с управлением параметрами ситуационной модели.

Для сформированной (первоначальной или скорректированной) ситуационной модели проводится конкретизация электродинамических моделей технических средств с учетом их индивидуальных особенностей.

В рамках электродинамической модели проводится расчет типичных и экстремальных уровней собственных ЭМП для каждого режима работы объекта. Далее, с учетом фоновых интенсивностей проводится расчет суммарных уровней ЭМП.

И, наконец, определяются итоговые параметры типичного и экстремального прогноза в терминах, соответствующих принятым критериям.

Алгоритм формирования ситуационной модели иллюстрируется рис. 5.2.

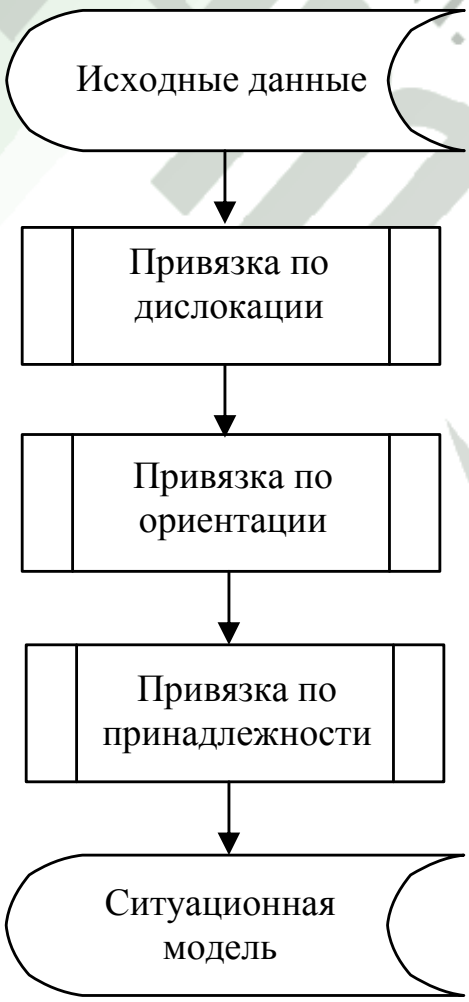


Рис.5.2. Формирование ситуационной модели

www.nilem.ru

На основании формализации исходных данных осуществляются привязка технических средств, являющихся источниками ЭМП по дислокации и пространственной ориентации с учетом их габаритных размеров. Для проводных линий фиксируются в привязке к помещению трассировка, точки разветвления, границы прямолинейных участков (линейных источников), точки подключения распределительных и оконечных устройств. Для локальных объектов фиксируются координаты, габаритные размеры.

Привязка источников осуществляется по принадлежности, то есть формализация описания подключений объектов к общей сети с учетом имеющихся точек подключения. При этом обеспечивается контроль по системным связям (соответствие токов в линейных источниках токам потребления распределительных и оконечных устройств) и системным ограничениям (соответствие токов в линейных источниках предельно допустимым значениям). Алгоритм конкретизации электродинамической модели приведен на рис.5.3.

Прежде всего, в рамках комплексной электродинамической модели, на основании формализованных данных ситуационной модели выполняется унификация координат для всей системы источников. Далее проводится сортировка источников по режимам и тактике работы и формируется групповая электродинамическая модель для каждой подсистемы. При этом каждый источник ЭМП работающий в нескольких возможных режимах представлен в соответствующем числе групповых моделей. Выполняется сортировка источников по уровням интенсивности. На основании сравнительного анализа может быть принято решение об уточнении номенклатуры источников путем исключения из рассмотрения заведомо несущественных.

Расчет уровней собственных ЭМП (см. рис.5.4) проводится отдельно для каждой групповой модели. При расчете определяются интенсивности воздействий при различных сочетаниях режимов работы объектов: типичном (с учетом среднего времени работы объекта в каждом режиме) и экстремальном (одновременная работа всех приборов в предельных режимах). Расчет суммарных уровней (см. рис.5.5) выполняется аналогичным образом с учетом фоновых интенсивностей.

Итоговой операцией является формирование расчетного прогноза электромагнитной обстановки (см. рис.5.6), который проводится на основе рассчитанных уровней суммарных ЭМП. Обобщенная оценка формируется на основе суперпозиции нормированных, с учетом тех или иных критериев, интенсивностей ЭМП всех групп, то есть смешанных воздействий всех источников различных частотных диапазонов. Результирующий прогноз представляет собой указанную обобщенную оценку как функцию координат в привязке к ситуационной модели для типичного и экстремального сочетаний режимов работы технических средств, являющихся источниками ЭМП.

www.nilem.ru

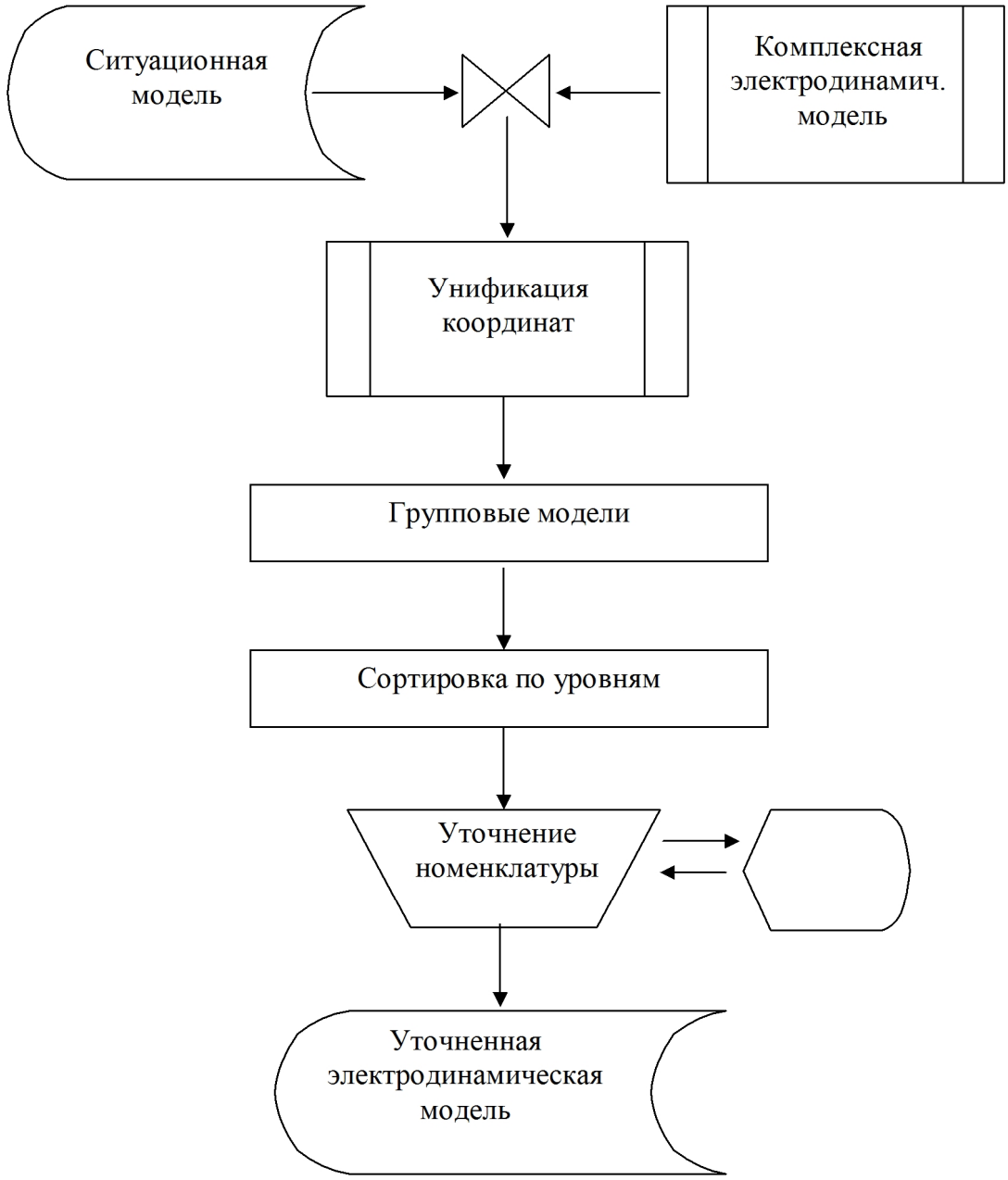


Рис.5.3. Конкретизация электродинамической модели

Очевидно, что эквивалентный уровень ЭМП зависит в основном от энергетических нагрузок фрагмента энергосистемы, которые определяются максимально возможными расчетными токами в линиях энергоснабжения. Величины этих токов ограничены, системами блокировки и защиты, располагающимися на входе линий.

Другие возможные критерии структурирования комплексной электродинамической модели связаны с характером пространственной локализации источников и стабильностью этой локализации во времени. Это определяется предполагаемой ориентацией в перспективе на задачи управления электромагнитной обстановкой в регионе, что диктует

www.nilem.ru

необходимость выделения варьируемой (управляемой) составляющей подсистемы в составе комплексной модели. Отсюда в свою очередь вытекает, то обстоятельство, что электродинамическая модель должна допускать исследование как средних, так и экстремальных (в пространстве и, вообще говоря, во времени) ЭМП.

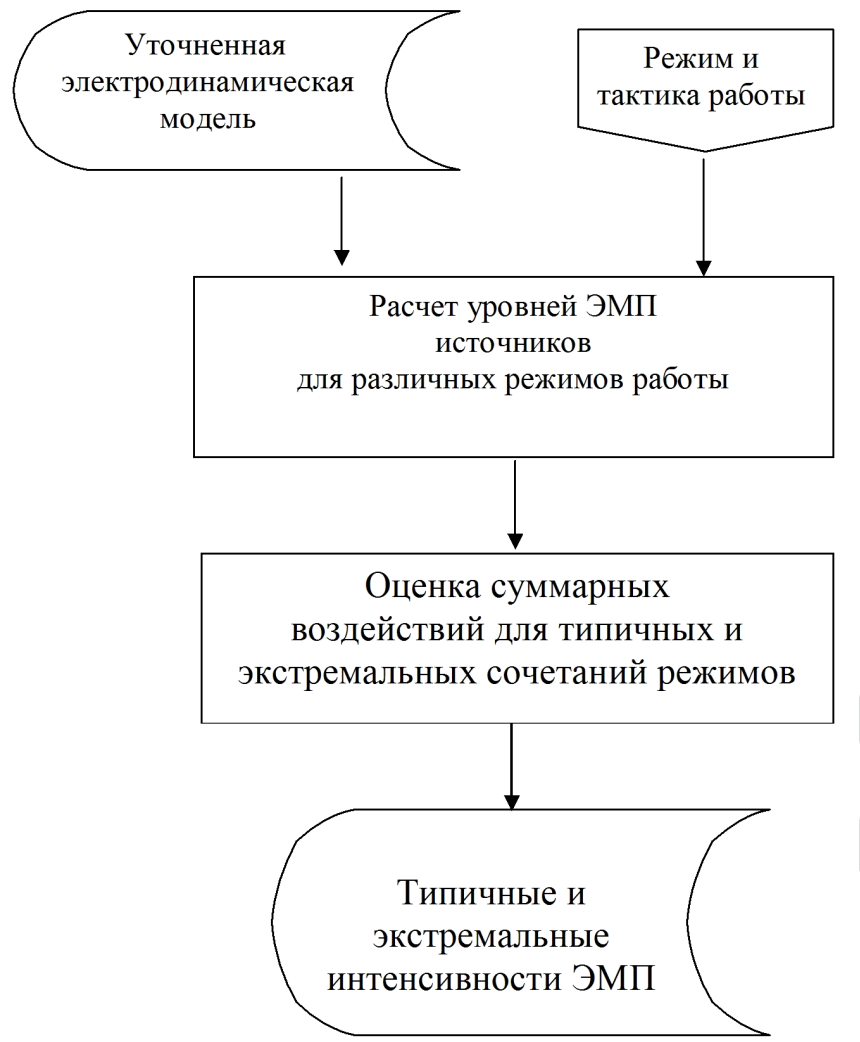


Рис.5.4. Расчет уровней собственных ЭМП.

Таким образом, комплексный характер электродинамической модели, в частности, предполагает:

- структурирование модели, выделение качественно однородных параллельных или иерархических групп источников по критериям, характера и управляемости пространственной локализации;
- соответствие набора основных физических величин (параметров модели) критериям оценки электромагнитной обстановки;
- обеспечение верифицируемости результатов в рамках действующей и перспективной нормативно-методической базы инструментального контроля;
- обеспечение возможности расчета параметров модели, связанных с расчетным прогнозированием как средних, так и экстремальных значений

www.nilem.ru

физических величин, определяемых критериями оценки при смешанном воздействии на основе принципа суперпозиции нормированных интенсивностей, обусловленных всей совокупностью собственных и фоновых источников ЭМП.

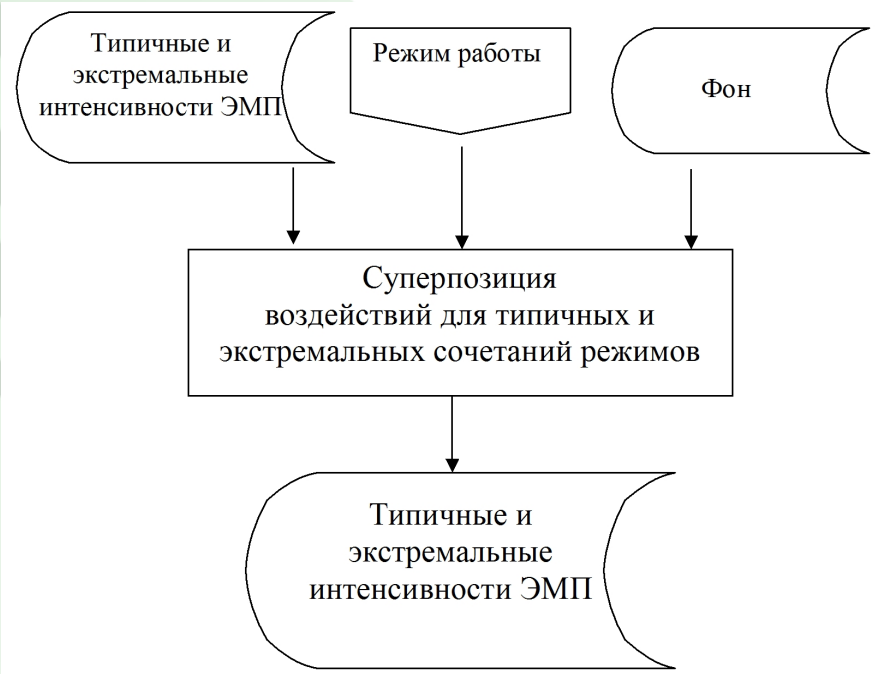


Рис.5.5. Расчет суммарных уровней ЭМП

Рис.5.6. Прогноз по заданным критериям.

www.nilem.ru

Таким образом, методологическую основу разрабатываемой, в рамках настоящей научной работы технологии составляют описанные выше алгоритмы в сочетании с адекватными методиками расчета ЭМП.

5.2. Применение геоинформационных технологий к представлению результатов электромагнитного мониторинга

Остановимся подробнее на вопросах визуализации результатов электромагнитного мониторинга с привязкой к геодезической информации.

В последние годы довольно широкое распространение получила практика применения электронных карт и геоинформационных технологий к представлению результатов экологического контроля [107, 118, 126, 142, 151, 162, 165]. В связи с этим появился специальный термин «геоэкологическое картографирование» [107].

Проблемы геоэкологического картографирования административных районов, в первую очередь индустриальных и урбанизированных, и городских территорий очень схожи. Особенно это проявляется при крупномасштабном картографировании наиболее развитых в промышленном отношении и густонаселенных участков административных районов [16].

Но до настоящего времени не выработаны общие принципы и подходы к созданию крупномасштабных карт экологического содержания для таких сильно измененных хозяйственной деятельностью территорий. Возрастающие требования к материалам экологических исследований невольно требуют их существенной трансформации по пути все большего возрастания системности применяемых методов и средств научного познания и комплексности характеристики всех аспектов природно-хозяйственной организации территории.

Все это ведет к увеличению объемов исходной, обрабатываемой и выдаваемой потребителям геоэкологической информации. Наряду с этим возрастает глубина и ответственность при решении проблем территориального взаимодействия природы и общества и поиска путей его оптимизации на принципах рационального природопользования. Потребителям для решения постоянно расширяющихся и усложняющихся задач управления территориями, развития экономики и охраны природы уже недостаточно иметь чисто констатационные информационные материалы. Возникает насущная необходимость выполнения разнообразных оценок и прогнозов, выдачи практических рекомендаций, что ведет к возрастанию сложности задач переработки данных, необходимости использования современных геоинформационных технологий. В настоящее время это, прежде всего, связывается с внедрением в процесс экологических исследований географических информационных систем и компьютерного картографирования.

