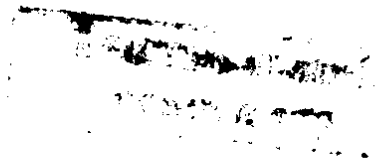


05.25.01

K665


На правах рукописи



Коржов Антон Вениаминович

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РЕГЛАМЕНТА
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени



кандидата технических наук

Челябинск

2003

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Сидоров А.И.
Научный консультант — кандидат технических наук,
доцент Окраинская И.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Кузнецов К.Б.;
кандидат технических наук,
доцент Булатов Б.Г.

Ведущее предприятие — филиал ОАО «ФСК ЕЭС»
МЭС Урала, г. Екатеринбург.

Защита состоится 26 июня, в 14 часов, в ауд.380 на заседании
диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.
Факс: (3512) 67-94-49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С.Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На современном этапе научно-технического прогресса невозможно представить энергетическую систему без межсистемных линий электропередачи (330...1150 кВ). Они являются основным связующим звеном отдельных энергосистем и служат устройством для передачи электроэнергии на большие расстояния. Огромные масштабы нашей страны обусловили и значительную протяжённость межсистемных линий электропередачи: около 50 тыс. км со 160 подстанциями (330...1150 кВ). Персонал, обслуживающий такие электрические сети, длительно и регулярно подвержен негативному влиянию электрического поля промышленной частоты (ЭП ПЧ). Следует отметить, что в настоящее время задача обеспечения безопасности персонала от указанного воздействия не решена должным образом. Общеизвестно, что основным фактором, определяющим отрицательное действие ЭП ПЧ на живой организм, является обусловленный этим полем ток, протекающий через тело человека. Однако, на сегодняшний день в качестве критерия безопасности для человека, находящегося в ЭП ПЧ, выбрана напряжённость неискажённого электрического поля, что, на наш взгляд, не отражает всей картины негативного влияния ЭП ПЧ на организм человека.

Актуальность работы подтверждается также перечнем приоритетных направлений развития науки, технологий и техники на период до 2010 года; итогами третьей международной конференции "Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундаментальные и Прикладные исследования", проведённой в сентябре 2002 г. (Москва—С.-Петербург); регулярно проводимой Российской научно-технической конференцией "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов" в Санкт-Петербурге и конкурсом научных работ по теме "Электромагнитная безопасность человека и экосистем", объявленным в 2003 году Российским национальным комитетом по защите от неионизирующих излучений.

Работа поддержана грантом по программе развития научного творчества молодёжи в вузах Челябинской области, осуществляемой Министерством образования РФ и Администрацией Челябинской области.

Цель работы – обосновать необходимость изменения принципа нормирования для персонала электрического поля промышленной частоты.

Идея работы: замена гигиенического норматива в виде напряжённости неискажённого электрического поля на величину тока, протекающего через тело человека, при нахождении последнего вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Ток, протекающий через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения, определяется не только напряжённостью электрического поля, измеренной на уровне его роста, но и длиной охвата плечевого пояса и рабочей позой.

2. Вертикальная составляющая вектора напряжённости электрического поля индуцирует в теле человека не более 50 % от общего тока, протекающего через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения.

3. Использование величины тока, протекающего через тело человека, находящегося в электрическом поле промышленной частоты, в качестве критерия безопасности позволяет учесть: искажение электрического поля, обусловленное телом человека; положения тела человека относительно токоведущих частей и земли; его антропометрические данные.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным применением математической теории эксперимента и удовлетворительной сходимостью результатов практических исследований с расчётными данными.

Значение работы. Научное значение работы заключается в том, что

- установлен спектральный состав и интенсивность электромагнитного излучения коронного разряда непосредственно на территории открытого распределительного устройства;
- на основе теоретических и экспериментальных исследований обоснована необходимость перехода к нормированию величины тока, протекающего через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения;
- показано, что распределение наведённых токов по различным участкам тела человека носит неравномерный характер;
- получена зависимость величины тока, протекающего через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения, от его роста и длины охвата плечевого пояса, а также напряжённости неискажённого электрического поля, измеренной на уровне 1,8 м от земли.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- разработана методика исследования электромагнитного излучения коронного разряда с позиций охраны труда;
- разработан проект общего технического регламента по нормированию допустимых параметров электрического поля промышленной частоты;
- предложена структурная схема устройства индивидуального учёта уровня воздействия электрического поля промышленной частоты, основанного на измерении тока, протекающего через тело человека в землю;
- построена номограмма для определения токов, протекающих через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения, по его антропометрическим параметрам и напряжённости неискажённого электрического поля, измеренной на уровне 1,8 м от земли.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Научные положения, выводы и рекомендации использованы:

- Южно-Уральским Государственным университетом в лекционном курсе “Электромагнитные излучения” при обучении студентов электротехнических специальностей, а также специальности 330100 (“Безопасность жизнедеятельности в техносфере”);

Кроме того, результаты работы с целью её реализации переданы в:

- Департамент генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей ОАО РАО “ЕЭС России”;
- Федеральное государственное учреждение науки Министерства здравоохранения Российской Федерации (Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья г. Санкт-Петербург).

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены:

- на шестой и седьмой Российских научно-технических конференциях “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов” (Санкт-Петербург, 2000, 2002);
- на ежегодном семинаре “Охрана труда в электроэнергетике – 2003”, проводимом в соответствии с планом ОАО РАО “ЕЭС России” (г. Москва);
- на IX-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Современные техника и технологии, 2003” (Томск, 2003 г.);
- на трёх Всероссийских ежегодных научно-технических конференциях “Наука – Производство – Технология – Экология” (ВятГТУ, Киров 2001, 2002, 2003);
- на I-ой научно-практической конференции “Вклад молодых учёных и специалистов в развитие науки и культуры г. Челябинска. Состояние. Проблемы. Перспективы” (Челябинск 2000 г.);
- на научно-практической конференции “Достижения науки и техники – развитию города Челябинска” (Челябинск 2002 г.);
- на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (1999...2003 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 138 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка, 37 таблиц, список используемой литературы из 117 наименований и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Одним из основных источников электромагнитных неионизирующих излучений являются электроустановки сверхвысокого напряжения (ЭУ СВН). Ввиду широкого распространения указанных электроустановок нельзя не учитывать создаваемые ими вредные факторы: электрическое поле промышленной частоты; магнитное поле промышленной частоты; электромагнитные излучения, обусловленные явлением коронного разряда (ЭМИ).

