

На правах рукописи

Чудный Владимир Сергеевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА СВЕРХ- И УЛЬТРАВЫСОКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ И
ЭКОЛОГИИ**

Специальность 05.14.02. – Электростанции и
электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор, акад. РАН
Тиходеев Н.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Гук Ю.Б.

кандидат технических наук, доцент
Таджибаев А.И.

Ведущая организация - ОАО "Институт Севзапэнергопроект"

Защита состоится « 14 » июня 2002 г. в 10 часов на заседании
Диссертационного Совета К 212.229.02 при Санкт-Петербургском
государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-
Петербург, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Терёшкин А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время проблема проектирования и строительства линий электропередачи постоянного тока сверхвысокого и ультравысокого напряжения (СВН и УВН) актуальна для крупных по территории стран, в том числе и для России. Линии постоянного тока СВН и УВН имеют, как известно, ряд технических и экономических преимуществ:

- возможности для радикального увеличения радиуса действия ВЛ;
- возможность несинхронной работы двух энергосистем, связанных линией электропередачи постоянного тока;
- способность вентильных преобразователей выполнять функции быстродействующего выключателя и регулятора передаваемой мощности;
- щадящие условия работы изоляции кабелей при постоянном напряжении;
- отсутствие ограничений передаваемой мощности по условиям устойчивости параллельной работы и др.

Эти особенности и определяют технологическую "нишу" линий постоянного тока. В связи с этим актуальными являются некоторые проблемы линий постоянного тока, решение которых позволяет повысить технические, экономические и экологические характеристики этих линий. К ним относятся: оптимизация площади поперечного сечения полюса воздушных линий электропередачи постоянного тока (ВЛ ППТ), надежности ВЛ ППТ, возврата тока небаланса полюсов, применения двухцепных (квадруполярных) ВЛ, а также вопросы их экологии. Эти вопросы являются недостаточно хорошо изученными, поэтому их рассмотрение является актуальным в настоящее время.

Основными целями данной работы являются:

- определение требований к надежности передачи постоянного тока и прогноз надежности ВЛ постоянного тока нового поколения;
- анализ возможности применения квадруполярных воздушных линий электропередачи постоянного тока;
- обоснование исходных данных для разработки опор с учетом экологической ситуации вблизи ВЛ;
- разработка методики оптимизации площади поперечного сечения полюса ВЛ постоянного тока;
- разработка предложений по выбору схемы возврата тока несимметрии полюсов ВЛ постоянного тока для исключения протекания тока небаланса полюсов через землю.

Основные научные результаты и их новизна заключаются в следующем:

1. Даны оценки предельной мощности биполярной и квадруполярной ВЛ, а также параметра ожидаемого потока отказов для ВЛ ППТ $\pm(400-750)$ кВ.

2. Предложены критерии по электрическому и магнитному полям и плотности ионных токов от проводов на землю, которые следует учитывать при оценке влияния на окружающую среду ВЛ постоянного тока и наиболее эффективные пути обеспечения выполнения этих критериев.

3. Разработаны схемы возврата тока несимметрии полюсов ВЛ постоянного тока для исключения протекания тока небаланса полюсов через землю и показаны их преимущества.

4. Даны оценки технико-экономических показателей ВЛ ППТ СВН и УВН.

5. Предложена методика оптимизации площади поперечного сечения полюса ВЛ, которая позволяет при заданном полюсном напряжении и пропускной способности ВЛ определить оптимальное сечение полюса ВЛ.

6. Показано, что двухцепное исполнение ВЛ ППТ СВН и УВН (квадруполярные ВЛ) обеспечивает ряд важных технических (повышение надежности и др.), экономических (экономия стали опор около 10%) и экологических (возможность улучшения экологической ситуации вблизи ВЛ) преимуществ.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Разработанные комплексные оценки, предложения, схемы и методики по вопросам надежности, снижения влияния на окружающую среду и оптимизации ВЛ постоянного тока СВН и УВН могут использоваться в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях при решении задач перспективного развития энергосистем, создания крупных энергообъединений и связей между ними, разработки мероприятий по улучшению технико-экономических показателей дальних передач постоянного тока. Результаты, полученные на основе выполненных в диссертации исследований, использовались в научной работе кафедры ЭСиС СПбГТУ и НИИ постоянного тока (С.-Петербург), в частности, при разработке пред-ТЭО ВЛ ППТ Туруханская ГЭС – Центр.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на V-м и VI-м международных симпозиумах ассоциации ТРАВЭК "Электротехника 2010 год" (Московская область, 1999 и 2001 г.г.), на 2-й и 3-й международных научно-практических конференциях "Экономика, экология и общество России на пороге 21-го столетия" (г. С.-Петербург, СПбГТУ, 2000 и 2001 г.г.), на IV-ой и V-ой Всероссийских научно-методических конференциях "Фундаментальные исследования в технических университетах" (г. С.-Петербург, СПбГТУ, 2000 и 2001 г.г.), на российско-японском научном семинаре (г. Иркутск, 1998 г.), на конференции молодых специалистов электроэнергетики - 2000 (г. Москва, 2000 г.), на международной научно-технической конференции "Экологические проблемы и пути их решения в XXI веке: образование, наука, техника" (г. С.-Петербург, 2000 г.), на конференции CIGRE-ICPS2001 (Wuhan, China, 2001

г.), на научных семинарах кафедры "Электрические системы и сети" СПбГТУ.

По теме диссертационной работы опубликовано одиннадцать печатных работ (имеется свидетельство на полезную модель).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем составляет 176 страниц, включая 33 рисунка и 50 таблиц. Список использованной литературы содержит 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется ее цель и основные задачи, перечисляются положения, отражающие научную новизну и практическую значимость диссертации.

