

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения

**А. Р. Закирова**

**ЗАЩИТА  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА  
ОТ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Монография

Екатеринбург  
УрГУПС  
2018

УДК 621.31  
3-18

**Закирова, А.Р.**

3-18 Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей : монография / А. Р. Закирова. – Екатеринбург : УрГУПС, 2018. – 171, [1] с.

ISBN 978-5-94614-428-5

Электротехнический персонал при эксплуатации электроустановок находится под воздействием электромагнитных полей (ЭМП) различного рода тока и частоты переменного тока. Установленные в 1980-х гг. уровни ЭМП для промышленной частоты и отсутствие норм для ЭМП до 10 кГц (кроме 50 Гц и 10 кГц) повысили актуальность исследований по установлению предельно допустимых уровней этих воздействий на человека.

В монографии представлены обобщенные результаты исследований электромагнитных полей на рабочих местах персонала электроустановок тягового электроснабжения. Описаны источники вредного воздействия ЭМП на электротехнический персонал и гармонический состав выпрямленного напряжения и тока на тяговых подстанциях, являющийся причиной наличия в окружающем пространстве спектра высших гармонических составляющих. Теоретически и экспериментально исследованы уровни напряженности электромагнитных полей на рабочих местах персонала в РУ-3,3 кВ. Сформулировано понятие «доза ЭМП низкочастотного диапазона» на основе использования вектора Пойнтинга в качестве параметра ЭМП. Предложены разработанные в УрГУПС методы и средства защиты электротехнического персонала от воздействия ЭМП низкочастотного диапазона до 10 кГц.

Монография адресована аспирантам и преподавателям, изучающим проблемы безопасности персонала электроустановок тягового электроснабжения, студентам направлений «Наземные транспортно-технологические комплексы», «Техносферная безопасность», научным работникам, руководителям и специалистам в области эксплуатации низковольтных и высоковольтных электроустановок.

УДК 621.31

*Издано по решению редакционно-издательского совета УрГУПС*

*Автор:*

А. Р. Закирова, канд. техн. наук, УрГУПС

*Рецензенты:*

К. Б. Кузнецов, профессор, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки, академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

А. И. Сидоров, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности», профессор, д-р техн. наук; Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск

ISBN 978-5-94614-428-5

© Закирова А. Р., 2018

© Оформление. Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), 2018

Federal Agency of Railway Transport  
Ural State University of Railway Transport

**A. R. Zakirova**

**ELECTROTECHNICAL PERSONNEL  
PROTECTION FROM DAMAGE EFFECT  
OF ELECTROMAGNETIC FIELD**

Monograph

Yekaterinburg  
USURT  
2018

## **Abstract**

During operating electrical installations electrotechnical personnel is under electromagnetic field (EMF) effect of different currents and alternating current frequencies. Stated in 1980<sup>th</sup> levels of EMF for commercial frequency and lack of regulations for EMF up to 10 kHz increased relevance of research on the establishment of the maximum permissible levels of these effects on humans.

There are generalized results of research on the electromagnetic fields in workplaces of electric installation of traction power supply personnel represented in the monograph.

The peculiarity of electrical installation (EI) of traction power supply in comparison with EI of three-phase power supply system is in occurrence of uncompensated magnetic field of single-phase traction networks. There are sources of damage effects of EMF on electrotechnical personnel and harmonic composition of rectified voltage and current in traction substations which is the cause of presence of a spectrum of higher harmonic components in the environment described here. Levels of electromagnetic field intensity at workplaces of personnel in RU-3,3 kilovolt are theoretically and experimentally researched. Based on the use of the Poynting vector as an EMF parameter such concept as «dose of EMF low-frequency range» is formulated. Methods and means of electrotechnical personnel protection from the influence of EMF low-frequency range up to 10 kHz developed in USURT are proposed.

The monograph is addressed to postgraduate students and teachers, who study the problems of electrical installation of traction power supply personnel security, students of areas of study «Ground transport-technological complexes», «Technospheric safety», scientists, executives and specialists in the field of operation of low-voltage and high-voltage electrical installations.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	9
<b>Глава 1. ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМП НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ</b> .....	11
Проблемы сочетанного воздействия на человека электрической и магнитной составляющих ЭМП .....	11
Расчет низкочастотных ЭМП, проникающих внутрь биологических тел .....	14
Уточненная методика расчета уровня электромагнитных полей в однородном теле человека .....	24
Вероятностный метод расчета энергии излучения низкочастотного ЭМП вблизи электроустановок, действующего на обслуживающий персонал .....	29
Проблемы воздействия ЭМП в низкочастотном диапазоне от переменного тока разной частоты на биологические объекты .....	36
Краткий обзор экспериментальных исследований электромагнитных полей на биологических объектах .....	40
Краткий анализ публикаций, касающихся влияния магнитных полей низкочастотного диапазона на биологические объекты .....	41
Краткий анализ публикаций, касающихся влияния электрических полей низкочастотного диапазона на биологические объекты .....	45
Устройство для создания переменного и электрического полей низкочастотного диапазона для исследования воздействия ЭМП на биологические объекты .....	51
Экспериментальные исследования магнитных полей разной частоты, искусственно созданных на экспериментальной установке .....	54
Модель проведения экспериментальных исследований электрических и магнитных полей частотой до 1 кГц .....	54
Результаты полученных уровней напряженностей магнитных полей 50 Гц в зависимости от величины переменного тока .....	56

Результаты полученных уровней напряженностей магнитных полей 100 Гц в зависимости от величины переменного тока .....	58
Результаты полученных уровней напряженностей магнитных полей в частотном диапазоне до 1 кГц в зависимости от величины переменного тока .....	60
Результаты полученных уровней напряженностей электрического поля 50 Гц в зависимости от величины напряжения .....	63
Результаты проведенных исследований воздействия магнитных полей 50 Гц на биологические объекты с помощью экспериментальной установки .....	64

**Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЧАСТОТОЙ ДО 10 кГц, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....**

Источники электромагнитных полей, вредно воздействующих на электротехнический персонал .....	73
Гармонический состав выпрямленного напряжения на тяговых подстанциях .....	76
Расчет электрического поля длинных разноименно заряженных параллельных осей без учета потенциала земли .....	82
Расчет электрического поля длинных разноименно заряженных параллельных осей с учетом потенциала земли .....	85
Гармонический состав выпрямленного тока на тяговых подстанциях .....	87
Расчет магнитного поля длинных разноименно заряженных параллельных осей без учета потенциала земли .....	89
Расчет магнитного поля длинных разноименно заряженных параллельных осей с учетом потенциала земли .....	91

**Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЧАСТОТОЙ ДО 10 кГц, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ .....**

94

Требования к проведению контроля уровней электромагнитных полей на рабочих местах . . . . .	94
Измерения электромагнитных полей от переменной составляющей выпрямленного напряжения и тока в ячейке выключателя АБ фидера № 11 . . . . .	97
Измерения электромагнитных полей под шинным мостом от выключателя автоматического быстродействующего до ячеек РУ-3,3 кВ . . . . .	101
Измерения электрических и магнитных полей под шинным мостом вблизи ячеек выключателя АБ . . . . .	104
Измерения магнитных полей у уравнительного реактора . . . . .	108
Измерения электромагнитных полей под отходящими шинами выпрямителя к тяговому трансформатору . . . . .	109
Организационно-технические мероприятия для защиты электротехнического персонала от вредного воздействия магнитного поля . . . . .	112
Сравнение теоретических и экспериментальных исследований ЭМП вблизи электроустановок в частотном диапазоне до 1 кГц . . . . .	113

**Глава 4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ . . . . .**

Нормирование ЭМП частотного диапазона до 30 кГц в производственных условиях в России . . . . .	115
Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля . . . . .	115
Предельно допустимые уровни напряженности периодического магнитного поля 50 Гц . . . . .	116
Предельно допустимые уровни напряженности электрического поля 50 Гц . . . . .	118
Предельно допустимые уровни электромагнитных полей диапазона частот 10–30 кГц . . . . .	118
Нормирование ЭМП частотного диапазона до 10 МГц в производственных условиях в странах ЕС . . . . .	120
Рабочие уровни (профессиональное воздействие производственного фактора) . . . . .	121
Методические рекомендации к оценке ЭМП частотой от 50 Гц до 1 кГц в производственных условиях на основе существующей практики нормирования ЭМП в России и странах Евросоюза . . . . .	124

Предельно безопасные уровни энергии излучения ЭП и МП ПЧ .....	125
ПБУ дозы ЭМП ПЧ .....	126
ПБУ энергии излучения промышленной частоты электромагнитных полей в диапазоне частот ≥ 50–1000 Гц .....	127
ПБУ спектра высших гармонических составляющих напряженностей электрических и магнитных полей от 50 Гц до 1кГц .....	130
ПБУ дозы ЭМП от 50 до 1000 Гц .....	131

**Глава 5. СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ  
ПЕРСОНАЛА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ** .....

Принципы системного подхода к защите персонала от вредного воздействия параметров ЭМП .....	134
Организационные мероприятия .....	135
Инженерно-технические мероприятия .....	135
Применение специальной экранирующей одежды .....	135
Лечебно-профилактические мероприятия .....	136
Системы устройств для защиты электротехнического персонала от электромагнитных полей .....	137
Способ контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока и устройства для его осуществления .....	137
Способ контроля напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока и устройство для его осуществления .....	139
Устройство для контроля напряженности магнитных полей переменного и постоянного токов .....	141
Устройство для измерения плотности потока энергии электромагнитного поля .....	143

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** .....

**ЛИТЕРАТУРА** .....

**Приложение 1** .....

**Приложение 2** .....

# ВВЕДЕНИЕ

Персонал, обслуживающий электроустановки тягового электрооборудования, подвергается воздействию множества вредных факторов производственной среды, в первую очередь воздействию электрического (ЭП) и магнитного (МП) полей.

Проведенные отечественными и зарубежными специалистами физиологические исследования свидетельствуют о вредном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) низкой частоты (НЧ) на организм человека; в результате такого воздействия возникают заболевания сердечно-сосудистой, нервной, эндокринной, иммунной систем, а также лейкемии, опухоли головного мозга.

Исследование статистики обращений с заболеваниями железнодорожников на Западно-Сибирской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» показало, что за 25 лет количество обращений железнодорожников в больничные учреждения по некоторым заболеваниям существенно возросло. По сравнению с контрольными группами городских жителей: по заболеваниям злокачественных опухолей – более чем в два раза, эндокринной системы – в четыре, системы кровообращения – в четыре [1]. Можно предполагать, что рост обращений с заболеваниями связан с множеством причин, однако здесь нельзя исключать вредное воздействие ЭМП.

Результаты статистического исследования данных о заболеваниях электротехнического персонала на полигоне Свердловской железной дороги свидетельствуют, что электротехнический персонал (персонал локомотивных бригад) обращается в медицинские учреждения с заболеваниями нервной и эндокринной систем, системы кровообращения и крови, новообразованиями от 5,8 до 10,7 раз чаще, чем персонал не электротехнический (персонал локомотивных бригад тепловозов на участках без электрической тяги) [2]. С большой степенью вероятности это связано и с вредным воздействием ЭМП спектра частот выпрямленного тока и напряжения.

Анализ заболеваемости работников различных структурных подразделений железнодорожного транспорта, которые в той и иной степени подвергаются воздействию переменных магнитных полей от электротяги, показал, что машинисты локомотивов с электрической тягой чаще обращаются с заболеваниями, чем машинисты мотор-вагонных секций и тепловозов [3]. Уровень обращений

с ишемической болезнью сердца среди машинистов электровозов составляет 12,4 на 1000 чел./г., а машинистов мотор-вагонных секций — 6,2 на 1000. Эти результаты позволяют рассматривать присутствующие в кабине электровоза переменные магнитные поля как фактор дополнительного риска возникновения заболеваний сердечно-сосудистой системы.

На персонал, находящийся в зоне воздействия ЭМП постоянного и однофазного переменного тока тяговой сети, одновременно действуют высокие уровни напряженностей ЭМП со спектром высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока до 1 кГц, предельно допустимые уровни (ПДУ) которых до сих пор не нормируются (кроме значений исключительно для частоты 50 Гц).

К настоящему времени в научных исследованиях по воздействию ЭМП на персонал тягового электроснабжения уровни напряженности ЭМП оцениваются только методами расчета и без учета высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока до 1 кГц.

Анализ нормирования ЭМП в частотном диапазоне до 10 кГц в разных странах показывает, что аддитивное воздействие двух факторов электрического и магнитного полей не рассматривается, хотя переменные электрические и магнитные поля не могут существовать по отдельности — изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое порождает магнитное.