Большой вклад в изучение воздействия ЭП ПЧ на биологические объекты, в том числе и на организм человека, разработку нормативов, а также способов и средств защиты от воздействия ЭП ПЧ внесён такими учёными, как Сазонова Т.Е., Кривова Т.И., Асанова Т.П., Ревнова Н.В., Александров Г.Н., Долин П.А., Габович Р.Д., Козярин И.П., Кузнецов К.Б., Никитина В.Н., Григорьев Ю. Г., Дьяков А.Ф. и другими. Человек, находящийся вблизи ЭУ СВН, подвергается также воздействию (ЭМИ), что ни как не учитывается существующими нормативными документами в России и за рубежом. Следует отметить, что как источник радиопомех ЭМИ достаточно изучены. Для исследования данного вида излучений с позиций охраны труда была разработана методика, одной из главных особенностей которой является обоснование места и количества измерений характеристик ЭМИ. На открытых распределительных устройствах (ОРУ) главных понизительных подстанций магистральных электрических сетей целесообразно исследовать интенсивность и спектр электромагнитных излучений по всей территории. На воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) интенсивность электромагнитных излучений следует измерять вдоль пролета (для получения картины пространственного распределения интенсивности излучения) с выборочной проверкой спектрального состава излучения. В результате проведённых исследований было установлено, что излучение коронного разряда имеет широкий спектральный состав от 50 кГц до 100 МГц. Наибольшая интенсивность электрического поля наблюдается на частотах: 0,01 МГц – $E=17,8$ мВ/м; 0,15 МГц – $E=35,48$ мВ/м; 0,25 МГц – $E=10,59$ мВ/м; 0,4 МГц – $E=37,58$ мВ/м; 0,5 МГц – $E=17,8$ мВ/м; 30 МГц – $E=1$ мВ/м; 45 МГц – $E=0,6$ мВ/м. Наибольшая интенсивность магнитного поля: 0,01 МГц – $H=47,21$ мкА/м; 0,15 МГц – $H=94,11$ мкА/м; 0,4 МГц – $H=99,68$ мкА/м; 0,5 МГц – $H=47,21$ мкА/м. Несмотря на то, что интенсивность электромагнитного излучения меньше чем предельно допустимая, предусмотренная ГОСТ 12.1.006-84 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96, необходимо иметь в виду, что персонал подвергается сочетанному воздействию электрического поля промышленной частоты и ЭМИ достаточно широкого диапазона. Данными Российского национального комитета по защите от неионизирующего излучения установлено, что опасность такого комбинированного действия может быть существенной для организма человека. Известно также, что опасность смешанных токов зависит от

соотношения основной и высокочастотной составляющих. Последнее позволяет предположить, что отрицательное действие токов, протекающих через тело человека, находящегося на ОРУ или под ЛЭП СВН, тем сильнее, чем больше в этих токах высокочастотная составляющая.

Действующие нормативные акты (ГОСТ 12.1.002-84; Межотраслевые правила по охране труда ПОТ РМ-016-2001) в качестве критерия безопасности для человека устанавливают напряжённость неискажённого электрического поля промышленной частоты, измеренную на высоте 1,8 м от поверхности земли, и, в зависимости от напряжённости электрического поля, регламентируют длительность нахождения персонала, занятого эксплуатацией электроустановок напряжением 330 кВ и выше. Измерение напряжённости электрического поля удобно с метрологических позиций, но при этом следует отметить, что её использование в качестве гигиенического норматива приводит либо к перезащите, либо к недозащите конкретного работника, поскольку не учитывается ряд существенных моментов:

- искажение электрического поля при появлении в нём человека;
- различные положения относительно токоведущих частей и земли, которые может принимать человек при ведении работ;
- антропометрические данные человека.

Для установления изменения величины тока, протекающего через тело человека, в зависимости от направления вектора напряжённости электрического поля и для определения величины тока, протекающего через тело человека, обусловленного вертикальной составляющей напряжённости электрического поля, было рассчитано ёмкостное сопротивление между различными участками токоведущей части и телом человека. Участки токоведущей части изменялись в зависимости от угла α (рис. 1). При проведении расчётов были приняты следующие допущения:

1. Человек, находящийся вблизи высоковольтных электроустановок, имеет ёмкостную связь с каждой фазой. При $C_A = C_B = C_C$, суммарный ток через тело человека будет равен нулю. На практике в реальных условиях ёмкостная связь человека с каждой из фаз различна, из-за различного расстояния от тела человека до фаз, поэтому через тело человека всегда протекает ток, обусловленный этой связью. В электроустановках сверхвысокого напряжения расстояния между фазами и расстояние между фазами и землёй соизмеримы, поэтому ёмкостная связь человека с одной из фаз намного больше, чем с другими. При ситуации, когда человек находится под фазой А – $C_A > C_B$ и $C_A > C_C$, значение тока, протекающего через тело человека в землю, можно определить по формуле:

$$I_h = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_A \cdot U_{\phi}, \quad (1)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение;
 C_A – ёмкость между человеком и фазой А.
 f – промышленная частота 50 Гц.

2. Тело человека для упрощения заменялось моделью в виде цилиндра из проводящего материала, имеющего длину H_m и объём V_m , равный соответственно высоте и объёму тела человека. Известно, что для человека, имеющего рост 1,7 м, объём его тела, можно принять равным $0,068 \text{ м}^3$. Поэтому размеры цилиндра, моделирующего тело человека, принимаем следующими: длина $H_m=1,7 \text{ м}$; радиус основания $R_m=0,113$.

3. В расчётах полагалось, что силовые линии напряжённости электрического поля равномерно входят только в боковую поверхность цилиндра, моделирующего тело человека, со всех сторон под углом α (рис. 1). Угол α в расчётах менялся от 10 до 80 градусов. При $\alpha=0^\circ$ считалось, что силовые линий напряжённости электрического поля равномерно входят только в верхнее основание цилиндра, то есть в данном случае ток обусловлен вертикальной составляющей напряжённости электрического поля.

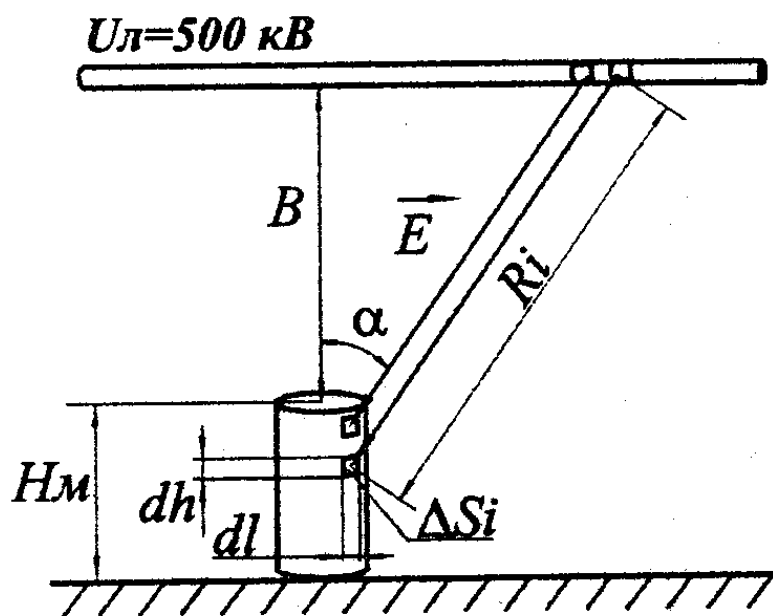


Рис. 1. Расчётная модель

4. Расстояние от токоведущих частей до головы человека принято $B=8 \text{ м}$. Линейное напряжение на токоведущих частях – $U_l=500 \text{ кВ}$.