Использование современных компьютерных технологий в картографии сейчас переходит из области теоретических и методических разработок в область широкого практического применения. Эти мето-

www.nilem.ru

ды становятся не просто все более часто используемыми, а основным инструментом экологов при создании карт. Активизация географической информации, вызванная внедрением в территориальные исследования современных методов и средств, вызывает более динамичное развитие самих компьютерных технологий. В данном случае речь идет, прежде всего, о постоянно совершенствуемых и все более усложняющихся специализированных программных продуктах. В особенной степени это относится к разработке методики компьютерного системного геоэкологического картографирования.

Структура экологического картографирования как особого научного направления, объединяющего экологию и картографию, связана с современным пониманием экологии как взаимоотношений любого организма (или системы) со средой. В составе экологии сейчас выделяется целое направление – геоэкология.

В последнее время все большее развитие получает географический подход к экологическим проблемам, определивший становление в связи с этим нового научного и прикладного направления - геоэкологического картографирования.

Применение геоэкологического картографирования в электромагнитной экологии как никогда оправдано еще и тем обстоятельством, что информация об электромагнитном загрязнении окружающей среды изначально связана с данными о географическом положении источника ЭМП.

Общенаучным принципом в географии, как и в любой другой науке о Земле, является системный подход. Поэтому все более насыщаются системным содержанием такие традиционные методы исследования, как картографический, ландшафтный, сравнительно-географический и многие другие. Системный подход позволяет избежать главного недостатка научной дифференциации, разрывающей единый объект науки на его отдельные части. Само понятие системы уже указывает на связь изучаемых фактов в процессе системного познания, необходимость интеграции сторон, свойств и отношений, выявленных в процессе научной дифференциации. В то же время экология как область научного знания объединяет в себе различные отрасли наук. Данное обстоятельство в чем-то роднит географию и экологию.

Один из важнейших методов и средств, способствующих интеграции территориальных исследований – картографический [16], который сам по себе сейчас является глубоко системным научно-практическим процессом. С помощью картографического метода можно привязывать с требуемой пространственной детальностью и конкретностью географические информационные материалы к конкретной территории, фиксировать на карте установленные и исследуемые природные и техногенные закономерности, получать выводы и оценки, характеризующие изучаемую территорию. Все это помогает рационально планировать дальнейшие исследования. Поэтому практически все специалисты утверждают, что многие направления науч-

www.nilem.ru

ного познания, например, охраны и преобразования природы, вообще невозможно изучать без применения карт [165].

Географическая картография под влиянием времени и запросов общественной практики развивается как комплексное направление, в задачу которого входит многостороннее отображение структуры, связей, динамики геосистем как целостных природных и социально-экономических образований. Поэтому географическое картографирование и понимается сейчас как системное картографическое моделирование (отображение, анализ, оценка и прогноз развития) геосистем. Оно включает в себя различные отраслевые направления тематического картографирования: геологическое, почвенное, социально-экономическое и другие, которые реализуются в отраслевых географических картах в той мере, в какой геологическое строение, почвы, экономика и т.д. могут рассматриваться как компоненты геосистем.

Геоэкологическое картографирование предполагает учет разнообразных свойств территории по различным ее «срезам» - природному, техногенному, вертикально-пространственному, горизонтально-пространственному и другим [107].

Получаемые с помощью компьютеров электронные карты позволяют исследователю – автору карты работать в диалоге с машиной и открывают широкие перспективы для оперативного построения моделей, отражающих не только статику, но и динамику явлений путем сопоставления различных объектов в пространственно-временном аспекте, что особенно важно для проведения экологических экспертиз.

Под цифровой картой обычно понимают цифровую запись в памяти ЭВМ картографической информации о местности (территориальных объектах, различных природных и социально-экономических процессах и явлениях) в необходимых кодах, структурах, форматах и системах исчисления.

Другими словами — это цифровая модель местности, созданная на соответствующей математической основе, в выбранной проекции и номенклатурной разграфке, принятых для карт определенного назначения и тематического содержания, и удовлетворяющая требованиям по содержанию, точности и надежности.

Образно говоря, применительно к листу топографической карты цифровая карта содержит дискретную, целенаправленно генерализованную цифровую запись его содержания.

Геоинформатика, представляющая синтез картографии и информатики, располагает возможностями как субстратно-функционального, так и пространственно-временного анализа геосистем. Поэтому ГИС-технологии как нельзя лучше отвечают сущности геоэкологических исследований. Отсюда, неслучайно стремительное внедрение геоинформационных методов в практику геоэкологических работ.

Именно такой синтез экологической и информационной составляющих геоэкологии и геоинформатики на базе цифровых и электронных карт, а также ГИС-технологий, приводит к формированию геоэкоинформатики,

www.nilem.ru

как нового интегрированного научного направления. Важнейшую часть цифровой картографической информации составляют цифровые модели рельефа реальных (рельеф земной поверхности, пластов земных недр и др.) и абстрактных (показатели загрязнения, количественные экологические характеристики и т.п.) геополей. Под цифровой моделью рельефа изучаемого объекта следует понимать его логико-математическое описание в цифровом виде, включая заданную форму представления исходных данных, их взаимосвязи и структуру, а также метод восстановления (интерполяция, аппроксимация или экстраполяция) рельефа по его цифровым данным [16].

5.3. Результаты электромагнитного мониторинга энергетической системы города Самара и Самарской области

В настоящее время в Самаре создана и активно развивается Единой Цифровой Картографической Основы (ЕЦКО) города– своеобразная пара-ГИС, в которую входит множество компонентов, в том числе и экологического назначения.

По результатам настоящей работы были созданы вложения в ЕЦКО, составляющих основу ГИС электромагнитной безопасности энергосистемы.

Рассмотрим технологические основы визуального представления результатов экологического мониторинга при помощи ГИС-технологий.

Первоначальным этапом решения поставленной практической задачи является создание базы данных, в которую заносятся все необходимые для дальнейших операций параметры излучающих технических средств. Далее необходимо осуществить размещение объектов базы данных на электронной карте местности. Интеграция базы данных и электронной карты может проходить несколькими способами. Один из способов предполагает первоначальное создание базы данных ТС и последующим формированием графического отображения на растре карты. Другой способ – создание базы данных ТС с использованием специальной информационной системы – геоинформационной.

Визуализация содержимого базы данных электронных карт производится в условных знаках, принятых для топографических, обзорно-географических, кадастровых и других видов карт. Широкие полномочия предоставляются для создания (добавления) пользовательских условных знаков с учетом специфики владельца информации или факторов внешнего воздействия. При этом система поддерживает без каких-либо дополнительных временных затрат различные системы координат и проекции.

Представление электронной карты на дисплее является многослойным и может создаваться путем комбинирования растрового вида карт и фотоматериала, векторных объектов местности, матриц свойств местности (матрица высот, матрица экологически опасных участков местности, матрица

www.nilem.ru

проходимости местности и т.д.) и пользовательских данных, выводимых на карту средствами интерфейса Windows.

На рис.5.7 представлен внешний вид интерфейса ГИС. На переднем плане – трехмерная модель рельефа г. Самара.

Процесс создания базы данных начинается с заполнения метрики объектов излучения – координат на местности. Для этого используются данные из ЕЦКО г. Самары.

Предоставленные сведения о местонахождении излучающего объекта проецируются на карту строений, выделяется нужный объект и с помощью редактора карты он переносится в слой излучающих ТС.

Следующим шагом в процессе построения ГИС является подготовка классификатора электронной карты. Классификатор электронной карты представляет собой управляющую часть базы данных электронных карт. Для проведения интеграции информационной системы и технических средств необходимо добавить в классификатор описания слоев с излучающими объектами, описания семантик объектов, присвоения объектам графических обозначений.

Первоначально создается слой излучателей (рис.5.8). Группировка по слоям значительно упрощает навигацию по базе данных карты и делает работу с картографическими материалами более удобной. Возможность показывать и скрывать выбранные слои предоставляет широкие возможности по анализу различных картографических комбинаций. В процессе создания слоя необходимо задать имя слоя, его номер, задать список доступных семантик.

Следующим шагом в процессе интеграции является заполнение параметров технического средства – его семантики. Интерфейс приложения для работы с семантикой показан на рис.5.9. Для создания новой семантики необходимо указать ее имя, код, ключ, единицу измерения и тип. Семантики бывают разных типов, основные – символьные и числовые. Код и ключ это внутренние параметры семантики.

После добавления семантик объектов необходимо создать условные обозначения для каждого типа ТС. На карту каждое ТС может наноситься линейным, площадным или векторным знаком. Соответствие каждому типу определяется спецификой реального объекта и его характеристиками. Например, административные границы и основные горизонтали рельефа местности обозначаются линейными объектами. Здания наносятся площадными объектами. Векторными значками отображаются специфические объекты, которые необходимо как-то графически выделить. На рис.5.10 показан процесс создания площадного объекта с названием «ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ». Для создания объекта необходимо определить его вид, линейку масштабов, заполнить допустимые семантики для данного объекта, вид при печати. Так же необходимо выбрать слой, к которому будет принадлежать данный объект.

