

**На правах рукописи**

**Степанов Илья Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В  
ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И РАЗРАБОТКА  
МЕР ПО СНИЖЕНИЮ ИХ ИНТЕНСИВНОСТИ**

**Специальность 05.14.12 – Техника высоких  
напряжений**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Новосибирск - 2009**

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кадомская Кира Пантелеймоновна**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Ефимов Борис Васильевич**

кандидат технических наук, ст. н. с.  
**Наумкин Иван Егорович**

Ведущая организация: Филиал ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС»-  
Новосибирская специализированная про-  
изводственная база, г. Новосибирск

Защита состоится: «26» февраля 2009 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном  
техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск-92, пр. Карла  
Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского  
государственного технического университета.

Автореферат разослан «    » января 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Тимофеев И.П.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В последние годы при проектировании и эксплуатации электроустановок высокого напряжения все большее внимание уделяется их электромагнитной совместимости с жизнедеятельностью человека. Это, в первую очередь, связано с проведением исследований в области влияния электромагнитных полей на здоровье человека. В частности, ранее не было четкой оценки негативного влияния на жизнедеятельность людей магнитных полей промышленной частоты. Главной причиной тому явилась невозможность человеком ощутить магнитное поле в момент его воздействия и проявление последствий этого влияния лишь по истечении достаточно большого промежутка времени.

Главными объектами электроэнергетики, при эксплуатации которых возникают опасные магнитные поля промышленной частоты, являются линии электропередачи различного конструктивного исполнения и подстанции высокого напряжения. Следует отметить, что воздействию электромагнитного поля вблизи линий электропередачи (ЛЭП) может подвергаться как специализированный персонал, так и проживающие или работающие около ЛЭП люди. Следовательно, в настоящее время достаточно остро стоит вопрос разработки методик расчета параметров электромагнитных полей промышленной частоты в электроэнергетических устройствах различного назначения и, соответственно, разработки мер по снижению их интенсивности.

В связи с развитием электронной вычислительной техники появилась возможность практического использования численных методов расчета электромагнитных полей, описываемых уравнениями в частных производных, которые позволяют с большой точностью решать те задачи, которые ранее решались с использованием аналитических методик при тех или иных допущениях. В частности, одним из таких численных методов является векторный метод конечных элементов (ВМКЭ). На основе использования этого метода базируется большая часть исследований, проведенных в настоящей работе. Между тем в диссертации при решении некоторых задач использованы и аналитические методы решения, в том числе и, где это возможно, для проверки результатов, полученных с помощью численного метода. Разработка аналитических методов решения обусловлена тем, что на практике реализация этих методов является гораздо менее трудозатратной, чем реализация численных методов. Одной из задач, для решения которой можно с достаточной степенью точности применить аналитический метод, является расчет магнитного поля по трассам воздушных линий электропередачи и под ошиновками открытых распределительных устройств (ОРУ) стандартного исполнения.

Вопрос о расчете магнитных полей по трассам воздушных линий стоит достаточно давно, а расчет магнитных полей по трассам кабельных линий высокого напряжения приобрел актуальность лишь в последние годы. Причиной этому послужило широкое внедрение кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), рабочие токи которых выше, чем рабочие токи кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией и маслонаполненных кабелей.

Кроме того, кабели со СПЭ изоляцией выполняются, в том числе, и в одножильном исполнении, что позволяет использовать различные способы их прокладки. Эти две причины обуславливают увеличение интенсивности магнитных полей по трассам кабельных линий, и, как следствие, необходимость их расчета и снижения.

Одним из наиболее признанных механизмов воздействия магнитного поля промышленной частоты на организм человека являются индуцированные (вихревые) токи. Плотность индуцированных токов в теле человека позволяет охарактеризовать интенсивность воздействия магнитного поля на его организм. Исследованию индуцированных токов в теле человека при воздействии магнитных полей посвящен один из разделов настоящей работы.

### **Цель работы**

- Разработка инженерного аналитического метода расчета магнитного поля по трассам воздушных линий высокого напряжения (ВЛ ВН) и под опорами высоковольтных подстанций;
- исследование электромагнитной совместимости линий электропередачи высокого напряжения надземного и подземного исполнения, а также открытых распределительных устройств высокого напряжения (ОРУ ВН) с жизнедеятельностью человека;
- разработка численной модели оценки индуцированных токов в теле человека, возникающих под воздействием магнитного поля промышленной частоты, в том числе и при проведении работ на ВЛ и КЛ ВН;
- разработка конструкций пассивных экранов, предназначенных для компенсации магнитных полей промышленной частоты;
- при выполнении каждого из упомянутых выше разделов работы разработка рекомендаций, позволяющих либо снизить интенсивность электромагнитного поля, либо ограничить время пребывания человека в зоне его опасного влияния.

Для достижения поставленных целей в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- исследованы различные современные конструкции воздушных и кабельных линий электропередачи, а также открытых распределительных устройств высокого напряжения с точки зрения их электромагнитной совместимости с жизнедеятельностью человека;
- разработаны модели тела человека, позволяющие с помощью ВМКЭ оценить индуцированные в его организме токи, обусловленные воздействием магнитного поля промышленной частоты;
- разработаны различные конструкции пассивных экранов, позволяющие существенно снизить интенсивность магнитных полей, инициируемых воздушными и кабельными линиями высокого напряжения.

**Научная новизна основных положений и результатов** работы может быть сформулирована следующим образом:

- доказана достоверность разработанного инженерного аналитического метода расчета магнитных полей по трассам воздушных линий высокого на-

пряжения как на основе анализа содержащихся в нем допущений, так и путем сравнения результатов численного и аналитического расчетов магнитных полей по трассам ВЛ;

- проанализировано количественное снижение интенсивности магнитных полей по трассам линий электропередачи различного конструктивного исполнения при компактизации и симметрировании канала передачи энергии. Показан также эффект снижения интенсивности магнитных полей по трассам многоцепных ВЛ и КЛ при оптимальной фазировке напряжения на проводах и жилах фаз;

- определены значения индуктированных токов в различных частях тела и органах человека, позволяющие оценить тяжесть воздействия магнитного поля промышленной частоты как при нормированном в настоящее время модуле напряженности магнитного поля, так и при ремонте воздушных линий высокого напряжения без их отключения;

- показано, что на величину индуктированных токов в теле человека влияет не только модуль вектора магнитной индукции, но и его направление, что открывает дополнительные возможности, в частности, по снижению опасности для обслуживающего персонала при проведении ремонта ВЛ и КЛ под напряжением;

- показано, что индивидуальная разработка активных и пассивных экранов для компенсации магнитных полей промышленной частоты позволяет локально существенно снизить интенсивность магнитного поля, инициируемого токами в проводящих элементах электроэнергетических установок.

#### **Практическая значимость результатов работы.**

- разработанные инженерные методики расчета магнитных полей по трассам воздушных линий электропередачи и под ошиновками ОРУ позволят уже на стадии их проектирования анализировать магнитные поля, инициируемые ВЛ ВН и ошиновками ОРУ при любом их конструктивном исполнении;

- показано, что в оптимальных с точки зрения минимизации интенсивности электромагнитных полей промышленной частоты конструкциях ВЛ (ВЛ с симметричным расположением проводов и в многоцепных линиях электропередачи при оптимальной фазировке цепей), напряженность электромагнитного поля по их трассам может быть снижена в 1.5-3 раза по сравнению с традиционными конструктивными решениями;

- сформулированы рекомендации по способам прокладки кабельных линий высокого напряжения с целью минимизации интенсивности магнитных полей по их трассам;

- разработаны конструкции пассивных экранов, позволяющих локально снизить интенсивность магнитных полей по трассам воздушных и кабельных линий электропередачи в 1.5-3 раза;

- показано, что плотность индуктированных токов в теле человека существенно зависит как от направления вектора магнитной индукции по отношению к телу человека, так и от расположения человека относительно токоведущих элементов конструкции.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитическая инженерная методика расчета магнитного поля по трассам воздушных линий высокого напряжения и под ошиновками ОРУ, основанная на допущениях об отсутствии эффекта близости между проводами и составляющими в проводах, а также на не учете продольных и поперечных токов в земле, может быть без больших трудовых затрат использована при проектировании ВЛ и ОРУ ВН.