В первой главе рассматривается использование электропередач постоянного тока СВН и УВН в электроэнергетике, описана краткая история развития передач постоянного тока, приведены параметры самых известных (мощных) электропередач постоянного тока и причины их применения, отражены современные мировые тенденции и возможности развития техники передачи электрической энергии постоянным током на дальние расстояния, обобщены данные последних исследований в этой области по вопросам надежности, экологии и стоимости ВЛ постоянного тока. В заключении главы описаны основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе дан обзор применяемых за рубежом и в России конструктивных схем промежуточных, промежуточно-угловых и анкерно-угловых опор и сделан выбор наиболее перспективных из них для будущих проектов биполярных ВЛ СВН и УВН. Выбор типа промежуточных опор обычно определяется соображениями надежности и экономии площади земельных и лесных участков, отводимых под опоры. В зарубежных странах предпочтение отдается более надежным и экономным по затратам земли свободностоящим опорам, в России - на оттяжках, как более легким.

На рис. 1, а и 1, б приведены принципиальные схемы наиболее часто применяемых промежуточных опор для биполярных ВЛ. На схеме рис. 1, а тросостойки выполнены в виде двух треугольных ферм. На биполярных ВЛ в качестве промежуточной опоры на оттяжках применяется и перспективная схема опоры, показанная на рис. 1, б. Опора поддерживается четырьмя оттяжками, анкера которых расположены попарно симметрично относительно плоскости опоры; верхние концы оттяжек крепятся к концам двух консолей, направленных вдоль от ВЛ, что обеспечивает восприятие крутящих моментов в аварийном режиме.

На участках ВЛ, проходящих по районам с высокой плотностью застройки и ценными обрабатываемыми землями, наиболее рациональна

свободностоящая опора (рис. 1, а). Аналогичная схема рациональна и для промежуточно-угловой опоры.

Для анкерно-угловых опор на угол поворота ВЛ до 60° наиболее часто находит применение схема, показанная на рис. 1, с. Схема этих опор повторяет конфигурацию соответствующей промежуточной свободностоящей опоры. Увеличение высоты тросостойки обусловлено необходимостью выдержать требуемое расстояние по вертикали между полюсами и грозозащитными тросами, а также обеспечить необходимый угол защиты.

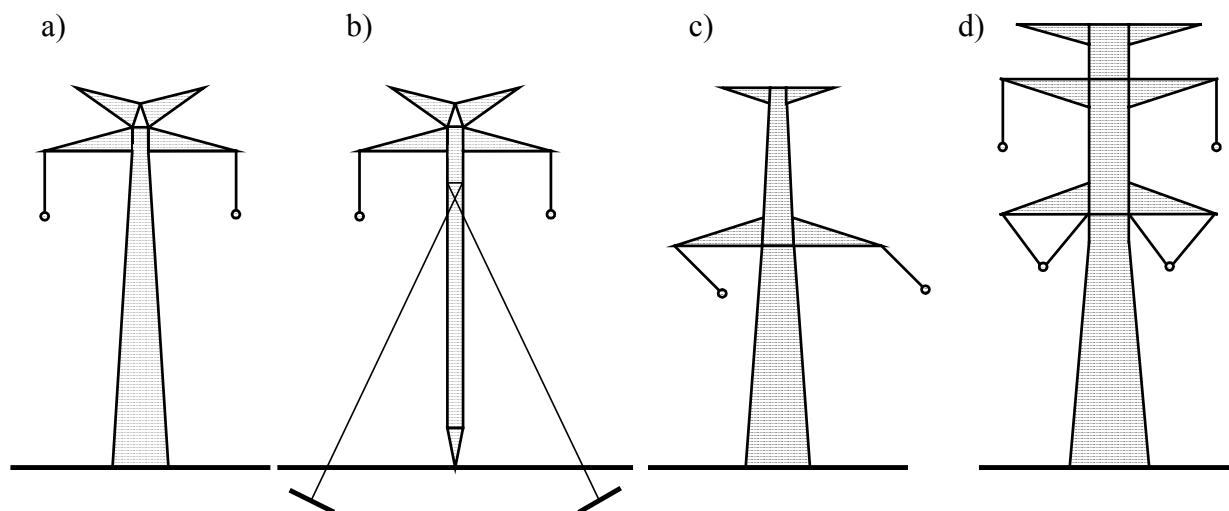


Рис. 1. Схемы опор для ВЛ постоянного тока:

- a) промежуточная свободностоящая опора для биполярной ВЛ;
- b) промежуточная опора на оттяжках для биполярной ВЛ;
- c) анкерно-угловая опора для биполярной ВЛ;
- d) промежуточная свободностоящая опора для квадрупольной ВЛ.

В работе оценен зарубежный опыт проектирования биполярных ВЛ ППТ, из которого следует, что затраты стали на анкерно-угловые опоры могут быть снижены за счет применения гаммы опор, включающих: промежуточно-угловые, анкерно-угловые опоры, рассчитанные на разные углы поворота ВЛ, и анкерные опоры. Оценен вклад промежуточно-угловых и анкерно-угловых опор в общие затраты стали на опоры для биполярных ВЛ: он составляет (20-35) %.

Определен расход стали на опоры для ВЛ $\pm(400-750)$ кВ в зависимости от выбранных напряжения и сечения полюсов и проведено сопоставление затрат стали на опоры для ВЛ постоянного и переменного тока при одинаковой пропускной способности. Показано, что экономия стали у биполярных ВЛ составляет (30-60) % для опор с оттяжками и (15-50) % для свободностоящих опор.

В третьей главе сделана попытка связать требования по надежности, предъявляемые энергообъединением к ППТ в своем составе, с выбором принципиальной схемы ВЛ на стадии ее проектирования и учетом

прогнозируемых показателей надежности перспективных ВЛ постоянного тока; разработана методика сравнения надежности и основных технико-экономических показателей одноцепных и двухцепных ВЛ для ППТ $\pm(400-750)$ кВ и выбора оптимальной ВЛ. Основными видами возмущений, генерируемыми ППТ, являются аварийная потеря полюса либо одновременно двух полюсов при падении опоры.

Большинство ВЛ постоянного тока СВН и УВН спроектированы в одноцепном исполнении (биполярная ВЛ). Но с ростом пропускной способности ВЛ постоянного тока УВН для радикального повышения ее надежности могут потребоваться и варианты двухцепного исполнения ВЛ:

- две параллельные биполярные ВЛ (например, на передаче постоянного тока от ГЭС Итайпу в Бразилии: две ВЛ ± 600 кВ с пропускной способностью по 3,15 ГВт);

- ВЛ с четырьмя полюсами на одной опоре (квадруполярная ВЛ, рис. 1, d).