5. Боковая поверхность цилиндра разбита на бесконечно малые участки ΔS_i и условно такие же участки выделены на токоведущей части. Значение ёмкости между бесконечно малыми участками ΔS_i рассчитывалось как ёмкость плоского конденсатора.

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \Delta S_i}{R_i}, \quad (2)$$

где C_i – ёмкость между участками ΔS_i ;
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная;
 $\epsilon = 1$ – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;
 ΔS_i – площадь выделенных участков;
 R_i – расстояние между i -ми участками.

Общее значение ёмкости между боковой поверхностью цилиндра и токоведущей частью, найдена как сумма частичных ёмкостей на участках ΔS_i .

$$C_{\Sigma} = \lim_{\Delta S_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \Delta S_i}{R_i} = \iint_{S_{\text{бпц}}} \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon}{R_i} dS, \quad (3)$$

где $S_{\text{бпц}}$ – площадь боковой поверхности цилиндра.

$$C_{\Sigma} = \int_0^{H_M} \int_0^{R_{\text{ц}}} \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \Delta S_i}{(B+h) \cdot \cos \alpha} dh dl = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot \ln\left(1 + \frac{H_M}{B}\right). \quad (4)$$

где $R_{\text{ц}}$ – радиус основания цилиндра.

При $\alpha=0^\circ$ значение ёмкости между верхним основанием цилиндра и токоведущей частью рассчитывалось по формуле:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S_{\text{о.ц}}}{B} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}}^2}{B}. \quad (5)$$

где $S_{\text{о.ц}}$ – площадь основания цилиндра.

Результаты расчётов величин тока, протекающего через тело человека при различных углах α , сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчёта

Угол α , град:	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80
Величина ёмкости, $\Phi \cdot 10^{-13}$	0,4	11,9	11,4	10,5	9,3	8,6	7,8	6,1	4,1	2,1
Ёмкостное сопротивление X_c , $\text{Ом} \cdot 10^9$	72	2,7	2,8	3	3,4	3,7	4,1	5,3	7,7	15
Ток I_h , мкА	4	108,1	103,1	95	84,1	77,6	70,5	54,9	37,5	19,1

Для анализа тока, проходящего через тело человека, была рассмотрена система состоящая из окружающей среды; ЭУ СВН; человека (рис.2). При исследовании этой системы использовался метод чёрного ящика.

Все факторы, воздействующие на систему, были предварительно разбиты по группам X, Z, q, .

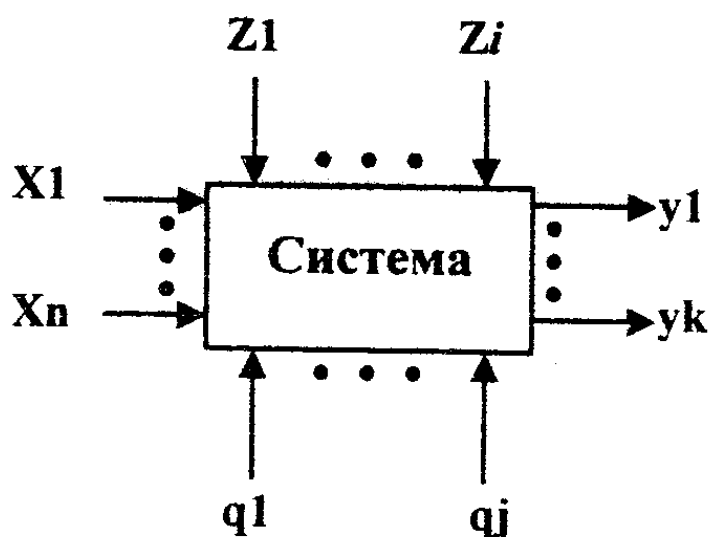


Рис. 2. Рассматриваемая система

При этом:

X – варьируемые факторы, которые влияют на поведение системы и которыми человек может управлять по определённым законам (матрицам). К группе X были отнесены следующие факторы: рост человека, длина охвата плечевого пояса, сопротивление обуви, напряжённость электрического поля на уровне 1.8 м от земли, температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, скорость ветра.

Z – это факторы, которые влияют на поведение системы, но управлять ими вследствие ограничений (технических, технологических, экономических, социальных) не представляется возможным. К группе **Z** были отнесены следующие факторы: напряжение ЭУ СВН, тип конструкции фазы, материал провода, атмосферное давление, влажность грунта, удельное сопротивление грунта, масса человека, сопротивление тела человека по пути: голова-ноги.

q – это факторы, которые влияют на поведение системы, но управление ими на данном этапе развития цивилизации невозможно. К группе **Z** были отнесены следующие факторы: высота над уровнем моря, напряжённость магнитного поля земли.

Для определения существенно влияющих факторов из числа 7, отнесенных к группе **X**, применялась теория отсеивающего эксперимента на основе плана Плакетта-Бермана с $N=12$ экспериментами для 11 факторов. При этом для корректности решения к существующим 7 факторам были добавлены четыре фиктивных фактора (табл.2).

Таблица 2

Уровни факторов

Номер фактора	Обозначение фактора	Уровень фактора	
		-1	+1
X1	h, м - рост человека	1,60	2,00
X2	фиктивный фактор	-	-
X3	L, м – длина охвата плечевого пояса	1,05	1,45
X4	фиктивный фактор	-	-
X5	Rоб, кОм – сопротивление обуви	0	300
X6	E, кВ/м – напряжённость электрического поля на уровне 1.8 м от земли	5	10
X7	T, K – температура окружающей среды	253	293
X8	Wотн, % – относительная влажность воздуха	45	90
X9	V, м/с – скорость ветра	0	10
X10	фиктивный фактор	-	-
X11	фиктивный фактор	-	-

С учётом уровней факторов согласно плану Плакетта-Бермана были проведены 12 экспериментов под ЛЭП-500 кВ. В качестве объекта исследования был выбран пролёт между 4 и 5 опорами ЛЭП-500 кВ (Шагол-Козырево), Челябинского предприятия магистральных электрических сетей филиала ОАО “ФСК ЕЭС” МЭС Урала. Измерение тока, протекающего через тело человека, осуществлялось экранированным микроамперметром переменного тока. Полученные данные сведены в табл. 3.