Необходимо не только проводить экспериментальные исследования на биологических объектах для определения вредных и опасных уровней напряженности ЭП и МП переменного тока в зависимости от частоты и продолжительности воздействия, но и разработать средства и методы защиты персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия ЭМП.

# Глава 1

## ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМП НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

### Проблемы сочетанного воздействия на человека электрической и магнитной составляющих ЭМП

В 60-х гг. прошлого века считалось, что слабые низкочастотные ЭМП нетепловой интенсивности безопасны для человека, а биологическое действие данных полей казалось невозможным с точки зрения физики. Накопленные со временем опытные данные показали потенциальную опасность ЭМП и излучений, часто имеющих скрытый характер действия [4, 5].

Современная электромагнитная обстановка характеризуется все большей сложностью за счет расширения рабочих частотных диапазонов и появления новых режимов генерации ЭМП [6]. На человека одновременно воздействуют высокие уровни ЭМП и сравнительно малые интенсивности техногенных ЭМП. Источники ЭМП различаются по многим параметрам: частота переменного ЭМП, энергия излучения и его продолжительность, режим работы источника. Это осложняет и возможность адекватной оценки степени их влияния на человека, и возможность их оптимальной классификации, необходимой для определения путей и методов оценки ЭМП.

Для решения вопросов электромагнитной безопасности человека [7] и окружающей среды усилия специалистов разных государств объединены в рамках международных организаций – Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (МКЗНИ) и Международной организации труда (МОТ), которые разрабатывают программы и руководства по электромагнитной безопасности. Национальные регламенты ЭМП разных стран иногда очень сильно отличаются от международных рекомендаций. Основная причина

таких несовпадений заключается в разнице критериев оценки порога вредного действия фактора. В последнее десятилетие за рубежом ужесточаются ПДУ техногенных ЭМП в связи с международной оценкой отдельных частотных диапазонов и режимов генерации ЭМП как потенциально опасных.

Гигиеническое нормирование ЭМП в нашей стране осуществляется для двух категорий: лиц, профессионально связанных с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП, и лиц, профессионально не связанных с воздействием ЭМП, в том числе населения [8].

В России гигиеническая регламентация производственных воздействий ЭМП промышленной частоты (ПЧ) для лиц, профессионально связанных с эксплуатацией и обслуживанием источников ЭМП, проводится по СанПиН 2.2.4.3359–16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [13].

В ГУ НИИ медицины труда РАМН разработана и испытана система гигиенической оценки интенсивностно-временных параметров воздействия ЭП и МП на рабочих местах персонала открытых распределительных устройств (ОРУ) и воздушных линий (ВЛ) [9], позволяющая оценивать степень экспозиции различных категорий работающих к фактору и сопоставлять эти значения с соответствующими гигиеническими регламентами. Система гигиенической оценки уровней ЭП и МП ПЧ в ОРУ сверхвысокого напряжения (СВН) строится на основании измерений уровней электрической и магнитной составляющих на всех возможных рабочих местах персонала (во всех ячейках оборудования), данных о характере профессиональной деятельности отдельных групп работающих и хронометражных исследований.

На основании результатов измерений строится графическое изображение (гистограмма) распределения уровней ЭП и МП (для ОРУ и ВЛ соответственно), рассчитываются средневзвешенные значения уровней ЭП и МП ПЧ ( $E$  и  $H$ ) для каждого электросетевого объекта.

Экспозиционные нагрузки как основной критерий степени воздействия фактора на работающих для соответствующих профессиональных групп определяются на основании интенсивностных и интенсивностно-временных характеристик воздействия ЭП и МП ПЧ. Для этого пересчитывают полученные средневзвешенные значения  $E$  и  $H$  в условно высчитываемые экспозиционные нагрузки: за рабочую смену и за год с учетом числа рабочих смен в год для каждой профессиональной группы. Полученные данные пересчитывались

на условно усредненную для каждой профессиональной группы нагрузку за сутки и в час. Расчеты производятся по формулам [9]

$$\text{ЭН}_H = \frac{H_{\text{средневзвешен}} \cdot I_{\text{max}} / I_i \cdot T \cdot N}{365 \cdot 24}, \quad (1.1)$$

$$\text{ЭН}_E = \frac{E_{\text{средневзвешен}} \cdot U_{\text{max}} / U_i \cdot T \cdot N}{365 \cdot 24}, \quad (1.2)$$

где  $\text{ЭН}_H$  – экспозиционная нагрузка по МП;  $\text{ЭН}_E$  – экспозиционная нагрузка по ЭП;  $H_{\text{средневзвешен}}$  – средневзвешенное значение напряженности МП на ОРУ или в зоне ВЛ;  $E_{\text{средневзвешен}}$  – средневзвешенное значение напряженности ЭП на ОРУ или в зоне ВЛ;  $T$  – среднее время работы за смену;  $N$  – число рабочих смен в году; 24 – кол-во часов в сутки; 365 – кол-во дней в году;  $I_{\text{max}}/I_i$  – отношение максимального рабочего тока к току в электроустановке при измерениях МП;  $U_{\text{max}}/U_i$  – отношение максимального рабочего напряжения к напряжению в электроустановке при измерениях ЭП.

Расчетные значения экспозиционных нагрузок для электротехнического персонала, обслуживающего подстанции (ПС) и ВЛ 500 кВ трехфазного тока, приведены в таблице 1.1 [9].

Таблица 1.1

Расчетные значения экспозиционных нагрузок по электрической и магнитной составляющим ЭМП ПЧ различных профессиональных групп персонала, обслуживающего ПС и ВЛ 500 кВ

Группа	Параметр	Средневзвешенное	Экспозиционная нагрузка			
			за смену	за год	на сутки за год	на час за год
Линейная служба	$E$ , кВ/м	8,1	60,6	10718,4	29,4	1,22
	$H$ , А/м	14,8	103,6	18026,4	49,39	2,06
Ремонтная служба ПС	$E$ , кВ/м	10,7	64,2	11170,8	30,6	1,27
	$H$ , А/м	18,6	111,6	19418,4	53,2	2,21
Служба релейной защиты	$E$ , кВ/м	10,7	26,75	4654,5	12,75	0,53
	$H$ , А/м	18,6	46,5	8091,0	22,17	0,92
Оперативно-диспетчерский персонал	$E$ , кВ/м	10,7	16,5	2921,1	8,0	0,33
	$H$ , А/м	18,6	27,9	5077,8	13,91	0,58

Сопоставление полученных данных с аналогичным расчетом для условий работы при соблюдении нормативных требований для всего рабочего дня – для ЭП при уровнях 5 кВ/м (по 8 ч в день), для МП – 80 А/м показывает, что условная экспозиция по ЭП ПЧ на час за год должна составлять не более 1,02 кВ/м, для трехфазных ЭУ по магнитной составляющей она должна быть не более 16,4 А/м [9].

Проведенные измерения и расчеты для трехфазных ЭУ показывают, что у наиболее экспонированных к ЭМП ПЧ групп персонала – линейной службы и ремонтной службы ПС – отмечается приблизительно 20%-ное превышение экспозиционных нагрузок к ЭП по сравнению с нормативными значениями; по магнитной составляющей уровни фактора на рабочих местах соответствуют нормативным требованиям как по средневзвешенным значениям, так и по экспозиционным нагрузкам, что характерно для трехфазных ЭУ.

Впервые предложена методика, позволяющая проводить расчеты экспозиционных нагрузок для электротехнического персонала, обслуживающего ПС и ВЛ 500 кВ трехфазного тока. Подобных методик в России, учитывающих фактическое время воздействия электрических и магнитных полей и их экспозиционных нагрузок на персонал, что позволит минимизировать время воздействия данных производственных факторов, нет [9]. Итак, несомненна перспективность метода условной дозиметрии ЭМП ПЧ для оценки степени их воздействия на рабочих местах персонала электросетевых объектов. Однако в предложенной методике не учитываются физические свойства электромагнитных волн согласно теории Максвелла, поэтому предлагается усовершенствовать метод оценки ЭМП с последующей оценкой не только экспозиционных нагрузок по магнитной и электрической составляющих ЭМП, но и их совместного воздействия с переходом оценки дозы низкочастотного ЭМП, которая позволяет учитывать энергию излучения ЭМП, поглощенную человеком (персоналом) за определенный период, площадь поверхности тела человека и (или) массу, проводимость ткани.

## **Расчет низкочастотных ЭМП, проникающих внутрь биологических тел**

Простыми моделями тел являются модели однородных эллипсоидов различной симметрии. Можно использовать модель двухосного или трехосного эллипсоида [10].

При аппроксимации тела двухосным эллипсоидом (эллипсоидом вращения), у которого оси  $b$  и  $c$  предполагаются равными, среднее сечение эллипсоида, перпендикулярное длинной оси, является кругом, радиус которого

$$b = c = \left[ \frac{3m}{4\pi \cdot a \cdot \rho} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.3)$$

При аппроксимации тела трехосным эллипсоидом предполагается, что отношение  $b/c$  равно отношению максимальных и минимальных толщин тела человека, измеренных в среднем сечении тела перпендикулярно его длинной оси, а абсолютные значения  $b$  и  $c$  определяются из условия равенства объема эллипсоида

$$V = \frac{4\pi \cdot a \cdot b \cdot c}{3}. \quad (1.4)$$

Объем моделируемого тела, пересчитанного из его массы  $m$  через плотность тканей  $\rho$ , которая в расчетах принимается равной  $10^{-3} \text{ м}^{-3}/\text{кг}$ :

$$V = \frac{m}{\rho}.$$

В случае аппроксимации тела шаром ( $a = b = c$ ), его радиус  $R$  определяется лишь массой тела:

$$R = \left[ \frac{3m}{4\pi \cdot \rho} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (1.5)$$

В соответствии с приведенными соотношениями для стандартного человека, в таблице 1.2 даны параметры сферических и эллипсоидальных моделей стандартного человека из [10].

Таблица 1.2

Параметры сферических и эллипсоидальных моделей стандартного человека

Организм	$m$ , кг	$L$ , м	$R$ , м	Трехосный эллипсоид			двухосный эллипсоид		
				$a$ , м	$b$ , м	$c$ , м	$a$ , м	$b = c$ , м	$a/b$ , м
Человек (мужчина)	70	1,75	0,256	0,875	0,195	0,098	0,875	0,138	6,34

Но этот подход искажает реальные параметры человека, поэтому в дальнейшем предлагается проводить расчет напряженностей полей внутри организмов с помощью использования средней площади тела человека.

Внутреннее электрическое поле  $E_i$  прямо пропорционально внешнему полю  $E_0$ , эти поля связаны между собой через сложную функцию разных параметров системы [10]:

$$E_i = f(\varepsilon, \sigma, \omega, a, b, \delta) E_0, \quad (1.6)$$

в которой параметры, характеризующие материал и форму тела, не разделяются на отдельные сомножители.

При эффективной же экранировке внешнего поля у поверхности тела в области низких частот будет выполняться условие:

$$E_{i,n} \ll E_{e,n}. \quad (1.7)$$

Связь между теми же величинами представляется в виде двух независимых сомножителей:

$$E_i = \frac{K_\phi \cdot E_0}{K_\varepsilon}, \quad (1.8)$$

где  $E_0$  — напряженность электрического поля, В/м;  $K_\phi$  — фактор формы тела человека;  $K_\varepsilon$  — коэффициент экранирования, определенный соотношением

$$K_\varepsilon = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_b}, \quad (1.9)$$

где  $\omega$  — круговая частота ( $2 \cdot \pi \cdot f$ ), задающая число полных колебаний в единицу времени, равная обратной величине периода колебаний  $T$ , который зависит в низкочастотном диапазоне только от частоты  $f$  и проводимости ткани, так как биологические жидкости в области низких частот и ткани в области крайне низких частот отвечают случаю относительно высоких потерь:  $\operatorname{tg} \delta \geq 1$  (рис. 1.1).

Это происходит из-за перераспределения свободных зарядов в исходно незаряженном теле, определяемых токами, текущими внутри тела под действием поля  $E_i$ .