В регионах с высокой плотностью населения и высокой стоимостью земли применение квадруполярной ВЛ безальтернативно, так как здесь трудно найти широкий коридор для двух биполярных ВЛ. При проектировании ВЛ с квадруполярными опорами возникает вопрос о её надежности по сравнению с надежностью двух одноцепных биполярных ВЛ, построенных в одном и том же коридоре.

В работе проанализирована аварийная статистика за последние 10–20 лет по ВЛ (220–750) кВ со стальными свободностоящими опорами и опорами на оттяжках. Всего рассмотрено около 170 аварий с опорами. Оценены удельные (т.е. в расчете на 100 км ВЛ и 1 год их эксплуатации) показатели надежности ВЛ (220–750) кВ по повреждению опор. Из опыта эксплуатации одноцепных и двухцепных ВЛ (220–750) кВ в б. СССР было получено, что удельное число повреждений стальных свободностоящих опор составляет $(1-2) \cdot 10^{-2}$, для опор на оттяжках этот показатель составляет примерно $3 \cdot 10^{-2}$. Из аварийной статистики по ВЛ США и Канады, а также публикаций СИГРЭ известно, что удельное число повреждений опор на североамериканских ВЛ находится в диапазоне: от $(0,2-0,3) \cdot 10^{-2}$ для ВЛ 345 кВ и 500 кВ до $(0,8-1,1) \cdot 10^{-2}$ для ВЛ 230 кВ и 765 кВ, что существенно лучше, чем на отечественных ВЛ соответствующего номинального напряжения. Среднее время восстановления опоры составляет 280 ч. Опыт эксплуатации ВЛ переменного тока показывает, что и для двух одноцепных ВЛ, проходящих в одном коридоре, около 30 % случаев повреждений опор наблюдалось одновременно на обеих цепях параллельно идущих ВЛ из-за значительного превышения гололедных и ветровых нагрузок на их провода и опоры (экстраординарные шквалы ветра, смерчи, отложения гололеда и др.). Следовательно, удельное число одновременных повреждений опор двух биполярных ВЛ составляет около $(0,3-0,6) \cdot 10^{-2}$ (для североамериканских линий этот показатель равен 10^{-3}). Только в том случае, когда две

биполярные ВЛ проходят по разным трассам, их можно считать независимыми с точки зрения повреждения опор, а одновременное повреждение опор на них маловероятным (удельное число одновременных повреждений опор на двух ВЛ в этом случае составляет порядка $(1-4) \cdot 10^{-4}$ (в Сев. Америке около $0,25 \cdot 10^{-4}$)).

Надежность одноцепных ВЛ на опорах с оттяжками обычно заметно ниже, чем для ВЛ на свободностоящих опорах (из-за повреждения оттяжек сельскохозяйственными и др. машинами, выползания якорей опор и т. п.): удельное число их повреждений может достигать $3 \cdot 10^{-2}$, поэтому для двух биполярных ВЛ, идущих в одном коридоре, удельное число одновременных повреждений опор с оттяжками на двух цепях составит $0,3 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \approx 10^{-2}$. Для двух биполярных ВЛ, идущих по разным трассам, тот же показатель оценивается величиной $(3 \cdot 10^{-2})^2 \approx 10^{-3}$.

На основании мирового опыта эксплуатации одноцепных и двухцепных ВЛ переменного было принято следующее значение параметра потока повреждения одного полюса для всех трех вариантов ВЛ -0,1 1/год·100 км. Среднее время восстановления полюса ВЛ составляет 15 ч.

ВЛ ППТ может быть спроектирована и построена в нескольких принципиально различных вариантах исполнения: две биполярных ВЛ на разных опорах в одном коридоре (I вариант); одна биполярная ВЛ на одной опоре (II вариант) и одна квадрупольная ВЛ на одной опоре (III вариант). Общий вид промежуточных опор для биполярной и квадрупольной ВЛ приведен на рис. 1.

Был проведен расчет надежности ВЛ постоянного тока на примере российского участка МППТ "Восток-Запад" ± 500 кВ, пропускная способность которого, в соответствии с пред-ТЭО на эту передачу, должна составлять 4 ГВт. Для всех трех вариантов ВЛ были эскизно разработаны как свободностоящие стальные опоры, так и опоры с оттяжками, которые хотя и уступают по надежности свободностоящим опорам, но обеспечивают существенную (на 10-20 %) экономию стали. При расчете надежности рассматривались повреждения (т.е. неустраняемые АПВ аварийные отключения) трех типов: а) одновременные падения опор у обеих ВЛ, проходящих в одном коридоре (I вариант); б) падение опоры (II и III варианты); в) повреждение одного полюса ВЛ (во всех вариантах ВЛ). Была проведена оценка надежности ВЛ ППТ ± 500 кВ длиной 1000 км со свободностоящими опорами и с опорами на оттяжках, а после этого выполнено сравнение надежности свободностоящих и оттяжных опор. Схемы для расчета надежности приведены на рис. 2.

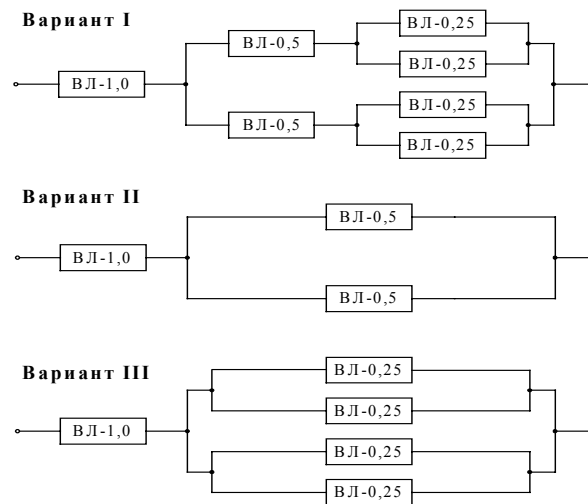


Рис. 2. Схемы замещения для расчета надежности ВЛ.