2. Компактизация канала передачи электроэнергии и рациональная фазировка напряжения на проводах и жилах многоцепных воздушных и кабельных линий позволяет снизить интенсивность магнитного поля в 1.5-3 раза.

3. Локальное экранирование магнитного поля воздушных линий электропередачи при помощи одной пассивной петли позволяет снизить напряженность магнитного поля, инициируемого на участках ВЛ, расположенных вблизи рабочих помещений, примерно на 30%.

4. Экранирование кабельных линий электропередачи, расположенных в каналах, при помощи ферромагнитных экранов приводит к снижению напряженности магнитного поля в нормированной зоне в 1.5-3 раза.

5. Разработанная численная методика расчета магнитных полей вблизи спусков к обслуживаемым аппаратам открытых распределительных устройств на подстанциях, позволяет оценивать значение напряженности магнитного поля на нормируемых расстояниях от спусков.

6. Разработанная методика расчета индуктированных токов в теле человека, позволяет оценить степень воздействия магнитного поля промышленной частоты как на организм человека в целом, так и на отдельные его органы.

7. Значение плотности индуктированного тока в теле человека существенно зависит от направления вектора магнитной индукции и расположения человека относительно токоведущих частей электроустановок. Наибольшая плотность индуктированных токов в теле человека при его неблагоприятном расположении относительно токоведущих частей установки наблюдается в области мозга и сердца.

**Достоверность результатов работы** основывается на использовании при её выполнении наиболее полных математических моделей, учитывающих конфигурацию токоведущих частей электроустановок ВН, тела и органов человека, на хорошем согласии результатов расчетов интенсивности электромагнитных полей относительно простой конфигурации, произведенных при помощи разработанных аналитических методик, с соответствующими численными расчетами. Результаты расчетов магнитных полей по трассам ВЛ ВН хорошо согласуются с результатами экспериментов для этих конструкций ВЛ, проведенных в Испании и опубликованных в журнале «IEEE Transactions on power delivery» vol.18, №4, 2004.

### **Апробация результатов работы.**

Отдельные результаты работы и работа в целом обсуждались на семинарах кафедры ТЭВН и факультета энергетики НГТУ, а также на Всероссийских и Международных конференциях в Новосибирске, Томске, Москве, Санкт-Петербурге и Монголии.

Результаты работы использованы при выполнении научно-исследовательских и проектных работ. По договору каф. ТиЭВН НГТУ с ОАО «Федеральная сетевая компания РАО ЕЭС России» был произведен анализ магнитных полей в тоннеле, содержащем 6 цепей кабельных линий 220 и 500 кВ, проектируемом в г. Москве. Результаты этих расчетов были включены в отчет о НИР: «Проведение экспертизы проектов кабельных коммуникаций на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по объектам реконструкции подстанций 500 кВ Московского кольца» (I этап), исполнитель расчетов магнитных полей по трассе КЛ ВН Степанов И.М. Анализ электромагнитных полей на модернизируемой подстанции 220 кВ «Власиха» (г. Барнаул) включен в соответствующий проект. Акт внедрения результатов работы автора в этом проекте включен в текст диссертации в виде приложения.

### **Публикации.**

Всего опубликовано 13 работ по теме диссертации: работ, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК – 1; работ, опубликованных в рецензируемых журналах – 2; работ, опубликованных в сборнике научных трудов – 1; докладов, опубликованных в сборниках международных и всероссийских конференций – 9.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 33 наименований и одного приложения, изложенных на 149 страницах текста. Работа проиллюстрирована 31 таблицей и 67 рисунками.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные задачи исследования, отражены научная новизна работы, ее практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** доказываемся достоверность разработанных аналитических методов расчета магнитного и электрического полей по трассам воздушных линий высокого напряжения (ВЛ ВН). При разработке аналитического метода расчета *магнитного* поля по трассам ВЛ ВН были приняты следующие допущения:

1. Распределение плотности тока в проводе принималось равномерным, т.е. не учитывался эффект близости проводов и составляющих в расщепленных фазах;

2. Не учитывались продольные и поперечные токи проводимости и токи смещения в земле;

3. Не учитывалось влияние постороннего тела (человека) на напряженность магнитного поля в воздушной среде;

Подавляющее число используемых на практике аналитических методик расчета и оценки характеристик магнитного поля по трассам ВЛ разработаны с учетом *первого допущения* о равномерности распределения плотности тока в проводах.

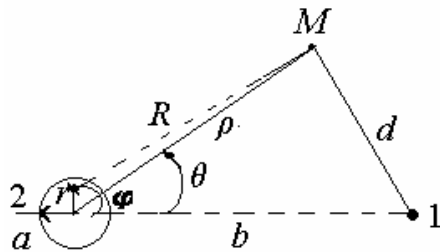


Рис. 1

Справедливость этого допущения в работе доказывается на основе рассмотрения магнитного поля в системе, приведенной на рис. 1. Следует отметить, что справедливость этого допущения, как и остальных допущений, принятых при разработке аналитического метода расчета магнитного поля по трассе ВЛ в нормальном режиме ее работы, доказывалась путем сравнительных аналитических и численных расчетов, а также

путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными результатами, опубликованными в мировой технической литературе.

Один из проводов (1) моделировался в виде длинной нити, второй (2) – в виде провода конечного радиуса  $a$ . Магнитное поле определялось в произвольной точке пространства между проводами -  $M$ . По проводу 1 течет ток  $I$ , по проводу 2 – ток  $-I$ .

С целью доказательства сформулированного выше допущения определялись:

- распределение плотности тока в проводе 2;
- векторный магнитный потенциал в произвольной точке  $M$ , лежащей в плоскости сечения проводов.

Распределение плотности тока в проводе 2 будет имеет вид:

$$J(r, \varphi) = -\frac{kI}{2\pi a} \frac{I_0(kr)}{I_1(ka)} - \frac{kI}{\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^n}{b^n} \frac{I_n(kr)}{I_{n-1}(kr)} \cos n\varphi, \quad (1)$$

где  $I_0, I_1, \dots, I_n$  -модифицированные функции Бесселя первого рода 0, 1, ..., n порядков, соответственно.

В случае, если второй провод также будет представлен в виде длинной нити, т.е. при допущении, что плотность тока равномерно распределена по периметру провода (пренебрежение эффектом близости), выражение для определения векторного магнитного потенциала в произвольной точке  $M$  диэлектрика запишется в виде:

$$A_{Mд} = \frac{\mu_0}{2\pi} I \ln \frac{b}{\rho} - \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\rho}{b} \right)^n \cos n\theta. \quad (2)$$



В таблице 1 приведены результаты расчетов максимального процентного содержания в плотности тока на внешнем периметре провода составляющей, обусловленной эффектом близости при горизонтальной подвеске проводов на опорах ВЛ 110-1150 кВ.