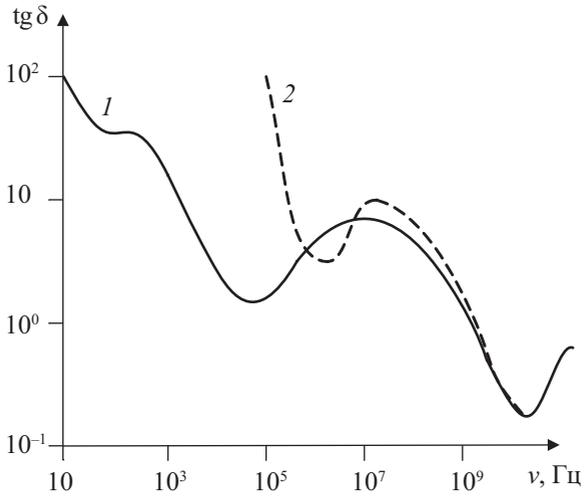


Рис. 1.1. Частотная зависимость тангенса угла потерь для мышечной ткани (1) и крови (2) при 25 °С [4]

На рис. 1.2 приведена зависимость  $K_э$  низкочастотных электрических полей от частоты.

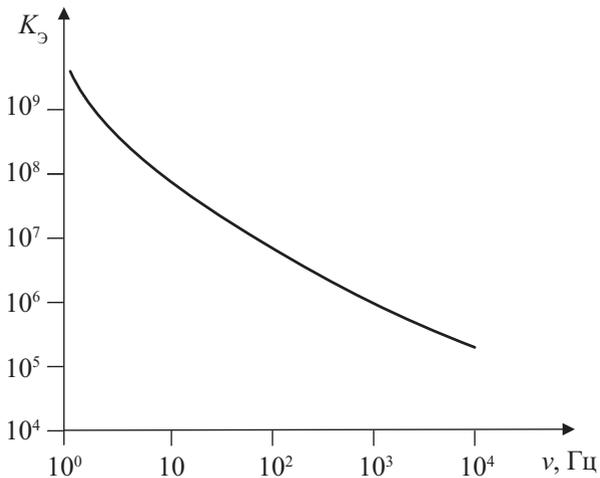


Рис. 1.2. Зависимость коэффициента экранирования низкочастотных электрических полей от частоты для тел, состоящих из изотропной мышечной ткани [4]

В области низких частот имеет место эффективная экранировка внешнего поля, так как коэффициент экранирования максимален. Чем выше частота, тем ниже коэффициент экранирования (обратно пропорциональная зависимость), соответственно, больше напряженность поля внутри тел. На сегодняшний день доказано, что при высоких частотах поле глубже проникает в ткани человека и разрушает жизненно важные органы (рис. 1.2).

Данные по проводимости мышечной и нервной тканей представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Главные значения проводимостей анизотропных тканей в области низких частот

Организм	Объект	Ткань	Частота, Гц	$\sigma^{\parallel}/\sigma^{\perp}$	$\sigma^{\parallel}$ (Ом·м) <sup>-1</sup>	$\sigma^{\perp}$ (Ом·м) <sup>-1</sup>
Человек	Скелетная мышца	Мышечная	0,1–1000	2,8 ± 0,25	0,42 ± 0,02	0,15 ± 0,01

Проводимость мышечной и нервной тканей зависит от ориентации электрического поля относительно вида ткани, соответствующая меньшим проводимостям ткани  $\sigma^{\perp}$  для ориентации поля поперек волокон, и большим значениям проводимости  $\sigma^{\parallel}$  для ориентации поля вдоль волокон; отношения  $\sigma^{\parallel}/\sigma^{\perp}$  рассчитаны с помощью экспериментальных величин и приведены с учетом среднеквадратических погрешностей.

Данные таблицы 1.3 подтверждают, что проводимость нервной и мышечной тканей разная; человек при выполнении необходимой работы не стоит на месте и по необходимости поворачивается и наклоняется, то есть поле может воздействовать как параллельно, так и перпендикулярно, поэтому в дальнейшем при расчетах низкочастотного ЭМП, проникающего внутрь биологических тел, предлагается использовать усредненный показатель проводимости.

Следующий показатель, который необходим для определения, —  $E_i$  — фактор формы ( $K_{\Phi}$ ), который определяет степень ослабления экранирования внешними полями зарядами, индуцированными на поверхности неплоских тел. Такие поля зависят лишь от отношений длин полуосей эллипсоидов и ориентации поля  $E_0$  относительно них.

В случае вытянутого двухосного эллипсоида ( $a > b = c$ ), для которого величины факторов формы при ориентации поля  $E_0$  вдоль

длинной оси эллипсоида и для любого из перпендикулярных ей направлений задаются с помощью следующих соотношений [10]:

$$K_{\text{фл}} = (u^2 - 1)^{-1} \cdot \left[ \frac{u}{2} \ln \frac{u+1}{u-1} - 1 \right]^{-1}, \quad (1.10)$$

$$K_{\text{ф}\perp} = 2(u^2 - 1)^{-1} \cdot \left[ \frac{u^2}{u^2 - 1} - \frac{u}{2} \ln \frac{u+1}{u-1} \right]^{-1}, \quad (1.11)$$

$$u = \frac{\left(\frac{a}{b}\right)}{\left[\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (1.12)$$

С помощью показанных зависимостей и соотношений в рамках двuosных эллипсоидных моделей можно рассчитать различные параметры электрических полей. Расчетные значения  $K_{\text{ф}}$ , отвечающие разным эллипсоидальным моделям, аппроксимирующим тело среднего человека, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Факторы формы эллипсоидальных моделей человека, находящегося в электрическом поле 50 Гц (человек стоит в вертикальном электрическом поле)

	Свободное пространство		Проводящая плоскость	
	$K_{\text{фл}}^*$	$K_{\text{ф}\perp}^{**}$	$K_{\text{ф}}^{***}$	$K_{\text{ф}}^{****}$
Человек	25,1	2,08	72,3	79,0

\* – для вытянутого двuosного эллипсоида при ориентации поля  $E_0$  вдоль длинной оси эллипсоида; \*\* – для вытянутого двuosного эллипсоида при ориентации поля  $E_0$ , перпендикулярного длинной оси эллипсоида; \*\*\* – для двuosного эллипсоида в том случае, когда поле  $E_0$  направлено под углом к его длинной оси; \*\*\*\* – для трехосного эллипсоида.

Из таблицы 1.4 видно, что значения факторов формы и значения напряженностей полей в зависимости от ориентации внешнего поля относительно тел, находящихся в свободном пространстве, могут изменяться до десяти раз; значит, необходимы более точные расчеты полей.

Результаты модельных расчетов напряженностей электрических полей внутри тел в зависимости от разных моделей при  $\sigma^+$  приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Напряженности электрических полей внутри тел в зависимости от факторов формы и частоты при  $\sigma^+$ \*

Частота, Гц	Организм	Свободное пространство		Проводящая плоскость	
		$K_{\text{фл}}^*$	$K_{\text{фл}}^{**}$	$K_{\text{ф}}^{***}$	$K_{\text{ф}}^{****}$
	$K_{\sigma} \cdot 10^4$	25,1	2,08	72,3	79
		$E, \text{В/м}$			
50	5,4	2,3	0,2	6,7	7,3
100	2,70	4,7	0,4	13,4	14,6
200	1,35	9,3	0,8	26,8	29,3
300	0,9	14,0	1,2	40,2	43,9
400	0,68	18,6	1,5	53,6	58,5
500	0,54	23,3	1,9	67,0	73,2
600	0,45	27,9	2,3	80,4	87,8
700	0,39	32,6	2,7	93,8	102,4
800	0,33	37,2	3,1	107,2	117,1
900	0,30	41,9	3,5	120,5	131,7
1000	0,27	46,5	3,9	133,9	146,4
10000	0,02	581,3	48,2	1674,3	1829,4

\* Обозначения – такие же, как в таблице 1.4.

Как показывает результат расчета напряженностей электрических полей внутри тел, поле меняется в зависимости от коэффициента экранирования и факторов формы: минимальные значения получены при выборе в качестве модели расчета – вытянутый двухосный эллипсоид при ориентации поля  $E_0$ , перпендикулярного длинной оси эллипсоида, и частоте 50 Гц, а максимальные поля зафиксированы при выборе трехосного эллипсоида и частоты 10 кГц. С увеличением частоты напряженность электрического поля индуцируется в тканях человека все больше и больше.

Результаты модельных расчетов напряженностей электрических полей внутри тел в зависимости от разных моделей при  $\sigma^{\parallel}$  приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Напряженности электрических полей внутри биологических тел в зависимости от факторов формы и частоты при  $\sigma^{\parallel}$ \*

Частота, Гц	Организм	Свободное пространство		Проводящая плоскость	
	человек	$K_{\Phi_{\parallel}}^+$	$K_{\Phi_{\perp}}^{**}$	$K_{\Phi}^{***}$	$K_{\Phi}^{****}$
	$K, 10^4$	25,1	2,08	72,3	79
		$E, \text{В/м}$			
50	15,1	0,8	0,1	2,4	2,6
100	7,56	1,7	0,1	4,8	5,2
200	3,78	3,3	0,3	9,6	10,5
300	2,52	5,0	0,4	14,4	15,7
400	1,89	6,6	0,6	19,1	20,9
500	1,51	8,3	0,7	23,9	26,1
600	1,26	10,0	0,8	28,7	31,4
700	1,08	11,6	1,0	33,5	36,6
800	0,95	13,3	1,1	38,3	41,8
900	0,84	14,9	1,2	43,1	47,0
1000	0,76	16,6	1,4	47,8	52,3
10000	0,2	63,4	5,3	182,6	199,6

\* Обозначения – такие же, как в таблице 1.4.

При проводимости ткани  $\sigma^{\parallel}$  для ориентации поля вдоль волокон значения напряженностей электрических полей ниже по сравнению с полем, где проводимости ткани  $\sigma^{\perp}$  для ориентации поля поперек волокон, различие составляет до девяти раз; чем выше частота, тем больше разница между индуцированными электрическими полями в теле человека. Подобная картина наблюдается и при проводимости ткани  $\sigma^{\perp}$  для ориентации поля поперек волокон, и выборе формы эллипсоидальных моделей человека: минимальные значения напряженностей электрических полей получены при выборе в качестве модели расчета вытянутого двухосного эллипсоида при

ориентации поля  $E_0$ , перпендикулярного длинной оси эллипсоида и частоте 50 Гц, а максимальные – при выборе трехосного эллипсоида и частоты 10 кГц.

При использовании в расчетах полей средней площади человека и среднего показателя проводимости можно отказаться от полученных разных значений напряженностей электрических полей внутри биологических тел.

Магнитное поле в тканях организма человека наводит по всей глубине тела циркулярное электрическое поле и, соответственно, циркулярный электрический ток.

В соответствии с принципом Ле Шателье\*, эти поля приведут к ослаблению в теле исходного магнитного поля и обусловленных им токов, уменьшая их в центральной части тела. При этом эффективная глубина проникновения внешнего магнитного поля в тело, соответствующая его ослаблению в  $e$  раз, составляет [10]

$$\sigma_i = \frac{1}{(\mu_B \cdot \sigma \cdot \omega / 2)^{0,5}}, \quad (1.13)$$

где  $\sigma_i$  – истинная проводимость ткани. Например, для поля промышленной частоты 50 Гц при  $\sigma = 0,2$  (Ом·м)<sup>-1</sup> истинная проводимость ткани составляет 0,18 (Ом·м)<sup>-1</sup>.

Внутренние магнитные поля приводят не только к ослаблению магнитного поля в теле, но и к созданию вихревого электрического поля  $E_i$ .

Максимальное значение  $E_i$ , отвечающее ориентации  $B_0$  вдоль или поперек оси вытянутого эллипсоида вращения, составляет

$$E_{\max i, \parallel} = \frac{\omega \cdot b \cdot B_0}{2}; \quad E_{\max i, \perp} = \frac{\omega \cdot b \cdot B_0}{\left[1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2\right]}. \quad (1.14)$$

---

\* Принцип Ле Шателье гласит, что в находящейся в состоянии равновесия термодинамической системе при попытке вывести ее из этого состояния происходят такие изменения, которые уменьшают результат внешних воздействий. Принцип Ле Шателье – Брауна в физике является обобщением правила Ленца в электродинамике, утверждающего, что индукционный ток в проводящем контуре всегда направлен так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Средние квадратичные значения амплитуд, усредненных по всему объему эллипсоида, для тех же ориентаций:

$$E_{i,\parallel} = \frac{\omega \cdot b \cdot B_0}{\sqrt{10}}; \quad E_{\max i,\perp} = \frac{\omega \cdot b \cdot B_0}{\left[1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2\right]}. \quad (1.15)$$

Те же значения, отвечающие шаровой модели, выраженные с помощью радиуса шара  $R$ :

$$E_{\max i,\text{ш}} = \frac{\omega \cdot R \cdot B_0}{2}; \quad E_{i,\text{ш}} = \frac{\omega \cdot R \cdot B_0}{\sqrt{10}}. \quad (1.16)$$

Согласно приведенным соотношениям и расчетным данным, различия в значениях  $E_{i,\parallel}$  и  $E_{i,\perp}$ , характеризующие часть общей формы тела, в определении зависимости характеристик внутреннего электрического поля от направления поля  $B_0$  не превышают двукратного.