План Плакетта-Бермана и результаты эксперимента

№ опыта	Уровни факторов											Ток I _h , мкА
	X1 h, м	X2 Ф.Ф.	X3 L, м	X4 Ф.Ф.	X5 R _{об} , Ом	X6 E, кВ/м	X7 T, К	X8 W _{отн} , %	X9 V, м/с	X10 Ф.Ф.	X11 Ф.Ф.	
1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	105
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	64
3	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	52
4	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	66
5	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	109
6	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	58
7	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	81
8	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	88
8	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	40
10	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	123
11	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	94
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	37

По данным табл. 3 была проведена обработка экспериментальных данных.

Эффект отдельных факторов вычислялся по формуле:

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^N u_j \cdot x_i^j}{N/2}, \quad (6)$$

где B_i – эффект i -ого фактора;

u_j – значение функции (величина тока) в j -эксперименте;

x_i^j – уровень i -ого фактора в j эксперименте;

N – общее число экспериментов в рассматриваемом плане.

Для выявления существенных факторов проверялось выполнение условия:

$$|B_i| \geq t_{кр} \cdot S_i = 2,776 \cdot \sqrt{5,65} = 6,6, \quad (7)$$

где B_i – эффект i -ого фактора;

$t_{кр}$ – критическое значение t – распределения для уровня значимости $\alpha=0,05$ и $\phi=4$ степеней свободы;

S_i^2 – оценка дисперсии коэффициента B_i .

Для оценки дисперсии ошибок наблюдений были добавлены 4 фиктивных фактора. Эффекты фиктивных переменных будут равны нулю лишь в том случае, если не имеется взаимодействий, и измерения являются

абсолютно точными. Проведённые нами эксперименты являются практическими и не могут иметь абсолютную точность, поэтому эффекты фиктивных переменных использовались для расчёта оценки дисперсии наблюдений S_f .

$$S_f^2 = \frac{N \cdot (|B_2|^2 + |B_4|^2 + |B_{10}|^2 + |B_{11}|^2)}{(N - \ell - 1)} = \frac{12 \cdot (2,73^2 + 2,36^2 + 3,09^2 + 0,18^2)}{12 - 7 - 1} = 67,83, \quad (8)$$

где S_f – дисперсия наблюдений;

N – общее число экспериментов в плане Плакетта-Бермана;

B_i – эффект i -ого фактора;

ℓ – число значимых факторов.

$$S_i^2 = \frac{S_f^2}{N} = \frac{67,83}{12} = 5,65. \quad (9)$$

В табл. 4 представлены результаты обработки эксперимента, из которой следует, что существенными оказались лишь три фактора: (X_5 – E , кВ/м), (X_1 – h , м), (X_2 – L , м). Поэтому в дальнейшем анализировалось влияние на величину тока через тело человека этих трёх факторов.

Таблица 4

Эффект факторов и их значимость

Фактор	X1 h, м	X2 Ф.Ф.	X3 L, м	X4 Ф.Ф.	X5 Rоб, Ом	X6 E, кВ/м	X7 T, К	X8 Wотн, %	X9 V, м/с	X10 Ф.Ф.	X11 Ф.Ф.
Эффект, B_i	24,18	2,73	10,36	2,36	-3,45	51,45	1,27	4,18	-3,82	-3,09	-0,18
Значимость	Да	–	Да	–	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	–	–

Основываясь на данных предварительных замеров, можно утверждать, что зависимость силы тока, протекающего через тело человека, от его роста и зависимость этой же силы тока от размера плечевого пояса имеют нелинейный характер. Поэтому, согласно теории математического моделирования, необходимо выбрать регрессионное уравнение второй степени, а эксперименты проводить по плану второго порядка (табл. 5), переходя к векторному изображению варьируемых факторов (рис. 3).

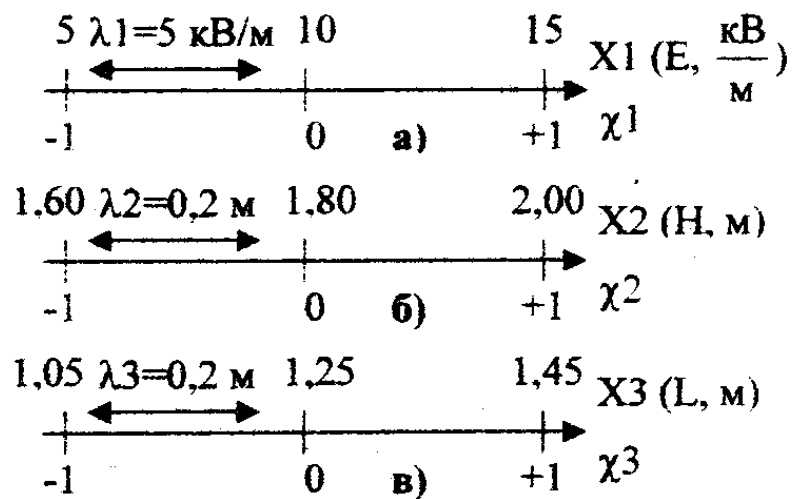


Рис. 3. Векторное изображение факторов:
а) напряжённости неискажённого электрического поля, измеренной на уровне 1,8 метра от земли;
б) роста;
в) длины охвата плечевого пояса

В эксперименте, участвовали 9 добровольцев: три человека ростом 1,60 м и охватом плечевого пояса 1,05 м, 1,25 м, 1,45 м; три человека ростом 1,80 м и охватом плечевого пояса 1,05 м, 1,25 м, 1,45 м; и ещё три человека ростом 2,00 м и охватом плечевого пояса 1,05 м, 1,25 м, 1,45 м. Такой подбор добровольцев был необходим для обеспечения всех возможных сочетаний, представленных в матрице эксперимента, соответствующей выбранному плану второго порядка, причём каждый опыт дублировался три раза. Порядок проведения 45 опытов был рандомизирован. Рандомизация необходима для равномерного распределения погрешности, она была проведена с помощью генератора случайных чисел. Номер реализации опытов представлен во 2-м столбце табл. 5. Результаты эксперимента также представлены в табл. 5.