Таблица 1

Максимальное процентное содержание в плотности тока на внешнем периметре провода составляющей, обусловленной эффектом близости

Параметры фазы	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$				
	110	220	500	750	1150
$r_0, \text{мм}$	10.53	12	15.3	11.2	12.6
$n$	1	1	3	4	8
$s, \text{см}$	-	-	40	60	40
$S_{\text{ф\phi}}, \text{м}$	5.0	5.6	11.3	14.5	22.4
$J_{\text{вл}}/J \cdot 100\%$	4.12	4.26	2.26	3.3	3.3

Из таблицы следует, что неравномерность распределения плотности тока по периметру фаз не превышает величины порядка 4%. Следовательно, эта неравномерность несущественно скажется на определении напряженности магнитного поля на достаточном удалении от провода.

Сравнивались также результаты расчета векторного магнитного потенциала в произвольной точке М диэлектрика в двух случаях:

- в системе двух проводов, из которых один моделируется длинной нитью, а второй в виде провода конечного радиуса ( $A_{\text{дм1}}$ );
- в системе двух проводов, каждый из которых моделируется в виде длинной нити ( $A_{\text{дм2}}$ ).

В этих расчетах при расстоянии между проводами, превышающем 0.2 м, магнитные потенциалы в диэлектрике практически не отличаются друг от друга. Поэтому при практических расчетах напряженности магнитного поля, инициируемого многофазными ВЛ, провода можно моделировать в виде длинных нитей, располагая токи в центрах фаз.

Третье допущение связано со средней проводимостью тканей человека, составляющей величину порядка 0.04 См/м. Глубина проникновения электромагнитной волны промышленной частоты в проводящую среду такой проводимости составляет 252 м. Эта глубина проникновения существенно больше геометрических размеров человека. Таким образом, принимаемое допущение также является правомочным.

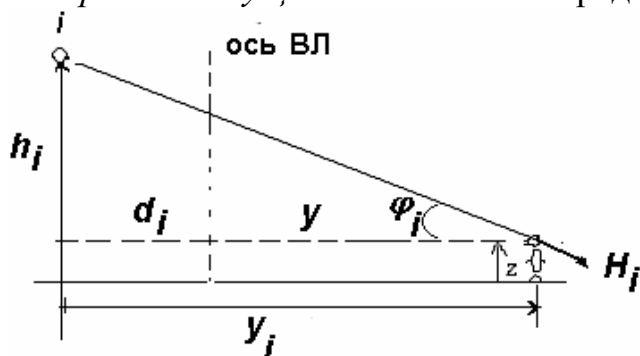


Рис. 2

Обоснованность *второго допущения* подтверждена хорошим согласием результатов аналитических и численных при отсутствии этого допущения расчетов магнитных полей по трассам воздушных линий высокого напряжения при различных проводимостях земли.

При приведенных выше допущениях расчет напряженности магнитного поля под линиями электропередачи  $\mathbf{H}_i$ , наводимой током в каждом  $i$ -м проводе (всего  $n$ -проводов), в точке с координатой  $z$  на расстоянии  $y_i$  от провода при высоте подвески провода над землей  $h_i$  (рис. 2) можно производить по следующим выражениям:

$$\mathbf{H}_i = \frac{I}{2\pi\sqrt{(h_i - z)^2 + y_i^2}} e^{j\arctg\varphi_i}. \quad (3)$$

Модули составляющих вектора напряженности по осям  $y$  и  $z$  определяются как:

$$H_{y_i} = H_i \cos \varphi_i, \quad H_{z_i} = H_i \sin \varphi_i, \quad \operatorname{tg} \varphi_i = \frac{h_i - z}{y_i}. \quad (4)$$

Следовательно, модуль напряженности поля на высоте  $z$  над землей и на расстоянии  $y$  ( $y_{i0} = y_i \pm d_i$ ) от оси линии определится как:

$$H_y = \sqrt{(H_{y10} + H_{y20} + \dots + H_{yn0})^2 + (H_{z1} + H_{z2} + \dots + H_{zn})^2}. \quad (5)$$

Вектор напряженности электрического поля  $\mathbf{E}_i$  в плоскости, перпендикулярной оси ВЛ, обусловленной зарядом  $i$ -го провода, определяется как:

$$\mathbf{E}_i = \frac{\tau_i h_i}{\pi \varepsilon_0} \frac{\exp\left(-i \arctg \frac{y_i^2 + h_i^2 - z^2}{2y_i z}\right)}{\sqrt{(y_i^2 + h_i^2 - z^2)^2 + 4y_i^2 z^2}}, \quad (6)$$

где  $\tau_i$ -линейная плотность заряда на  $i$ -ом проводе,  $h_i$ -высота подвеса  $i$ -го провода,  $z$ -расчетное расстояние от поверхности земли,  $y_i$ -расстояние  $i$ -го провода от оси линии.

Поскольку напряженности электрических и магнитных полей на расстоянии  $y$  от оси линии зависят от момента времени в диапазоне периода промышленной частоты, то в качестве расчетного распределения напряженностей в плоскости, перпендикулярной оси ВЛ, принималась огибающая их максимальных значений.

**Во втором разделе** работы приведены результаты расчетов электрических и магнитных полей по трассам воздушных и кабельных линий электропередачи и способы их экранирования. Расчеты магнитных и электрических полей по трассам ВЛ можно производить как при применении аналитических методик, изложенных выше, так и с помощью численного решения фундаментальных уравнений Максвелла. В качестве примеров, характеризующих интенсивность полей под ВЛ различного конструктивного исполнения, в работе проанализиро-

ваны распределения максимумов напряженностей магнитного и электрического полей в направлениях, перпендикулярных трассам трех одноцепных ВЛ: 500 и 750 кВ традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз и линии 420 кВ с расположением фаз в вершинах равностороннего треугольника (линия повышенной пропускной способности); а также по трассам двух многоцепных ВЛ ВН: трехцепной линии 500 кВ (в схеме выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС) и четырехцепной ВЛ 500 кВ (Китай). Следует отметить, что для многоцепных линий были рассмотрены различные варианты фазировки напряжений на проводах ВЛ. На рис. 3,б показан график распределения напряженности магнитного поля под ВЛ ВН 500 кВ традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз. Как видно из этого рисунка, совпадение результатов аналитического и численного расчетов магнитного поля практически идеальное. Такое же совпадение наблюдается и при расчете электрического поля под ВЛ.

Кроме сравнения результатов, полученных при помощи различных методик расчета, производилась проверка достоверности аналитического метода расчета магнитного поля при помощи сравнения с реальными экспериментальными данными. Сравнение экспериментально полученных значений напряженности магнитного поля и рассчитанных при помощи аналитической методики показывает, что их максимальное расхождение не превышает 10%. Эта не столь уж значительная погрешность может быть обусловлена как небалансом токов в фазах в эксперименте, так и погрешностью измерений.

Результаты расчетов напряженностей электрических и магнитных полей по трассам одноцепных и многоцепных ВЛ сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Напряженности электрических и магнитных полей по трассам одноцепных ВЛ

Конструкция линии	Максимальное значение напряженности		Значение напряженности на нормируемом расстоянии 30 м от оси линии	
	$E$ , кВ/м	$H$ , А/м	$E$ , кВ/м	$H$ , А/м
Одноцепная ВЛ 500 кВ, традиционного исполнения	7.5	21.8	2.8	5.4
Одноцепная ВЛ 750 кВ, традиционного исполнения	6.4	15.1	4.7	9.9
Одноцепная ВЛ 420 кВ, повышенной пропускной способности	1.5	24.3	0.6	2.6
Трехцепная ВЛ 500 кВ	0.23	3.3	0.23	1.77
Четырехцепная ВЛ 500 кВ	0.61	17.8	0.56	5.5

Минимальные значения электрических и магнитных полей наблюдаются под ВЛ 420 кВ повышенной пропускной способности и под многоцепными ВЛ 500 кВ при оптимальной фазировке напряжений на их проводах.