В случае воздействия на тело переменного магнитного поля расчет средних и максимальных значений напряженностей внутренних полей можно проводить в рамках сферических моделей.

Схема распределения электрических полей и токов, индуцированных в однородном теле человека переменным магнитным полем  $B$  [10], приведена на рис. 1.3.

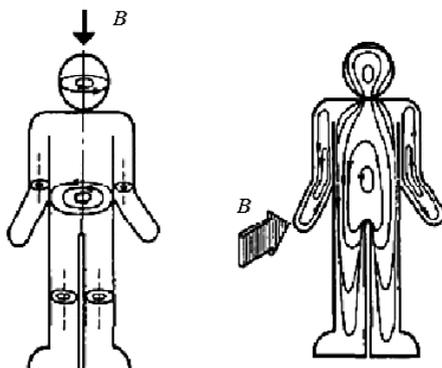


Рис. 1.3. Схема распределения электрических полей и токов, индуцированных в однородном теле человека переменным магнитным полем

При ориентации  $B$  вдоль тела, когда отдельные части тела, перпендикулярные его длинной оси, располагаются на не контактирующих между собой сечениях его отдельных частей, но когда поле  $B_0$  направлено перпендикулярно длинной оси тела, подобное описание усложняется, так как при этом необходимо учитывать возможность затекания токов из одной части тела в другую. При расчетах напряженности электрического поля, индуцированные в телах сферических магнитным полем, не учитываются.

Вышеприведенную методику можно изменить с помощью некоторых уточнений, а по обновленной методике можно не только рассчитать магнитное и электрическое поля внутри биологических объектов, но и оценить дозу низкочастотного электромагнитного поля с использованием понятия «энергия излучения поля».

### **Уточненная методика расчета уровня электромагнитных полей в однородном теле человека**

Расчет поглощенной телом человека дозы низкочастотного ЭМП проводится с учетом следующих показателей: частота поля, средняя проводимость (электропроводимость) и диэлектрическая проницаемость тканей, энергии излучения ЭМП.

Степень проникновения электрической составляющей ЭМП в воздушном пространстве через тело человека зависит не только от величины напряженности электрического поля, но и от соотношения электрической проводимости воздуха, в котором распространяется электрическое поле, и тканей человеческого организма, что определяет искажение электрического поля телом человека [10].

Примем допущение, что всё низкочастотное электромагнитное поле поглощается телом человека. Найдем внутреннее электрическое поле  $E_i$  в области низких частот через функцию от параметров тела человека с учетом соотношения (1.6):

$$E_i = \int (\varepsilon, \sigma, \omega, \delta, S_1, S_2) E_0. \quad (1.17)$$

После подстановки параметров, характеризующих материал и форму тела, выражение примет вид

$$E_i = \frac{\omega \cdot \varepsilon_b \cdot \varepsilon \cdot S_1 \cdot E_0}{\sigma \cdot S_2} \quad (1.18)$$

где  $\varepsilon_b$  – диэлектрическая проницаемость воздуха, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость ткани, изменяется в зависимости от частоты поля, 100000 отн. единиц для частоты 50 Гц, 40000–1000 Гц;  $\omega$  – частота, задающее число полных колебаний в единицу времени, 1/с;  $S_1$  – площадь поглощения излучения электрического поля, соответственно 0,87 м<sup>2</sup>;  $S_2$  – площадь поверхности тела человека при излучении электрического поля, равная 1,73 м<sup>2</sup>;  $E_0$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;  $\sigma$  – усредненная проводимость ткани, См/м.

Проводимость мышечной и нервной тканей для разных биологических объектов разная; в низкочастотном диапазоне до 10 кГц с низким содержанием воды изменяется до 0,03 См/м, а с высоким содержанием – до 1,5 См/м. Для расчета низкочастотного ЭМП, проникающего внутрь биологического тела, предлагается использовать усредненный показатель проводимости, равный 0,1 См/м.

Результаты модельных расчетов напряженностей электрических полей внутри тел в зависимости от частоты приведены в таблице 1.7.

*Таблица 1.7*

Напряженности электрических полей внутри тел в зависимости от частоты при внешнем поле  $E_0 = 5000$  В/м

$f$ , Гц	$E_i(f)$ , В/м
50	6,99
100	11,18
200	20,96
300	29,35
400	36,33
500	41,92
600	46,12
700	48,91
800	50,31
900	54,08
1000	55,90

Как показывает результат расчета напряженностей электрических полей внутри тел, напряженности электрических полей, индуцированные в теле человека, изменяются в зависимости от частоты. Чем выше частота, тем глубже поле проникает в ткани человека, величина поля больше. При воздействии на человека внешнего ЭП в 5000 В/м значение напряженности ЭП 50 Гц внутри тела составило 6,99 В/м, максимальное зафиксировано при 1 кГц – 55,90 В/м.

Магнитное поле в тканях организма наводит по всей глубине тела циркулярное магнитное поле и, соответственно, циркулярный электрический ток.

Максимальное значение  $H_i$ :

$$H_i = \omega \cdot \mu \cdot S \cdot \sigma \cdot H_0, \quad (1.19)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость в вакууме  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;  $S$  – площадь поверхности тела после поглощения излучения магнитного поля, равная  $0,87$  м<sup>2</sup>;  $H_0$  – напряженность внешнего магнитного поля, А/м;  $\sigma$  – проводимость ткани, при расчетах принята  $0,7$  См/м.

Результаты модельных расчетов напряженностей магнитных полей внутри тел в зависимости от частоты приведены в таблице 1.8.

*Таблица 1.8*

Напряженности магнитных полей внутри тел в зависимости от частоты при внешнем поле  $H_0 = 80$  А/м

$f$ , Гц	$H_i(f)$ , А/м
50	0,02
100	0,04
200	0,08
300	0,12
400	0,15
500	0,19
600	0,23
700	0,27
800	0,31
900	0,35
1000	0,39

Из таблицы 1.8 видно, что при воздействии внешнего магнитного поля 80 А/м в теле человека в зависимости от частоты индуцируется часть этого поля. При частоте 50 Гц магнитное поле минимально (0,02 А/м) от внешнего (80 А/м), максимально оно при частоте 1000 Гц (0,39 А/м), то есть чем выше частота, тем большая часть магнитного поля будет поглощена в теле человека.

При сравнении электрического и магнитного полей, индуцированных в теле человека, понятно, что магнитное поле проникает в тело глубже, опаснее воздействуя на организм человека, чем электрическое.

Энергия излучения низкочастотного электромагнитного поля, поглощенная в теле человека, при аддитивном воздействии ЭП  $E_i(f)$  и МП  $H_i(f)$ :

$$\Theta_i(f) = P_i(f) = E_i(f) \cdot H_i(f), \quad (1.20)$$

где  $E_i(f)$  – напряженность электрического поля для частоты  $f$ ;  $H_i(f)$  – напряженность магнитного поля для частоты  $f$ .

При известных показателях  $E_i(f)$ ,  $H_i(f)$  результаты энергии излучения низкочастотного электромагнитного поля сведем в таблицу 1.9.

Таблица 1.9

Энергия излучения низкочастотного ЭМП,  
поглощенная телом человека

Частота, Гц	$E_i(f)$ , В/м	$H_i(f)$ , А/м	$\Theta_i(f)$ , Вт/м <sup>2</sup>
50	6,99	0,02	0,14
100	11,18	0,04	0,45
200	20,96	0,08	1,68
300	29,35	0,12	3,52
400	36,33	0,15	5,45
500	41,92	0,19	7,96
600	46,12	0,23	10,61
700	48,91	0,27	13,21
800	50,31	0,31	15,60
900	54,08	0,35	18,93
1000	55,90	0,39	21,80

Энергия излучения низкочастотного ЭМП, поглощенная телом человека, увеличивается от  $0,14 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> (50 Гц) до  $21,80 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>

(1000 Гц). Величина энергии излучения низкочастотного ЭМП, поглощенная телом человека, до сих пор не нормируется. Допустимое значение плотности потока энергии излучения ЭМП в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц на рабочих местах персонала не должно превышать 1000 мкВт/см<sup>2</sup>; указанные же расчетные значения энергии излучения ЭМП для частоты 1000 Гц будут превышены. Необходимо совершенствовать систему нормирования ЭМП в низкочастотном диапазоне и принять ПДУ ЭП и МП для всего спектра частот (до 1 кГц).

Для перехода к оценке дозы ЭМП, поглощенной в низкочастотном диапазоне, необходимо учесть удельную энергию излучения низкочастотного ЭМП и массу тела человека.

Доза низкочастотного ЭМП, поглощенная телом человека, Вт·ч/кг:

$$D_i(f) = \frac{\mathcal{E}_y(f)}{m} = \frac{\mathcal{E}_i(f) \cdot t}{m}, \quad (1.21)$$

где  $\mathcal{E}_y(f)$  – удельная энергия излучения электромагнитного поля, поглощенная в теле человека для частоты  $f$ , Вт·ч/м<sup>2</sup>;  $m$  – масса тела человека, кг, при расчетах принято 70 кг;  $t$  – время воздействия.

Полученные расчетные значения дозы низкочастотного ЭМП, поглощенной телом человека, приведены в таблице 1.10.

*Таблица 1.10*

Доза низкочастотного ЭМП, поглощенная телом человека, при 8-часовой экспозиции, Вт·ч/кг

Частота, Гц	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$D_i(f)$	0,02	0,05	0,19	0,40	0,62	0,91	1,21	1,51	1,78	2,16	2,49

Доза низкочастотного ЭМП, поглощенная телом человека, при 8-часовом воздействии может достигать для 50 Гц – 0,02 Вт·ч/м<sup>2</sup> кг, для 1000 Гц – 2,49 Вт·ч/м<sup>2</sup> кг. На сегодняшний день ПДУ дозы низкочастотного ЭМП, поглощенной телом человека, отсутствуют. Для защиты электротехнического персонала, обслуживающего электроустановки, подвергающегося данному фактору, необходимо усовершенствовать систему нормирования ЭМП в низкочастотном диапазоне, принимать ПДУ не только для электрической и магнитной составляющих ЭМП, но и для энергии излучения ЭМП и действующей дозы рассматриваемого поля.

## Вероятностный метод расчета энергии излучения низкочастотного ЭМП вблизи электроустановок, действующего на обслуживающий персонал

Нормирование вредного воздействия неионизирующего ЭМП в виде предельно допустимых значений напряженностей электрической и магнитной составляющих ставит перед исследователями вопросы: как нормировать сочетанное воздействие электрической и магнитной составляющих ЭМП? как учитывать составляющие продолжительности сочетанного воздействия, частот переменных составляющих и других факторов?

Энергию неионизирующего ЭМП можно выразить через вектор Пойнтинга, определенную как поглощенную энергетическую нагрузку телом человека.

Электромагнитное поле в некотором бесконечно малом объеме пространства  $dV$  имеет запас электрической и магнитной энергии, определяемый уравнениями [11]

$$W = \int_v \frac{DE}{2} dV + \int_v \frac{DH}{2} dV = \int_v \frac{\varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} dV. \quad (1.22)$$

Электромагнитное поле и его запас энергии непрерывно изменяются во времени. Допустим, что происходит убывание количества энергии в объеме  $V$  со скоростью

$$-\frac{dW}{dt} = -\int_v \left( E \frac{dE}{dt} + \mu H \frac{dH}{dt} \right) dV. \quad (1.23)$$

Из уравнения Максвелла следует

$$E \frac{dE}{dt} = [\nabla H] - \gamma E; \quad \mu H \frac{dH}{dt} = -[\nabla E]. \quad (1.24)$$

Рассматривая оператор  $\nabla$  как символ дифференцирования и обращаясь с ним формально как с вектором, можно получить

$$\nabla[E \cdot H] = E[H\nabla] + H[\nabla E] = H[\nabla E] - E[\nabla H].$$

Выражение скорости убывания энергии примет следующую форму:

$$-\frac{dW}{dt} = \int_V \gamma E^2 dV + \int_V \nabla [E \cdot H] dV.$$

Член уравнения  $\int_V \gamma E^2 dV$  выражает энергию, преобразовываемую в тепло за единицу времени. Второй член уравнения преобразуем по теореме Островского – Гаусса

$$\int_V \nabla [E \cdot H] dV = \int [E \cdot H] ds.$$

Этот интеграл представляет собой поток энергии, уходящий в единицу времени через замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ .

В первом приближении предлагается по крайней мере снизить уровень ПДУ фактора миксЭМП при совместной экспозиции ЭП и МП в два раза в связи с тем, что для оценки аддитивного характера различающихся вредных факторов предлагается применять известное соотношение

$$\frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} \leq 1, \quad (1.25)$$

где  $E_i$  и  $E_{\text{норм}}$  – измеренное и нормируемое значения электрической напряженности ЭМП соответственно, кВ/м;  $H_i$  и  $H_{\text{норм}}$  – измеренное и нормируемое значения магнитной напряженности ЭМП, А/м.

Предельно допустимые уровни ЭМП до 10 кГц для персонала в РФ не нормируются (кроме 50 Гц и 10 кГц), поэтому в качестве ПДУ ЭП и МП мы взяли нормы для производственных условий промышленной частоты 50 Гц (таблица 1.11).

Таблица 1.11

Энергетическая нагрузка ЭМП при нормируемых значениях напряженностей электрических и магнитных полей электроустановок промышленной частоты

Экспозиция, ч	ПДУ электрической составляющей напряженности ЭМП, В/м	ПДУ магнитной составляющей напряженности ЭМП А/м	Энергия излучения ЭМП, Вт/м <sup>2</sup>
1	5000	1600	4 000 000
2	5000	800	2 000 000
4	5000	400	1 000 000
8	5000	80	200 000

Из расчетных показателей таблицы 1.11 видно, если принять воздействие электрической и магнитной составляющих ЭМП для 8-часового рабочего дня при соответствующих ПДУ для этой продолжительности, то максимальная предельно допустимая энергетическая нагрузка составит 20 Вт/см<sup>2</sup>.

В первом приближении это значение можно было бы принять в качестве предельно допустимой дозы энергетической нагрузки ЭМП.

Анализ изменения энергетической нагрузки электромагнитного поля (энергетической нагрузки  $P$ ,  $P_H$ ,  $P_E$ ) при различных ситуациях изменения электрической и магнитной напряженностей ЭМП представлен на рис. 1.4.

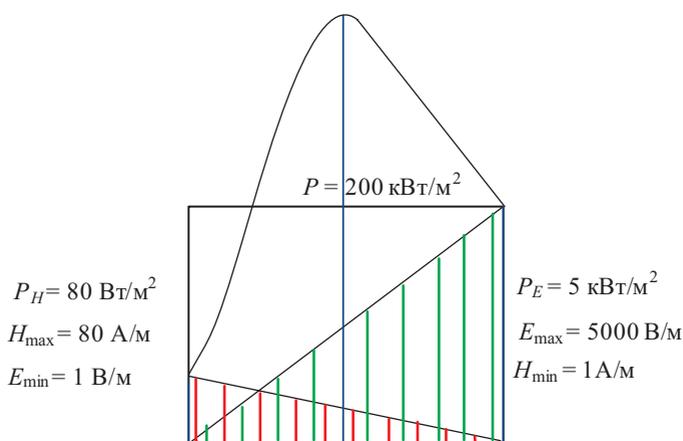


Рис. 1.4. Диаграмма энергетической нагрузки при линейно разнонаправленном изменении электрической и магнитной напряженности ЭМП

На рис. 1.4 показано изменение энергетической нагрузки ЭМП при сочетании напряженностей электрического и магнитного полей при разнонаправленном их линейном изменении от 1 до 80 А/м и от 1 до 5000 В/м соответственно (для 8-часовой экспозиции). В этом случае энергетическая нагрузка ЭМП может изменяться до 100 кВт/м<sup>2</sup>, имея минимальные значения 80 Вт/м<sup>2</sup> при максимальном значении магнитной напряженности (80 А/м) и минимальной – электрической (1 В/м) и 5 кВт/м<sup>2</sup> при максимальном значении электрической напряженности (5000 В/м) и минимальной – магнитной (1 А/м).

При рассмотрении однонаправленного изменения электрической и магнитной напряженностей ЭМП [12] величина энергетической нагрузки ЭМП для 8-часовой экспозиции составляет 200 кВт/м<sup>2</sup>. Можно сделать вывод, что энергетическая нагрузка может удовлетворять требованиям СанПиН 2.2.4.3359–16 [13] при одной и той же продолжительности экспозиции и самых разных значениях энергетической нагрузки, зависящей от сочетания величины электрической и магнитной напряженностей ЭМП (80 Вт/м<sup>2</sup>, 5,0 кВт/м<sup>2</sup>, 100 кВт/м<sup>2</sup>, 200 кВт/м<sup>2</sup>) [14,15].

Значения напряженностей электрического и магнитного поля можно представить в относительных безразмерных единицах в следующем виде:

$$\frac{E_i}{E_{\text{норм}}} = e_{i0}, \quad \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} = h_{i0}. \quad (1.26)$$

При учете и нормировании данного показателя должна выполняться следующая система уравнений:

$$\begin{cases} h_{i0} + e_{i0} \leq 1, \\ 0 < h_{i0} < 1, \\ 0 < e_{i0} < 1. \end{cases} \quad (1.27)$$

Представим систему уравнений (1.27) в графическом виде (рис. 1.5).

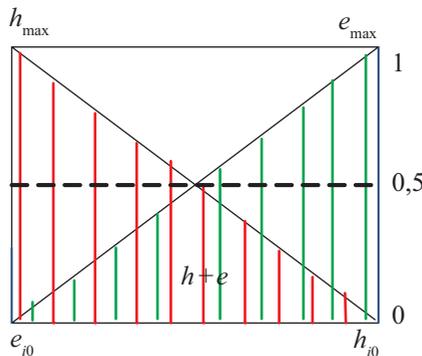


Рис. 1.5. Линейное разнонаправленное изменение относительных значений напряженностей электрического и магнитного полей

При суммировании относительных значений напряженностей электрического и магнитного полей при линейном и пропорциональном разнонаправленном их изменении относительно друг друга (единственный возможный вариант, рис. 1.5) выполняются все три уравнения системы уравнений (1.26).

Детерминированные методы нормирования ПДУ напряженностей электрического и магнитного полей не позволяют в полной мере контролировать вредное воздействие ЭМП на работников. Необходимо нормирование на основе вероятности риска причинения ущерба здоровью от экспозиции ЭМП того или иного уровня с учетом рода тока и частоты переменного тока.

Вероятность вредного воздействия электромагнитного поля на организм человека как случайного фактора определяется случайным сочетанием различных событий. Например, степень превышения ПДУ напряженности магнитного поля электроустановки, степень превышения ПДУ напряженности электрического поля, продолжительность экспозиции на организм человека, наличие случайного характера сочетанного частотного спектра ЭМП (миксЭМП).

Для вероятностной оценки или определения вероятности вредного воздействия или вероятности профессионально обусловленного профессионального заболевания в результате экспозиции ЭМП на рабочем месте важно определиться с граничными уровнями величины вероятности события: вероятность события близка к единице (0,999), т. е. в результате экспозиции ЭМП заболевание работника наступит; вероятность события близка к нулю (0,001), т. е. в результате экспозиции ЭМП заболевание работника не наступит; вероятность события  $0 < P_{\text{заб}} < 1$ , т. е. в результате экспозиции ЭМП заболевание работника может наступить с разной степенью вероятности.

Рассмотрим вероятность события: возникновение уровня экспозиции, вызывающего наступление обусловленного воздействием ЭМП профессионального заболевания. Условимся, что ЭМП всегда существует при наличии электрической и магнитной составляющих. Очевидно, что при невыполнении этого условия вероятность возникновения профессионально обусловленного заболевания равна единице. С учетом некоторого запаса, который может быть связан со случайными факторами наличия особо устойчивых отдельных организмов на воздействие ЭМП, можно принять

$$P = 0,999, \text{ если } \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} \geq 1. \quad (1.28)$$

Рассмотрим вероятность события: возникновение уровня экспозиции, не вызывающего наступления профессионального заболевания в результате экспозиции ЭМП. В этом случае событие не наступит, если каждое из слагаемых и их сумма (1.28) не превысит 0,5. С учетом возможных особо чувствительных организмов к воздействию ЭМП, в виде допущения можно принять

$$P = 0,001, \text{ если } \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} < 0,5; \quad (1.29)$$

$$\frac{E_i}{E_{\text{норм}}} < 0,5; \quad \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} < 0,5.$$

Наиболее сложно оценить вероятность возникновения уровня экспозиции, который может вызвать наступление профессионально обусловленного заболевания в случае изменяющейся интенсивности воздействия вредного фактора на организм человека в производственных условиях.

Определить вероятность превышения уровня экспозиции при совместном наличии электрической и магнитной составляющих переменного тока можно с помощью соотношения энергетической нагрузки ЭМП, определяемой выражением (1.29), на рабочем месте  $E_i$  и  $H_i$  к энергии ЭМП, определяемой нормируемыми значениями  $E_{\text{норм}}$  и  $H_{\text{норм}}$ .

Можно сформулировать гипотезу: величина вероятности наступления профессионально обусловленного заболевания между минимальным уровнем и максимальными уровнями вероятности изменяется пропорционально превышению параметра, действующего на работника ЭМП, по отношению к величине предельно допустимого нормируемого параметра. В качестве такого комплексного параметра, характеризующего электрическую и магнитную составляющие ЭМП, можно принять энергетическую нагрузку ЭМП (вектор Пойтинга).

Для выражений при совместном воздействии на работников электрической и магнитной составляющих ЭМП максимальное расчетное значение величины нормируемой энергетической нагрузки составит  $0,25 H_{\text{норм}} \cdot E_{\text{норм}}$  (рис. 1.6). Вероятность превышения

уровня экспозиции, при котором может возникнуть профессионально обусловленное заболевание, с учетом сформулированной гипотезы можно выразить соотношением

$$P = \frac{E_i \cdot H_i}{0,25 \cdot E_{\text{норм}} \cdot H_{\text{норм}}}, \quad (1.30)$$

если  $0,5 \leq \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} \leq 1$ .

Теперь можно определить вероятность превышения уровня экспозиции параметров ЭМП, при котором есть вероятность возникновения профессионально обусловленного заболевания работников, в частности, электротехнического персонала:

$$P = \begin{cases} \frac{E_i \cdot H_i}{0,25 \cdot E_{\text{норм}} \cdot H_{\text{норм}}}, & 0,5 \leq \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} \leq 1. \\ 0,001, & \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} < 0,5; \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} < 0,5; \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} < 0,5. \\ 0,999, & \frac{E_i}{E_{\text{норм}}} + \frac{H_i}{H_{\text{норм}}} \geq 1. \end{cases} \quad (1.31)$$

Электромагнитная безопасность работников, обслуживающих ЭУ тягового электроснабжения, крайне низка. Отсутствует методика нормирования ЭМП разного рода тока и частоты (до 10 кГц). Чтобы исключить пробел в области нормирования и оценки фактора миксЭМП, мы провели ситуационный анализ совместной экспозиции электрической и магнитной составляющих ЭМП для 8-часового рабочего дня. Уже сегодня необходимо принимать меры по снижению существующих и введению дополнительных норм ПДУ ЭМП для работников тяговых сетей электрических железных дорог.

Детерминированные методы оценки не всегда могут точно оценивать реальный уровень вредного воздействия ЭМП на работников. На основе существующих детерминированных показателей и гипотезы о пропорциональности величины вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания от

величины превышения параметров электромагнитного поля предложены соотношения для определения вероятности этого события.

Эти соотношения позволят намного точнее оценивать риск профессиональных заболеваний при экспозиции работников электромагнитным полем с учетом фундаментальных медико-биологических исследований.

Сравнение предельно допустимой плотности потока энергии для высоких частот переменного ЭМП  $S$  ( $1000 \text{ мкВт/см}^2$ ) и предельно допустимой энергетической нагрузки (см. рис. 1.4; энергетическая нагрузка  $P$ ) показывает гораздо бóльшую величину предельно допустимой энергетической нагрузки ЭМП низкочастотного диапазона по сравнению с ЭМП радиочастот (более чем в 20 тыс. раз), что естественно для низких частот ЭМП, так как с повышением частоты переменного тока негативное воздействие на организм воздействия излучения существенно возрастает.