www.nilem.ru

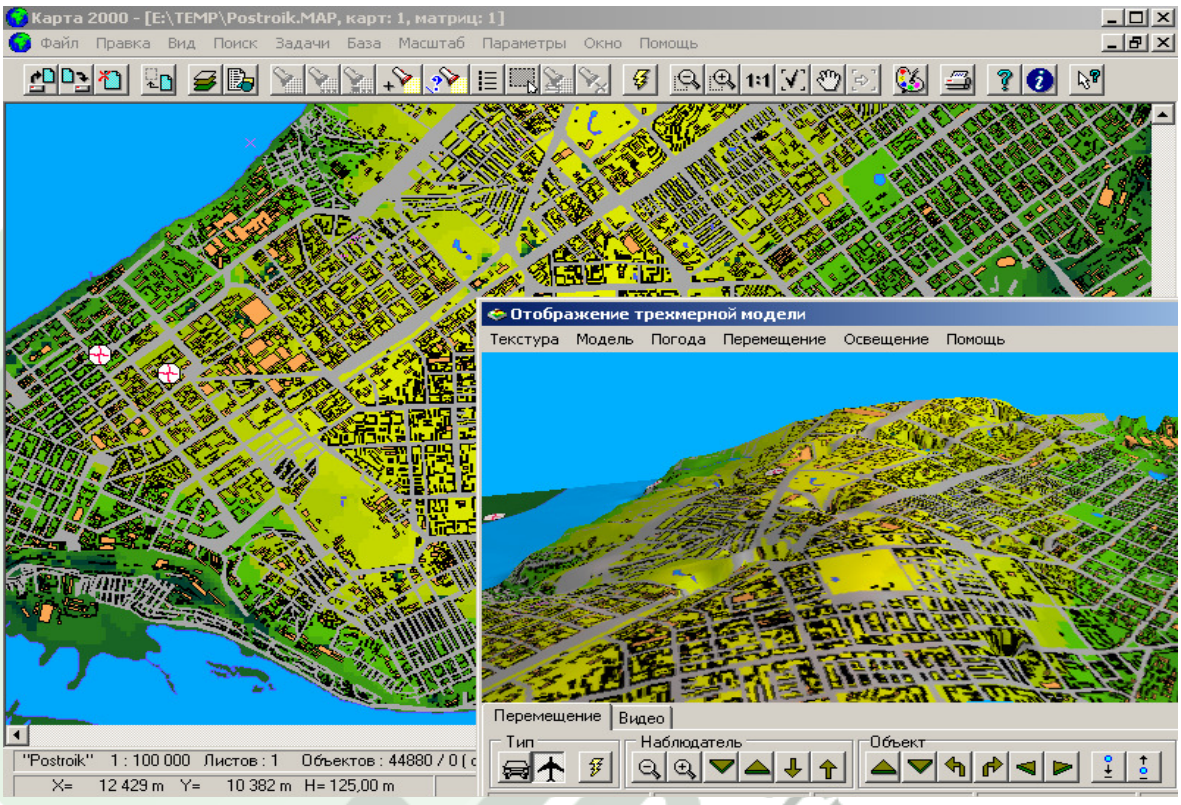


Рис.5.7. Внешний вид интерфейса ГИС

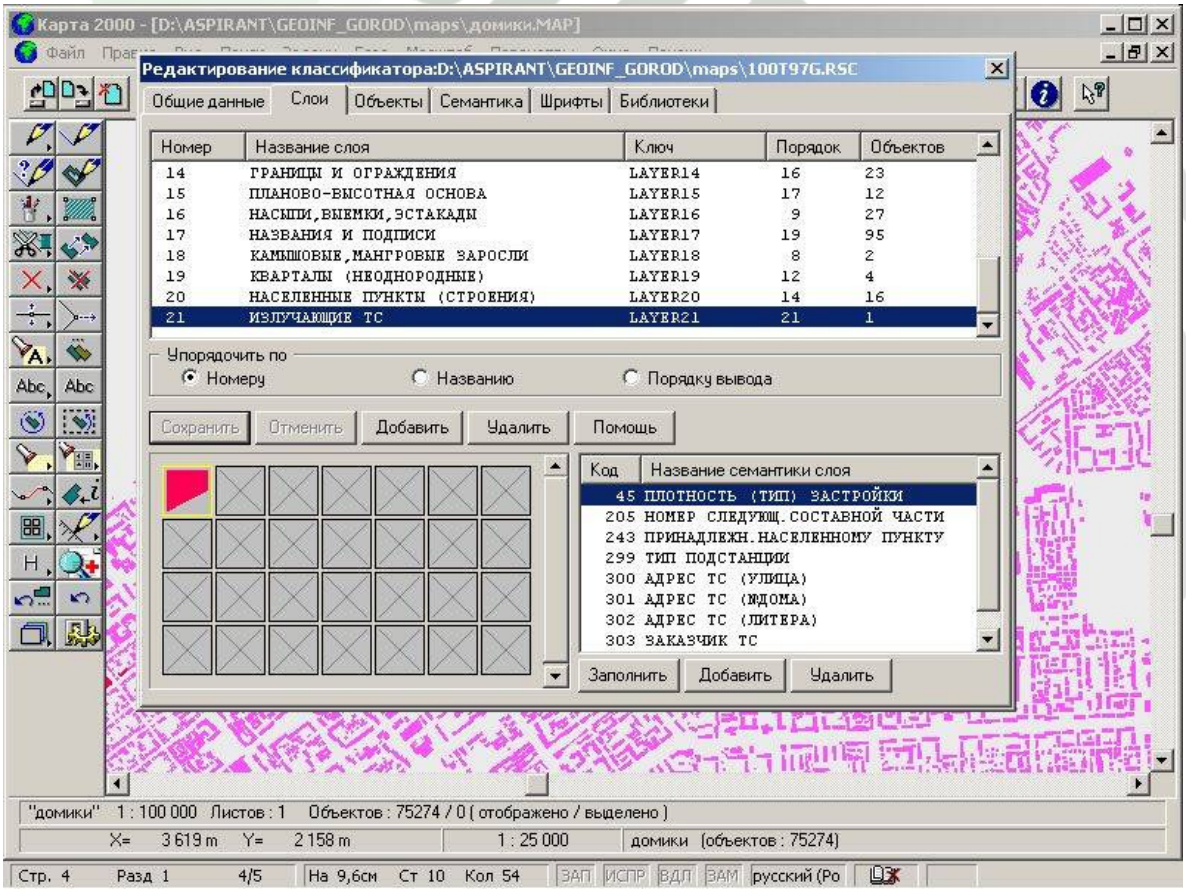


Рис.5.8. Слой излучающих технических средств

www.nilem.ru

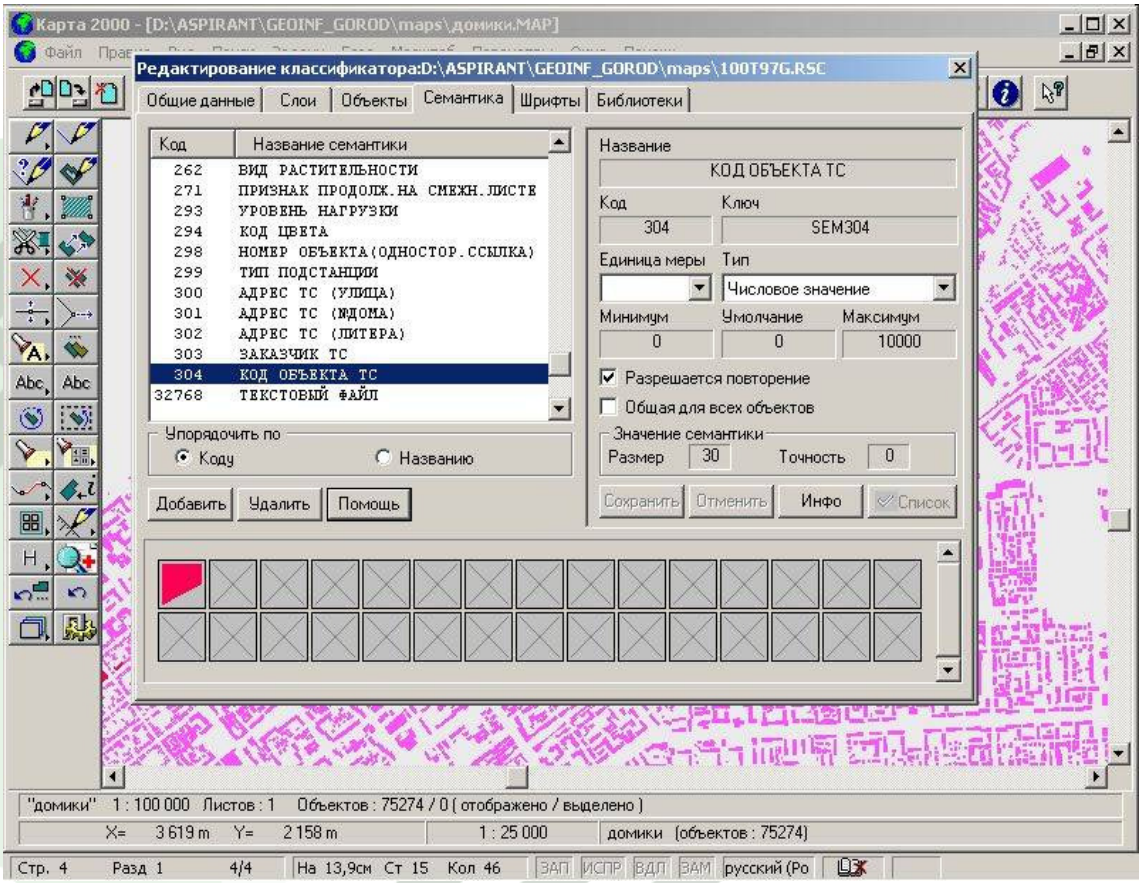


Рис.5.9. Интерфейс ГИС с семантикой

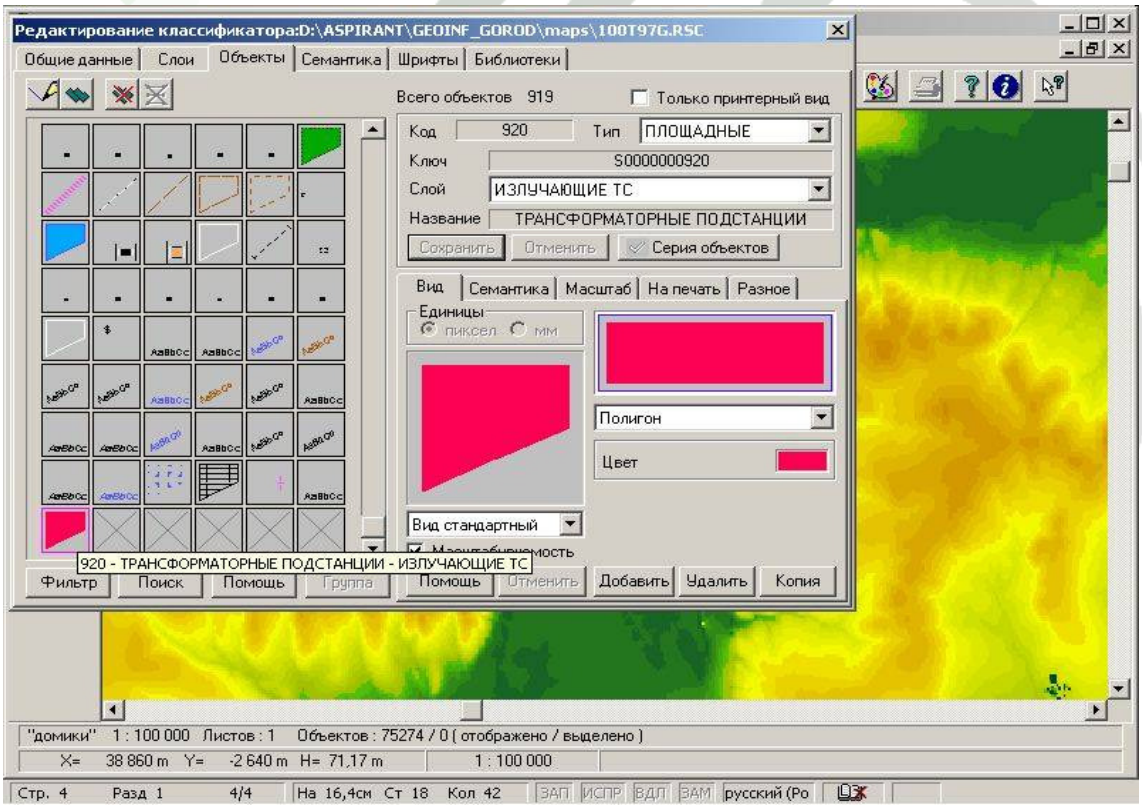


Рис.5.10. Площадный объект ГИС

www.nilem.ru

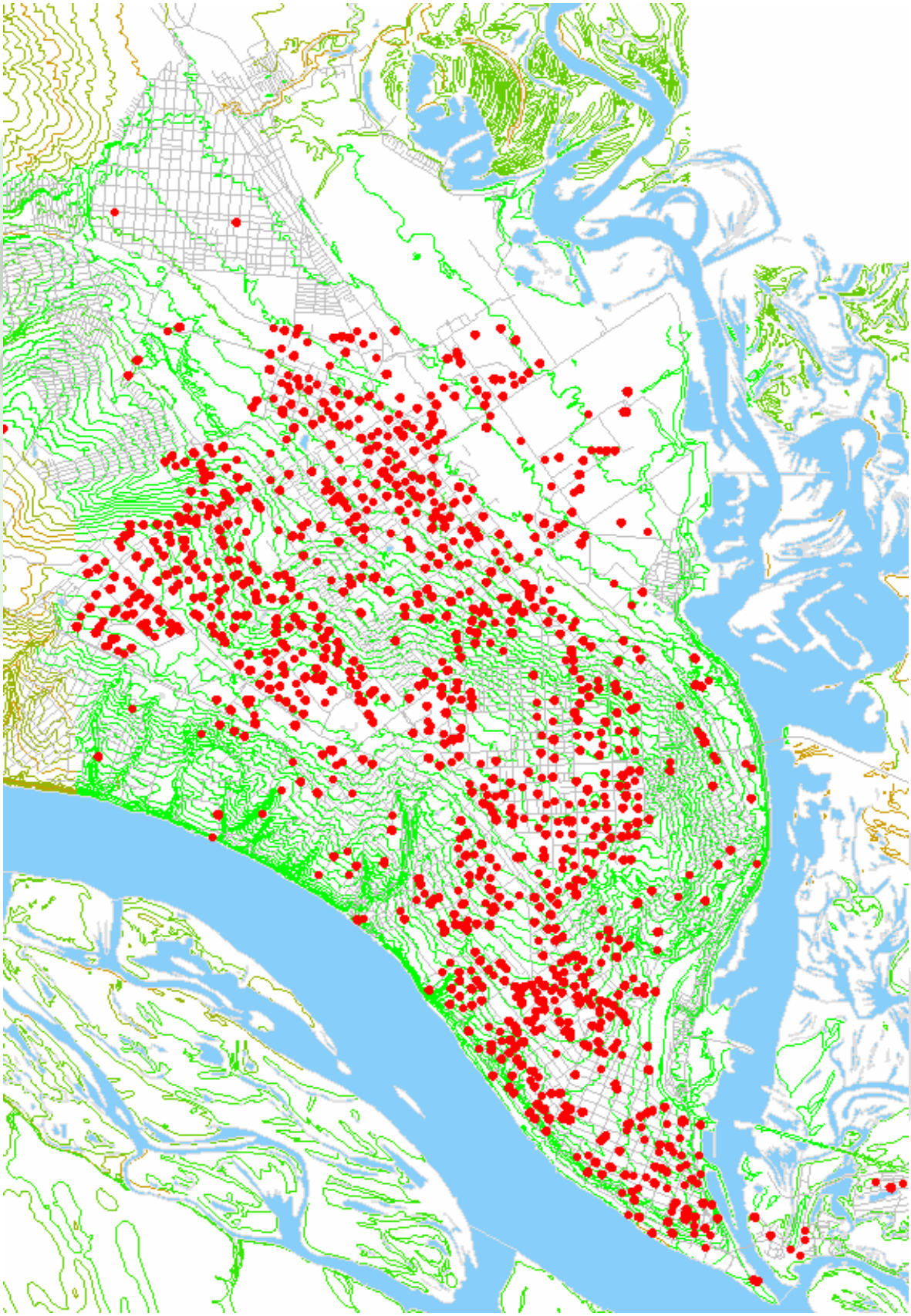


Рис.5.11. Карта трансформаторных подстанций

www.nilem.ru

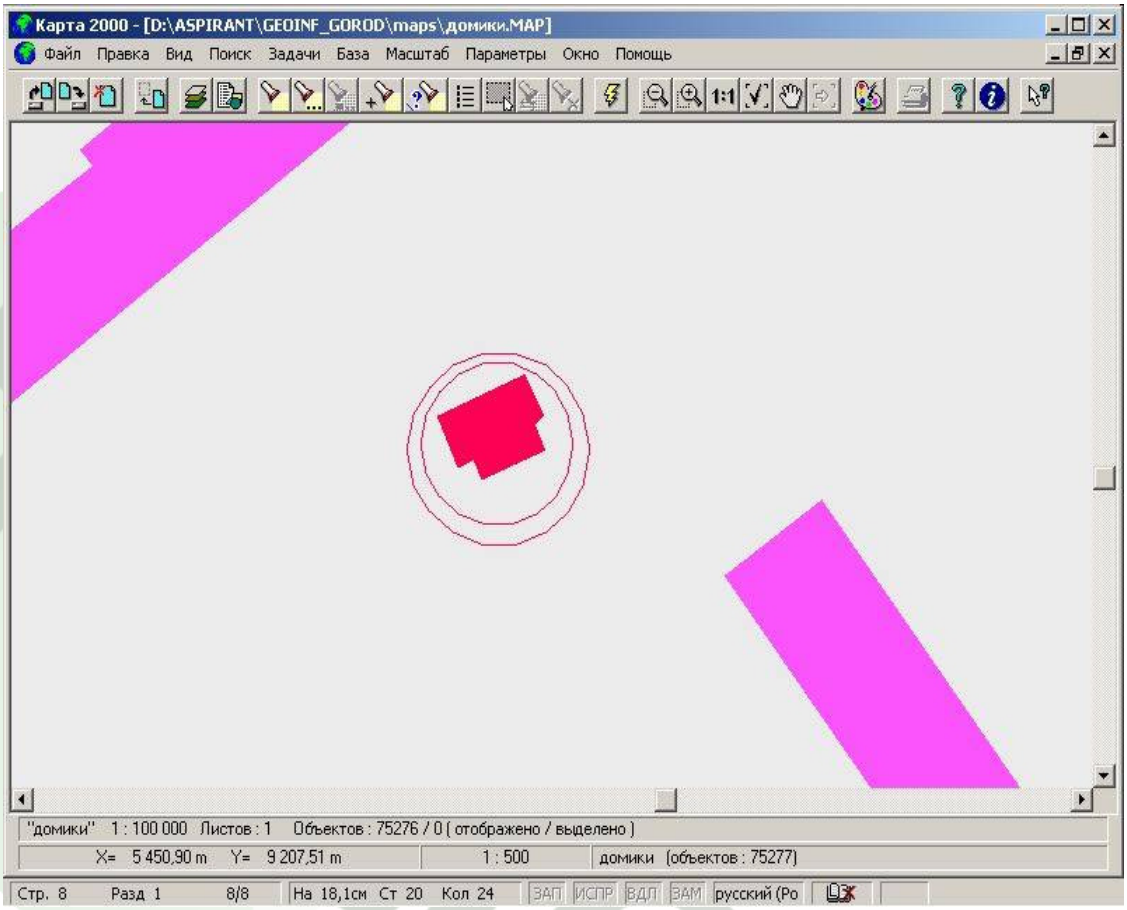


Рис.5.12. Изолинии магнитного поля вокруг трансформаторной подстанции

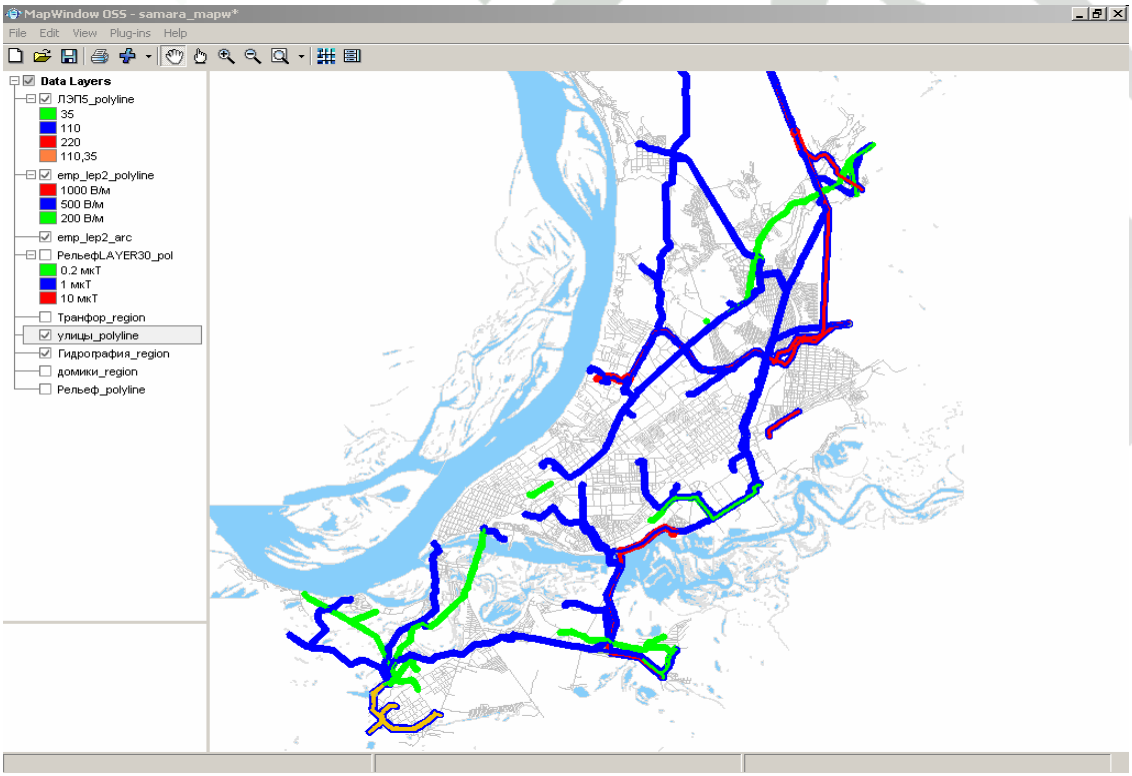


Рис.5.13. Карта ЛЭП и уровней создаваемых ими ЭМП

www.nilem.ru

Следующим этапом является нанесение объектов на электронную карту. При этом первоначально идентифицируется и выделяется объект на системном слое электронной карты, соответствующий техническому средству. Далее необходимо изменить тип объекта с помощью редактора карты, при этом объект автоматически переносится в тот слой, к которому принадлежит новый тип объекта.

Заключительным этапом является заполнение семантик нового объекта. В результате получаем слой электронной карты с излучающими техническим средством (рис.5.11).

В результате проведенных работ создано четыре слоя, вошедших в ЕЦКО:

- воздушные линии электропередач;
- электромагнитные поля воздушных линий электропередач;
- трансформаторные подстанции;
- электромагнитные поля трансформаторных подстанций.

На рис.5.12 и 5.13 показаны фрагменты карт электромагнитных полей воздушных ЛЭП и трансформаторных подстанций, соответственно.

www.nilem.ru

Заключение

Планом работы над монографией предусматривалось разработка технологии регионального контроля состояния природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергосистем, предназначенной для решения актуальных проблем охраны окружающей среды и человека от неионизирующих излучений.

Разрабатываемая технология должна обеспечивать строгий расчет всех компонент электрического поля и давать возможность оценки электромагнитной обстановки с точки зрения различных критериев, отвечающих современным требованиям.