На рис.4 в качестве примера проиллюстрирован эффект фазировки напряжений на проводах трехцепной ВЛ 500 кВ.

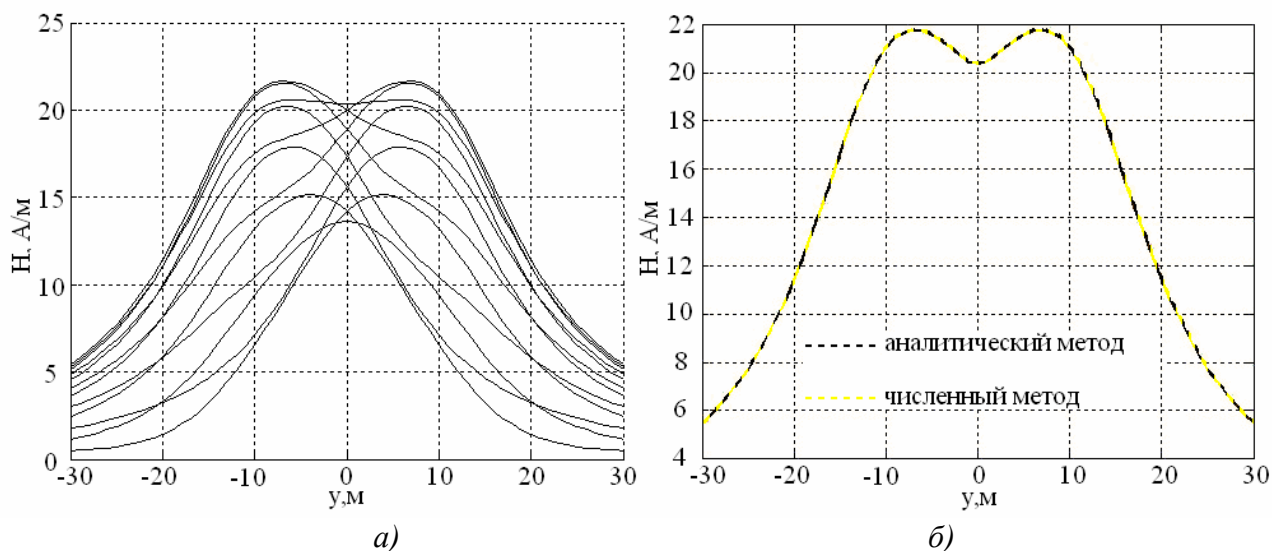


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля под одноцепной ВЛ 500 кВ(а-значения напряженности в различные моменты времени, б-максимальное значение напряженности )

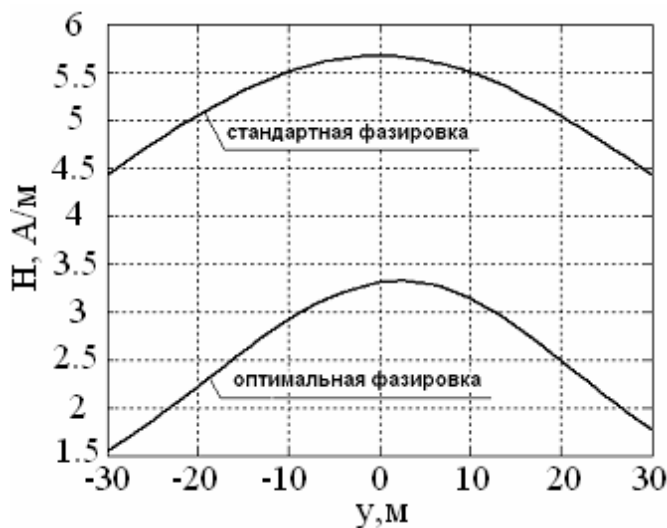


Рис.4. Распределение максимальных значений напряженности магнитного поля под трех-цепной ВЛ 500 кВ

При исследовании магнитных полей, инициируемых КЛ ВН, рассматривалось несколько одноцепных и многоцепных конструкций, содержащих КЛ ВН. На рис. 5 показана одна из рассмотренных конструкций, содержащих КЛ ВН. Слева в тоннеле находятся 4 цепи кабелей 500 кВ, справа – четыре цепи кабелей 220 кВ. В постоянной эксплуатации находятся 3 верхние цепи КЛ 500 и 220 кВ, рабочие токи которых составляют 1200 и 800 А, соответственно. График

магнитной индукции вдоль вертикальной оси тоннеля при стандартной и оптимальной фазировках и проектируемом расположении кабелей в тоннеле показан на рис. 6.