## **Проблемы воздействия ЭМП в низкочастотном диапазоне от переменного тока разной частоты на биологические объекты**

Сегодня крайне актуальна проблема биологического действия электромагнитных полей разных частотных диапазонов на человека. Здоровье персонала и населения охраняется гигиенической регламентацией ЭМП. В России гигиенические нормативы ЭМП [16,17] разрабатываются, как правило, на основании комплексных гигиенических, клинико-физиологических, эпидемиологических и экспериментальных исследований. Гигиенические исследования ставят своей целью определение интенсивности и времени воздействия ЭМП в реальных производственных или не производственных условиях; клинико-физиологические направлены на выявление нарушений в состоянии здоровья и физиологических функций человека; эпидемиологические – на выявление отдаленных последствий воздействия фактора; экспериментальные – на изучение особенностей и характера биологического действия ЭМП.

Группировка объектов по частотам излучения выполняется в соответствии с общепринятой классификацией [18] (таблица 1.12).

Таблица 1.12

Диапазон частот и тип устройства  
или услуги источника электромагнитного излучения

Частотный диапазон	Частота	Тип устройства или сервиса (службы)
0–30 кГц	НЧ (сверхнизкие)	Индукционные печи, видеодисплейные терминалы ПЭВМ, бытовые электроприборы, линии электропередачи
30–300 кГц	НЧ (низкие)	Низкочастотное вещание и длинноволновое радио
300–3000 кГц	СЧ (средние)	Средневолновое радио, радионавигация, связь с кораблями
3–30 МГц	ВЧ (высокие)	Высокочастотное радио, любительское радио, высокочастотная радиосвязь и вещание
30–300 МГц	ОВЧ (очень высокие)	FM-радио, телевидение, связь аварийно-спасательных служб
300–3000 МГц	УВЧ (ультравысокие)	УВЧ-телевидение, пейджинговая связь, мобильные телефоны, любительские радиостанции
3–30 ГГц	СВЧ (сверхвысокие)	Микроволновые печи, спутниковая связь, радиолокация, сверхвысокочастотные точка-точка, беспроводная wi-fi-связь
30–300 ГГц	КВЧ (крайне высокие)	Радары, радиолокация, радиоастрономия, высокоскоростная радиорелейная связь

Данные подлежат корректировке с позиций полноты учета источников ЭМИ, корректности исходных электромагнитных параметров и расположения отдельных источников.

Необходимо в частотный диапазон 0–30 кГц добавить системы электроснабжения: электрические станции, электроподвижной состав, контактную сеть, тяговые подстанции.

При идентификации опасности [18] следует учитывать все виды эффектов, которые, в соответствии с научными данными, могут формироваться у населения под воздействием ЭМИ разной частоты. Обобщенные данные по видам эффектов приведены в таблице 1.13.

Таблица 1.13

Эффекты нарушения здоровья населения при воздействии  
электромагнитных полей различного вида

Частотный диапазон	Эффекты для здоровья	Источник данных (год издания)
0–30 кГц	Возбуждение рецепторов, нервных и мышечных клеток, вероятность фибрилляции сердца	В. Ванг (1986), М. Shutly (1987), Л. Исаев (1997)
30–300 кГц	Выраженное лечебное действие при ряде заболеваний при низких экспозициях. Изменение артериального давления. Изменение частоты сердечных сокращений. Лейкозы у детей. Лейкозы у взрослых. Опухоли разной локализации и вида	S.M. Michaelson (1976), В. Штеммлер (1978), N. Wertheimer, E. Leeper (1979), L. Tomenius (1982, 1986), Verkasalo et al. (1993), Olsen et al. (1993, 1995), Szmigielski et al. (1982)
300–3000 кГц	Функциональные нарушения центральной нервной системы. Изменение гормонального статуса, изменение биотоков мозга	Л. Исаев (1997)
3–30 МГц	Увеличение температуры кожи	В.Д. Искин (1990)
30–300 МГц	Увеличение температуры тканей	К.В. Никонова, А. Е. Вермель (1978), Б. В. Савин (1978)
300–3000 МГц	Нагрев тканей. Опухоли различной локализации, в том числе головного мозга (глиома, менингиома и пр.)	В.Д. Искин (1990)
3–300 ГГц	Ожоги кожи, роговицы глаза, термические конъюнктивиты, поражения внутренних органов	В.Д. Искин (1990)

По данным таблицы 1.13 видно, что ЭМП частотой до 30 кГц вызывают у человека возбуждение рецепторов, нервных и мышечных клеток, может возникнуть фибрилляция сердца. Не только население подвергается воздействию ЭМП, но и – в связи со спецификой работы электрооборудования тягового электроснабжения – электротехнический персонал.

Обобщенные данные [19] по эффектам нарушения здоровья персонала и населения при воздействии магнитных полей различного вида приведены в таблице 1.14.

*Таблица 1.14*

Эффекты нарушения здоровья персонала и населения при воздействии магнитных полей различного вида

Источники и (или) характеристика магнитного поля	Наблюдаемые эффекты
Силовые подстанции, МП 50 Гц	Головная боль, утомляемость, боли в сердце, головокружение у работающих на силовых подстанциях
Промышленные МП 50 и 60 Гц	Головная боль, утомляемость, депрессии, самоубийства
Импульсные ЭМП 60 Гц	Повышенная смертность из-за несчастных случаев у работающих с импульсными полями
ЛЭП 50 и 60 Гц	Увеличение числа сердечно-сосудистых заболеваний у проживающих вблизи ЛЭП, повышенный риск заболеваний (в 1,5–3 раза) лейкемией
МП от трамваев	Повышенный риск заболеваний раком груди у мужчин – трамвайных рабочих
МП от электропоездов (переменный ток 16,67 Гц)	Повышенный риск заболеваний (в 2–3 раза) лейкоцитарной лейкемии у машинистов и кондукторов. Повышенная вероятность смерти (в 2 раза) от лейкемии у машинистов электропоездов
МП от электропоездов (постоянный ток)	Повышенный риск заболеваний сердечно-сосудистой системы у работающих на железной дороге

Приведенные данные об эффектах нарушения здоровья персонала и населения при воздействии магнитных полей различного вида свидетельствуют о их вредном воздействии. Необходимо определить, какие характеристики поля являются наиболее опасными для здоровья человека: величина напряженности магнитного поля, его спектральный состав, форма длины волны, длительность воздействия или определенная комбинация этих характеристик.

Например, на рабочих местах электротехнического персонала, обслуживающего тяговые подстанции РУ-3,3 кВ, имеется спектр высших гармонических составляющих выпрямленного тока

и напряжения, ЭМП которого в настоящее время не нормируется (кроме ЭП и МП исключительно 50 Гц). Это один из пробелов в области нормирования низкочастотного ЭМП. При разработке нормируемых уровней электрических и магнитных полей низкой частоты необходима проработка данного вопроса как с помощью вероятностных подходов, так и с проведением экспериментальных исследований на биологических объектах (животные, насекомые и т. д.).

## Краткий обзор экспериментальных исследований электромагнитных полей на биологических объектах

*Опыт многолетних наблюдений говорит о том, что некоторые электромагнитные поля представляют потенциальную угрозу для здоровья людей и являются не менее существенным фактором, чем температура, давление и влажность.*

Ю. А. Холодов [20]

Исследованием возможного воздействия электромагнитных полей [20] на биологические объекты занимаются ученые в области биомагнетизма и магнитобиологии. Современная биология организма базируется на биохимических данных, относящихся преимущественно к мембранологии. В регулярных процессах организма также принимают участие электрические токи и электромагнитные поля, которые энергию для своего существования черпают из тех же биохимических процессов.

Актуальность исследования влияния электромагнитных полей подтверждается публикационной активностью по изучению данной проблемы в магнитобиологии. Условно разделим известные публикации поведения биологических систем в электромагнитных полях [21] по диапазонам: постоянные поля [22–38]; диапазон < 1 Гц [39–41]; диапазон 1–100 Гц [42–96]; диапазон 100–1000 Гц [97–102]; диапазон 1000–10000 Гц [103–108].

При описании экспериментов используется формула эксперимента. В ней указаны контролируемые параметры МП, интервалы их изменения и некоторые статистические данные.

Единицы измерения соответствуют часто употребляемым в экспериментах этого рода: для индукции МП  $B$  – мкТл, или  $\mu T$ , для частоты  $f$  – Гц, или Hz, для времени –  $T$ ,  $\tau$  – с. Например, формула

$$B(45 \pm 5)b(0-12/1)f(50, 60)Bp(!)n(5-8)g(?) \quad (1.32)$$

означает, что постоянное МП  $B$  (также может обозначаться  $B_{DC}$  или  $H_{DC}$  в зависимости от контекста) равно 45 мкТл с точностью 5 мкТл, параллельное ему переменное поле с амплитудой, т.е. пиковым значением  $b$  (или  $B_{AC}$ ) менялось от 0 до 12 мкТл с шагом 1 мкТл. В разных сериях опыта использовали две фиксированные частоты: либо 50 Гц, либо 60 Гц, величина перпендикулярной компоненты постоянного МП  $Bp$  не контролировалась (!), количество повторов  $n$  (экспериментальных точек) для каждого набора параметров МП было от 5 до 8, градиент МП  $g$  не известен (?). При импульсном МП  $b$  означает высоту импульса. Порядок указания параметров произволен.

### **Краткий анализ публикаций, касающихся влияния магнитных полей низкочастотного диапазона на биологические объекты**

В низкочастотном диапазоне магнитное поле [21] практически без каких-либо помех проникает в живую ткань. Оно действует на все частицы ткани, но не все из частиц вовлечены в процесс передачи информации о магнитном поле на биологическом уровне.

Исследованы также изменения в морфологических параметрах роста куриных эмбрионов под действием импульсных МП в течение 48 ч [42]. Объем данных недостаточен для построения амплитудных или частотных спектров, однако статистически значимая эффективность режимов 0,12 мкТл при 100 Гц и 1000 Гц показана.

Измерена скорость некоторых ферментативных реакций *in vitro* [44], связанных с малыми молекулами небелковой природы (коферментом В12). Авторы заключают, что действие МП на физиологические процессы вряд ли связано с данными ферментами.

Изучена вероятность возникновения аритмии на препаратах предсердия лягушки в зависимости от частоты и амплитуды МП [45]. Опыты проводили по схеме

$$B(?)Bp(?)b(0-750)f(0-100)t(30 \text{ min})n(7). \quad (1.33)$$

Эффект оказался квазирезонансным как по частоте, так и по амплитуде. Он достигал максимума при  $H_{AC} = 15$  мкТл,  $f = 40$  Гц.

Относительно большой шаг в изменении параметров МП, а также отсутствие информации о величине и направлении локального постоянного МП затрудняют интерпретацию данных, однако общий характер оконной структуры отклика хорошо заметен. Предполагается, что эффект вызван электрическими полями, индуцированными переменным МП.

Воздействие магнитного поля на вес эмбриона цыпленка на 10-й день развития исследовали Саали, Юутилайнен и Лахтинен [47] в условиях

$$B(?)\text{Вр}(?)b(0-125)f(50, 1000)n(14-28). \quad (1.34)$$

Обнаружено, что синусоидальное МП приводит к магнитобиологическому эффекту, то есть присутствует нетепловая природа таких эффектов: а) интенсивность действующих ЭМП далеко не достаточна для сколько-нибудь заметного нагрева биологической ткани; реакции биологической системы на ЭМП и нагрев иногда разнонаправлены и б) данные эффекты имеют место лишь в некоторых частотных интервалах ЭМП.

В литературе такие эффекты называют магнитобиологическими эффектами, или МБЭ. В последнем случае МБЭ наблюдали со статистической достоверностью при разных амплитудах переменного МП.

На частоте 50 Гц МБЭ возникает тогда, когда амплитуда поля становится сравнимой с локальным полем. На частоте 1000 Гц МБЭ не обнаруживает определенной зависимости и в целом одинаков в широком диапазоне амплитуд.

Авторы в [50] воспроизвели опыты и подтвердили их. Они измерили подвижность одноклеточных водорослей *Amphora* со *eaformis* в смеси красных и бурых водорослей, обогащенной ионами кальция в концентрациях 0, 0,25 и 2,5 *mM*. Схема эксперимента повторяла условия

$$B(21)b(21)\text{Вр}(\sim 0)f(16)n(19)B_{\text{sham}}(43)b_{\text{sham}}(<0,2). \quad (1.35)$$

Большой разброс данных не позволил снять частотный спектр эффекта. Такая зависимость от начальной концентрации показывает, что некоторый уровень неравновесности по кальцию необходим для наблюдения эффектов.