Специфика поставленной научной проблемы состоит в том, что в составе региональной энергетической системы присутствует значительное число технических средств, являющихся источниками ЭМП, имеющих различные пространственно-временные характеристики. При этом, как правило, конфигурация излучающих токов оказывается чрезвычайно сложной, а иной раз и вообще трудно поддающейся описанию. Кроме того, на структуру и уровни полей любой природы оказывают существенное влияние присутствующие в непосредственной близости источников, материальные тела, обладающие самыми произвольными электрофизическими параметрами.

Расчётное прогнозирование электромагнитной обстановки подразумевает разработку электродинамических моделей источников ЭМП, присутствующих в исследуемой области пространства. Применительно к данной проблеме анализ электромагнитной обстановки требует расчёта полей в непосредственной близости источников электромагнитного излучения, что накладывает определённые требования на уровни физической и математической строгости разрабатываемых моделей. Кроме того, методики расчётного прогнозирования должны быть увязаны с принятыми в данной области критериями.

Так как большинство электродинамических задач, формулируемых для решения поставленной проблемы, принципиально неразрешимы в аналитическом виде, все разрабатываемые подходы должны быть вполне пригодны для алгоритмизации и программной реализации на ЭВМ. Причем крайне желательно, чтобы итогом всей работы явился законченный проблемно-ориентированный программный продукт.

К настоящему времени достаточно полно разработаны электродинамические модели излучающих средств радиосвязи, радиовещания и телевидения, различных направляющих систем. Однако, вопросы электродинамического моделирования энергетического оборудования для целей оценки воздействия электромагнитного поля на окружающую среду и человека остаются практически нерешенными. Кроме того, в России к настоящему времени не выработана единая концепция экологического контроля электромагнитной обстановки в регионах, которая учитывала бы

www.nilem.ru

всё многообразие присутствующих там источников, а так же специфику их пространственной и временной локализации.

В рамках решения поставленной проблемы была разработана технологи включающая систему классификации источников, методики их электродинамического моделирования, как приближенные, так и строгие, в зависимости от специфики конструкции и характера излучаемого поля, подходы к учету реальных условий размещения.

Многообразие источников, относящихся к региональной энергосистеме, диктует необходимость систематизации сведений о них и выделения в их составе качественно однородных групп, характеризуемых определенными конструктивными сходствами либо пространственно-временными характеристиками излучаемого поля. То обстоятельство, что все рассматриваемые источники создают электромагнитное поле стационарного или квазистационарного характера, позволяет раздельно формулировать электродинамические задачи для электрического и магнитного полей.

Так в составе всех технических средств, входящих в энергосистему региона выделены две группы:

- группа линейных (распределенных) источников;
- группа локальных (сосредоточенных) источников.

К линейным источникам ЭМП отнесены локальные участки цепей энергоснабжения – воздушные и подземные линии электропередач, линии питания наземного и подземного электротранспорта.

Следующая ступень классификации источников связана с адекватными методами электродинамического моделирования. Здесь можно выделить три группы:

1. *Воздушные линии электропередач* и линии питания электротранспорта. Для электродинамического моделирования здесь применен подход, основанный на использовании метода зеркальных изображений и замкнутых интегралов уравнений Пуассона.

2. *Подземные линии электропередач, трансформаторные подстанции, линии питания электротранспорта* в непосредственной близости транспортного средства. Для таких источников разработана методика электродинамического моделирования, в основу которой положен метод конечных элементов для стационарных уравнений второго порядка эллиптического типа. Сформулированы допущения, позволяющие понижать размерность решаемой краевой задачи. Выведены выражения для коэффициентов интерполяционных полиномов методом Галеркина. В методике использован оригинальный способ формализации сторонних источников, в котором непосредственному решению электродинамической задачи предшествует расчет распределения токов и напряжений по полюсам моделируемого устройства методами теории цепей. При этом получены аналитические выражения для распределений токов и напряжений в различных характерных случаях;

www.nilem.ru

3. *Первичные и вторичные объекты системы энергоснабжения, концентраторы распределители* – технические средства, относимые к локальным источникам ЭМП, но имеющие неунифицированную конструкцию. Для анализа таких источников разработана расчетно-экспериментальная методика, основанная на представлении анализируемого устройства системой электрического и магнитного диполей, параметры которых определяются по экспериментальным данным.

Отдельного рассмотрения потребовали вопросы, связанные с расчетом высокочастотных полей линий электропередач и силовых трансформаторов. В первом случая физической причиной излучения является электрическая корона, возникающая на проводах ЛЭП, а во втором случае частичные разряды в магнитопроводе и конструктивных элементах трансформатора, возникающие вследствие местных перенапряжений.

Для вычисления полей излучения коронирующих проводов ЛЭП предложена приближенная методика, основанная на использовании нелинейного закона Ома и экспериментально определенной вольтамперной характеристике коронного разряда.

Для решения задачи расчета поля излучения силового трансформатора разработан подход, основанный на аппроксимации корпуса (корпусов) устройств системами тонких проводников. При этом расчету ЭМП предшествует расчет поверхностного тока, наведенного возбуждением на проводящих элементах модели. Плотность поверхностного тока определяется путем решения обратной электродинамической задачи методом интегральных уравнений. Такой подход обеспечивает универсальность по конфигурации моделируемых устройств.

Итогом работы явилась оформленная технология комплексного анализа электромагнитной обстановки создаваемой энергетическим оборудованием в масштабах региона, объединившая в себе все методики и алгоритмы, разработанные в данной работе.

Все вычислительные процедуры реализованы в виде программных модулей, которые в дальнейшем составят основу перспективной автоматизированной системы. На всех этапах работы проведены тестовые расчеты, подтверждающие работоспособность программ. Расчеты проводились на примере реальных объектов, эксплуатирующихся либо вводимых в эксплуатацию на территории г. Самары и Самарской области. Корректность результатов полученных при помощи расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями.

Итоговые результаты экологического контроля состояния природной среды по фактору ЭМП, создаваемого элементами региональной энергосистемы, представлены в виде слоев электронной карты.

Следует отметить, что при дальнейшем рассмотрении проблемы наряду с предложенным чисто детерминистским подходом к электродинамическому моделированию технических средств системы энергоснабжения, следует применять методы вероятностного моделирования, которые позво-

www.nilem.ru

лят учесть не только особенности мгновенной пространственной локализации источников электромагнитного поля, но и стабильность, возможные изменения этой локализации во времени, тактику работы реальных объектов.

www.nilem.ru

Приложение 1

Функции формы и преобразования координат в методе конечных элементов

Используя следующее обозначение для площади треугольника, образованного симплекс-элементом (рис.2.2):

$$S=\frac{1}{2}\begin{vmatrix}1 & \xi_i & \eta_i\\ 1 & \xi_j & \eta_j\\ 1 & \xi_k & \eta_k\end{vmatrix}=\xi_j\eta_k-\xi_k\eta_j+\xi_i(\eta_j-\eta_k)+\eta_i(\xi_k-\xi_j), \quad (П1.1)$$

путем несложных преобразований (2.24) и (2.25) нетрудно получить выражения для коэффициентов интерполянтов в местной системе координат:

$$\begin{aligned}
a_{0\xi,\eta,\theta}&=\frac{1}{2S}\left[(\xi_j\eta_k-\xi_k\eta_j)E_{i\xi,\eta,\theta}+(\xi_k\eta_i-\xi_i\eta_k)E_{j\xi,\eta,\theta}+(\xi_i\eta_j-\xi_j\eta_i)E_{k\xi,\eta,\theta}\right],\\
a_{1\xi,\eta,\theta}&=\frac{1}{2S}\left[(\eta_j-\eta_k)E_{i\xi,\eta,\theta}+(\eta_k-\eta_i)E_{j\xi,\eta,\theta}+(\eta_i-\eta_j)E_{k\xi,\eta,\theta}\right], \quad (П1.2)\\
a_{2\xi,\eta,\theta}&=\frac{1}{2S}\left[(\xi_k-\xi_j)E_{i\xi,\eta,\theta}+(\xi_i-\xi_k)E_{j\xi,\eta,\theta}+(\xi_j-\xi_i)E_{k\xi,\eta,\theta}\right];\\
b_{0\xi,\eta,\theta}&=\frac{1}{2S}\left[(\xi_j\eta_k-\xi_k\eta_j)H_{i\xi,\eta,\theta}+(\xi_k\eta_i-\xi_i\eta_k)H_{j\xi,\eta,\theta}+(\xi_i\eta_j-\xi_j\eta_i)H_{k\xi,\eta,\theta}\right],\\
b_{1\xi,\eta,\theta}&=\frac{1}{2S}\left[(\eta_j-\eta_k)H_{i\xi,\eta,\theta}+(\eta_k-\eta_i)H_{j\xi,\eta,\theta}+(\eta_i-\eta_j)H_{k\xi,\eta,\theta}\right], \quad (П1.3)\\
b_{2\xi,\eta,\theta}&=\frac{1}{2S}\left[(\xi_k-\xi_j)H_{i\xi,\eta,\theta}+(\xi_i-\xi_k)H_{j\xi,\eta,\theta}+(\xi_j-\xi_i)H_{k\xi,\eta,\theta}\right]
\end{aligned}$$

Далее осуществим переход к глобальным координатам. Подставляя (П1.2) и (П1.3) в соответствующие выражения для E и H, соответственно, можно привести выражения интерполянтов к компактному виду:

$$E_{\xi,\eta,\theta}=A_iE_{i\xi,\eta,\theta}+A_jE_{j\xi,\eta,\theta}+A_kE_{k\xi,\eta,\theta}, \quad (П1.4)$$

$$H_{\xi,\eta,\theta}=A_iH_{i\xi,\eta,\theta}+A_jH_{j\xi,\eta,\theta}+A_kH_{k\xi,\eta,\theta}. \quad (П1.5)$$

Коэффициенты в (П1.4) и (П1.5) имеют смысл функций формы и определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
A_i&=\frac{1}{2S}\left[a_i+b_i\xi+c_i\eta\right],\\
A_j&=\frac{1}{2S}\left[a_j+b_j\xi+c_j\eta\right], \quad (П1.6)\\
A_k&=\frac{1}{2S}\left[a_k+b_k\xi+c_k\eta\right].
\end{aligned}$$

В выражениях (П1.6) введены следующие обозначения:

$$a_i=\xi_j\eta_k-\xi_k\eta_j,\ b_i=\eta_j-\eta_k,\ c_i=\xi_k-\xi_j; \quad (П1.7)$$

www.nilem.ru

$$a_j = \xi_k\eta_i - \xi_i\eta_k,\ b_j = \eta_k - \eta_i,\ c_j = \xi_i - \xi_k; \qquad (П1.8)$$

$$a_k = \xi_i\eta_j - \xi_j\eta_i,\ b_k = \eta_i - \eta_j,\ c_k = \xi_j - \xi_i. \qquad (П1.9)$$

Видно, что функции формы обладают следующим свойством: $A_i = 1$ в $i-$м узле и $A_j, A_k = 0$ и т.д.

Приведем формулы преобразования координат для перехода к глобальной системе, связанной с моделью в целом. Симплекс-элемент и местная система координат, в глобальной системе координат показаны на рис.П1.1.

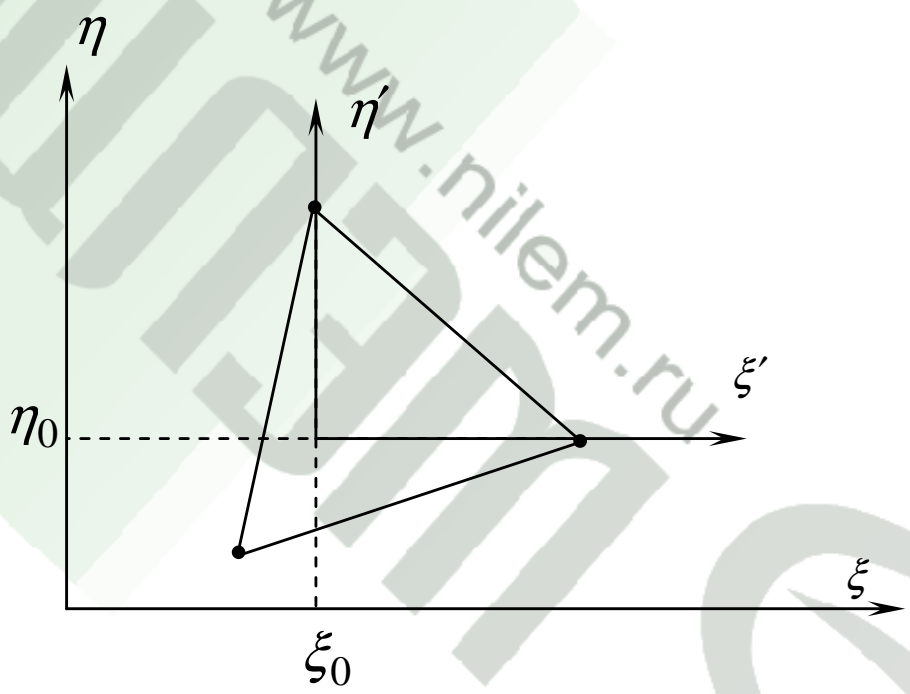


Рис.П1.1. Местная и глобальная системы координат

На рис.П1.1 ξ', η' – собственная система координат; ξ, η – глобальная система координат; ξ_0, η_0 – координаты начала собственной системы в глобальной.

Очевидно, что местные и глобальные координаты связаны следующим преобразованием:

$$\xi = \xi_0 + \xi',\ \eta = \eta_0 + \eta'. \qquad (П1.10)$$

Пусть начало местной системы координат расположено в центре элемента, т.е. справедливо:

$$\xi_0 = \frac{\xi_i + \xi_j + \xi_k}{3},\ \eta_0 = \frac{\eta_i + \eta_j + \eta_k}{3}. \qquad (П1.11)$$

В этом случае (П1.6) примет следующий вид:

$$A_i = \frac{1}{2S}\left(\frac{2S}{3} + (\eta_j - \eta_k)\xi' + (\xi_k - \xi_j)\eta'\right). \qquad (П1.12)$$

Аналогичным образом получаются выражения для функций A_j и A_k.

www.nilem.ru

Получив закон преобразования местных координат в глобальные, необходимо осуществить композицию (объединение) элементов в модель.

Интерполяционные полиномы для компонент векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ имеют вид (2.24) и (2.25). Заметим, что в первоначальной записи коэффициенты $a_{0_{\xi,\eta,\theta}}$, $a_{1_{\xi,\eta,\theta}}, a_{2_{\xi,\eta,\theta}}$ и $b_{0_{\xi,\eta,\theta}}, b_{1_{\xi,\eta,\theta}}, b_{2_{\xi,\eta,\theta}}$ полиномов, аппроксимирующих решение уравнений, были различными и зависели от узловых значений искомых величин. В (П1.4) и (П1.5) узловые значения вынесены, коэффициенты A_i, A_j и A_k стали инвариантными по отношению к виду уравнения и компоненте решения (исчезли индексы ξ,η,θ). Таким образом, выражения интерполянтов для произвольного элемента с номером (n) могут быть представлены в виде:

$$E^{(n)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_i^{(n)} E_{i\xi,\eta,\theta} + A_j^{(n)} E_{j\xi,\eta,\theta} + A_k^{(n)} E_{k\xi,\eta,\theta}, \qquad \text{(П1.13)}$$

$$H^{(n)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_i^{(n)} H_{i\xi,\eta,\theta} + A_j^{(n)} H_{j\xi,\eta,\theta} + A_k^{(n)} H_{k\xi,\eta,\theta}. \qquad \text{(П1.14)}$$

Чтобы проиллюстрировать процедуру композиции элементов, рассмотрим базовую 6-ти узловую модель, состоящую из 5 элементов (рис.П1.2). Для того, чтобы воспользоваться выведенными ранее выражениями для коэффициентов $A_i^{(n)}, A_j^{(n)}$ и $A_k^{(n)}$ необходимо определить в каждом элементе опорный узел (например, узел с номером i). На рис.П1.2 опорный узел обозначен символом «+». Таким образом, i, j, k – собственные номера узлов элемента в местной системе координат; а 1…6 – глобальные номера узлов.