Таблица 5

Матрица и результаты эксперимента

№ опыта	№ реализации	X1	χ_1	X2	χ_2	X3	χ_3	Y_i – ток, мкА				Расчётное значение, Y_p	$\frac{\bar{y} - y_p}{\bar{y}} 100\%$
		Физич.	Код.	Физич.	Код.	Физич.	Код.	Y_1	Y_2	Y_3	Среднее значение, \bar{y}		
1	17, 28, 7	5	-1	160	-1	105	-1	35	42	39	38,67	39,59	2
2	3, 40, 32	15	1	160	-1	105	-1	126	130	132	129,33	127,79	-1
3	31, 23, 14	5	-1	200	1	105	-1	54	60	58	57,33	57,89	1
4	8, 18, 43	15	1	200	1	105	-1	159	161	154	158	161,75	2
5	27, 12, 30	5	-1	160	-1	145	1	48	56	53	52,33	50,22	-4
6	24, 6, 37	15	1	160	-1	145	1	136	142	147	141,67	142,75	1
7	33, 2, 29	5	-1	200	1	145	1	70	63	65	66	69,19	5
8	42, 22, 16	15	1	200	1	145	1	174	176	180	176,67	177,39	1
9	26, 5, 38	5	-1	180	0	125	0	51	57	54	54	54,73	2
10	13, 15, 21	15	1	180	0	125	0	151	157	153	153,67	152,93	-1
11	36, 4, 19	10	0	160	-1	125	0	89	85	87	87	91,93	6
12	1, 34, 9	10	0	200	1	125	0	120	122	128	123,33	118,40	-5
13	45, 10, 25	10	0	180	0	105	-1	91	98	94	94,33	93,93	-1
14	20, 44, 35	10	0	180	0	145	1	107	104	109	106,67	107,07	1
15	11, 39, 41	10	0	180	0	125	0	100	98	103	100,33	103,09	3

Коэффициенты регрессионного уравнения были рассчитаны с использованием L-матрицы, которая соответствует матрице эксперимента.

Регрессионное уравнение второго порядка, показывающее зависимость $I=f(E,H,L)$, имеет вид:

$$I = 103,09 + 49,1 \cdot \frac{E-10}{5} + 13,23 \cdot \frac{H-1,8}{0,2} + 6,57 \cdot \frac{L-1,25}{0,2} + 0,74 \cdot \left[\frac{E-10}{5} \right]^2 + 3,92 \cdot \frac{E-10}{5} \cdot \frac{H-1,8}{0,2} + 1,08 \cdot \frac{E-10}{5} \cdot \frac{L-1,25}{0,2} + 2,08 \cdot \left[\frac{H-1,8}{0,2} \right]^2 + 0,17 \cdot \frac{H-1,8}{0,2} \cdot \frac{L-1,25}{0,2} - 2,59 \cdot \left[\frac{L-1,25}{0,2} \right]^2. \quad (10)$$

Определение относительной погрешности между экспериментальными и расчётными данными (последняя колонка табл.5), проверка по дисперсионному отношению Фишера и проверка интерполяционных свойств полученного уравнения показала, что полученное уравнение можно считать адекватным.

По полученному регрессионному уравнению была рассчитана и представлена на рис. 4 наглядная зависимость тока, протекающего через тело человека, от его роста и длины охвата плечевого пояса при $E=5$ кВ/м.

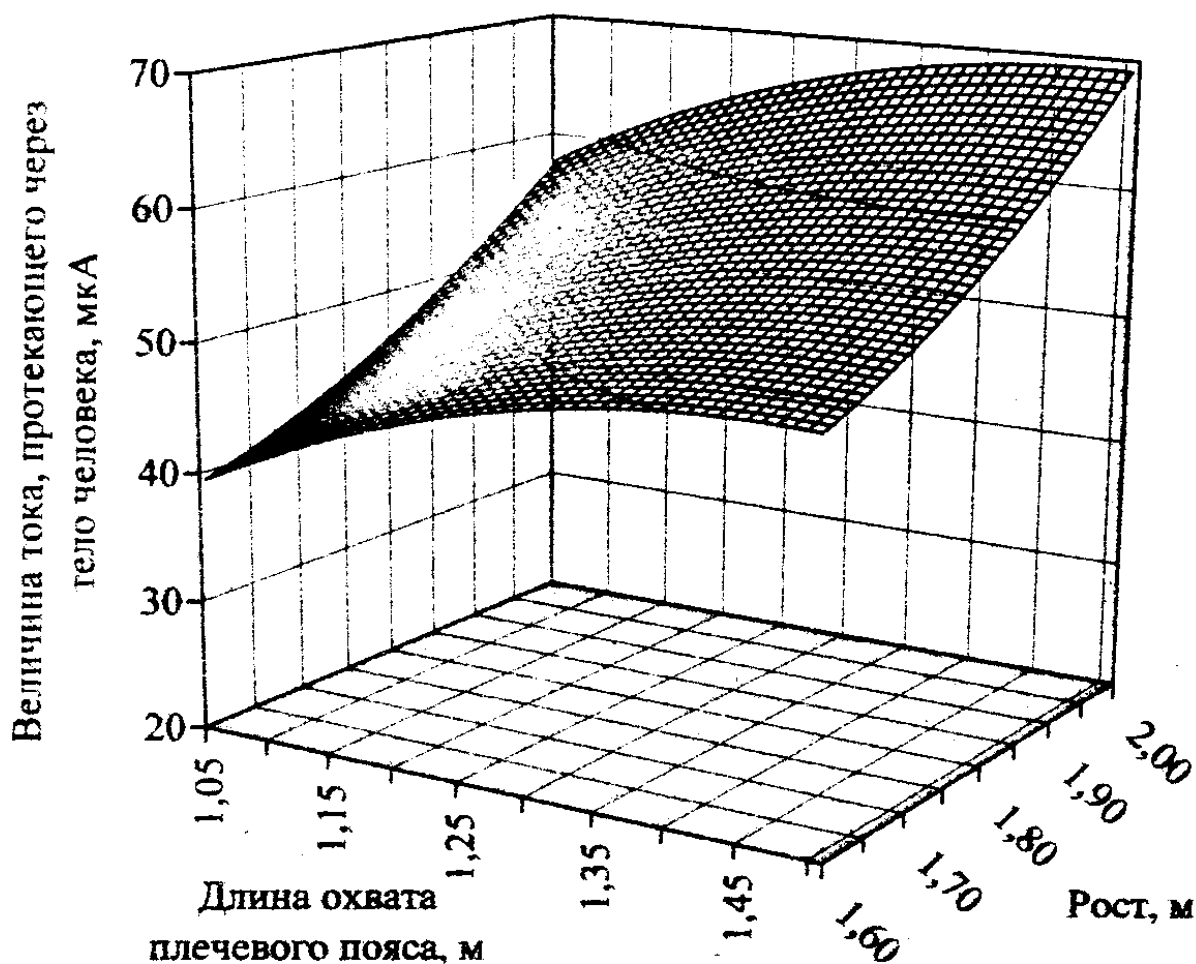


Рис. 4. Зависимость величины тока, протекающего через тело человека, от его роста и длины охвата плечевого пояса ($E=5$ кВ/м)

Зависимости, приведённые на рис. 5, показывают, что через тело человека с большими ростом и плечевым поясом, находящегося в электрическом поле с напряжённостью $E=4$ кВ/м, может протекать больший

ток, чем через тело человека с меньшими антропометрическими данными. но при этом находящемся в электрическом поле с напряжённостью $E=6$ кВ/м.