Для анализа надежности используется функция распределения пропускной способности $P(y)$ (где y – уровень реализации пропускной способности в рассматриваемый момент времени), которая является наиболее универсальной характеристикой, позволяющей получить следующие основные показатели надежности сложной системы:

- Коэффициент работоспособности системы, равный отношению среднего значения переданной мощности S_{cp} к номинальной мощности передачи S_N :

$$K_p = \frac{S_{cp}}{S_N} = \int_0^1 y dP(y).$$

При полной загрузке передачи среднее значение переданной мощности пропорционально K_p ($S_{cp} = K_p \cdot S_N$).

- Коэффициент недоотпуска мощности, равный отношению среднего значения непереданной (недоотпущенной) мощности ($\Delta S_{cp} = S_N - S_{cp}$) к номинальной мощности передачи S_N :

$$K_n = \frac{\Delta S_{cp}}{S_N} = \frac{S_N - S_{cp}}{S_N} = 1 - K_p.$$

Среднее значение недоотпущенной мощности пропорционально K_n ($\Delta S_{cp} = K_n \cdot S_N$).

- Среднее число часов возможного использования номинала пропускной способности электропередачи:

$$T_{cp} = K_p \cdot 8760.$$

- Величина среднего недоотпуска энергии:

$$\Delta W = K_n \cdot S_N \cdot 8760 = (1 - K_p) \cdot S_N \cdot 8760.$$

Для оценки надежности ВЛ со свободностоящими опорами принимается следующее значение параметра потока повреждений одной опоры: $\lambda_b = 0,01$ 1/год·100 км (при времени простоя ВЛ 280 ч).

Для определения вероятностей реализации пропускной способности и коэффициентов работоспособности различных энергетических систем под руководством проф. Д.Е. Кадомского была разработана специальная

программа расчета коэффициентов работоспособности. С помощью этой программы были определены вероятности p_k реализации пропускной способности и коэффициенты работоспособности всех трех рассматриваемых вариантов ВЛ ППТ ± 500 кВ. Полученные данные приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что вариант I (две биполярные ВЛ) имеет более низкий коэффициент работоспособности, чем варианты II и III из-за дополнительной малой вероятности одновременного падения опор у двух ВЛ, проходящих в одном коридоре. По коэффициентам работоспособности K_p (табл. 1), была оценена величина среднего недоотпуска энергии ΔW в каждом варианте ВЛ (табл. 2). Из-за дополнительной малой вероятности одновременного падения опор в двух ВЛ, проходящих в одном коридоре, вариант I (две биполярные ВЛ) дает большие величины недоотпуска энергии, чем варианты II и III.

Таблица 1

Вероятности p_k реализации пропускной способности и коэффициенты работоспособности вариантов ВЛ ± 500 кВ со свободностоящими опорами

k	y_k	Вариант I		Вариант II		Вариант III	
		p_k	$y_k \cdot p_k$	p_k	$y_k \cdot p_k$	p_k	$y_k \cdot p_k$
0	0,0	0,00096	0	0,00318	0	0,00318	0
1	0,25	0,00002	0,000005	-	-	0	0
2	0,5	0,00633	0,003165	0,0034	0,0017	0,00002	0,00001
3	0,75	0,00676	0,00507	-	-	0,00678	0,005085
4	1,0	0,98593	0,98593	0,99341	0,99341	0,99002	0,99002
$K_p = \sum_k y_k p_k$			0,9942		0,9951		0,9951

Таблица 2

Величины недоотпуска энергии ВЛ ± 500 кВ со свободностоящими опорами (за год при длине ВЛ 1000 км)

ΔW , ГВт·ч/год·1000 км	Вариант I	Вариант II	Вариант III
	203,2	171,7	171,7

Условный ущерб от ненадежности Y за полный срок эксплуатации $T=35$ лет для всех вариантов ВЛ ± 500 кВ определяется следующим образом:

$$Y = \Delta W \cdot a \cdot T,$$

где a – разность себестоимости электроэнергии на отправном и приемном концах ВЛ. Данные по условному ущербу от ненадежности ВЛ при $a=0,05$ \$/кВт·ч для рассматриваемых вариантов приведены в табл. 3. При уменьшении величины a ущерб Y пропорционально уменьшается.

Таблица 3

Условный ущерб от ненадежности ВЛ ± 500 кВ со свободностоящими опорами за полный срок эксплуатации (при длине ВЛ 1000 км)

Y , млн. \$/1000 км	Вариант I	Вариант II	Вариант III
	355,6	300,7	300,7

При учете 30 %-ной форсировочной способности оставшихся в работе полюсов величины потерь электроэнергии от ненадежности и ущерба от ненадежности существенно меняются. Также следует отметить, что 30 %-ная форсировочная способность заранее, на стадии пред-ТЭО, закладывается в проект для вентильного и трансформаторного оборудования с целью повышения надежности работы преобразовательных подстанций. Провода ВЛ ППТ ± 500 кВ способны выдерживать длительно 30 %-ную перегрузку по току в диапазоне рабочих токов (2-4) кА. С учетом 30 %-ной форсировочной способности оставшихся в работе полюсов аналогичным образом были проведены расчеты величины потерь электроэнергии от ненадежности и ущерба от ненадежности для ВЛ со свободностоящими опорами и опорами на оттяжках, результаты этих расчетов приведены в табл. 4 и 5. Из табл. 4 видно, что ВЛ со свободностоящими опорами обеспечивают значительно меньшие величины недоотпуска энергии (в 2,2-2,4 раза без форсировки мощности и в 2,4-2,8 раза с учетом форсировки), чем ВЛ с опорами на оттяжках. Форсировка мощности увеличивает преимущество свободностоящих опор.