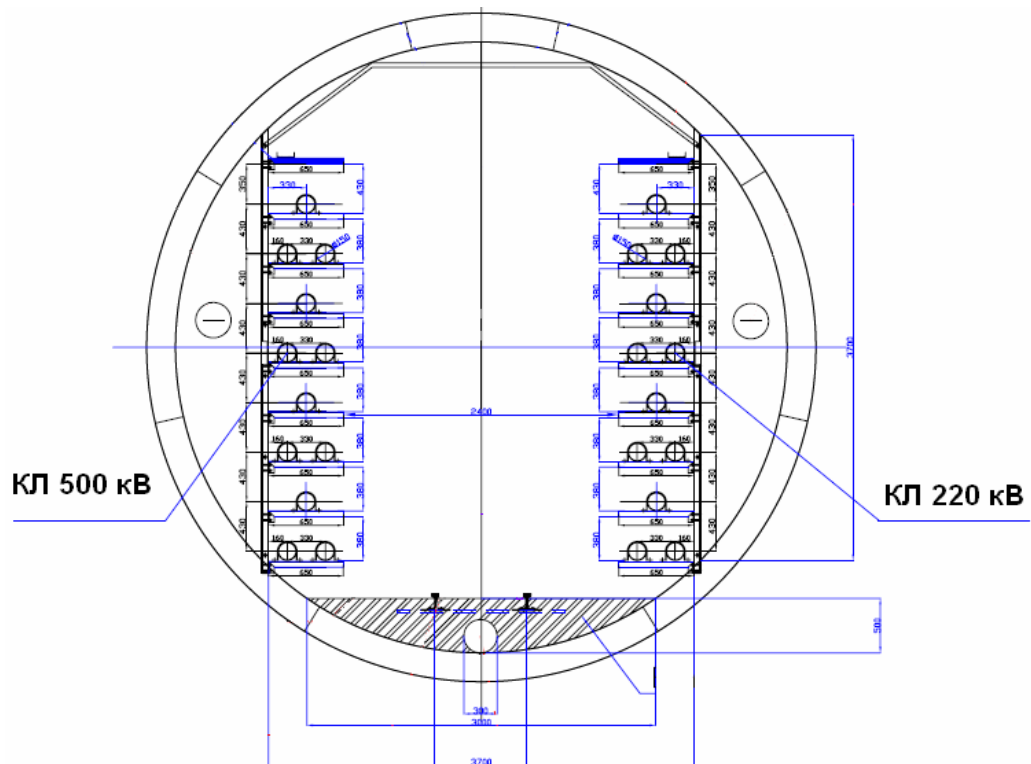


Рис. 5. Эскиз сечения тоннеля с КЛ 500 и 220 кВ

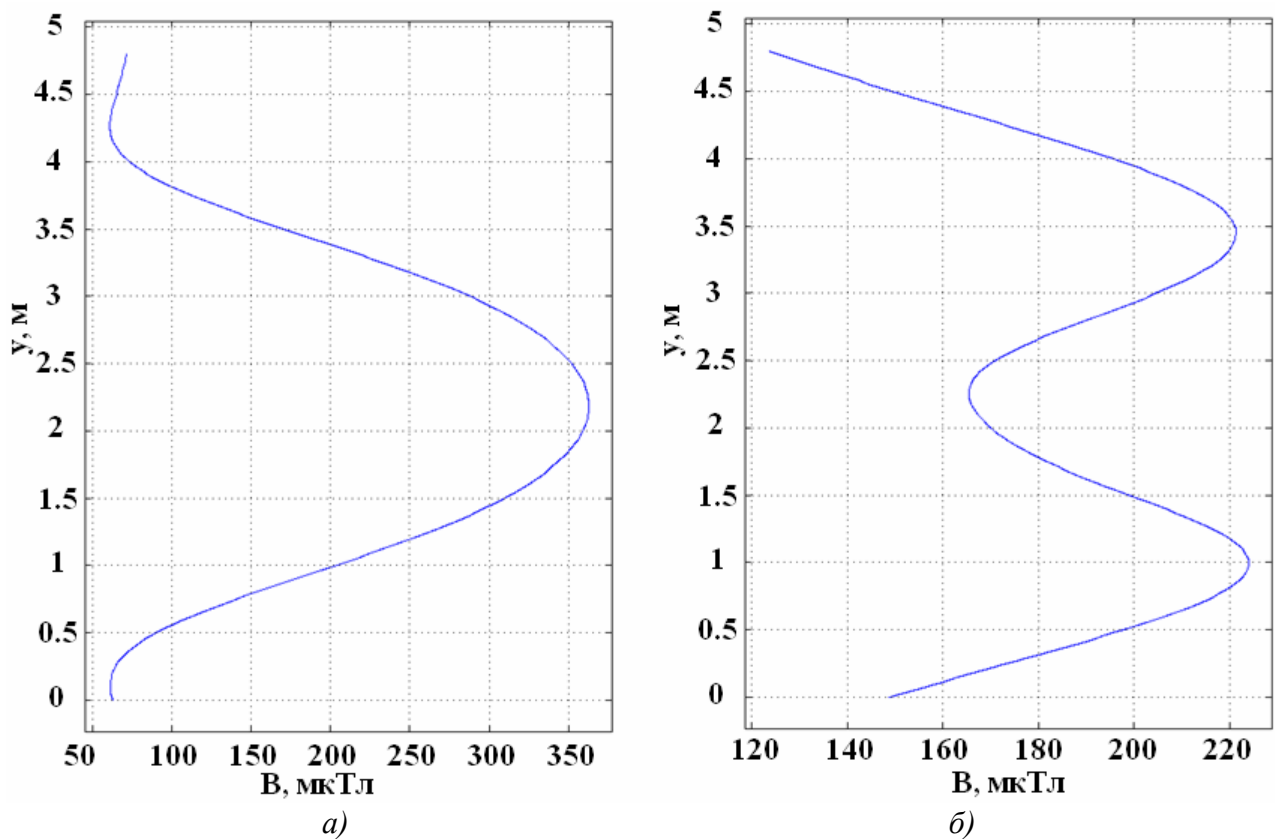


Рис. 6. Распределение максимального значения магнитной индукции вдоль вертикальной оси тоннеля (а-стандартная фазировка, б-оптимальная фазировка)

Значение магнитной индукции в нормальном режиме эксплуатации превышает нормируемую величину (100 мкТл) как при стандартной, так и при оптимальной фазировке напряжений на фазах КЛ (оптимизация фазировки напряжений приводит к снижению максимального значения магнитной индукции с 362 до 224 мкТл).

Компактизация канала передачи энергии для КЛ ВН достигается путем сближения кабелей каждой цепи. Однако при сближении кабелей встает вопрос о тепловой стойкости кабелей. Для этой конструкции можно уменьшить расстояние между кабелями с 40 до 30 см, при этом максимальное значение магнитной индукции снижается с 362 до 288 мкТл.

Для рассматриваемой конструкции возможны режимы её работы при выходе из строя отдельных цепей КЛ. При этом значение максимальной магнитной индукции вдоль вертикальной оси тоннеля в любом случае ниже, чем при работе всех цепей. Однако, при проведении ремонтов аварийных цепей, находясь от них в непосредственной близости, персонал может подвергаться воздействию магнитного поля достаточно большой интенсивности. Это воздействие может носить как общий, так и локальный характер. Максимальное значение магнитной индукции в рассматриваемом случае при общем воздействии может достигать 1000 мкТл, а при локальном воздействии 2750 мкТл.

Для кабельного тоннеля (рис.5) в соответствии с существующими нормативами, в работе предложены следующие рекомендации по ограничению времени пребывания в нем персонала: при проведении ремонтов ограничить время пребывания персонала до 1-2 часов, при профилактическом осмотре и стандартной фазировке напряжений на фазах КЛ -до 4-5 часов.

Для того чтобы судить о том, опасны ли магнитные поля, инициируемые одноцепными КЛ ВН, был рассмотрен вариант прокладки кабелей 500 кВ в тоннеле Бурейской ГЭС. Эскиз тоннеля и график магнитной индукции вдоль его вертикальной оси показаны на рис. 7.

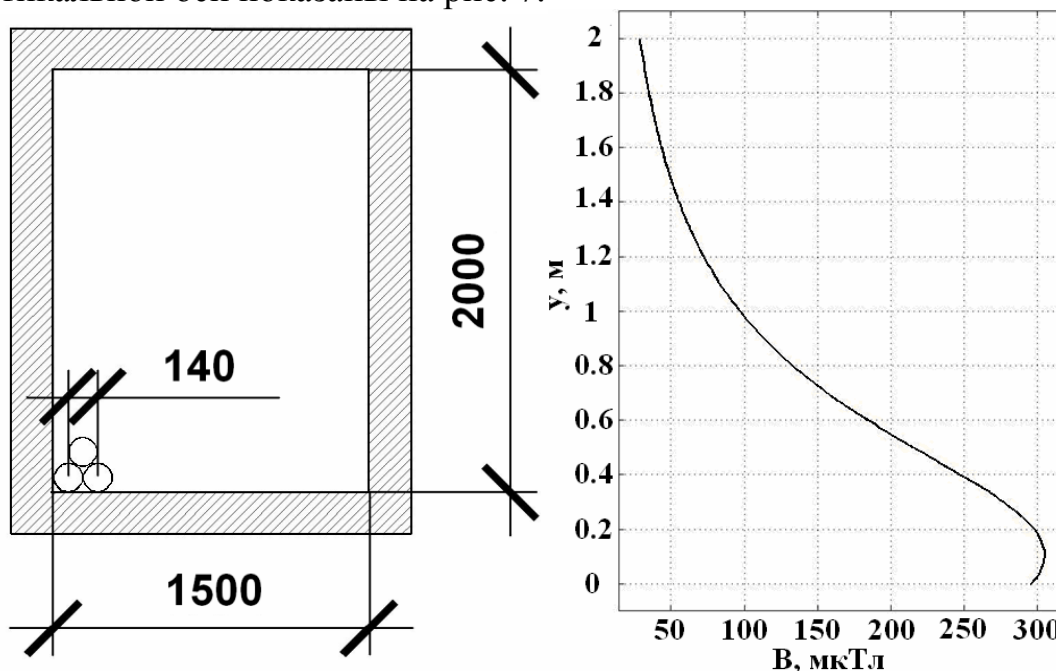


Рис. 7. Эскиз тоннеля (Бурейская ГЭС) и распределение максимального значения магнитной индукции вдоль его вертикальной оси

В тоннеле Бурейской ГЭС, кроме цепи кабеля 500 кВ, проложено большое количество силовых и контрольных низковольтных кабелей. Во время проведения профилактических осмотров и ремонтов этих кабелей, персонал может достаточно часто находиться под воздействием магнитного поля, инициируемого КЛ 500 кВ. Если принять за характерное воздействие, значение магнитной индукции на высоте 0.5 м, то в соответствии с существующими нормативами необходимо ограничивать время пребывания персонала в этом тоннеле до 6-7 часов.