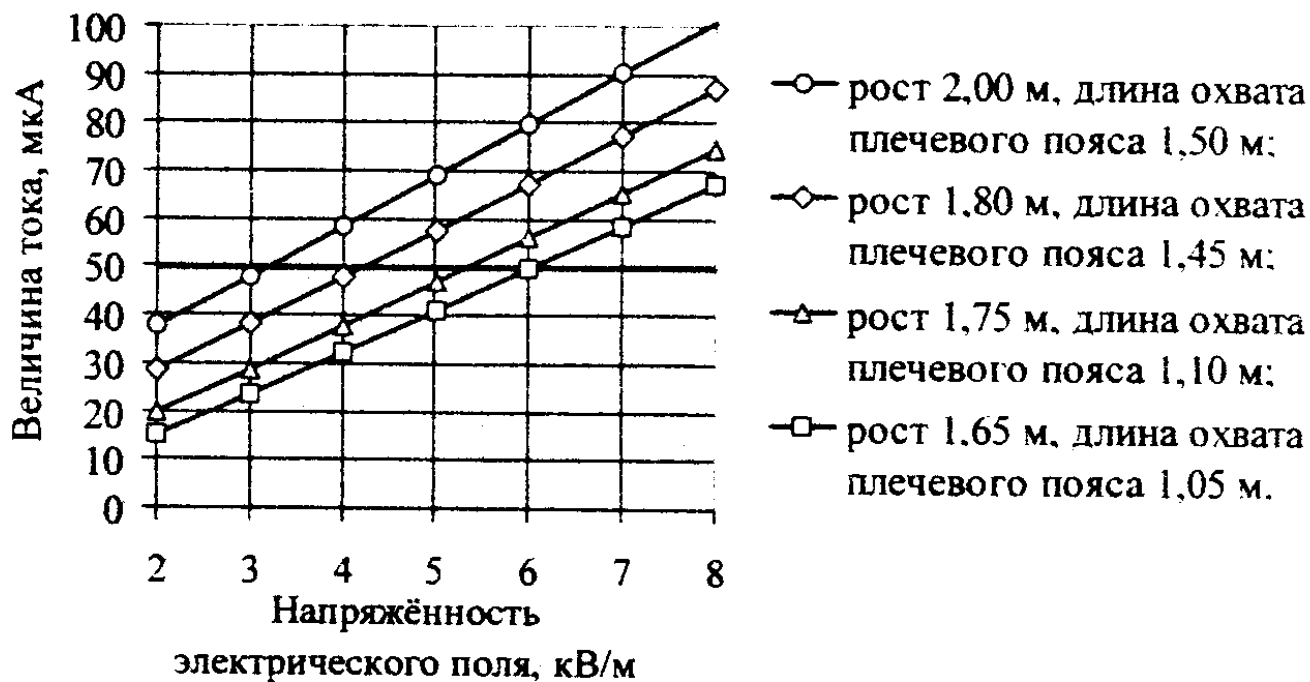


Рис. 5. Зависимости величины тока, протекающего через тело человека, от напряжённости электрического поля промышленной частоты для людей с разными антропометрическими данными

На рис. 6 представлены графики, показывающие зависимость величины тока от антропометрических характеристик человека.

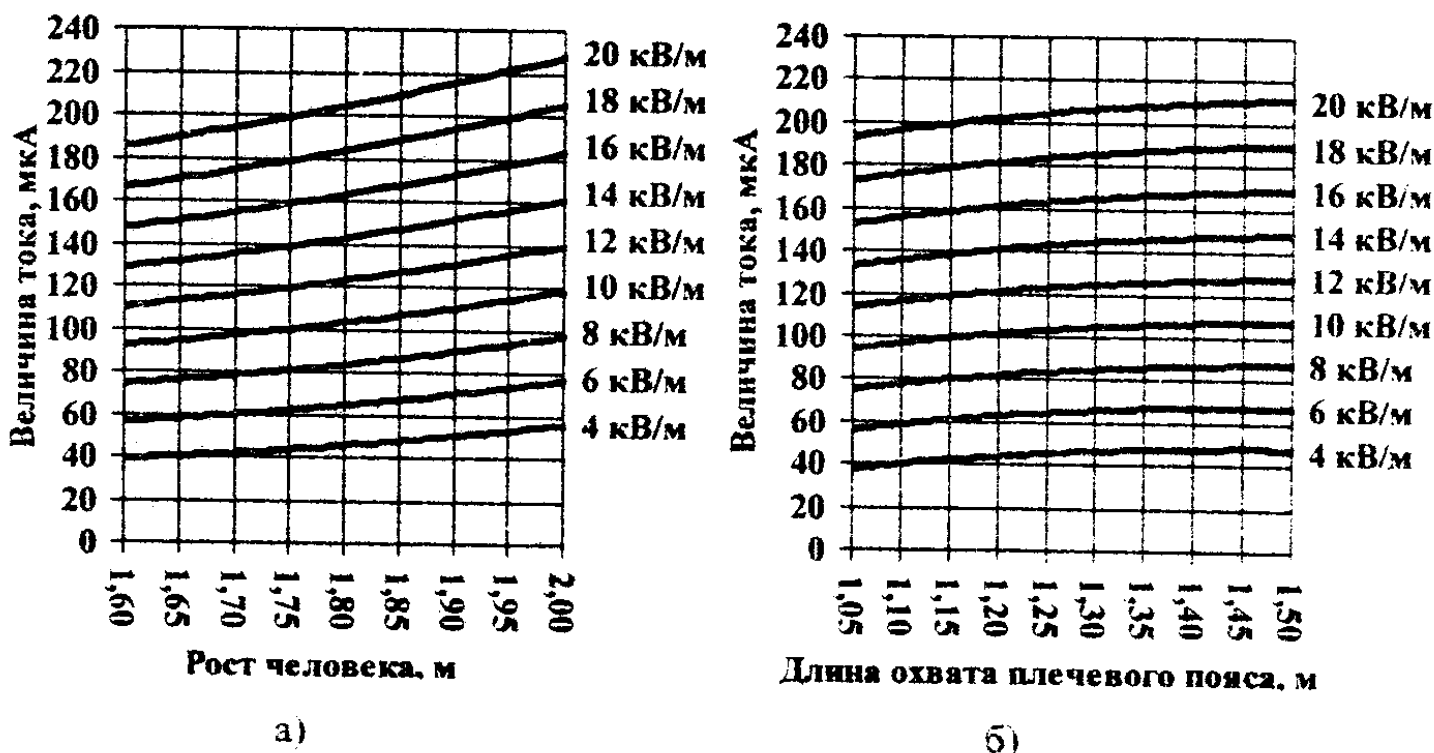


Рис. 6. Зависимости величины тока от антропометрических характеристик человека: а) при длине охвата плечевого пояса 125 см; б) при росте человека 180 см

Анализируя их, можно отметить, что при увеличении роста человека со 160 см до 200 см (при длине охвата плечевого пояса 125 см) практически в 1,5 раза возрастает и величина тока, протекающего через его тело. При увеличении размера плечевого пояса со 105 см до 150 см (при росте человека 180 см) величина тока увеличивается на 15–20 мкА.