Таблица 4

Сравнение величин недоотпуска энергии вариантов ВЛ ± 500 кВ
со свободностоящими опорами и с опорами на оттяжках
(за год при длине ВЛ 1000 км)

№ варианта	ΔW , ГВт·ч/год·1000 км			
	Без форсировки		С форсировкой 30 %	
	Свободностоящие опоры	Опоры на оттяжках	Свободностоящие опоры	Опоры на оттяжках
Вариант I	203,2	487,1	119,1	336,4
Вариант II	171,7	388,9	154,2	371,4
Вариант III	171,7	388,9	119,1	336,4

Таблица 5

Сравнение условного ущерба от ненадежности вариантов ВЛ ± 500 кВ
со свободностоящими опорами и с опорами на оттяжках
(за полный срок эксплуатации при длине ВЛ 1000 км)

№ варианта	Ущерб от ненадежности, млн. \$/1000 км			
	Без форсировки		С форсировкой 30 %	
	Свободностоящие опоры	Опоры на оттяжках	Свободностоящие опоры	Опоры на оттяжках
Вариант I	355,6	852,6	208,6	588,7
Вариант II	300,7	680,8	269,9	649,9
Вариант III	300,7	680,8	208,6	588,7

По данным табл. 5 можно сделать вывод, что ВЛ со свободностоящими опорами обеспечивают существенно более высокую надежность и меньшие условные ущербы от ненадежности (на 380-500 млн. \$/1000 км), чем ВЛ с

опорами на оттяжках. При применении свободностоящих опор условные ущербы явно перекрывают разницу в укрупненных показателях стоимости (УПС), которая для ВЛ ± 500 кВ длиной 1000 км со свободностоящими опорами на 10-20 млн. \$ (в зависимости от варианта исполнения ВЛ) больше, чем у ВЛ опорами на оттяжках. Этот вывод остается справедливым и при меньшей величине a и при уменьшенном расчетном сроке эксплуатации ВЛ T (при дисконтировании ущерба). Поэтому, несмотря на более низкую стоимость опор на оттяжках, лучше применять на будущих ВЛ СВН и УВН свободностоящие опоры.

С учетом форсировочной способности оставшихся в работе полюсов наиболее предпочтительными вариантами являются вариант I (две биполярные ВЛ в одном коридоре), применение которого сопровождается увеличением УПС на 40 млн. \$ по сравнению с одной биполярной ВЛ, и вариант III (квадруполярная ВЛ), для которого характерно увеличение УПС на 20 млн. \$ по сравнению с одной биполярной ВЛ, они (варианты I и III) обеспечивают величины недоотпуска энергии на 35 ГВт·ч/год·1000 км и условного ущерба от ненадежности на 60 млн. \$ ниже по сравнению с вариантом II (одна биполярная ВЛ).

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: максимальная величина мощности отключаемой полупеи ППТ может быть оценена диапазоном (1,0-1,5) ГВт. Это равноценно мощности наиболее крупного генерирующего блока на современной электрической станции или средней по мощности станции. Так как биполярная ВЛ ППТ имеет два достаточно независимо отключаемых полюса, то предельная мощность одной цепи ППТ может быть оценена (2,0-3,0) ГВт. При необходимости передачи мощности (4,0-6,0) ГВт требуется создание двухцепной ППТ.

На базе анализа современного мирового опыта развития ППТ и МППТ и прогнозных оценок можно оценить в качестве перспективного следующий диапазон номинальных напряжений ППТ и МППТ: $\pm(400-750)$ кВ. Более высокое напряжение, чем ± 750 кВ, едва ли реализуемо в ближайшее десятилетие по техническим и экономическим соображениям. Поэтому в технике передачи электрической энергии постоянным током на дальние расстояния получают применение одноцепные (биполярные) и многоцепные (биполярные и квадрупольные) ВЛ ППТ и МППТ со следующими основными параметрами одной цепи: передаваемая мощность (2,0-3,0) ГВт, номинальное напряжение $\pm(400-750)$ кВ, выпрямленный ток (1000-4000) А.

Наибольшая величина выпрямленного тока определяется техническими возможностями применяемого преобразовательного электрооборудования и в случае необходимости может быть увеличена до величины 4000 А, как это было сделано на ППТ Экибастуз-Центр. Увеличение выпрямленного тока до 4000 А достижимо более простыми техническими мероприятиями, чем повышение номинального напряжения сверх ± 750 кВ.

В четвертой главе рассмотрены методика и возможности оптимизации полюсного напряжения U и поперечного сечения Q ВЛ постоянного тока, а также затрат стали на опоры в зависимости от пропускной способности ВЛ и требований к надежности (в частности, цепности, т.е. числу полюсов) и влиянию электропередачи на окружающую среду. Сложность оптимизации определяется ее многофакторностью и необходимостью итеративного решения задачи: при фиксированном полюсном напряжении для механических расчетов и оптимизации опор необходимо предварительно задать конструкцию полюсов (и грозозащитных тросов), конструктивную схему опоры и климатические нагрузки, а для выбора оптимального сечения требуется знать стоимость опор в зависимости от сечения для вычисления "приведенных" затрат на линию в целом. Так как число выполненных проектов воздушных линий постоянного тока в мире и, в частности, в России и б. СССР относительно невелико, то для анализа стоимости 1 км этих линий в зависимости от полюсного напряжения, цепности, сечения Q и других особенностей ВЛ были выполнены эскизные проекты биполярных и квадрупольных (двухцепных) ВЛ $\pm(400-750)$ кВ с широким варьированием напряжения, сечения полюса и схем промежуточных опор. Эскизными проектами были охвачены воздушные линии ± 400 , ± 500 , ± 600 и ± 750 кВ с различными значениями пропускной способности.

При решении задачи оптимизации параметров ВЛ постоянного тока $\pm(400-750)$ кВ необходимо учесть особенности ожидаемого влияния этих ВЛ на окружающую среду. Учитывая, что речь идет о здоровье человека, находящегося в зоне влияния ВЛ $\pm(400-750)$ кВ, и недостаточном уровне изученности этого влияния во всех странах приходится с большой осторожностью относиться к этой стороне проектов ВЛ.

На биполярной ВЛ постоянного тока объемные заряды заполняют все пространство между коронирующими проводами, а также между проводами и землей. Эти заряды образуют как доминирующий по величине биполярный ток между полюсами линии, создаваемый двумя встречными потоками положительных и отрицательных ионов, дрейфующих от разноименных полюсов линии, так и униполярные токи, создаваемые ионами одного знака, дрейфующими от каждого полюса на землю. Токи ионов от проводов на землю достаточно малы (по измерениям на опытных пролетах составляют не более 10 мкА/м). Однако, очень важно учитывать их влияние вблизи линий электропередач СВН и УВН.