Цикл работ [63] посвящен исследованию эффектов комбинированного МП на конформационное состояние (конформация –

геометрические формы, которые могут принимать молекулы органических соединений) генома клеток *E. coli* (K12 AB1157) в различных магнитных условиях. Специально приготовленные суспензии клеток подвергали лизису (разрушению) после экспозиции в МП. Измерение вязкости суспензий проводили в ротационном вискозиметре. В [63] наблюдали четко выраженный 25%-ный пик МБЭ на частоте 8,6–8,9 Гц с шириной около 1,6 Гц для схемы

$$B(43,6)Bp(19,7)b(30)f(7-12). \quad (1.36)$$

В данных магнитных условиях менее выраженные изменения бактериального титра концентрации (титр раствора – способ выраживания концентрации раствора) и интенсивности синтеза ДНК и протеинов были получены другими методами.

Некоторые ученые работают над установлением онкогенного потенциала низкочастотных полей. Они визуально определяли частоту образования внутриклеточных ядер в лимфоцитах человека (human peripheral lymphocytes HPL) [71]. Образование подобных ядер в специальных условиях является маркером хромосомных повреждений. Схемы эксперимента

$$B(\pm 0,1)b(150rms)f(50)[b(75rms)f(32)] \quad (1.37)$$

и

$$B(42)Bp(\pm 0,1)b(75rms, 150rms)f(32) \quad (1.38)$$

позволяли выделить значение постоянной составляющей МП, параллельной переменной компоненте.

Авторы отметили статистически значимый МБЭ в присутствии параллельного постоянного МП: это точки в середине графика. Но приведенные в [71] данные трудны для интерпретации, так как мало экспериментальных точек.

Исследовалась пролиферация (пролиферация – разрастание ткани) клеток фибробластов эмбриона цыпленка в магнитных условиях [82]

$$B(?)Bp(?)b(60-700)f(50,60,100)n(\sim 100) \quad (1.39)$$

и найдена полиэкстремальная зависимость отклика на 24-часовую экспозицию.

Рост эффекта в области больших значений амплитуд и частот связан, вероятно, с электрохимическим действием индуцированных

токов, так как произведение  $bf$  превышает установленный предел. Экстремум в области 200 мкТл в целом соответствует проявлениям механизма ионной интерференции.

Перпендикулярную комбинацию МП использовали в [96] при наблюдении МБЭ на хронически (3 мес.) облученных мышах:

$$B(40)Bp(141)f(50). \quad (1.40)$$

Качественные и количественные изменения состава лимфоцитов были отождествлены с индуцированной МП лейкемией.

Действие МП амплитудой 10 мкТл частотой до 1000 Гц на активность цитохромоксидазы (фермент из семейства дыхательных ферментов) мембранного фермента описано в [107]. Частотная зависимость эффекта обнаружила максимум в диапазоне 500–1000 Гц.

В 1996 г. проведено исследование влияния слабого комбинированного магнитного поля на скорость регенерации планарий *Dugesia tigrina* – бесполой лабораторной расы животных [109]. Полученные результаты свидетельствуют, что слабое комбинированное магнитное поле, настроенное на основную частоту параметрического резонанса для  $Ca^{2+}$ , приводит к ускорению регенерации этих планарий. Этот вывод был подтвержден в ходе экспериментальной проверки предсказаний теории магнитного параметрического резонанса с использованием регенерирующих планарий *Dugesia tigrina* в качестве тест-системы [110].

Ученые доказали, что крайне слабые переменные магнитные поля с амплитудами в области «пикотеслового», «нанотеслового» и «микротеслового» диапазонов оказывают существенное влияние на скорость гравитропического изгиба в отрезках стеблей льна [111].

Аномалии развития могут быть вызваны действием слабых электромагнитных факторов различной частоты [112, 113]. Такое действие было обнаружено и для регенерирующих планарий, подвергавшихся влиянию переменных магнитных полей частотой 60 Гц при интенсивности от 1,0 до 80 мТл [114, 115].

Проведенный анализ научных публикаций, касающихся воздействия магнитного поля на биологические объекты, свидетельствует о биологическом эффекте. Величина биологического эффекта переменного магнитного поля зависит от определенных соотношений «амплитуда (напряженность поля)/частота» и времени воздействия данного фактора на биологические объекты.

## **Краткий анализ публикаций, касающихся влияния электрических полей низкочастотного диапазона на биологические объекты**

Биологическое действие электрического поля преимущественно сводится к действию вызванных им ионных токов внутри внеклеточной плазмы [21]. Перераспределение ионов ведет к локальным изменениям электропотенциалов на поверхности макромолекул и клеточных мембран. Это в свою очередь сопровождается изменением скоростей биохимических реакций.

В одном из экспериментов клетки фибробластов кожи человека подвергали действию электрического поля 60 Гц величиной 100 кВ/м и не обнаружили изменений в скорости роста клеток и репарации ДНК [47].

Исследование пролиферации (разрастание ткани организма путем размножения клеток делением) клеток костных тканей цыпленка в слабом НЧ электрическом поле по включению в клетки <sup>3</sup>Н-тимидина описано в [51]. Также определяли фитогенную активность экспонированной культуры на другой, неэкспонированной. Переменное поле между обкладками в отсутствие чашки составляло 10 В/2,3 см. Формула эксперимента

$$e(430 V/m)B(?)f(8-24/4)n(6) \quad (1.41)$$

позволила установить наличие окна эффективности по частоте. В рамках механизма интерференции ионов в переменном электрическом поле эффективные частоты такие же, как и в случае одноосного МП: циклотронная частота и ее (суб)гармоники. Если принять локальное МП, о котором в статье не сообщили, за 20 мкТл, то частота максимума 16 Гц соответствует ларморовой частоте\* ионов кальция.

Обнаружена частотная избирательность действия синусоидального электрического поля на специфическую активность фермента энлаза в культуре клеток кишечной палочки [76]. Клетки помещали на 30 мин в область, где амплитуда электрического поля составляла 65,4 В/м. Использовали частоты в диапазоне 10–72 Гц. При варьировании частоты электрического поля меняется не только величина, но и знак эффекта.

---

\* Ларморова частота – угловая частота прецессии магнитного момента, помещенного в магнитное поле.

Низкочастотное электрическое поле [90] прикладывалось к среде с клетками HL-60 посредством плоских электродов внутри или снаружи в диапазоне амплитуд 1–4000 В/м и частот 0,1–100 Гц. Измерение внутриклеточного содержания свободных ионов кальция на флуоресцентном спектрометре не выявило эффективности 15-минутной экспозиции в таких полях. Компонента ГМП, перпендикулярная электрическому полю, была 12 мкТл, о наличии и величине другой компоненты ничего не сообщалось.

Относительно интенсивные и короткие импульсы электрического тока способствуют проникновению крупных молекул типа ДНК и белков внутрь биологических клеток [92]. Возможность действия относительно сильных постоянных и переменных электрических полей не вызывает сомнений, хотя и в этом случае механизмы такого действия не всегда определены. Обнаружены частотные и амплитудные окна (это та резонансная частота и амплитуда волны, в пределах которой биологический эффект наиболее ощутим) при действии низкочастотного электрического поля на скорость истечения ионов кальция  $^{45}\text{Ca}$  из ткани мозга цыпленка. Максимум эффекта был зафиксирован в области 16 Гц и 10–60 В/м.

Сконструирована специальная чашка с концентрическими ячейками, которая помещалась в соленоид [93]. Ячейки устроены так, что в них можно организовать прохождение через клеточную культуру (timoциты крысы) переменного электрического тока 60 Гц, равного тому, который был индуцирован включением МП 60 Гц, 22 мТл в соленоиде. В обоих случаях электрическое поле в ячейке имело одну геометрию и составляло 62–170 мВ/м. В статье указано, что параллельная оси соленоида компонента ГМП составила 20,5 мкТл, что не исключает ионные интерференционные механизмы действия электрического поля [93].

Флуоресцентным видеомикроскопом исследована реорганизация нитей цитоскелета при пропускании электрического тока через культуру клеток гепатомы человека Hep3В [94] (рис. 1.6).

Параметры электрического поля менялись в диапазоне частот 0–60 Гц, нулевая частота соответствует пропусканию постоянного тока и амплитуд поля 0–1 кВ/м. Последние вычислялись по измеренному току и проводимости клеточной среды. Только часть клеток реагировала на включение поля (рис. 1.7).

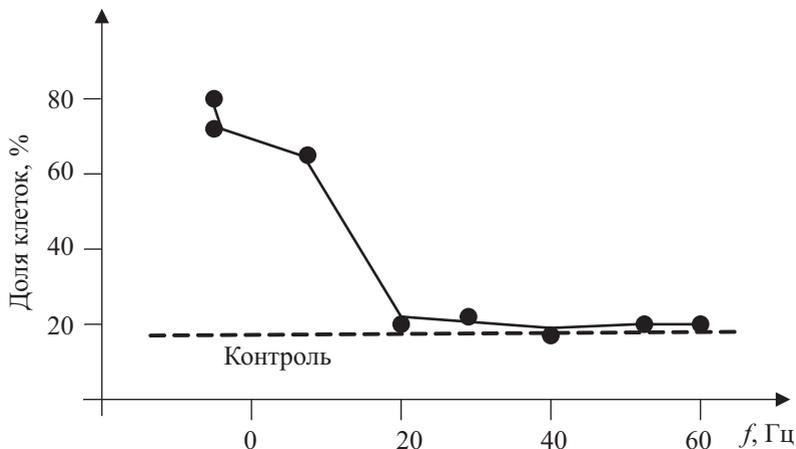


Рис. 1.6. Относительное число клеток гепатомы человека, реагирующих перестройкой структуры цитоскелета на включение ЭП в зависимости от частоты

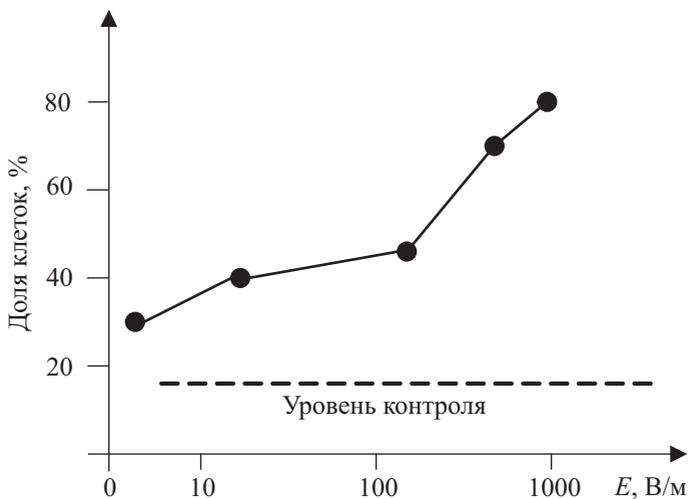


Рис. 1.7. Относительное число клеток гепатомы человека, реагирующих перестройкой структуры цитоскелета на включение ЭП 1 Гц различной амплитуды

На рис. 1.7 приведены результаты влияния ЭП 1 Гц на клетки гепатомы (злокачественная опухоль печени) человека и относительное

число чувствительных клеток, проявивших реакцию на 15-минутное включение поля. Нерезонансный вид частотного спектра говорит, что в основе эффекта лежит реакция на постоянное поле с характерным временем 0,1 с, причем поля противоположной направленности вызывают противоположные эффекты. В таком случае действия положительной и отрицательной полуволн синусоидального сигнала с частотой  $> 10$  Гц значительно компенсируют друг друга. Видно, что эффект возникает уже при малом значении электрического поля – 1 В/м – и не обладает амплитудной величиной.

Скорость гликолиза астроцитов мозга мыши в присутствии электрического поля изменяется от 50 до 1500 В/м [95]. Клеточная культура в плоской чашке располагалась между горизонтальными пластинами конденсатора, разделенными расстоянием 1 см. Когда отрицательный электрод был сверху, наблюдали увеличенную скорость гликолиза, приблизительно на 20 % при 1000 В/м. Изменение полярности меняло знак эффекта, но по величине он был гораздо меньше, около 4 %. Интересно, что зависимость величины эффекта от напряженности поля имела нетривиальный характер (рис. 1.8).

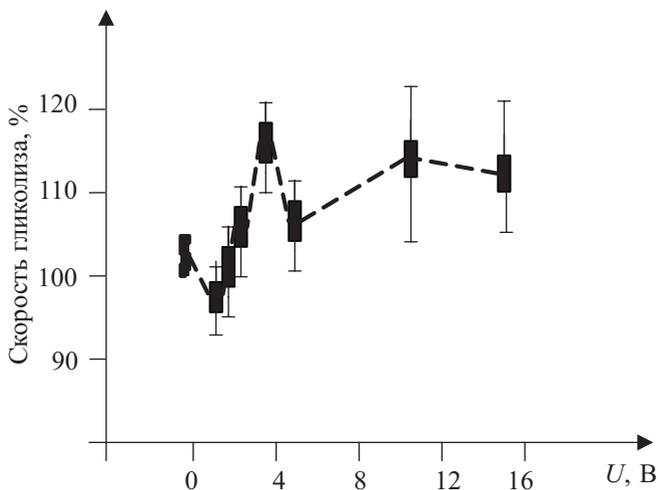


Рис. 1.8. Скорость гликолиза клеток мозга мыши после 30 мин экспозиции в ЭП заданной величины, в процентах к контролю при  $U = 0$  В

Авторы рассчитали, что электрическое поле в 30 мВ/м способно вызывать биологический эффект со сложной дозовой зависимостью [95].