Во время проведения работ человек принимает различные положения относительно токоведущих частей и земли, существенно сказывающиеся на величине тока, протекающего через его тело (табл. 6). Как видно из этой таблицы, величина тока может как возрастать (max на 43 %), так и уменьшаться (min на 59 %) по отношению к величине тока, протекающего через тело человека, стоящего вертикально с опущенными руками.

Таблица 6

Величина тока, протекающего через тело человека, занимающего различные положения относительно токоведущих частей и земли

Положение тела человека	Величина тока
Стоя, руки вдоль туловища	I
Стоя, руки вытянуты вперёд	$1,22 \cdot I$
Стоя, руки вытянуты в стороны	$1,34 \cdot I$
Стоя, руки вытянуты вверх	$1,43 \cdot I$
Согнувшись	$0,64 \cdot I$
Сидя	$0,41 \cdot I$
Сидя, руки вперёд	$0,51 \cdot I$
Сидя, руки в стороны	$0,61 \cdot I$

При разработке действующих нормативов распределение наведённых токов по различным участкам тела человека считалось равномерным. Выполненные нами исследования это положение не подтверждают (табл. 7).

Таблица 7

Распределение тока по различным участкам тела человека

Часть тела	Процентное соотношение
Голова шея, плечи	~ 60 %
Торс со стороны живота	~ 18 %
Торс со стороны спины	~ 18 %
Ноги	~ 4 %

Данные табл.7 свидетельствуют о справедливости гипотезы о неравномерном распределении наведённых токов по различным участкам тела человека. Подобная неравномерность приводит к неодинаковой плотности тока протекающего через тело человека, что не учитывается действующими в настоящее время нормативными актами. Кроме того, полученные результаты дополнительно подтверждают целесообразность разработки нормативных

значений, основанных на измерении тока, протекающего через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения.

Основываясь на результатах исследований, выполненных специалистами Ленинградского научно-исследовательского института охраны труда, в качестве предельно допустимого уровня (ПДУ) тока, протекающего через тело человека, находящегося вблизи ЭУ СВН, можно предложить величину в 50 мкА, соответствующую напряжённости электрического поля $E=5$ кВ/м. В табл. 8 приведены значения предельно допустимого времени пребывания в ЭП ПЧ при данном уровне тока, протекающего через тело человека.

Таблица 8

Предельно допустимые уровни времени пребывания в ЭП ПЧ

Величина тока, мкА	До 50 включительно	Свыше 50 до 200 включительно	Свыше 200 до 250 включительно	Свыше 250
Предельно допустимое время пребывания	8 часов	$T=(500/I)-2$ где T в часах; I в мкА	10 минут	Без средств защиты не допустимо

Измерение дозы воздействия электрического поля на организм человека предполагается производить путём оценки приведённого времени. Под приведённым временем понимается время нахождения персонала в ЭП ПЧ, эквивалентное по своему биологическому эффекту пребыванию человека в течение 8 часов при уровне тока, протекающего через его тело, в 50 мкА, то есть человек, подверженный воздействию ЭП ПЧ, может работать до тех пор, пока будет выполняться условие:

$$T_{\text{пр}} = 8 \cdot \left(\frac{t_{I1}}{T_{\text{доп.}(I1)}} + \frac{t_{I2}}{T_{\text{доп.}(I2)}} + \dots + \frac{t_{In}}{T_{\text{доп.}(In)}} \right) \leq 8\text{ч}, \quad (11)$$

где t_{In} – время пребывания персонала при данном уровне тока, протекающего через тело человека;

$T_{\text{доп.}(In)}$ – предельно допустимое время пребывания при данном уровне тока, протекающего через тело человека (табл. 8);

$T_{\text{пр}}$ – приведённое время.

На рис. 7 приведена разработанная структурная схема устройства, реализующего предложенную методику контроля уровня воздействия ЭП ПЧ на организм человека. В структурной схеме приняты следующие обозначения: ДТ – датчик тока; КПиУС – канал передачи и усиления сигнала; БП – блок преобразования; БС – блок суммирования; БВ – блок вычисления предельно допустимого времени при данном уровне тока, протекающего через тело человека; ПЭ №1 – пороговый элемент для запрета вычисления приведённого времени при уровне тока меньше 50 мкА; ПЭ №2 – при уровне тока более

250 мкА разрешает действие звуковой сигнализации; ПЭ №3 – как только $T_{пр}$ становится равным 8 часам, разрешается действие звуковой сигнализации; БВ – блок вычисления приведённого времени; ЗИ – знакосинтезирующий индикатор; БЗС – блок звуковой сигнализации.

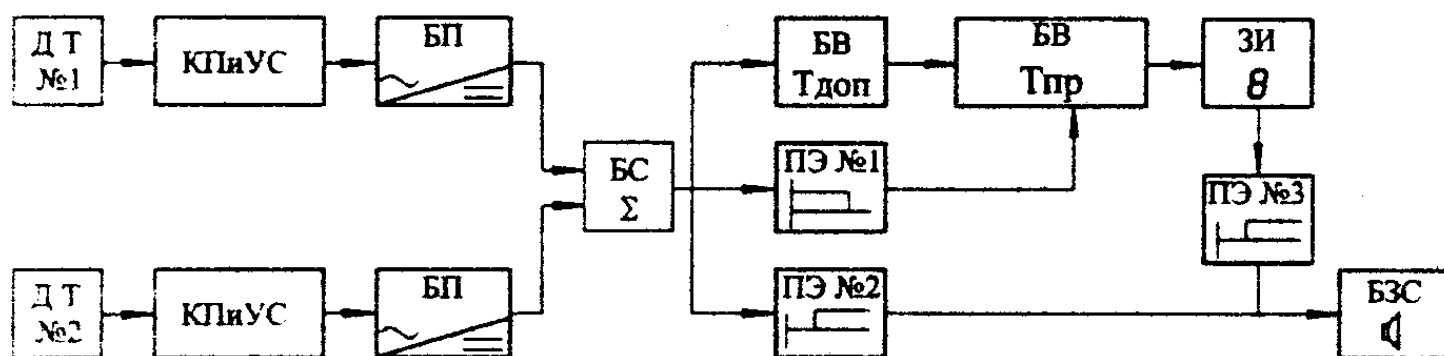


Рис. 7. Структурная схема устройства для индивидуального учёта уровня воздействия ЭП ПЧ на организм человека

При проведении работ человек может находиться в движении, поэтому одна из его ног в некоторые моменты времени не имеет непосредственный контакт с землёй. При этом весь ток, как показывают экспериментальные исследования, проходит через другую ногу, имеющую в данный момент контакт с землёй. Следовательно, необходимо предусмотреть установку двух датчиков тока на обеих ногах человека.