Униполярные ионные токи с полюсов линии электропередачи на землю приводят к образованию объемных зарядов, которые перераспределяют электростатическое поле E^0 под ВЛ и, в частности, увеличивают напряженность электрического поля (E) вблизи земли до $(1,5-2,5)E^0$. Ионные токи резко увеличивают концентрацию положительных (вредных для здоровья человека) ионов у поверхности земли вблизи ВЛ. Это вынуждает:

ограничивать уровень напряженности электрического поля под проводами ВЛ и соответственно концентрацию положительных ионов, стекающих с полюсов линии на землю.

На основе имеющегося опыта эксплуатации ВЛ постоянного тока $\pm(400-600)$ кВ и исследований, проведенных в IREQ (Канада) и НИИПТ, в качестве ориентировочных критериев обеспечения щадящих условий вблизи ВЛ постоянного тока можно принять 2 условия:

- для максимальной напряженности электрического поля ВЛ на уровне земли $E_m \leq 40$ кВ/м (с учетом объемного заряда);

- для максимальной плотности положительных ионных токов на землю $j_m \leq 100$ нА/м².

Как показали расчеты, при выполнении на биполярной ВЛ условия $U/U_0 \leq 0,7$ (где U - полюсное напряжение ВЛ, U_0 - начальное напряжение общей короны) оба указанных выше неравенства выполняются. Исследования НИИПТ показали также, что наиболее эффективным путем снижения j_m является увеличение габарита полюса над землей и такой выбор проводов в полюсе и конструкции полюса, при котором выполняется условие $U/U_0 \leq 0,7$.

На основе электрических расчетов с учетом экологических особенностей ВЛ ППТ СВН и УВН, с использованием специальной программы проектирования механической части линии со свободностоящими одноцепными и двухцепными опорами "Tower" (проф. А.А. Зевина) была проведена оптимизация (по критерию минимума затрат стали на 1 км ВЛ) основных геометрических параметров опор для биполярных и квадрупольных ВЛ. На выходе программа выдавала оптимальную геометрию опоры, соответствующие усилия в заданных режимах, механические напряжения в элементах, минимальные возможные сечения элементов, которые выбираются из заданного сортамента одиночных уголков, и, в конечном счете, затраты стали и стоимость опор с фундаментами в расчете на 1 км ВЛ. По площади поперечного сечения алюминия и стали в проводе проводился расчет стоимости проводов (на 1 км ВЛ). Суммирование всех затрат на ВЛ, включая затраты на монтаж опор, стоимость грозозащитных тросов, линейной изоляции и т. д., приводит к следующим эмпирическим формулам для оценки собственных капитальных затрат на 1 км ВЛ k_0 :

для биполярной линии

$$k_0 = (2680 + 65 \cdot U + 18,5 \cdot Q), \text{ \$/км,}$$

для квадрупольной линии

$$k_0 = 2 \cdot (1620 + 64 \cdot U + 16 \cdot Q), \text{ \$/км.}$$

Полученные для k_0 формулы использовались при оптимизации сечения полюса, которая проводилась на основе "приведенных" затрат на линию, в которые входят как капитальные затраты на сооружение ВЛ, так и

суммарные эксплуатационные издержки за весь расчетный срок её эксплуатации (обычно $t_p=35$ лет), приведенные к моменту ввода линии в эксплуатацию. Учет основных рыночных факторов (инфляции i , процента на капитал r и др.) обычно сокращает эквивалентный срок эксплуатационных издержек до t_p^* . В итоге определение оптимального Q для линии ведется за счет сведения к минимуму "приведенных" затрат, представленных в виде:

$$L = k(U, Q) \left[1 + p \cdot \sum_{t=1}^{t_p} \left(\frac{1+r}{1+i} \right)^{t-1} \right] + \frac{m\rho}{Q} \cdot \sum_{t=1}^{t_p} a(t) \cdot I^2(t) \cdot \tau(t) \cdot \left(\frac{1+r}{1+i} \right)^{t-1},$$

где $p \cdot k(U, Q) = 0,028 \cdot k(U, Q)$ - ежегодные амортизационные издержки по линии;
 $\sum_{t=1}^{t_p} \left(\frac{1+r}{1+i} \right)^{t-1} = t_p^*$ - коэффициент приведения издержек за весь расчетный срок службы линии $t_p=35$ лет к $t=1$; a - удельные затраты на электроэнергию в приемной энергосистеме, связанные с возмещением потерь в линии;
 $\rho=30,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ - удельное сопротивление алюминия; I - номинальный рабочий ток линии; τ - продолжительность максимальных потерь в линии за год; m - число полюсов на линии постоянного тока ($m=2$ для биполярной линии и $m=4$ для квадрупольной линии).

Итогом оптимизации является полученная формула, связывающая оптимальное сечение полюса ВЛ ППТ Q_0 с полюсным напряжением U при заданной пропускной способности P_0 :

$$Q_0 \cdot U = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot a \cdot \tau}{C_3}} \cdot P_0,$$

где C_3 - коэффициент в формуле для расчета "приведенных" затрат при Q .

Последняя формула позволяет при заданных пропускной способности линии P_0 и полюсном напряжении U определить оптимальное значение площади поперечного сечения полюса Q_0 ВЛ ППТ СВН и УВН. Также возможно вычисление оптимального U , но U ограничено диапазоном $U \leq \pm 750$ кВ, для которого были получены формулы для k_0 . Более высокое напряжение (например, ± 900 кВ), вероятно, теоретически еще реализуемо, но сопряжено с очень большими техническими трудностями, как при создании преобразовательных подстанций (габариты, транспортабельность и надежность трансформаторов, реакторов, вводов и другого оборудования), так и ВЛ (высота опор, прорывы молнии на положительные полюса, надежность изоляции и др.).

В пятой главе представлены результаты исследований по выбору оптимальной схемы возврата тока несимметрии полюсов биполярных и квадрупольных ВЛ ППТ СВН и УВН. Для густонаселенных и промышленно развитых регионов необходима постановка вопроса об исключении этого режима, так как он во многих случаях представляет опасность из-за электрокоррозии подземных сооружений в широкой зоне

вокруг рабочих заземлений преобразовательных подстанций. Более предпочтительной альтернативой является применение дополнительного провода для протекания тока небаланса полюсов ВЛ ("металлический возврат"). С точки зрения исключения опасного влияния возврата тока несимметрии через землю предложен вариант схемы металлического возврата с использованием дополнительных проводов, подвешенных под проводами ВЛ. Их использование дает ряд преимуществ.