С целью уменьшения интенсивностей магнитных полей по трассам КЛ и ВЛ ВН были рассмотрены варианты экранирования магнитного поля. Для КЛ ВН, расположенных в кабельных каналах или кабельных лотках, наиболее эффективным способом снижения интенсивности магнитного поля является ферромагнитное экранирование. Была рассмотрена типовая конструкция кабельного канала, показанная на рис. 8.

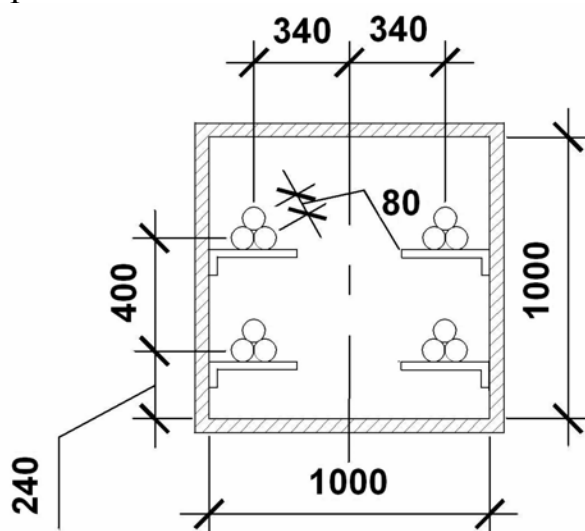


Рис. 8. Конструкция кабельного канала

Расчеты магнитного поля, произведенного с помощью ВМКЭ, показали, что при укладке листов электротехнической стали различной толщины поверх канала, магнитное поле на нормируемой высоте снижается в 1.2-1.8 раза. Эффективность такого способа экранирования достаточно мала. Для более эффективного снижения напряженности магнитного в работе предложено располагать листы электротехнической стали не только по верху канала, но и вдоль его боковых стенок. При этом напряженность магнитного поля уменьшается в 2,4-2,9 раза. Следует отметить, что предложенная конструкции экранов требует меньшего количества используемой стали, по сравнению с экранированием лишь по верху канала, распространенным в настоящее время.

Для локальной компенсации магнитных полей ВЛ ВН была рассмотрена конструкция пассивного петлевого экрана, содержащего конденсатор в цепи петли, расположенного вблизи ВЛ 500 кВ традиционного исполнения. Напряженность магнитного поля при этом снизилась на 30 %. Следует отметить, что при применении пассивных экранов рассмотренных конструкций задачу опти-

мизации количества петель и их расположения в каждом конкретном случае необходимо решать индивидуально.

**В третьем разделе** рассмотрены магнитные поля вблизи спусков и ошинок открытых распределительных устройств (ОРУ). Типовые решения практически всех ОРУ предусматривают горизонтальное расположение фаз. С точки зрения интенсивности электрических и магнитных полей в нормальном эксплуатационном режиме такое конструктивное решение является наилучшим. Однако горизонтальное расположение фазных проводов обусловлено удобством монтажа распределительных устройств. Габарит ошинок до земли также является типовым. На основе расчетов магнитных полей под типовыми ошиновками 6-220 кВ при различных их токовых нагрузках в работе получены коэффициенты, позволяющие определять максимальное значение напряженности магнитного поля в зависимости от токовой нагрузки ошиновки (таблица 3).

Таблица 3

Значения коэффициентов пропорциональности между рабочим током ошинок и напряженностью магнитного поля под ними

Класс напряжения ошиновки, кВ	220	110	35	6-10 (шинный мост)
Значение коэффициента	0.01	0.0113	0.023	0.0893

*Примечание:* при токах в ошиновках, измеряемых в амперах, напряженности магнитного поля измеряются в А/м.

Анализ магнитного поля вблизи конкретной конструкции спуска 35 кВ к обслуживаемым аппаратам показал, что напряженность магнитного поля вблизи спуска в 1.6 раза превышает напряженность магнитного поля под ошиновкой при одинаковых токовых нагрузках. Так как конструкция спусков не является типовой, то при их проектировании необходимо индивидуально численно рассчитывать напряженность магнитного поля вблизи спусков, используя трехмерную постановку задачи.

**В четвертом разделе** рассмотрены индуктированные токи в теле человека, как показатель тяжести воздействия на него магнитного поля промышленной частоты.

В работе при расчете плотностей индуктированных токов были приняты достаточно полные модели тела человека. Исследовалось воздействие магнитного поля нормированной величины при различных направлениях вектора магнитной индукции, в том числе и при ремонте линий электропередачи под напряжением.

Были разработаны две модели тела человека. В одной из них тело человека моделировалось средней проводимостью его тканей 0.04 См/м (рис. 9).

Во второй, более подробной модели тела человека, различные органы человека моделировались их собственной проводимостью (рис. 10).



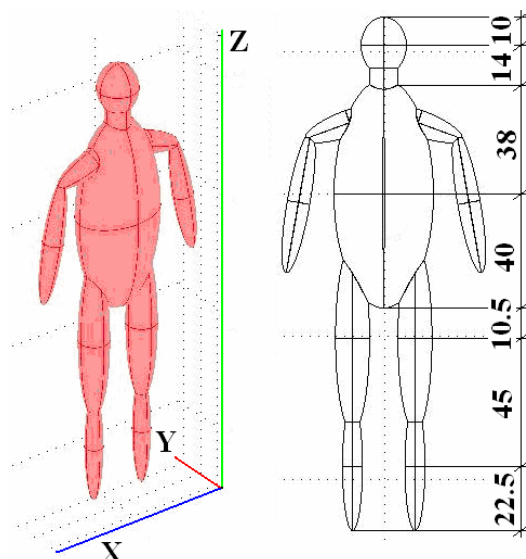


Рис. 9. Геометрические размеры тела человека и направления осей координат

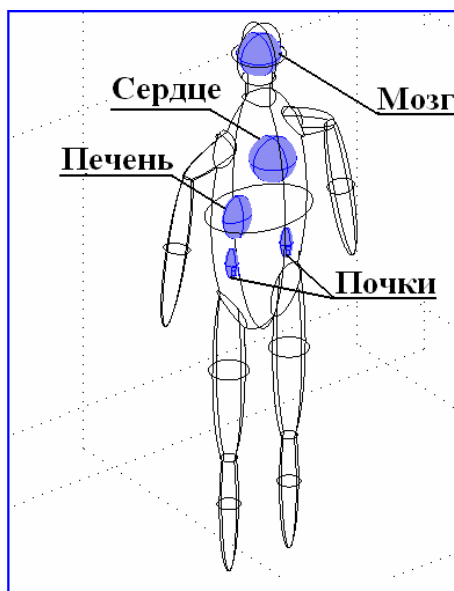


Рис. 10. Модель тела человека с учетом различных органов

При помощи первой модели исследовалось влияние направления вектора напряженности магнитного поля на значение плотности индуцированного тока в различных частях тела. Значения максимальной плотности индуцированного тока по высоте человека для трех различных направлений вектора магнитного поля показаны на рис. 11.