В качестве предварительного способа контроля предлагается использование номограммы для определения величины ожидаемого тока от напряжённости неискаженного телом человека электрического поля, измеренной на уровне 1,8 м от земли, роста человека и длины охвата плечевого пояса, которая была построена на основе полученного регрессионного уравнения (10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, на основе математического моделирования с применением теории планирования эксперимента, теории отсеивающего эксперимента и теоретических расчётов, решена научно-техническая задача обоснования выбора величины тока, протекающего через тело человека, находящегося вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения, в качестве критерия нормирования электрического поля промышленной частоты, имеющая существенное значение при решении вопросов охраны труда персонала, занятого обслуживанием указанных электроустановок.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты:

1. Установлено, что электромагнитное излучение, обусловленное явлением коронного разряда, имеет широкий спектральный состав от 50 кГц до 100 МГц. Впервые получены данные напряжённости электрического и магнитного поля на уровне 1,8 м от земли, непосредственно на ОРУ 500 кВ.

Наибольшая интенсивность электрического поля наблюдается на частотах: 0,01 МГц – $E=17,8$ мВ/м; 0,15 МГц – $E=35,48$ мВ/м; 0,25 МГц – $E=10,59$ мВ/м; 0,4 МГц – $E=37,58$ мВ/м; 0,5 МГц – $E=17,8$ мВ/м; 30 МГц – $E=1$ мВ/м; 45 МГц – $E=0,6$ мВ/м. Наибольшая интенсивность магнитного поля: 0,01 МГц – $H=47,21$ мкА/м; 0,15 МГц – $H=94,11$ мкА/м; 0,4 МГц – $H=99,68$ мкА/м; 0,5 МГц – $H=47,21$ мкА/м.

2. На основе теории планирования эксперимента выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на величину тока, протекающего через тело человека. Этими факторами являются: напряжённость неискажённого электрического поля измеренная на уровне 1,8 метра от земли; рост человека; длина охвата его плечевого пояса. С учётом этого установлено, что ток, протекающий через тело человека, наиболее точно определяется с помощью регрессионного уравнения второго порядка.
3. Экспериментально установлено распределение наведённых токов по различным участкам тела человека, при этом следует отметить, что до 60 % тока, протекающего через тело человека, индуцируется на голове, шее и плечах человека; до 36 % на туловище, а 4 % на ногах человека.
4. Показано, что положение тела человека относительно токоведущих частей и земли существенно влияет на величину тока, протекающего через него в землю. Наводимый электрический ток в теле человека, экспонированном в электрическое поле, возрастает до 22 % при подъеме рук на уровень плеч по сравнению с положением с опущенными руками.
5. Разработан проект общего технического регламента, устанавливающего время пребывания персонала вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения в зависимости от величины тока, протекающего через тело человека.
6. Предложена структурная схема прибора индивидуального учёта уровня воздействия электрического поля промышленной частоты на организм человека. Обосновано место установки датчиков тока.
7. Построена номограмма для определения величины ожидаемого тока, протекающего через тело человека, от напряжённости неискажённого электрического поля, измеренной на уровне 1,8 м от земли, роста человека и длины охвата плечевого пояса.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Влияние изменения температуры на напряжённость электрического поля под ВЛ-500 кВ / М.В. Гареев, И.С. Окраинская, А.Б. Тряпицын, А.В. Коржов // Вклад молодых учёных и специалистов в развитие науки и культуры г. Челябинска. Состояние. Проблемы. Перспективы: Сборник научных статей. – Челябинск: Изд-во УрГАФК, 2000. – Ч.2. – С.73 – 74.

2. Электромагнитное излучение ВЛ-500 кВ / М.В. Гареев, И.С. Окраинская, А.Б. Тряпицын, А.В. Коржов // Вклад молодых учёных и специалистов в развитие науки и культуры г.Челябинска. Состояние. Проблемы. Перспективы: Сборник научных статей. – Челябинск: Изд-во УрГАФК, 2000. – Ч.2. – С.74 – 75.
3. Коржов А.В. Экспериментальное исследование токов, протекающих через тело человека вблизи электроустановок 500 кВ // Электробезопасность. – 2000. – №4. – С.18 – 23.
4. Электромагнитные излучения электроустановок сверхвысокого напряжения / А.И. Сидоров, А.В. Коржов, И.С. Окраинская, М.В. Гареев // Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов: Сборник докладов шестой российской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во ВИТУ, 2000. – С.151 – 153.
5. Коржов А.В. Окраинская И.С. Основные аспекты, подлежащие учёту при разработке методики исследования электромагнитных полей электроустановок сверхвысокого напряжения // Наука – Производство – Технология – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2001. – Т.3. – С.105 – 106.
6. Электротехнические характеристики тела человека с учётом его антропометрических данных / А.А. Симакова, А.И. Сидоров, А.Л. Шестаков, И.С. Окраинская, А.В. Коржов // Электробезопасность. – 2001. – №1. – С.37 – 39.
7. Коржов А.В. Нормирование электрических полей промышленной частоты // Электробезопасность. – 2001. – №2-3. – С.20 – 26.
8. Коржов А.В., Горбунов Н.И. Выявление факторов, определяющих величину тока утечки, протекающего через тело человека обусловленного влиянием электрического поля промышленной частоты // Электробезопасность. – 2002. – №2-3. – С.26 – 31.
9. Коржов А.В. Анализ токов смещения, протекающих через тело человека, находящегося под ВЛ-500 кВ // Наука – Производство – Технология – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2002. – Т.2. – С.33.
10. Коржов А.В. Экспериментальное исследование распределения токов по участкам тела человека // Сборник докладов седьмой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости. – Санкт-Петербург: Изд-во ВИТУ, 2002. – С.521 – 522.
11. Коржов А.В., Сидоров А.И., Окраинская И.С. К вопросу о выборе критерия нормирования электрического поля промышленной частоты // Сборник докладов седьмой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости. – Санкт-Петербург: Изд-во ВИТУ, 2002. – С.518 – 521.

12. Коржов А.В. Исследование электромагнитного излучения электроустановок сверхвысокого напряжения как фактора, влияющего на условия труда // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых учёных вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С.86 – 87.
13. Сидоров А.И., Окраинская И.С., Коржов А.В. Проект общего технического регламента. Электрические поля промышленной частоты. Предельно допустимые уровни // Охрана труда в электроэнергетике – 2003: Материалы отраслевого семинара. – М., 2003.
14. Коржов А.В. Определение активной составляющей тока, протекающего через тело человека, находящегося в зоне действия электроустановок сверхвысокого напряжения // Наука – Производство – Технология – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: В 5 т. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2003. – Т. 4. – С.47 – 49.
15. Коржов А.В. Определение ёмкостной составляющей тока, протекающего через тело человека, находящегося в зоне действия электроустановок сверхвысокого напряжения // Наука – Производство – Технология – Экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: В 5 т. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2003. – Т. 5. – С.151 – 152.