Конкретные расчетные исследования проводились применительно к квадрупольной двухцепной ВЛ ± 500 кВ, изучавшейся в последнее время применительно к МППТ Восток-Запад (Россия-Германия). Подвеска дополнительного провода для металлического возврата тока несимметрии полюсов может улучшить экологические характеристики ВЛ за счет экранирующего действия заземленного провода, который будет отводить в землю определенную часть ионных токов от коронирующих нижних полюсов, и за счет бифилярного эффекта, который позволяет снизить величину индукции магнитного поля вблизи ВЛ ППТ в несимметричных режимах работы.

В этой главе также рассматриваются вопросы магнитной экологии ВЛ постоянного тока СВН и УВН. Вопрос о необходимости нормирования допустимой напряженности относительно слабого магнитного поля (МП) вблизи ВЛ постоянного тока СВН и УВН дискуссионен. Это обусловлено распространенной точкой зрения об отсутствии наведенных токов в организме человека, находящегося во внешнем постоянном МП, и отсутствии достоверных медико-биологических данных. Как следует из анализа литературных источников, можно предполагать, что отсутствие медико-биологических данных о влиянии постоянного магнитного поля на клеточную структуру человеческого организма вызвано тем, что большинство опытов проводится путем помещения отделенных от организма тканей или органов во внешнее постоянное МП. В случае воздействия МП на те же ткани (органы), находящиеся в составе организма человека и обтекаемые потоком движущейся крови, эффект может быть и другим. Следовательно, нельзя полностью отрицать существование влияния постоянного МП на организм человека. Для объяснения процессов, происходящих в организме человека, находящегося под воздействием внешнего постоянного МП, в НИИПТ проф. Кадомским Д.Е. была предложена следующая гипотеза. При нахождении организма человека в постоянном МП с индукцией \vec{B} в крови человека, движущейся со скоростью \vec{v} в организме человека, возникает электрическое поле \vec{E} , которое, согласно уравнениям Максвелла, определяется как $\vec{E} = [\vec{v} \times \vec{B}]$. Это электрическое поле \vec{E} индуцирует в организме человека (в крови) токи, которые переносят

заряженные частицы (ионы, электроны) и могут оказывать негативное влияние на здоровье человека.

Для оценки величины МП от ВЛ постоянного тока СВН и УВН в НИИПТ разработана программа для расчета магнитного поля вблизи ВЛ ППТ. По указанной программе проводились расчеты для определения индукции магнитного поля вблизи биполярных ВЛ постоянного тока. Расчеты показали, что вблизи ВЛ постоянного тока $\pm(400-750)$ кВ в рабочем (симметричном) режиме самой опасной (с наибольшей индукцией магнитного поля) точкой вблизи ВЛ ППТ является точка на оси ВЛ, где индукция для типовых ВЛ ППТ составляет (20-45) мкТл на уровне земли и (30-60) мкТл на высоте 2 м. В несимметричном режиме (при обрыве одного полюса линии, в ремонтном режиме) наиболее опасна точка под полюсом линии, в этом месте индукция достигает (25-50) мкТл на уровне земли и (30-60) мкТл на высоте 2 м. Вдали от линий постоянного тока магнитная индукция не велика и составляет (1-2) мкТл в рабочем режиме и (2,5-9) мкТл в аварийном. Длительное нахождение людей в МП с индукцией (20-60) мкТл может оказаться небезопасным. В связи с этим необходимо в дальнейшем продолжать изучать МП вблизи ВЛ ППТ и воздействие постоянного МП на человека с привлечением специалистов-профессионалов медико-биологического профиля.

Одной из мер по снижению МП от ВЛ ППТ является подвеска дополнительного провода металлического возврата тока несимметрии полюсов. Для рассматриваемых схем подвески дополнительных проводов были выполнены расчеты электрического и магнитного полей вблизи ВЛ ППТ и проведено сравнение показателей напряженности электрического поля и индукции магнитного поля вблизи ВЛ ППТ при наличии и отсутствии дополнительных проводов металлического возврата тока несимметрии полюсов. Результаты исследований дают основание сделать вывод о том, что применение дополнительных проводов на ВЛ ППТ СВН и УВН создает ряд преимуществ, позволяющих надеяться на широкое использование дополнительных проводов в будущем при проектировании ВЛ ППТ СВН и УВН. К основным преимуществам использования дополнительных проводов, помимо исключения протекания через землю тока несимметрии полюсов и исключения электрокоррозии подземных сооружений и необходимости сооружения дорогостоящих рабочих заземлителей, относятся: снижение величины напряженности электрического поля и ионных токов под проводами ВЛ, а также снижение величины индукции МП под проводами ВЛ в несимметричных режимах работы ВЛ. Важно отметить, что это достигается без увеличения массы стали на опоре из-за возможности подвески дополнительного провода на минимальной высоте в соответствии с выбранным уровнем его изоляции.

Перечисленные достоинства применения дополнительных проводов на ВЛ ППТ СВН и УВН позволяют сделать вывод, что в густонаселенной местности, крупных промышленных районах более предпочтительным является использование дополнительных проводов для протекания тока небаланса полюсов ВЛ ("металлический возврат").

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и расчетных исследований по диссертационной работе можно сделать следующие основные выводы:

1. На основе схем замещения для расчета надежности получены показатели надежности биполярных и квадрупольных ВЛ ППТ СВН и УВН с различными типами опор (свободностоящие и на оттяжках). Оценена надежность ВЛ постоянного тока на примере российского участка МППТ "Восток-Запад" ± 500 кВ пропускной способностью 4 ГВт длиной 1000 км при различном конструктивном исполнении ВЛ (две биполярных ВЛ в одном коридоре, одна биполярная ВЛ и одна квадрупольная ВЛ).

2. Показано, что ВЛ со свободностоящими опорами обеспечивают значительно более высокую надежность, чем ВЛ с опорами на оттяжках: для ВЛ со свободностоящими опорами величины недоотпуска энергии существенно ниже. При относительно небольшой разнице в укрупненных показателях стоимости ВЛ со свободностоящими опорами обеспечивают на порядок меньшие условные ущербы от ненадежности.