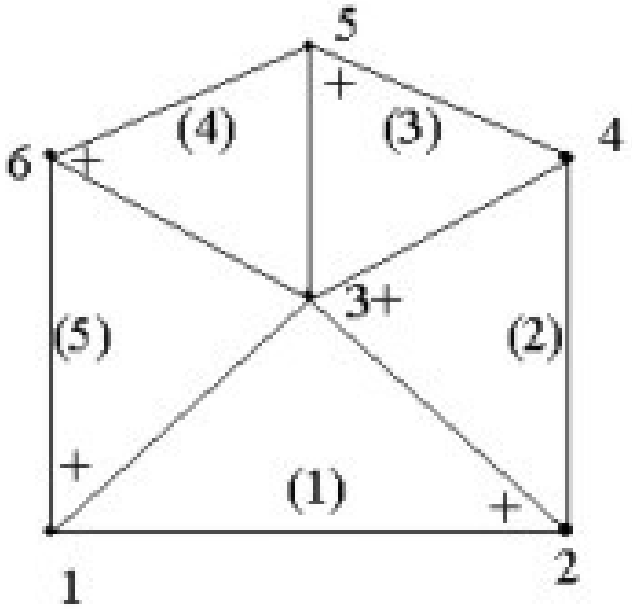


Рис.П1.6. Базовая 6-элементная модель

Соответствие собственных номеров элементов глобальным приведено в табл.П1.1.

www.nilem.ru

Табл.П1.1

Элемент	i	j	k
(1)	2	3	1
(2)	3	2	4
(3)	5	3	4
(4)	6	3	5
(5)	1	3	6

Очевидно, что выражения интерполянтов для электрического и магнитного полей в глобальных координатах примут следующий вид:

$$
\begin{aligned}
&E^{(1)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_2{}^{(1)} E_{2\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(1)} E_{3\xi,\eta,\theta} + A_1{}^{(1)} E_{1\xi,\eta,\theta},\\
&E^{(2)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_3{}^{(2)} E_{3\xi,\eta,\theta} + A_2{}^{(2)} E_{2\xi,\eta,\theta} + A_4{}^{(2)} E_{4\xi,\eta,\theta},\\
&E^{(3)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_5{}^{(3)} E_{5\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(3)} E_{3\xi,\eta,\theta} + A_4{}^{(3)} E_{4\xi,\eta,\theta},\\
&E^{(4)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_6{}^{(4)} E_{6\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(4)} E_{3\xi,\eta,\theta} + A_5{}^{(4)} E_{5\xi,\eta,\theta},\\
&E^{(5)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_1{}^{(5)} E_{1\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(5)} E_{3\xi,\eta,\theta} + A_6{}^{(5)} E_{6\xi,\eta,\theta};
\end{aligned}
\qquad (\text{П1.15})
$$

$$
\begin{aligned}
&H^{(1)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_2{}^{(1)} H_{2\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(1)} H_{3\xi,\eta,\theta} + A_1{}^{(1)} H_{1\xi,\eta,\theta},\\
&H^{(2)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_3{}^{(2)} H_{3\xi,\eta,\theta} + A_2{}^{(2)} H_{2\xi,\eta,\theta} + A_4{}^{(2)} H_{4\xi,\eta,\theta},\\
&H^{(3)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_5{}^{(3)} H_{5\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(3)} H_{3\xi,\eta,\theta} + A_4{}^{(3)} H_{4\xi,\eta,\theta},\\
&H^{(4)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_6{}^{(4)} H_{6\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(4)} H_{3\xi,\eta,\theta} + A_5{}^{(4)} H_{5\xi,\eta,\theta},\\
&H^{(5)}{}_{\xi,\eta,\theta} = A_1{}^{(5)} H_{1\xi,\eta,\theta} + A_3{}^{(5)} H_{3\xi,\eta,\theta} + A_6{}^{(5)} H_{6\xi,\eta,\theta}.
\end{aligned}
\qquad (\text{П1.16})
$$

Глобальный коэффициент формы $A_m^{(n)}$ определяется путем подстановки в (П1.6) соответствующих i, j, k ; координаты ξ, η, θ зависят от выбранной системы координат.

www.nilem.ru

Приложение 2

Некоторые интегралы, использованные в разделе 2

Первое слагаемое в подынтегральном выражении в (2.43), используя формулу дифференцирования произведения, можно представить в виде:

$$A_m^{(n)}(\xi,\eta)\alpha(\xi,\eta)\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi^2} = \\ = \frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial\ \tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi}\right) - \frac{\partial}{\partial\xi}A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial\ \tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi}\right]\cdot\alpha(\xi,\eta). \qquad (П2.1)$$

Тогда первое слагаемое в интеграле (2.43) без $\alpha(\xi,\eta)$ будет иметь вид:

$$\int_D A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi^2}dD = \int_D\frac{\partial}{\partial\xi}\left(A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi}\right)dD - \\ -\int_D\frac{\partial}{\partial\xi}A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi}dD. \qquad (П2.2)$$

Применим к первому слагаемому в (П2.2) теорему Остроградского в обобщенных координатах:

$$\int_D\frac{\partial}{\partial\xi}\left(A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi}\right)dD = \int_D A_m^{(n)}(\xi,\eta)\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi}\vec{\xi}_0\vec{\eta}_0 d\xi d\eta. \qquad (П2.3)$$

Символом $\vec{\xi}_0$ в (П2.3) обозначен орт оси ξ.

Аналогичным образом поступим с членом (2.43), содержащим $\frac{\partial^2\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\eta^2}$, и перепишем в виде:

$$\int_D A_m^{(n)}\left[\alpha(\xi,\eta)\vec{\xi}_0\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi} + \beta(\xi,\eta)\vec{\eta}_0\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\eta}\right]\vec{n}_0 d\xi d\eta - \\ -\int_D\left[\alpha(\xi,\eta)\frac{\partial A_m^{(n)}(\xi,\eta)}{\partial\xi}\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\xi} + \beta(\xi,\eta)\frac{\partial A_m^{(n)}(\xi,\eta)}{\partial\eta}\frac{\partial\tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial\eta}\right]d\xi d\eta + \qquad (П2.4) \\ +\int_D A_m^{(n)}F(\xi,\eta)d\xi d\eta = 0.$$

www.nilem.ru

Здесь $\vec{\eta}_0$ - орт оси η, $\vec{n}_0$ - орт нормали к области D.

Таким образом, в (2.43) мы оставили только первые производные. Первое слагаемое в может быть представлено в виде:

$$\int_D A_m^{(n)} \left[\alpha(\xi,\eta)\vec{\xi}_0 \frac{\partial \tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial \xi} + \beta(\xi,\eta)\vec{\eta}_0 \frac{\partial \tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial n} \right] \vec{n}_0 d\xi dn = \\ = \int_D A_m^{(n)} \chi(\xi,\eta) \frac{\partial \tilde{\Phi}(\xi,\eta)}{\partial n} d\xi dn, \qquad \text{(П2.5)}$$

где $\chi(\xi,\eta)$ - оператор, зависящий от системы координат; n - направление наискорейшего возрастания решения.

www.nilem.ru

Приложение 3

Типовые опоры высоковольтных линий электропередач

Анкерно-угловые напряжением 35 и 220 кВ

У35

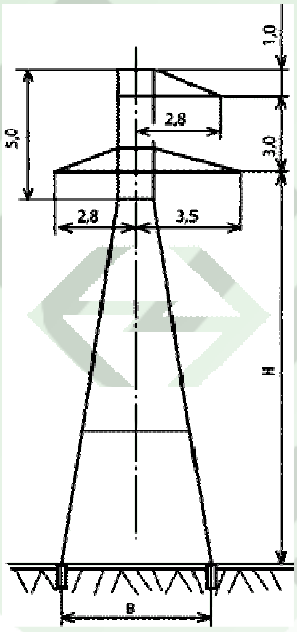


Рис. П3.1

У35-4, У35-4+9

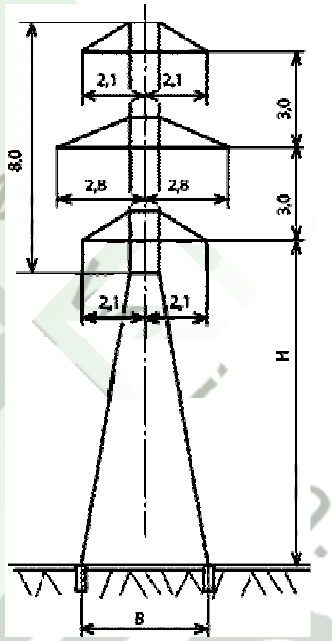


Рис. П3.2

У220

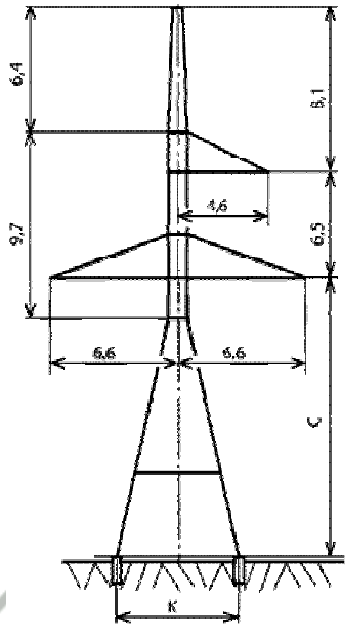


Рис. П3.3

Табл.П3.1

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(H)
У35-1	10
У35-1+5	15
У35-2	10.5
У35-2+5	15.5
У35-3	10
У35-3+5	15
У35-3+9	19
У35-4	10.5
У35-4+9	19.5

Табл.П3.2

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(H)
У220-1	10.5
У220-1+5	15.5
У220-1+9	19.5
У220-1+14	24.5
У220-2	10.5
У220-2+5	15.5
У220-2+9	19.5
У220-2+14	24.5
У220-2Т	10.5
У220-3	10.5
У220-3+5	15.5
У220-3+9	19.5
У220-3+14	24.5
УС220-5	15.5
УС220-5Т	15.5
УС220-6	15.5
УС220-6Т	15.5

www.nilem.ru

Анкерно-угловые опоры напряжением 750 кВ

У750

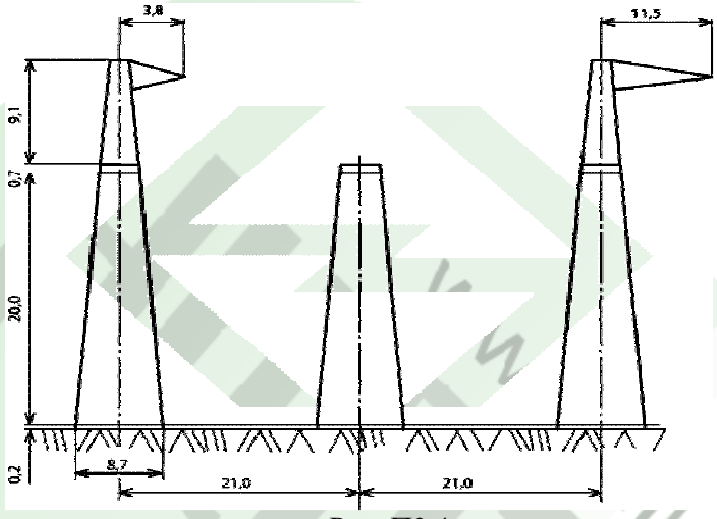


Рис. П3.4

Табл.П3.3

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
У750-1	20.0
У750-1+5	25.0
У750-1+10	30.0
У750-1+15	35.0
УС750-1+5Т	25.0
УСк750-1	20.0

Анкерно-угловые опоры напряжением 110 и 330 кВ

У110

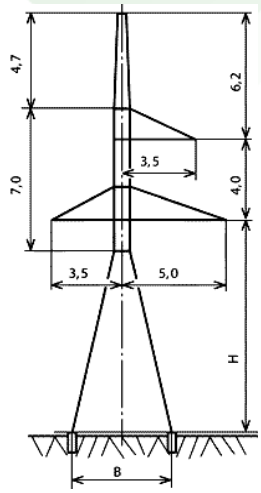


Рис. П3.5

Табл.П3.4

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
У110-1	10.5
У110-1+5	15.5
У110-1+9	19.5
У110-1+14	24.5
У110-2	10.5
У110-2+5	15.5
У110-2+9	19.5
У110-2+14	24.5
У110-3	10.5
У110-3+5	15.5
У110-4	10.5
У110-4+5	15.5
УС110-5	15.5
УС110-6	15.5
УС110-3	10.5

У330

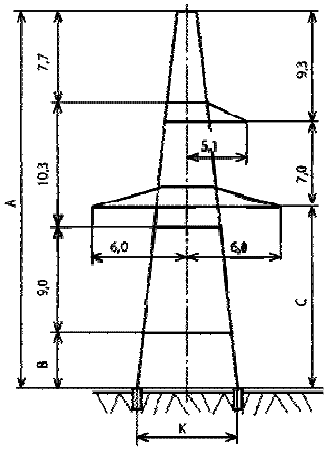


Рис. П3.6

Табл.П3.5

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
У330-1	10.7
У330-1+5	15.7
У330-1+9	19.7
У330-1+14	24.7
У330-2	10.7
У330-2+5	15.7
У330-2+9	19.7
У330-2+14	24.7
У330-2Т	10.7
У330-2Т+5	15.7
У330-2Т+9	19.7
У330-2Т+14	24.7
У330-3	10.7
У330-3+5	15.7
У330-3+9	19.7

www.nilem.ru

Анкерно-угловые свободностоящие напряжением 110-500 кВ и анкерно-угловые опоры напряжением 500 кВ

УС110

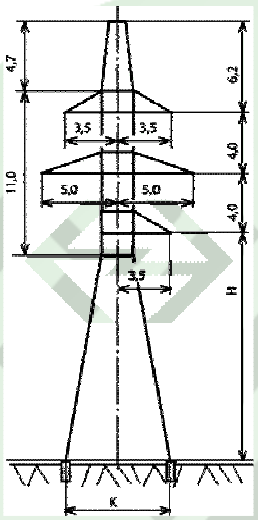


Рис. П3.7

У1, У2

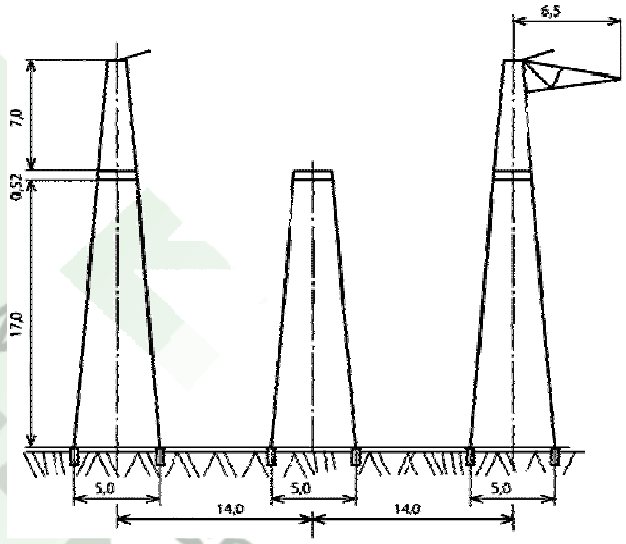


Рис. П3.8

Табл.П3.6

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
УС110-7	10.5
УС110-7+5	15.5
УС110-7+9	19.5
УС110-7+14	24.5
УС110-8	10.5

Табл.П3.7

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
У1	17.0
У2	17.0
У2к	17.0

Промежуточные опоры напряжением 35 кВ

П35-1В, П35-2В

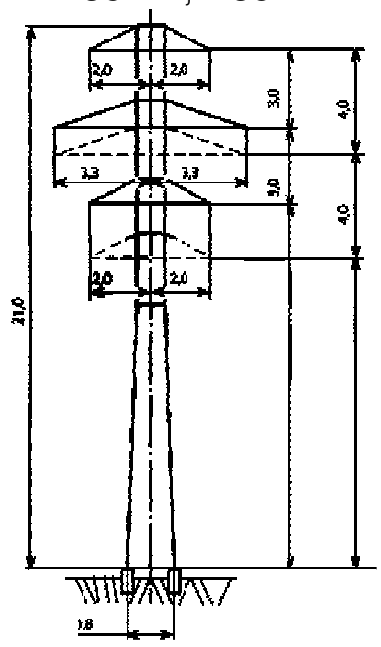


Рис. П3.9

П35-4В

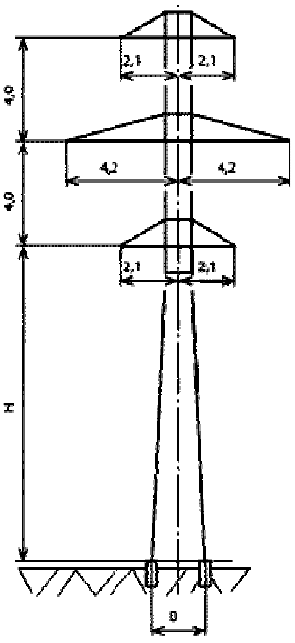


Рис. П3.10

Табл.П3.8

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
П35-1	15.0
П35-2В	14.0
П35-4В	12.5

www.nilem.ru

Промежуточные опоры напряжением 110,220 и 330 кВ

П220

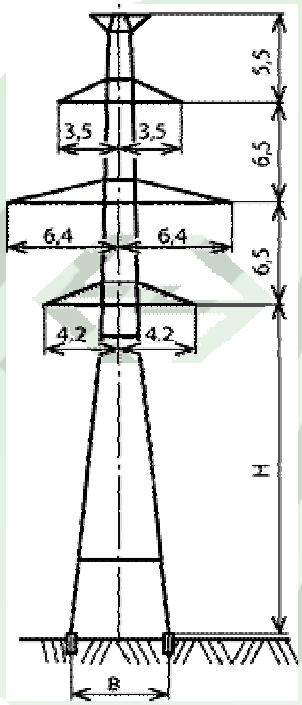


Рис. П3.11

П110

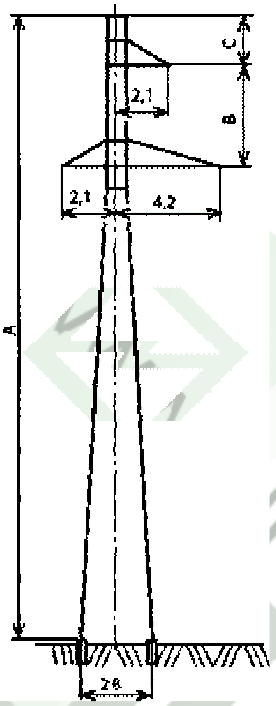


Рис. П3.12

Табл.П3.9

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
П110-1В	19.0
П110-1В+4	23.0
П110-2В	19.0
П110-3В	19.0
П110-4В	19.0
П110-5В	19.0
П110-6В	19.0
ПС110-6В+4	23.0
ПС110-5В	15.0
ПС110-6В	15.0
ПС110-10В	19.0