Из полученных результатов следует, что максимальное значение плотности индуцированного тока возникает при вертикальном направлении вектора напряженности магнитного поля. Этот вывод был подтвержден расчетами индуцированных токов с использованием второй модели. При этом максимальные плотности индуцированных токов возникают в сердце и мозге человека.

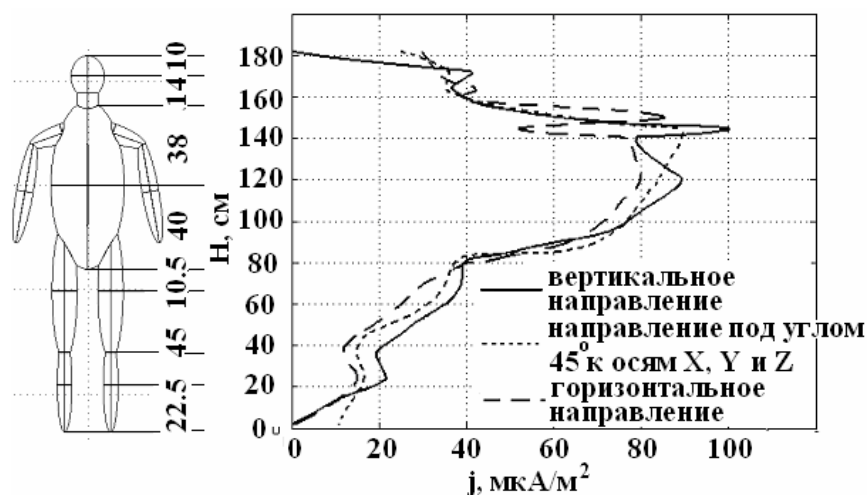


Рис. 11. Распределение максимальной плотности тока, индуцированного в теле человека, при различных направлениях воздействия вектора магнитного поля

Эти результаты позволяют предположить, что при ремонте ВЛ ВН под напряжением существенное значение может иметь расположение человека относительно токоведущих проводов. Этот вопрос был рассмотрен применительно к ремонту под напряжением ВЛ 500 кВ традиционного исполнения .

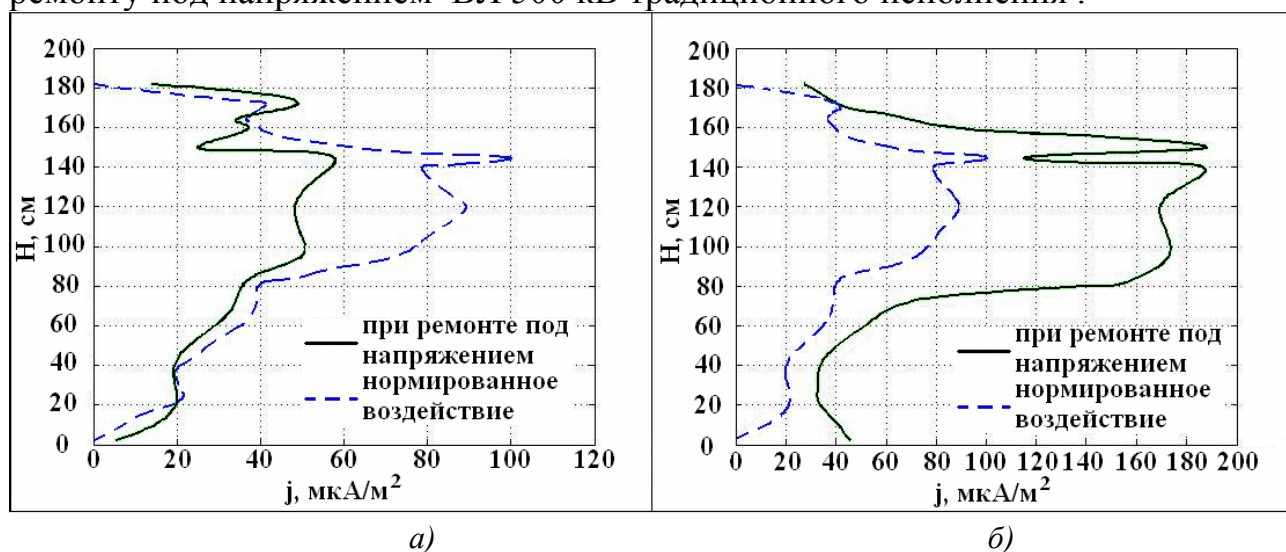


Рис. 12. Распределение максимальной плотности тока, индуцированного в теле человека, при перпендикулярном (а) и параллельном (б) расположении тела человека относительно проводов ВЛ 500 кВ

При расположении человека перпендикулярно фазным проводам на расстоянии 0.5 м от них, значение плотности индуцированного тока не превышает значения плотности тока при нормированном модуле напряженности магнитного поля 80 А/м и вертикальном направлении его вектора. При расположении человека параллельно проводам значение плотности индуцированного тока более, чем в 2 раза, превышает плотности токов при указанном выше нормированном воздействии. Одним из наиболее тяжелых случаев является расположение человека внутри расщепленной фазы, при этом значение плотности индуцированных токов практически в шесть раз превышает плотность тока при нормированном значении напряженности. Следовательно, при проведении ремон-

тов ВЛ ВН под напряжением, расположение тела человека перпендикулярно токоведущим проводам позволяет существенно снизить интенсивность воздействия магнитного поля на его организм.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По работе могут быть сделаны выводы как методического характера, так и по существу рассмотренных вопросов.

**К основным методическим выводам** можно отнести следующие:

- Достоверный расчет магнитных полей промышленной частоты под воздушными линиями электропередачи и под ошиновками открытых распределительных устройств можно производить с помощью разработанной аналитической методики, в которой провода моделируются в виде длинных нитей, находящихся в расчетной среде - воздухе.

- Существенное влияние на интенсивность магнитного поля, инициируемого токовыми нагрузками воздушных и кабельных линий многоцепного исполнения, является фазировка проводов цепей. В работе предложены варианты фазировки для двухцепных, трехцепных и четырехцепных ВЛ одного класса напряжения и четырехцепных кабельных линий разного класса напряжения, проложенных в одном тоннеле.

- Локальное снижение интенсивности магнитного поля может быть осуществлено с помощью пассивных петлевых экранов. В работе приведена методика выбора характеристик пассивных экранов для локального снижения интенсивности магнитного поля вблизи ВЛ ВН и по трассам КЛ ВН.

**Основные выводы, относящиеся к существу рассмотренных вопросов**, можно сформулировать следующим образом:

- Применение одноцепных линий электропередачи повышенной пропускной способности с расположением проводов в вершинах равностороннего треугольника позволяет уменьшить напряженности электрического и магнитного полей на нормируемом расстоянии от оси линии в 2-5 раз, по сравнению с ВЛ ВН традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз.

- Оптимальная фазировка проводов многоцепных линий электропередачи высокого напряжения позволяет снизить напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты по их трассам в 1.5-3 раза по сравнению с принятой в настоящее время традиционной фазировкой проводов.

- Снижения напряженности магнитного поля по трассам кабельных линий можно добиться путем уменьшения расстояния между кабелями цепи. При этом при соблюдении условия тепловой стойкости системы значения напряженностей магнитного поля могут быть снижены в 2-2.5 раза.

- Оптимальная фазировка напряжений на жилах многоцепных кабельных линий высокого напряжения позволяет снизить напряженность магнитного поля более, чем в 1.5 раза.