3. Выявлено, что с учетом 30 %-ой длительной форсировочной способности полюсов по показателям надежности (величина недоотпущенной энергии, условный ущерб от ненадежности) наиболее предпочтительными являются следующие варианты ВЛ: две биполярных ВЛ в одном коридоре и одна квадрупольная ВЛ (в сильно населенной местности, лесных зонах и т.д.).

4. По оценкам, сделанным в работе, предельную мощность одной биполярной ВЛ следует принимать (2-3) ГВт, а в случае необходимости передать большую мощность, следует применять либо двухцепную ВЛ, либо квадрупольную ВЛ.

5. Основными факторами, которые следует учитывать при оценке влияния на окружающую среду ВЛ постоянного тока, являются повышенная за счет униполярных ионных токов короны на землю напряженность электрического поля и повышенная на 2-3 порядка концентрация положительных ионов у земли.

6. Сформулированы критерии для ВЛ ППТ СВН и УВН: для максимальной напряженности электрического поля ВЛ на уровне земли - $E_m \leq 40$ кВ/м (с учетом объемного заряда); для максимальной плотности ионных токов на землю - $j_m \leq 100$ нА/м².

7. Наиболее эффективными путями снижения j_m являются увеличение габарита полюса над землей и такой выбор расщепленных проводов в полюсе

и конструкции полюса, при котором отношение полюсного напряжения к напряжению начала общей короны менее 0,7 ($U/U_0 \leq 0,7$).

8. Применение дополнительных проводов на ВЛ ППТ СВН и УВН создает ряд преимуществ, позволяющих надеяться на широкое использование дополнительных проводов в будущем при проектировании ВЛ ППТ СВН и УВН. К ним относятся: исключение протекания через землю тока несимметрии полюсов; исключение электрокоррозии подземных сооружений и необходимости сооружения дорогостоящих рабочих заземлителей; слабый рост массы стали в опоре при подвеске дополнительных проводов; снижение величины напряженности электрического поля и ионных токов под проводами ВЛ; снижение величины напряженности магнитного поля под проводами ВЛ в несимметричных режимах.

9. Предложены эмпирические формулы для определения стоимостных показателей биполярных и квадрупольных воздушных линий ППТ СВН и УВН, разработана методика оптимизации поперечного сечения полюса ВЛ, которая позволяет при заданных пропускной способности ВЛ P_0 и полюсном напряжении U определить оптимальную площадь поперечного сечения полюса ВЛ.

10. Показано, что квадрупольные ВЛ СВН и УВН обеспечивают ряд важных преимуществ - повышение надежности и маневренности передачи, существенное уменьшение коридора для ВЛ по сравнению с двумя биполярными ВЛ, экономию стали опор (около 10%), возможность улучшения экологической ситуации вблизи ВЛ за счет размещения на нижнем ярусе отрицательных полюсов.

11. Предложен ряд новых (с позиций надежности, экологии и оптимизации), ранее не рассматривавшихся проектных решений по ВЛ ППТ (квадрупольная ВЛ, дополнительные провода для металлического возврата тока несимметрии полюсов и др.).

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Тиходеев Н.Н., Зевин А.А., Кузнецова Л.Е., Чудный В.С. Методика оптимизации и оценки стоимости биполярных и квадрупольных воздушных линий электропередачи СВН и УВН. // V симпозиум "Электротехника 2010 год". Сборник докладов – Московская область, 1999.
2. Чудный В.С. Электромагнитная экология воздушных линий постоянного тока сверхвысокого и ультравысокого напряжения. // II международная научно-практическая конференция "Экономика, экология и общество России на пороге 21-го столетия". Сб. трудов - Санкт-Петербург, 2000.
3. Чудный В.С. Экологическое влияние воздушных линий постоянного тока на окружающую среду. // IV Всероссийская научно-методическая конференция "Фундаментальные исследования в технических университетах". Сб. материалов - Санкт-Петербург, 2000.

4. Чудный В.С. Экологическая оценка влияния магнитного поля воздушных линий постоянного тока на человека. // Международная научно-техническая конференция "Экологические проблемы и пути их решения в XXI веке: образование, наука, техника". Сб. трудов - Санкт-Петербург, 2000.
5. Чудный В.С., Кутузова Н.Б. Оценка влияния магнитного поля воздушных линий постоянного тока на человека. // Конференция молодых специалистов электроэнергетики - 2000. Сборник докладов - Москва, 2000.
6. Свидетельство на полезную модель № 15821. Многопроводная воздушная линия постоянного тока высокого напряжения / Галанов В.И., Кадомский Д.Е., Тиходеев Н.Н., Чудный В.С. Заявление 21.04.2000, № 2000110153. Опубл. в Бюл. № 31, 2000 г.
7. Чудный В.С. Экологическое влияние воздушных линий электропередачи постоянного тока на окружающую среду. // III международная научно-практическая конференция "Экономика, экология и общество России в 21-ом столетии". Сб. трудов - Санкт-Петербург, 2001.
8. Чудный В.С. Учет требований надежности воздушных линий электропередачи постоянного тока сверхвысокого и ультравысокого напряжения. // V Всероссийская научно-методическая конференция "Фундаментальные исследования в технических университетах". Сб. материалов - Санкт-Петербург, 2001.
9. N.N. Tikhodeev, A.A. Zevin, L.E. Kuznetsova, V.S. Chudny. Comparison of the tower steel component for HVDC and HVAC power transmission lines. // CIGRE ICPS2001 CIGRE International Conference on Power Systems – Wuhan, China, 2001.
10. Зевин А.А., Кузнецова Л.Е., Тиходеев Н.Н., Чудный В.С. Сравнение затрат стали на опоры воздушных линий электропередачи постоянного и переменного тока. // VI симпозиум "Электротехника 2010 год". Сборник докладов – Московская область, 2001.
11. Кутузова Н.Б., Чудный В.С. Оценка магнитного поля воздушных линий электропередачи постоянного тока СВН и УВН и его влияние на человека. // Известия НИИ постоянного тока. 2001, №58.