Табл.П3.10

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
П220-2	22.5
П220-2т	22.5
П220-2т+5	27.5
П220-2+5	27.5
П220-3	22.5
П220-3т	25.5
П220-3+5	30.5
П220-5	25.5
ПС220-1	16.5
ПС220-2	17.5
ПС220-2т	17.5
ПС220-3	20.5
ПС220-5	22.5
ПС220-6	22.5
ПС220-7	22.5

Табл.П3.11

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
П330-2	25.5
П330-2+5	27.5
П330-2т	22.5
П330-2т+5	27.5
П330-3	25.5
П330-3т	25.5
П330-3+5	30.5
П330-3т+5	30.5
П330-5	25.5
ПС330-2	17.5
ПС330-2т	17.5
ПС330-3	20.5
ПС330-3т	20.5
ПС330-5	25.5
ПС330-6	22.5

www.nilem.ru

Промежуточные опоры напряжением 750 кВ

П750

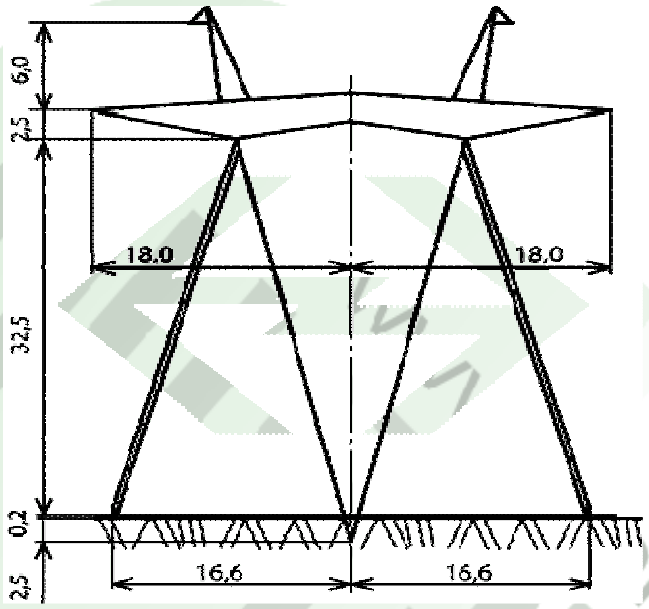


Рис. П3.13

Табл.П3.12

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
П750-1	35.0
ПП750-1	35.0
ПП750-1-1	33.45
ПП750-1-2	31.9
ПП750-1-3	28.8
ПП750-1-4	35.0
ПП750-3	35.0
ПС750-1	35.0
ПП750-3	35.0

Переходные опоры напряжением 220-330 кВ

ПП220, ПП330

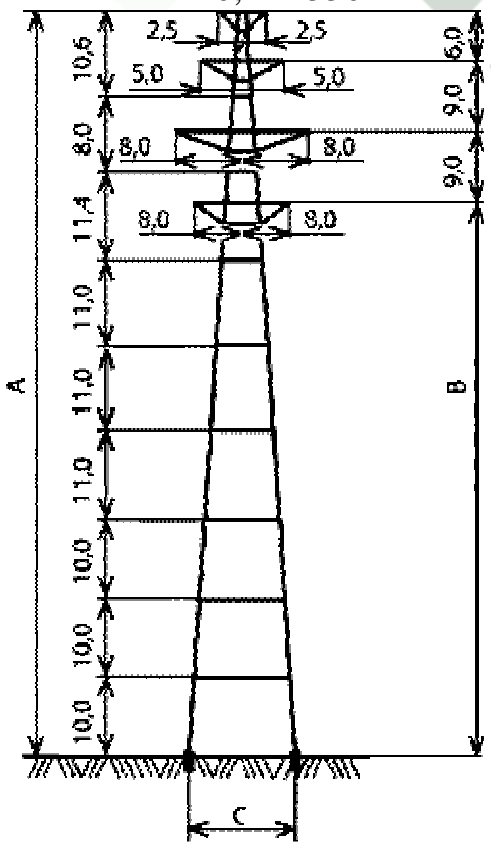


Рис. П3.14

Табл.П3.13

Наименование и тип опоры	Высота до низа траверсы, м(Н)
ПП220-2/40	40.0
ПП220-2/50	50.0
ПП220-2/60	60.0
ПП220-2/70	78.0
ПП330-1/41	41.0
ПП330-1/51	51.0
ПП330-1/61	61.0
ПП330-1/71	71.0
ПП330-1/81	81.0
ПП330-2/40	40.0
ПП330-2/50	50.0
ПП330-2/60	60.0
ПП330-2/70	70.0

www.nilem.ru

Приложение 4

Коэффициенты разложения токовой функции при численном решении интегрального уравнения

После несложных преобразований получим (с учетом введенных обозначений) выражения для коэффициентов разложения тока:

$$A_j^- = \frac{a_j^+ \cdot Q_i^-}{\sin k\Delta_j}, \tag{П4.68}$$

$$B_j^- = \frac{a_j^+ \cdot Q_i^-}{2\cos k\dfrac{\Delta_j}{2}}, \tag{П4.69}$$

$$C_j^- = -\frac{a_j^+ \cdot Q_i^-}{2\sin k\dfrac{\Delta_j}{2}}, \tag{П4.70}$$

$$A_j^+ = \frac{a_j^- \cdot Q_i^+}{\sin k\Delta_j}, \tag{П4.71}$$

$$B_j^- = \frac{a_j^- \cdot Q_i^+}{2\cos k\dfrac{\Delta_j}{2}}, \tag{П4.72}$$

$$C_j^- = -\frac{a_j^- \cdot Q_i^+}{2\sin k\dfrac{\Delta_j}{2}}. \tag{П4.73}$$

Если концевая точка 2 не имеет гальванического контакта с другими проводниками, а точка 1 – имеет (т.е. $N^- \neq 0$ и $N^+ \neq 0$), то коэффициенты разложения будут определяться следующими выражениями:

$$A_i^0 = -1, \tag{П4.74}$$

$$B_i^0 = \left(a_i^- Q_i^- + a_i^+ Q_i^+\right)\frac{\sin k\dfrac{\Delta_i}{2}}{\sin k\cdot\Delta_i}, \tag{П4.75}$$

$$C_i^0 = \left(a_i^- Q_i^- - a_i^+ Q_i^+\right)\frac{\cos k\dfrac{\Delta_i}{2}}{\sin k\cdot\Delta_i}, \tag{П4.76}$$

www.nilem.ru

$$Q_i^- = \frac{a_i^+(1-\cos k\Delta_i) + P_i^+ \sin k\Delta_i}{(P_i^- P_i^+ + a_i^- a_i^+)\sin k\Delta_i + (P_i^- a_i^+ - P_i^+ a_i^-)\cos k\Delta_i}, \quad \text{(П4.77)}$$

$$Q_i^+ = \frac{a_i^-(\cos k\Delta_i - 1) - P_i^- \sin k\Delta_i}{(P_i^- P_i^+ + a_i^- a_i^+)\sin k\Delta_i + (P_i^- a_i^+ - P_i^+ a_i^-)\cos k\Delta_i}. \quad \text{(П4.78)}$$

Вспомогательные функции, использованные в (П4.75-П4.78) записаны ниже:

$$P_i^- = \sum_{j=1}^{N^-}\left[\frac{1-\cos k\Delta_j}{\sin k\Delta_j}\right]\cdot a_j^+, \quad \text{(П4.79)}$$

$$P_i^+ = \sum_{j=1}^{N^+}\left[\frac{\cos k\Delta_j - 1}{\sin k\Delta_j}\right]\cdot a_j^-. \quad \text{(П4.80)}$$

Для случая, когда $N^- = 0$ и $N^+ \neq 0$, коэффициенты примут вид:

$$A_i^0 = -1, \quad \text{(П4.81)}$$

$$B_i^0 = \frac{\sin k\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i} + a_i^+ Q_i^+ \cdot \frac{\cos k\frac{\Delta_i}{2} - x_i \sin k\cdot\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i}, \quad \text{(П4.82)}$$

$$C_i^0 = \frac{\cos k\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i} + a_i^+ Q_i^+ \cdot \frac{\sin k\frac{\Delta_i}{2} + x_i \cos k\cdot\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i}, \quad \text{(П4.83)}$$

$$Q_i^+ = \frac{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\Delta_i - 1}{(x_i P_i^+ + a_i^+)\sin k\Delta_i + (a_i^+ x_i - P_i^+)\cos k\Delta_i}. \quad \text{(П4.84)}$$

Для $N^- \neq 0$ и $N^+ = 0$ справедливо:

$$A_i^0 = -1, \quad \text{(П4.85)}$$

$$B_i^0 = \frac{-\sin k\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i} + a_i^- Q_i^- \cdot \frac{\cos k\frac{\Delta_i}{2} - x_i \sin k\cdot\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i}, \quad \text{(П4.86)}$$

$$C_i^0 = \frac{\cos k\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i} - a_i^- Q_i^- \cdot \frac{\sin k\frac{\Delta_i}{2} + x_i \cos k\cdot\frac{\Delta_i}{2}}{\cos k\Delta_i - x_i \sin k\cdot\Delta_i}, \quad \text{(П4.87)}$$

www.nilem.ru

$$Q_i^- = \frac{1-\cos k\Delta_i + x_i \sin k\Delta_i}{(a_i^- - x_i P_i^-)\sin k\Delta_i + (a_i^- x_i + P_i^-)\cos k\Delta_i}. \qquad (П4.88)$$

Если $N^- = 0$ и $N^+ = 0$, то $f_i^0 = \dfrac{\cos k(s-s_i)}{\cos k\dfrac{\Delta_i}{2} - x_i \sin k\cdot\dfrac{\Delta_i}{2}} - 1.$ (П4.89)

Если сегмент имеет гальванический контакт с проводящей поверхностью, моделируемой уравнением (П4.27), то, очевидно, выполняется равенство:

$$\frac{\partial}{\partial s}\cdot I_j(s)\Big|_{S=S_j+\frac{\Delta_j}{2}} = 0. \qquad (П4.90)$$

Уравнение (П4.90) требует обращения в ноль накопленного заряда в месте гальванического контакта.

www.nilem.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов А.М., Довбыш В.Н., Зимин Л.С. Энергосбережение и экология в электротехнологии. // Труды VII Международной конференции «Окружающая среда для нас и будущих поколений». Самара, СамГТУ, 2002, С.13-14.
2. Артемов И.Е. Влияние современной антропогенной деятельности на природную среду и климатические особенности Урала / И. Е. Артемов // Использование и охрана природ. ресурсов в России. – 2006, №1. – С.98-104.
3. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. – М.: Связьиздат, 1962. –815 с.
4. Александров Г.Н. Сверхвысокие напряжения. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1973. – 180 с.
5. Аполлонский С.М. Внешние электромагнитные поля электрооборудования и средства их снижения. - СПб.: Безопасность, 2001. – 620 с.
6. Атабеков В.Б., Крюков В.И. Городские электрические сети. М.: Стройиздат, 1987. – 384 с.
7. Атаманова И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1964. – 365 с.
8. Багс К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 250 с.
9. Базуткин В.В., Кадомская К.П., Колечицкий Е.С. и др. Физико-математические основы техники и электрофизики высоких напряжений. / Под ред. К.П. Кадомской. - М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
10. Бартенев О.В. Visual Fortran: новые возможности. – М.: Диалог МИФИ, 1999. – 232 с.
11. Бартенев О.В. Современный Fortran. – М.: МИФИ, 2000. – 446 с.
12. Башкин В.Н. Управление экологическим риском. - МГУ Им. М.В. Ломоносова, Науч.-исслед. и проект.-изыскат. инст-т экологии города. - М.: Науч. мир, 2005. - 367 с.
13. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 2000. – 350 с.
14. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. – М.: Наука, 1976. – 320 с.
15. Белушкин М.Ю., Клоков В.В., Силин Н.В., Катанаев В.А. Высоковольтный силовой трансформатор как источник собственных электромагнитных излучений. //Материалы III международного симпозиума по проблемам электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – С-Пб, 2003 г. – С.55 – 57.
16. Берлянт А.М., Тикунов В.С. Геоинформационные системы: Сб. переводных статей – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1994. – 180 с.
17. Битюкова В.Р. Экологическая безопасность как фактор качества жизни и социального развития регионов России // Межрегиональный экологический форум «Человек. Экология. Здоровье». - Барнаул, 2004. - С.161-163.

www.nilem.ru

18. Блохин Ю.В., Журавлев З.Н., Ярославский Э.Н. К расчету электростатических полей методом эквивалентных зарядов.– Электричество, 1980, №2, С.26-31.

19. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

20. Борисов Б.М. К вопросу об оценке состояния здоровья населения в условиях антропогенного загрязнения окружающей среды. // Экология промышленного производства. 1999. №1. - С.3-6.

21. Брауде Л.Г. Использование сетчатых моделей для расчета входных сопротивлений самолетных антенн ДКМВ.// Труды НИИР. – № 3, 1989. – С.79-82.

22. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1981. – 652 с.

23. Бузов А.Л., Казанский Л.С., Минкин М.А., Юдин В.В. Принципы моделирования антенно-фидерного устройства как сложной пространственной структуры обобщенными LC-цепями. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1, № 4, 1998. – С.38-41.

24. Бузов А.Л., Маслов М.Ю. Моделирование электромагнитных полей, возникающих за счёт антенного эффекта технических средств в закрытых помещениях. // Антенны и электродинамика СВЧ. – № 7, 2002. – С.9-12.

25. Бузов А.Л., Маслов М.Ю. Постановка задачи и выбор методов комплексного анализа электромагнитной обстановки в помещениях с детерминированным распределением источников. // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – Т.IX, вып. 3 (31), Москва, 2001г. – С.113-118.

26. Бузов А.Л., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная экология. Основные понятия и нормативная база. – М.: Радио и связь, 1999. – 78 с.

27. Бузов А.Л., Сподобаев Ю.М., Филиппов Д.В., Юдин В.В./ Под ред. В.В. Юдина. Электродинамические методы анализа проволочных антенн. – М.: Радио и связь, 2000. – 153 с.

28. Бузов А.Л., Сподобаев Ю.М., Юдин В.В.. Электромагнитные поля и волны. Термины и определения. Справочное пособие. – Самара: СО-НИИР, 1999. – 70 с.

29. Булгаков Н.Г. Технология регионального контроля природной среды по данным биологического и физико-химического мониторинга. // Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. – Москва, МГУ, 2003. – 270 с.

30. Быстрова А.К. Экология и капиталистический город. М.: Н., 1980.- 173 с.

31. Бялобок С. Регулирование загрязнения атмосферы. // Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л., 1988. С500-531.

32. Ветров В.В., Хрупачев А.Г. Метод оценки и прогнозирования влияния вредных техногенных факторов на продолжительность жизни человека // Вестник новых медицинских технологий 1998. 5. №3-4. – С.15-17.

33. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1981. – 250 с.

www.nilem.ru

34. Волков Е.А. Численные методы. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
35. Воробейчик Е.Л. Садыков О.Ф., Фарафонтов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
36. Вычислительные методы в электродинамике. Под ред. Р. Митры./ Пер. с англ. Под. ред. Э.Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1977. – 487 с.
37. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971. – 512 с.
38. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984.–428 с.
39. Гахов Ф.Д. Краевые задачи. – М.: Наука, 1977. – 640 с.
40. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М., Госэнергоиздат, 1960. – 463 с.
41. Гринберг Г.А., Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – 727 с.
42. Гринберг Г.А., Пименов Ю.В. К вопросу о дифракции электромагнитных волн на бесконечно тонких идеально проводящих экранах.// Журнал теоретической и экспериментальной физики, т. XXVII, вып. 10, 1957. – с. 2326– 2339.
43. ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
44. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А., Меркулов А.В. Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное издание. – М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999. – 151 с.
45. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979. - 200 с.
46. Данилушкин А.И., Довбыш В.Н. Проблемы экологии при утилизации взрывателей. // Труды VII Международной конференции «Окружающая среда для нас и будущих поколений». Самара, СамГТУ, 20021, С.58-59.
47. Дезин А.А. Общие вопросы теории граничных задач. – М.: Наука, 1980. – 120 с.
48. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа./ 3-е, перераб. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
49. Демирчан К.С., Солнышкин Н.И. Расчет трехмерных магнитных полей методом конечных элементов. // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. 1975, №5. – С.39–49.
50. Демирчан К.С. Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. М., Высшая школа, 1966. – 456 с.
51. Дженюк С.Л. Методология информационного обеспечения мониторинга окружающей среды. Дисс. на соиск. уч. ст. д-ра геогр. наук. / Российский государственный гидрометеорологический университет – СПб, 2003. – 346 с.
52. Довбыш В.Н. Идентификация процесса непрерывного индукционного нагрева изделий при утилизации взрывателей. // Труды XII

www.nilem.ru

межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». Ч.2. Самара: СамГТУ, 2002. – С.31-34.

53. Довбыш В.Н. Модели и алгоритмы оптимального управления индукционными нагревателями непрерывного действия в установках утилизации. //Труды XII межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». Ч.2. Самара: СамГТУ, 2002. – С..34-37.

54. Довбыш В.Н. Моделирование и расчет электромагнитных источников тепла при индукционном нагреве осесимметричных тел сложной формы. // «Вестник Самарского государственного технического университета». Серия «Технические науки». Вып.14, 2002. – С.181-184.

55. Довбыш В.Н. Оптимизация нестационарных режимов непрерывного индукционного нагрева в условиях ступенчатой вариации входных параметров изделий. // «Вестник Самарского государственного технического университета». Серия «Технические науки». Вып.15, 2002. – С.18-23.

56. Довбыш В.Н. Проблемы электромагнитной экологии энергетических систем. // Материалы IX Конгресса «Актуальные проблемы экологии человека». – Самара, 2004. – С.150-156.

57. Довбыш В.Н. Электромагнитные поля и здоровье человека. // Материалы X Конгресса «Актуальные проблемы экологии человека». – Самара, 2005. – С.162-170.

58. Довбыш В.Н. Принципы электромагнитного мониторинга энергетических систем. // Материалы XIII Юбилейной Всероссийской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. 30.01 – 4.02.2006 г. Самара, ПГАТИ. – С.150.

59. Довбыш В.Н. Анализ помехового излучения линии электропередач. // Радиотехника, №10, 2006. – С.69-71.

60. Довбыш В.Н. Технология регионального контроля природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергетических систем. // Инфокоммуникационные технологии №3, 2006. – С.73 - 78

61. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю. Анализ излучения коронного разряда высоковольтных линий передачи. // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». Самара, 2006. – С.270-272.

62. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сарокваша О.Ю. Экологический мониторинг состава почвы в зоне размещения высоковольтной ЛЭП. // Вестник СамГУ - Естественнонаучная серия. №4 (44). 2006. – С.182-193.

63. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Ситникова С.В., Сподобаев Ю.М. Электродинамическая модель трансформатора с сердечником, выполненным из материала с нелинейными свойствами. // Инфокоммуникационные технологии, Том 2, №3, 2004. – С.72-76.

64. Довбыш В.Н. Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Численный анализ электромагнитного поля силовых трансформаторов в реальных условиях размещения. // Ежегодник РНКЗНИ 2003. Сб. трудов. – М.: Изд. АЛАНА, 2004. – С.151-163.

www.nilem.ru

65. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Моделирование электромагнитных полей встроенной трансформаторной подстанции жилого дома. // Материалы V Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». Самара, 2004. – С.201-202.

66. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Встроенные трансформаторные подстанции – проблемы электромагнитного мониторинга. // Материалы IV Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Санкт-Петербург, 2005. – С.25-30.

67. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Метод оценки электромагнитной обстановки в помещениях со встроенными распределительными пунктами систем энергоснабжения. // Материалы VIII Международной НМТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2007. – С. 154-156.

68. Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М., Маслов М.Ю. Электромагнитный мониторинг энергетических систем. // Академия Энергетики. №1 (09), 2006. – С.4-7.

69. Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М. Электромагнитный мониторинг энергетических систем. // Материалы V Международной научно-технической конф. «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». Самара, 2004 – С.3-14.

70. Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М. Проблемы мониторинга электромагнитного загрязнения окружающей среды. // XXXIII Всероссийский семинар «Актуальные вопросы охраны окружающей среды. Программное обеспечение экологов. 21.11 – 25.11.2005г., НПО «Логус», Москва. – С.7-8.

71. Довбыш В.Н., Сподобаев Ю.М. Проблемы электромагнитного мониторинга мегаполисов. // Материалы VII Международной НТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». Самара, 2006. – С.272-274.

72. Довбыш В.Н., Сподобаев М.Ю. Современные методы оценки и прогнозирования экологической обстановки. // Материалы VIII Международной НМТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2007. – С.157-162.

73. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Ружников В.А., Сивков В.С., Сподобаев Ю.М. Электромагнитные поля в окружающей среде. Расчет электромагнитных полей распределительных и оконечных устройств сетей энергоснабжения. – Самара, ООО «Самбр», 2005. – 57 с.

74. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Семаков Л.М., Сподобаев Ю.М. Экспериментальные исследования электромагнитных полей высоковольтной линии электропередач. // Инфокоммуникационные технологии, Том 2, №4, 2007. – С.70-74.

75. Довбыш В.Н., Семаков Л.М. Расчет электромагнитных полей первичных объектов энергоснабжения области. // Материалы IV Всероссийской НК. Самара, ПГАТИ март 2007 г. – С. 162-164.

76. Довбыш В.Н., Сивков В.С. Применение геоинформационных технологий в системах электромагнитного мониторинга. // Материалы X

www.nilem.ru

Конгресса «Актуальные проблемы экологии человека». – Самара, 2005. – С.170-175.

77. Довбыш В.Н., Сивков В.С., Сподобаев Ю.М. Визуализация электромагнитной обстановки, создаваемой телекоммуникационными техническими средствами, расположенными на больших территориях. // Антенны, №10 (113), 2006. – С.58-62.

78. Довбыш В.Н., Сивков В.С. Цифровая электромагнитная модель местности. // Инфокоммуникационные технологии. Т5. №1, 2007 г. – С.85-88.

79. Довбыш В.Н., Сивков В.С. Формирование пространственных данных для геоинформационной системы электромагнитной безопасности. // Материалы VIII Международной НМТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2007. С.163-170.

80. Дончева А.В. Экологическое проектирование и экспертиза. Практика: учеб. пособие - М.: Аспект Пресс, 2005. – 286 с.

81. Ефимов Н.В. Высшая геометрия. М., Физматгиз, 1961. – 580 с.

82. Жигальский О.А. Экологическое нормирование антропогенных нагрузок // Материалы III междунар. конф. «Освоение Севера и пробл. рекультивации». Сыктывкар, 1997. – С.73-75.

83. Заворыкин В.М. и другие. Численные методы. – М.: Просвещение, 1980. – 250 с.

84. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. Численный анализ дифракции радиоволн. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.

85. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.:Мир,1975–541с.

86. Иванов В.А. Система управления промышленной безопасностью. // Экология и промышленность России. - 2005. - №6. - Спец. вып.: Природоохранная деятельность химического предприятия.

87. Иванов В.К. О некорректно поставленных задачах. // Математический сборник. – №2 (61), 1963. – С.75-79.

88. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 435 с.

89. Икрамов К.Д. Численные решения матричных уравнений. – М.: Наука, 1984. – 300 с.

90. Инженерные расчеты на ЭВМ. Справочное пособие. / Под ред. В.А. Троицкого. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1979. – 288 с.

91. Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С, Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. - 2-е изд. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1981. – 282 с.

92. Казаков В.Н. Уравнение коронного разряда. // Цветные металлы. - №6 2003 г. – С.44 -47.

93. Кайданов Ф.Г., Перельман Л.С. Экранирующие навесы для защиты персонала подстанции сверхвысокого напряжения. – Электрические станции, 1975, №1. – С.75-78.

94. Кайданов Ф. Г., Тиходеев Н. Н. Зарубежные исследования электрических полей линий и подстанций сверхвысоких напряжений и их воздей-

www.nilem.ru

ствия на людей и животных. – Энергохозяйство за рубежом,. 1977, № 3. – С.18-23.

95. Калабеков А.Л. Структурно-функциональная организация и экологический мониторинг урбосистемы мегаполиса. // Дисс. на соиск. уч. ст. д-ра биол. наук. – МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва, 2003. – 480 с.

96. Калиткин Н.Н. Численные методы. / Под редакцией А.А. Самарского, – М.:1976. – 260 с.

97. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961. – 704 с.

98. Ким К.С., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Линейный коронный факельный разряд. // Сб. научн. тр. - Вып. 3. - Бишкек: Кыргызско-Российский Славянский университет, 2000. - С.23-31.

99. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

100. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей. М.: МЭИ, 1977. – 81 с.

101. Колечицкий Е.С. Численный метод расчета осесимметричных электростатических полей. – Электричество, 1972, № 7, с. 57—61.

102. Колечицкий Е.С., Меликов Н.А. Расчет электростатического поля экранов сложной формы. // Электричество, 1974, №2. – С.43-47.

103. Колечицкий Е.С, Филиппов А.А., Фирсова О.В. Методы расчета электрических полей высоковольтных аппаратов.- Электротехника, 1980, №4, С.13-15.

104. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.– М.: Наука, 1984. – 831 с.

105. Корнилов М.В., Калашников Н.В., Рунов А.В. и др. Численный электродинамический анализ произвольных проволочных антенн // Радиотехника, № 7, 1989. – С. 82-83.

106. Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. / Под ред. Д.В. Лисицкого. - М., 1993. – 200 с.

107. Корягина Е.Е., Коськин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. Учебник для техникумов городского транспорта. М.: изд. Транспорт, 1982. – 296 с.

108. Капцов Н.А. Коронный разряд. - М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947 г. – 256 с.

109. Краскович и др. Численные методы в инженерных исследованиях. – Киев: В/ш, 1986. – 320 с.

110. Краснов М.Л., Киселёв А.И., Макаренко Г.И. Интегральные уравнения. – М.: Наука, 1968. – 192 с.

111. Крылов В.А., Юченкова Т.В. Защита от электромагнитных излучений. – М.: Сов. Радио, 1972. – 130 с.

112. Кубанов В.П., Маслов О.Н., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная экспертиза – независимость и компетентность. // Телекоммуникационное поле регионов, № 3, 1999. – С. 22-25.

113. Кудрявцев Л.Д. Курс математического анализа. В 3 т., Т. 3, – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – 352 с.

www.nilem.ru

114. Кузнецов А.Н. Биофизика электромагнитных воздействий (основы дозиметрии). – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 80 с.

115. Кузнецов А.Н. Биофизика низкочастотных электромагнитных воздействий. Учебное пособие. – М.: МФТИ, 1994. – 90 с.

116. Кунцман С.Е. Численные методы. – М.: Наука, 1979. – 350 с.

117. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т2. Теория поля. М.: Наука, 1988. – 509 с.

118. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. - М.: Наука, 2004. – 250 с.

119. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе. – М.: Мир, 1969. – 583 с.

120. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.

121. Маслов М.Ю. Численный анализ электромагнитной обстановки в офисном помещении. // Вестник СОНИИР №1, 2004. – С.162 – 168.

122. Маслов О.Н. Вероятностное моделирование и нормирование уровней электромагнитного фона..// Труды Межд. Ак. Связи, № 2(6), 1998. – С.12-16.

123. Маслов О.Н. Вероятностное моделирование последствий непороговых электромагнитных воздействий. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, Т.1, № 4, 1998. – С.30-34.

124. Маслов О.Н. Электромагнитная безопасность радиоэлектронных средств. Серия изданий «Связь и бизнес». – М.: МЦНТИ, 2000. – 82 с.

125. Макеева Е.Д. Становление и развитие природоохранного и экологического движения в Самарской обл. // Дисс. на соиск. уч. ст. канд. ист. наук. – С амарский государственный педагогический университет. – Самара, 2002.–238 с.

126. Мамихин С.В. Компьютеризация экологических исследований. //Вест. Российского университета дружбы народов. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2000. №4. - С.150-157.

127. Маткад 6.0. Финансовые, инженерные и научные расчёты. / Пер с англ. MathSoft Inc. 101 Main Street. Cambridge. Massachusetts, 02142USA – 698 с.

128. Методы граничных элементов. Перевод с англ. / Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. М., Мир, 1987. – 524 с.

129. Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. Методы расчета электростатических полей. М.: Высшая школа, 1963. – 415 с.

130. Моисеев В. Н. Способ вычисления электрического поля на заряженной поверхности, обладающей осевой симметрией. - Труды МЭИ, 1979, вып. 412. – С. 97-100.

131. Молчанов А.П., Занадворнов П.Н. Курс электротехники и радиотехники. – М.: Наука, глав. ред. физ.-мат. лит., 1969. – 480 с.

132. Назаров В.Е., Рунов А.В., Подиниогин В.Е. Численное решение задач об основных характеристиках и параметрах сложных проволочных

www.nilem.ru

антенн // Радиотехника и электроника, Вып. 6. – Минск: Вышейшая школа, 1976. – С.153-158.

133. Научно-методические основы мониторинга и управления экологическим состоянием окружающей среды мегаполиса с целью его устойчивого развития. Отчет. Руководитель Карлин Л.Н. № ГР 01200113032. / Российский государственный гидрометеорологический университет. – СПб, 2003. – 250 с.

134. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. 2 т. Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 800 с.

135. Нефедов Е.И., Радциг Ю.Ю., Эминов С.И. Теория интегральных уравнений дифракции электромагнитных волн. // ДАН, Т.345, №2, 1995. – С.186–187.

136. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. Изд-е 3-е. М., Высшая школа, 1964. – 384 с.

137. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1973. – 608 с.

138. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1989. – 544 с.

139. Норри Д., де Физ Ж. Введение в метод конечных элементов. / Пер. с англ. Демидова Г.В. и Урванцева А.Л., под ред. акад .Марчука Г.И. М.: Изд «Мир», 1981.– 304 с.

140. Обобщение результатов разработки элементов ГИС экологии г. Вологды. Отчет. Руководитель Поляков М.М. № ГР 01200314224. - Исполн. Поляков М.М., Поливанов В.С., Воробьева, Т.А. / Вологодский научно-коорд. центр Центрального экономико-математического инст. РАН. - Вологда, 2003. - 87 с.

141. Павлов А.Н. Электромагнитные поля и жизнедеятельность. Учебное пособие. – М.: Изд-во МНЭПУ, 1998. – 148 с.

142. Паращук Е.М. Экологический мониторинг в информационной системе обеспечения градостроительной деятельности. // Проблемы региональной экологии. - 2006. - № 5. - С. 76-80.

143. Перельман Л. С. Методика расчета емкостей и распределения зарядов в системе трубчатых проводников сложной конфигурации. - Изв. НИИПТ, 1979, сб. 16. – С.180-191.

144. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. – М.: Радио и связь, 2000. – 450 с.

145. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. / Пер. с англ. Икрамова Х.Д. и Капорина И.Е., под ред. Икрамова Х.Д. М., Мир, 1988. – 411 с.

146. Попков В. И. Электропередачи сверхвысокого напряжения, в кн.: Наука и человечество, (т. 6), М., 1967 г. – 230 с.

147. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Раздел 1. – М.: НЦ ЭНАС, 2003. – 304 с.

148. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Раздел 2. Передача электроэнергии. – М.: НЦ ЭНАС, 2003. – 152 с.