- Эффективность пассивных петлевых экранов повышается при включении в их цепи конденсаторов, емкости которых выбираются исходя из тре-

буемого значения напряженности магнитного поля вблизи защищаемого объекта.

- Экранирование магнитных полей, инициируемых кабельными линиями высокого напряжения, проложенными в каналах, лотках и других закрытых конструкциях, целесообразно осуществлять с помощью ферромагнитных экранов из электротехнической стали. При этом наибольшая эффективность экранов (коэффициент экранирования 2.5 и более) достигается при установке стальных листов не только по верху кабельного канала, но и вдоль его боковых стенок.

- Максимальное значение напряженности магнитного поля под типовыми ошиновками открытых распределительных устройств можно определять с помощью приведенных в работе зависимостей максимального значения напряженности магнитного поля от токовой нагрузки ошиновки.

- Величины плотностей индуктированных токов в теле человека существенно зависят от направления вектора напряженности магнитного поля. При этом наиболее опасным является вертикальное направление вектора напряженности магнитного поля. Наибольшие значения плотностей индуктированных токов наблюдаются в области сердца и мозга человека.

- При ремонте линий электропередачи под напряжением значения индуктированных токов в теле человека существенно зависят от его расположения по отношению к токоведущим проводам. Наиболее опасным является случай расположения человека параллельно проводам. Следовательно, минимизировать интенсивность воздействия магнитного поля можно путем применения приспособлений, позволяющих человеку в течение большей части времени располагаться перпендикулярно токоведущим проводам.

- При проведении ремонтных работ в кабельных тоннелях с проложенными в них многоцепными КЛ ВН следует в случае ремонта в непосредственной близости к цепям КЛ ограничивать время пребывания человека в тоннеле 1-2 часами.

Сформулированные выше выводы позволяют выдвинуть **комплекс рекомендаций мер** для проектировщиков и персонала, эксплуатирующего ВЛ, КЛ и ОРУ ВН.

#### **Рекомендации проектировщикам:**

- При проектировании ВЛ, КЛ и ОРУ ВН необходимо учитывать интенсивности электрических и магнитных полей в средах, окружающих эти конструкции и по возможности предлагать конструктивные решения, обеспечивающие сниженную интенсивность электромагнитного поля в окружающей среде. Для решения этой задачи можно применить предлагаемые в работе аналитические и численные методики расчетов интенсивности электрических и магнитных полей, инициируемых зарядами на токоведущих частях и токами в них.

- В случае превышения в среде, окружающей воздушные и кабельные линии электропередачи, предельно допустимых уровней по напряженности магнитного поля необходимо либо применение конструктивных мер (располо-

жение фазных проводов в вершинах треугольника, сближение кабелей цепи, выбор оптимальной фазировки напряжения на проводах ВЛ и жилах кабелей КЛ многоцепных линий), либо применение пассивных петлевых (вблизи ВЛ) и ферромагнитных (по трассам КЛ, проложенных в лотках и трубах) экранов.

#### **Рекомендации эксплуатирующему персоналу:**

- При проведении ремонтов линий электропередачи под напряжением необходимо минимизировать время пребывания персонала вблизи токоведущих проводов и по возможности располагаться перпендикулярно им.
- Необходимо измерять значения напряженностей электрических и магнитных полей на действующих подстанциях, с целью определения мест с наибольшей напряженностью и минимизации времени пребывания персонала в этих местах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ**

*Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. **Степанов, И.М.** Методика расчета токов, индуктированных в теле человека при воздействии магнитного поля, инициируемого воздушными линиями высокого напряжения/И.М. Степанов, К.П. Кадомская// Научный вестник НГТУ.- 2007.- №4 (29).- С. 133-142.

*Работы, опубликованные в сборниках научных трудов, рецензируемых журналах, трудах международных и всероссийских конференций и семинаров:*

2. **Степанов, И.М.** Методы исследования электромагнитного поля по трассам воздушных линий высокого напряжения/И.М. Степанов// СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ НГТУ.-2006.- №2 (44).- С. 107-111.

3. **Степанов, И.М.** Методы расчета и способы снижения интенсивности электромагнитных полей под воздушными линиями высокого напряжения/И.М. Степанов// Восьмой Всероссийский студенческий научно-технический семинар «ЭНЕРГЕТИКА: ЭКОЛОГИЯ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ». Труды семинара. Томск: Изд-во ТПУ, 2006.-С. 175-177.

4. **Stepanov, I.M.** Effectiveness evaluation for measures to minimize hazardous electromagnetic environment around overhead high-voltage power lines/I.M. Stepanov, K.P. Kadomskaya//Proceedings of the Third international forum of strategic technologies.-2007.-P. 643-647.

5. **Степанов, И.М.** Методы расчета и способы снижения интенсивности электрических и магнитных полей под воздушными линиями высокого напряжения. Расчет индуцированных токов в теле человека/И.М. Степанов// Девятый Всероссийский студенческий научно-технический семинар «ЭНЕРГЕТИКА: ЭКОЛОГИЯ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ»/Сборник трудов в двух томах. Т.1. Электроэнергетическое направление.- Томск: Изд-во ТПУ, 2007.-С. 226-229.

6. **Степанов, И.М.** Методика расчета токов, индуктированных в теле человека при воздействии магнитного поля, инициируемого воздушными линиями высокого напряжения/И.М. Степанов// НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ// Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. Часть3 – С. 249- 250.
7. **Степанов, И.М.** Влияние конструкций воздушных линий высокого напряжения на интенсивности электрического и магнитного полей по их трассам/И.М. Степанов, К.П. Кадомская// Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: ч.2/ под ред. В.П. Горелова, С.В. Журавлева, В.А. Глушец.- Омск: Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 2007 (Труды 3-й междуна. науч.-техн. конф. К. П.).-С. 293-297.
8. **Степанов, И.М.** Электромагнитные поля промышленной частоты. Воздействие на организм человека/И.М. Степанов, Кадомская К.П.// Новости электротехники.-2007.- №3 (45).-С.84-87.
9. **Степанов, И.М.** Влияние конструкций воздушных линий высокого напряжения на интенсивности магнитных полей по их трассам /И.М. Степанов, Кадомская К.П.// Линии электропередачи – 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно – технический прогресс: Сборник докладов Третьей Российской научно – практической конференции с международным участием / Под ред. Лаврова Ю.А., Новосибирск, 2008. – С.81-91.
10. **Stepanov, I.M.** Measures toward the reduction of magnetic fields produced by high-voltage overhead and cable transmission lines. Currents magnetically induced in human body/I.M. Stepanov, K.P. Kadomskaya, Y.A. Lavrov//Proceedings of the Third international forum of strategic technologies.-2008.-P. 639-643.
11. **Степанов, И.М.** Мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости воздушных и кабельных линий электропередачи с жизнедеятельностью человека/И.М. Степанов, К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров// Сборник докладов десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности.-2008.-ВИТУ.-С. 651-655.
12. **Степанов, И.М.** Конструктивные меры снижения интенсивности магнитных полей по трассам воздушных и кабельных линий электропередач. Индуктированные токи в теле человека, как механизм воздействия магнитного поля промышленной частоты/И.М. Степанов// Сборник докладов Третьей научно-технической конференции «Разработки молодых специалистов в области электроэнергетики».-2008.-Диалог-Электро.- С. 193-198.
13. **Степанов, И.М.** Методы расчета магнитных полей по трассам воздушных линий высокого напряжения при учете петлевых экранов/И.М. Степанов// Научный журнал «Доклады академии наук высшей школы России».-2008.-№ 2 (11)- С. 120-127.