149. Правила устройства электроустановок. - НЦ ЭНАС, 2003. – 299 с.

www.nilem.ru

150. Предварительные итоги деятельности Федеральной службы надзора в сфере природопользования в 2005 году. // Использование и охрана природ. ресурсов в России. - 2006. - № 1. - С.42-44.

151. Прогулова Т.Б. Геоинформационные системы при подготовке специалистов в области недропользования. // Дисс. на соиск. уч. ст. к.т. н. / Московский государственный геолого-разведочный университет. – М., 2003. - 100 с.

152. Разевиг Д.В., Соколова М.В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. – М.: Энергия, 1977. – 199 с.

153. Резвых К. А. Расчет электростатических полей в аппаратуре высокого напряжения. – М.: Энергия, 1967. – 121 с.

154. Разработка методик энергоэкологического мониторинга систем энергообеспечения образовательных учреждений. Отчет. Руководитель Медведев В.Т. № ГР 01200105463. - Исполн. Медведев В.Т., Макальский Л.М., Каралюнец А.В. / Московский энергетический институт. – Москва, 2003. – 55 с.

155. Ряполов С.И. Обобщённый метод численного решения задач Коши. / Под ред. Баринова. – М-во обороны, 1975. – 80 с.

156. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М., Наука, 1977. – 656 с.

157. СанПиН 2.1.2.1002-00. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

158. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

159. СанПиН 2.2.2.1332-03 Гигиенические требования к организации работы на копировально-множительной технике. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

160. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

161. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Изд. «Мир», 1979. – 392 с.

162. Система экологического мониторинга, создание и внедрение. Первая очередь. Разработка программной системы для ввода данных и представления информации. Отчет. Руководитель Мясоедов Б.В. № ГР 01200200659. - Исполн. Казаков С.В., Шикин А.В., Бакин, Р.И. / Научно-исследовательский центр радиационного риска и экологической безопасности. - Москва, 2003. – 13 с.

163. Смайт В. Электростатика и электродинамика. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1954. – 604 с.

164. Создание комплексов программно-алгоритмических средств для анализа и прогноза состояния окружающей среды. Отчет. Руководитель Бабешко В.А. № ГР 01200106692. – Исполн. Бабешко В.А., Бабешко, О.М., Зарецкая, М.В. / Кубанский государственный университет. - Краснодар, 2003. – 81 с.

www.nilem.ru

165. Сподобаев Ю.М. Методы прогнозирования и картографирования электромагнитных полей технических средств телекоммуникаций в окружающей среде (на рус. и англ. яз.).// Материалы Международного совещания «Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование», Женева, 1999. – С.22-25.

166. Сподобаев Ю.М. Проблемы электромагнитной экологии.// Электросвязь, № 3, 1992. – С.8-9.

167. Сподобаев Ю.М. Методики расчёта ближних полей в диапазонах ОНЧ, НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ, УВЧ. // Отчёт Куйбыш. Электротехнического института связи, научный руководитель Шередько Е.Ю. – 4/83, № ГР 0183.0067225, инв. № 0284.0054708, Куйбышев , 1983. – 163 с.

168. Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. Основы электромагнитной экологии. – М.: Радио и связь, 2000. – 239 с.

169. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. – М., Л.: Гостехиздат, 1948. – 540 с.

170. Суворов Г.А., Пальцев Ю.П., Хунданов Л.Л. и др. Неионизирующие электромагнитные излучения и поля (экологические и гигиенические аспекты). / Под общей ред. Н.Ф. Измерова. – М.: Изд-во «Вооружение. Политика. Конверсия», 1998. – 110 с.

171. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Изд. 3-е, исправленное. – М.: Наука,1986. – 288 с.

172. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990. – 232 с.

173. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975. – 295 с.

174. Трифонова Т.А., и др. Прикладная экология.–М.: Традиция, 2005.–384 с.

175. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. – М.: В/ш, 1965.–328 с.

176. Холодов Ю.А. Шестой незримый океан. Очерки по электромагнитной биологии. – М.: Знание, 1978. – 112 с.

177. Цырлин Л.Э. Избранные задачи расчета электрических и магнитных полей. – М.: Советское радио, 1977. – 313 с.

178. Юдин В.В. Разработка и программная реализация эффективных численных методов электродинамического анализа антенн диапазона ОВЧ. // Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н., Самара, 1995. – 250 с.

179. Abou-Seada M. S., Nasser E. Digital Computer Calculation of the Electric Potential of a Rod Gap. - Proc. IEEE, 1968, vol. 56, № 5. – P.813-820.

180. Antenna Modeling Program – Engineering Manual, MB Associates Report No. MB-R-74/62, 1994. – 85 p.

181. Antenna Modeling Program – Supplementary Computer Program Manual (AMP2), MBAssociates Report No. MB-R-75/4, 1975. – 72 p.

182. Bulgakov N.G. Determination analysis as a method for diagnostics of ecosystem condition. // Environmetrics. 2003. – P.122-135.

www.nilem.ru

183. Calow P. Ecological risk assessment: Risk for what? How do we decide? // Ecotoxicol. and Environ. Safety. 1998. – P.15-18.

184. Comparative Study of three Methods for Computing Electric Fields / Beasley B. A., Pickles J. H., D'Amico G. et. al. – Proc. IEE, 1979, vol. 126, №1. – P.126-134.

185. David O. Carpenter. Sinerik Ayrapetyan «Biological Effects of Electric and Magnetic Fields» Academic press, 1994. – 369 p.

186. Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz). Environmental health criteria; 137, Geneva: WHO, 1993. – P.290.

187. Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields edited by Charles Polk, Elliot Postow. – New York, London, Tokyo: CRC Press, 1996. – 618 p.

188. Hannon B. Ecosystem flow analysis //Can. Bull. Fish. Aq. Sc. 1985.- P.97-118.

189. Harrington R.F. Field Computation by Moment Method. Macmillan, New York, 1968. – 150 p.

190. Hoorfar A., Jamnejad V. Electromagnetic Modeling and Analysis of Wireless Communication Antennas.// IEEE Microwave Magazine. Mar. 2003/ – P.51–67.

191. Numerical Electromagnetic Code (NEC-1) Part I: NEC Program Description Theory, Lawrence Livermore Laboratory, 1977. – 85 p.

192. Lytle R.J., Lager D.L. Numerical Evaluation of Sommerfeld Integrals, UCRL-51688, Lawrence Livermore Laboratory, CA, October 23, 1974. – 170 p.

193. Maximov V.N., Bulgakov N.G., Levich A.P. Quantitative methods of ecological control: Diagnostics, standardization, and prediction // Environmental indices: Systems Analysis Approach. London: EOLSS Publishers, 1999. – 363 p.

194. Poggio A.J. and Miller E.K. Integral Equation Solutions of Three-Dimensional Scattering Problems, Chapt. IV in Computer Techniques for Electromagnetics, edited by R.Mittra, Pergamon Press, New York, 1973. – P.125 – 132.

195. Poggio A.J. and Adams R.W. Approximations for Terms Related to the Kernel in Thin-Wire Integral Equation, UCRL-51985, Lawrence Livermore Laboratory, CA, December 19, 1975. – 52 p.

196. Shannon, C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, Illinois: Univ. of Illinois Press, 1949 – 350 p.

197. Silvester P., Chari M. Finite element solution of saturate magnetic field problems. IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1970, vol. 89, #7. – p. 1642 – 1651.

198. Thide B. Electromagnetic Field Theory. Swedish Institute of Space Physics; Department of Astronomy and Space Physics Uppsala University, Sweden; School of Mathematics and Systems Engineering Vaxjo University, Sweden. 2002.–191 p.

199. Urban ecology/ / edited: J. Breuste, H. Feldmann, O. Uhlmann. – Berlin et al.: Springer, 1998. – XVIII. – 714 p.

200. William Ralpf Bennett, jr. Health and Low-Frequency Electromagnetic Fields. Yale University, 1994. – 185 p.

www.nilem.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5
Foreword 7
Введение 9
Раздел 1. **Электродинамические модели распределительных элементов региональной энергетической инфраструктуры** 28

1.1. Классификация технических средств систем энергоснабжения с точки зрения пространственной локализации и характеристик создаваемых электромагнитных полей 28
1.2. Электродинамическое моделирование воздушных линий электропередач 32
1.2.1. Выбор и обоснование подходов к электродинамическому моделированию 32
1.2.2. Вывод выражений для компонент векторов электрического и магнитного полей 35
1.2.3. Учет разветвленного характера воздушных линий 39
1.2.4. Расчет уровней электромагнитных полей высоковольтных линий электропередач 42
1.2.5. Расчет высокочастотных полей высоковольтных линий 48
1.3. Электродинамическое моделирование подземных линий электропередач 53
1.3.1. Анализ поля частично экранированной многопроводной линии при помощи метода конечных элементов 53
1.3.2. Моделирование линий электропередач и оценка корректности конечноэлементных моделей 56
1.3.3. Расчет уровней электромагнитных полей заземленной подземной линии электропередач 59
1.4. Анализ электромагнитных полей силовых распределительных пунктов системы энергоснабжения 65
1.4.1. Моделирование силовых распределительных пунктов расчетно-экспериментальным методом 65
1.4.2. Выражения для компонент векторов электромагнитного поля расчетно-экспериментальной модели 66
1.4.3. Расчет уровней электромагнитных полей силового распределительного пункта 67
Раздел 2. Электродинамические модели силовых трансформаторных подстанций 70
2.1. Моделирование силового электрооборудования с учетом условий размещения при помощи метода конечных элементов 70
2.1.1. Исходные уравнения и формулировка соответствующих 70

www.nilem.ru

краевых задач ……
2.1.2. Выбор и обоснование вида аппроксимирующего элемента и порядка интерполяционного полинома …… 75
2.2. Построение модели трансформатора и трансформаторной подстанции ……. 77
2.3. Вывод выражений для коэффициентов интерполяционных полиномов методом Галеркина …… 82
2.4. Вывод выражения для баланса энергий и оценка точности вычислений ……. 83
2.5. Учет особенностей структуры матричного уравнения, возникающего в методе конечных элементов …….. 84
2.6. Расчет уровней электромагнитных полей встроенной трансформаторной подстанции ……. 86
2.7. Расчет высокочастотных полей силовых трансформаторов ... 94
2.7.1. Общие замечания …….. 94
2.7.2. Применение метода ИУ к электродинамическому моделированию силовых трансформаторов …… 98
2.7.3. Численное решение интегрального уравнения …….. 103
2.7.4. Результаты расчета характеристик излучения высоковольтного силового трансформатора ……... 108
РАЗДЕЛ 3. Электродинамическое моделирование цепей питания электротранспорта …….. 110
3.1. Варианты технических решений и конструктивного исполнения энергоснабжения электротранспорта ……... 110
3.2. Учет объемных проводящих тел, присутствующих в непосредственной близости токоведущих частей. Учет вторичных вихретоковых полей …… 115
3.3. Расчет уровней электромагнитных полей электротранспорта 117
3.3.1. Электромагнитные поля системы питания троллейбуса ….. 117
3.3.2. Электромагнитные поля системы питания трамвая …….. 122
3.3.3. Электромагнитные поля системы питания метрополитена . 122
РАЗДЕЛ 4. Экспериментальные исследования электромагнитных полей энергетической инфраструктуры региона ……... 132
4.1. Методика проведения эксперимента и обработки результатов 132
4.2. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей высоковольтных ЛЭП …….. 134
4.3. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей трансформаторной подстанции …… 141
РАЗДЕЛ 5. Систематизация подходов к контролю природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергетических систем …….. 144
5.1. Алгоритм комплексного анализа электромагнитной об- 144

www.nilem.ru

становки ……..
5.2. Применение геоинформационных технологий к представлению результатов электромагнитного мониторинга …….. 153
5.3. Результаты электромагнитного мониторинга энергетической системы города Самара и Самарской области …… 156
Заключение ……. 163
Приложение 1 167
Функции формы и преобразования координат в методе конечных элементов ……
Приложение 2 171
Некоторые интегралы, использованные в разделе 2 ……...
Приложение 3 173
Типовые опоры высоковольтных линий электропередач ……..
Приложение 4 178
Коэффициенты разложения токовой функции при численном решении интегрального уравнения ……..
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ……. 181

www.nilem.ru

CONTENT

Preface …… 5
Foreword ……..…… 7
Introduction ……... 9
Chapter 1. **Electromagnetic fields of distributive elements of a regional power infrastructure** 28

1.1. Classification of power supply systems equipments from the point of view of spatial locating and characteristics of created electromagnetic fields ……..... 28
1.2. Electrodynamics modeling of air located power lines ……..... 32
1.2.1. Choice and substantiation of approaches to electrodynamic modeling …….. 32
1.2.2. Conclusion of expressions for a component of vectors electric and magnetic field ……..... 35
1.2.3. The account of the branched out character of air-lines ……..... 39
1.2.4. Calculations of electromagnetic field of air-crossed power lines 42
1.2.5. Calculations of high-frequency electromagnetic field of air-crossed power lines ……... 48
1.3. Electrodynamics modeling of under-ground located power lines 53
1.3.1. The analysis of electromagnetic fields of partially screened multiwire line by means of a finite elements method ……..... 53
1.3.2. Modeling of electric power lines and correctness estimation of finite element models ……... 56
1.3.3. Calculation of levels of electromagnetic fields of the earthed underground electric power line …….. 59
1.4. The analysis of electromagnetic fields of power distributive points of system of power supply …… 65
1.4.1. Modelling of power distributive points by a settlement-experimental method ……... 65
1.4.2. Expressions for a component of vectors of an electromagnetic field of settlement-experimental model ……... 66
1.4.3. Calculation of levels of electromagnetic fields of power distributive point …….. 67

Chapter 2. **Electromagnetic fields of power transformer substations** …… 70
2.1. Modeling of a power electric equipment taking into account conditions of placing by means of a of finite elements method …….. 70
2.1.1. The initial equations and the formulation of corresponding boundary problems …… 70
2.1.2. Choice and substantiation of a kind of an approximating element and order of an interpolation polynom …….. 75

www.nilem.ru

2.2. Construction of model of the transformer and transformer substation 77
2.3. Conclusion of expressions for interpolation polynoms coefficients by Galerkin method 82
2.4. Conclusion of expression for balance of energy and an estimation of accuracy of calculations 83
2.5. The account of features of structure of the matrix equation arising in a of finite elements method 84
2.6. The account of features of structure of the matrix equation arising in a of finite elements method 86
2.7. Calculation of high-frequency fields of power transformers 94
2.7.1. The general remarks 94
2.7.2. Application of integral equation method to electrodynamic modelling of power transformers 98
2.7.3. The numerical decision of the integrated equation 103
2.7.4. Results of calculation of characteristics of radiation of highly-voltage power transformer 108
Chapter 3. Electromagnetic fields of feed circuits of electrotransport 110
3.1. Variants of technical decisions and design of power supply of electrotransport 110
3.2. The account of the volume conducting bodies which are present in immediate proximity of current carrying parts. The account of secondary vortical current fields 115
3.3. Calculation of levels of electromagnetic fields of electrotransport 117
3.3.1. Electromagnetic fields of the power supply system of a trolley bus 117
3.3.2. Electromagnetic fields of the power supply system of a tram 122
3.3.3. Electromagnetic fields of the power supply system of underground 122
Chapter 4. **Experimental researches of electromagnetic fields of a power infrastructure of region** 132
4.1. Technique of carrying out of experiment and processing of results 132
4.2. Results of experimental researches of electromagnetic fields of high-voltage power line 134
4.2. Results of experimental researches of electromagnetic fields of transformer substation 141
Chapter 5. **Ordering of approaches to the environment control under the factor of electromagnetic radiation of objects of power systems** 144
5.1. Algorithm of the complex analysis of electromagnetic conditions 144
5.2. Application of geoinformation technologies to representation of results of electromagnetic monitoring 153
5.3. Results of electromagnetic monitoring of a power system of the city of Samara and the Samara region 156
The conclusion 163

www.nilem.ru

Appendix 1 167
Form functions and transformation of coordinates in a finite elements method …….
Appendix 2 171
Some integrals used in chapter 2 …….....
Appendix 3 173
Typical support of high-voltage electric power lines ……...
Appendix 4 178
Decomposition coefficients of current functions at the numerical decision of the integrated equation ……..
LITERATURE ……... 181

Научное издание

Довбыш Владимир Николаевич
Маслов Михаил Юрьевич
Сподобаев Юрий Михайлович

Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем

Монография

Подписано в печать 26.01.09 Формат 60 х 84 1/16
Печать оперативная. Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 13,30
Усл. печ. л. 12,35. Тираж 500 экз. Заказ № 14626

Отпечатано в типографии ООО ‘‘ИПК ‘‘Содружество’’
443030 Самара, ул. Чернореченская, 33.
Тел.: (846) 336-13-22, 267-58-73.

www.nilem.ru