Исследована пролиферация клеток остеобластов мышей [96]. Клетки, подвергнутые экспозиции ЭП 10 Гц величиной 20 В/м в течение 20 мин, росли на 60 % быстрее контрольных. Также измеряли внутриклеточную концентрацию кальция флюоресцентным методом при экспозиции прямоугольными импульсами ЭП по следующей схеме:

$$E(20-1000 \text{ V/m})f(1-1000). \quad (1.42)$$

Обнаружены частотное и амплитудное окна. Максимальный эффект найден в диапазоне 5–15 Гц. Максимум эффекта электрического поля составил около 500 В/м.

Исследован выход ионов кальция из ткани мозга цыпленка *in vitro* в широком диапазоне частот комбинированного действия слабых магнитных и электрических полей [97]. Формула эксперимента:

$$b(0,085-0,1)ep(20 \text{ V/m})f(1-510/15)Bp(<38)B(?). \quad (1.43)$$

Использовали двойной контроль: шам-контроль (контрольные условия; Sham применяется в англоязычной литературе) и контроль вне устройства экспозиции. Обращает на себя внимание довольно малая амплитуда переменного МП – десятки нТл, что соответствует уровню некоторых геомагнитных вариаций (рис. 1.9).

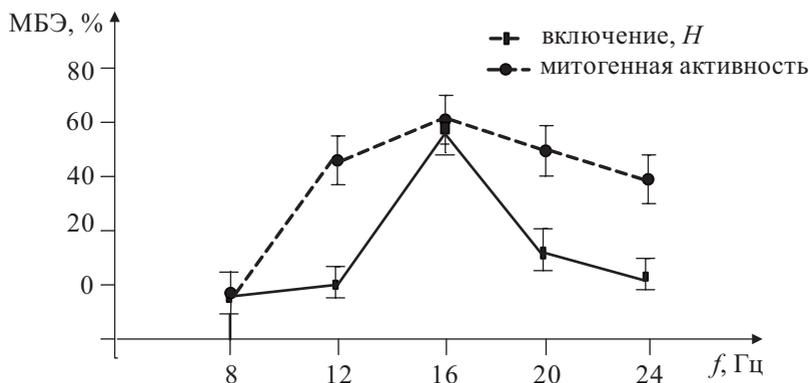


Рис. 1.9. Отклик клеток костной ткани черепа цыпленка на переменное МП

Для 16-ти из 38-ми испытанных частот найден статистически значимый,  $P < 0,05$ , МБЭ. Обнаружены частотные окна МБЭ. Не исключено, что в разных диапазонах срабатывают разные

первичные биофизические механизмы. Важно, что практически во всем частотном спектре МБЭ был одного знака, а выход кальция при включении ЭМП возрастал.

Эффективность экспозиции током  $250 \text{ мкА/см}^2$  на частоте  $4 \text{ кГц}$  в амплитудном окне шириной около  $200 \text{ мкА/см}^2$  была обнаружена в работе по измерению выхода интерлейкинов из клеток [108]. При проведении эксперимента применяли низкочастотную модуляцию тока  $0\text{--}125 \text{ Гц}$ .

Не было замечено и изменений в свойствах раковых клеток после воздействия электрическими полями, в отличие от случая комбинированного с МП облучения [118]. Краткая сводка работ по биологическим эффектам электрических полей величиной  $5\text{--}105 \text{ кВ/м}$  имеется в [119].

Ученые подходят к изучению биологического эффекта с точки зрения возникновения резонанса между возможными частотами от искусственных источников и частотами, на которых функционируют органы человека, так называемые ларморовые частоты. Анализ научных публикаций, касающихся воздействия электрического поля на биологические объекты, свидетельствует о биологическом эффекте.

Величина биологического эффекта переменного электрического полей зависит от соотношения

$$\frac{\text{амплитуда (напряженность поля)}}{\text{частота и время воздействия данного фактора}}.$$

Приведенное соотношение позволит определить безопасные уровни напряженности электрического поля низкой частоты в течение рабочей смены и (или) нескольких лет работы персонала в электроустановках, тем самым будет заполнен пробел в области нормирования электрических полей до  $1 \text{ кГц}$ .

В представленных работах изменения биологических объектов при воздействии электрических полей были ниже предельно допустимого уровня рассматриваемого поля в РФ [15]; необходимы постоянный контроль данного фактора на рабочих местах и актуализация ПДУ ЭП.

Биологические процессы при заболеваниях человека сложны и многогранны. Необходимо разработать должные подходы к этим научным вопросам, а это можно достичь только в междисциплинарном сотрудничестве биологов, инженеров и биофизиков [25].

На сегодняшний день разработана программа проведения совместных экспериментальных исследований между инженерами ФГБОУ ВО УрГУПС и биологами ФГБОУ ВПО ИнГГУ, которая устанавливает порядок и методы проведения экспериментальных исследований воздействия ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты (животные, растения) в зависимости от частоты и времени воздействия данного фактора (приложение 1).

## Устройство для создания переменного и электрического полей низкочастотного диапазона для исследования воздействия ЭМП на биологические объекты

Изобретение относится к генерированию электромагнитных полей для исследований их воздействия на биоорганизмы.

Задача прибора – создание переносного устройства для генерирования электромагнитных полей с заданными параметрами для исследования их воздействия на биоорганизмы.

На рис. 1.10 представлена схема устройства для создания переменного магнитного и электрического полей [120].

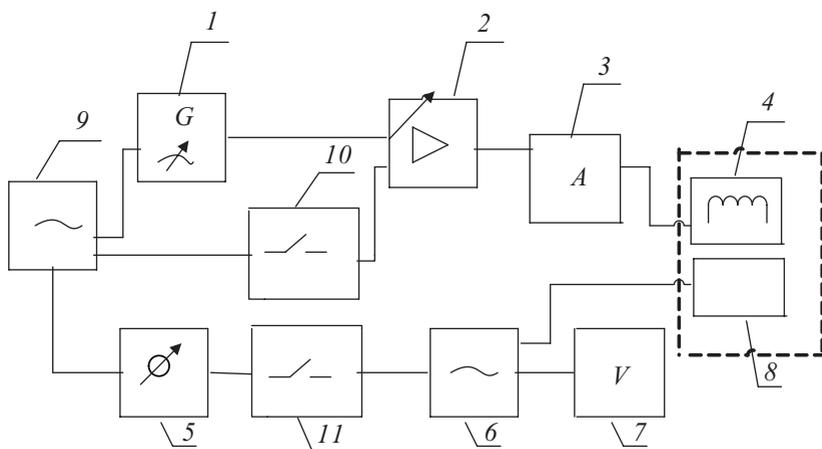


Рис. 1.10. Устройство для создания переменного магнитного  
и электрического полей

С помощью генератора переменного напряжения  $I$ , подключенного к сети  $9$  напряжением  $220$  В, осуществляется получение переменного напряжения заданной формы и частоты. Сигнал с генератора переменного напряжения  $I$  подается на один из входов усилителя переменного тока  $2$ , который вторым входом через выключатель  $10$  подключен к сети  $9$  напряжением  $220$  В. К выходу усилителя переменного тока  $2$  через амперметр переменного тока  $3$  подключена обмотка соленоида  $4$ . В обмотке соленоида  $4$  протекает ток заданной величины, который приводит к образованию переменного магнитного поля внутри соленоида  $4$ . Величину тока определяют с помощью амперметра переменного тока  $3$ .

Необходимую величину тока в обмотке соленоида определяют из соотношения [121]

$$H = I \cdot n, \quad (1.44)$$

где  $H$  – напряженность переменного магнитного поля внутри соленоида, А/м;  $I$  – ток в обмотке соленоида, А;  $n$  – число витков обмотки, проходящихся на единицу длины соленоида

$$n = \frac{N}{l}, \quad (1.45)$$

где  $N$  – полное число витков соленоида;  $l$  – длина соленоида, м.

Регулирование тока производится с помощью реостата, встроенного в усилитель переменного тока  $2$ .

Для получения электрического поля служит высоковольтный источник переменного напряжения  $6$ , который входом подключен через выключатель  $11$  к выходу лабораторного автотрансформатора  $5$ . Лабораторный автотрансформатор  $5$  входом подключен к сети  $9$  напряжением  $220$  В. С помощью лабораторного автотрансформатора  $5$  регулируют напряжение на входе высоковольтного источника переменного напряжения  $6$ . Высоковольтный источник переменного напряжения  $6$  имеет два выхода, один из которых подключен к металлическим пластинам  $8$ , а другим – к вольтметру переменного напряжения  $7$ , с помощью которого измеряют напряжение на выходе высоковольтного источника переменного напряжения  $6$ . При подаче напряжения на металлические пластины  $8$  в пространстве между ними образуется электрическое поле.

Необходимое значение напряжения на выходе высоковольтного источника переменного напряжения определяют из соотношения [121]

$$E = \frac{U}{d}, \quad (1.46)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в пространстве между металлическими пластинами, В/м;  $U$  – напряжение на выходе высоковольтного источника переменного напряжения, В;  $d$  – расстояние между металлическими пластинами, м.

Высоковольтный источник переменного напряжения 6 содержит клеммы (на схеме не представлены) для подключения вольтметра переменного напряжения 7 и металлических пластин 8. Для повышения безопасности работы клеммы подключения металлических пластин 8 соединены с высоковольтным источником переменного напряжения 6 через резисторы (на схеме не представлены).

Максимально допустимое напряжение на входе высоковольтного источника переменного напряжения 6, подаваемое с лабораторного автотрансформатора 5, равно 240 В.

Металлические пластины 8 размещены внутри соленоида 4 таким образом, что переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой соленоида 4, и электрическое поле, создаваемое между металлическими пластинами 8, совпадают или пересекаются в своей большей части, создавая в этой области пространства электромагнитное поле с заданными параметрами.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет генерировать электрическое, переменное магнитное и электромагнитное поля, задавать необходимые параметры этих полей в зависимости от исследуемых биоорганизмов, является мобильным и может быть подключено к сети напряжением 220 В.

Внешний вид устройства для создания переменного магнитного и электрического полей представлен на рис. 1.11.

Прибор может использоваться для проведения экспериментальных исследований на биологических объектах с целью выявления безопасных уровней ЭП и МП в частотном диапазоне до 1кГц и дозы ЭМП.



*Рис. 1.11. Устройство для создания переменного магнитного и электрического полей*  
 1 – вольтметр переменного напряжения; 2 – автотрансформатор;  
 3 – высоковольтный источник переменного напряжения; 4 – соленоид со встроенными металлическими пластинами; 5 – амперметр переменного тока; 6 – реостат регулировки тока (встроен в усилитель); 7 – генератор низкочастотный

## **Экспериментальные исследования магнитных полей разной частоты, искусственно созданных на экспериментальной установке**

### ***Модель проведения экспериментальных исследований электрических и магнитных полей частотой до 1 кГц***

На созданной нами экспериментальной установке проведены экспериментальные исследования ЭП и МП. Для проведения экспериментальных исследований магнитных полей на обмотку соленоида подается переменный ток от 0,5 А до 1,16 А и с помощью генератора частот выбирается и устанавливается частота от 50 Гц до 1 кГц (рис. 1.12). Таким образом, внутри соленоида формируется переменное магнитное поле определенной частоты.

Для проведения экспериментальных исследований электрических полей на металлические пластины, размещенные внутри соленоида, подается напряжение от 20 В до 220 В, внутри соленоида формируется электрическое поле 50 Гц.

Уровни напряженностей МП и ЭП внутри соленоида измеряют с помощью прибора «Экофизика». Для каждой величины тока

и напряжения получены среднеквадратичные и максимальные значения напряжённости магнитного и электрического полей.

Проводится анализ полученных данных для ЭП и МП; при их адекватности ( $R^2 > 0,9$ ) строятся графики зависимости напряженности магнитного поля от величины тока и напряженности электрического поля от напряжения, определяется математическая модель, указывается уравнение регрессии с коэффициентом детерминации.

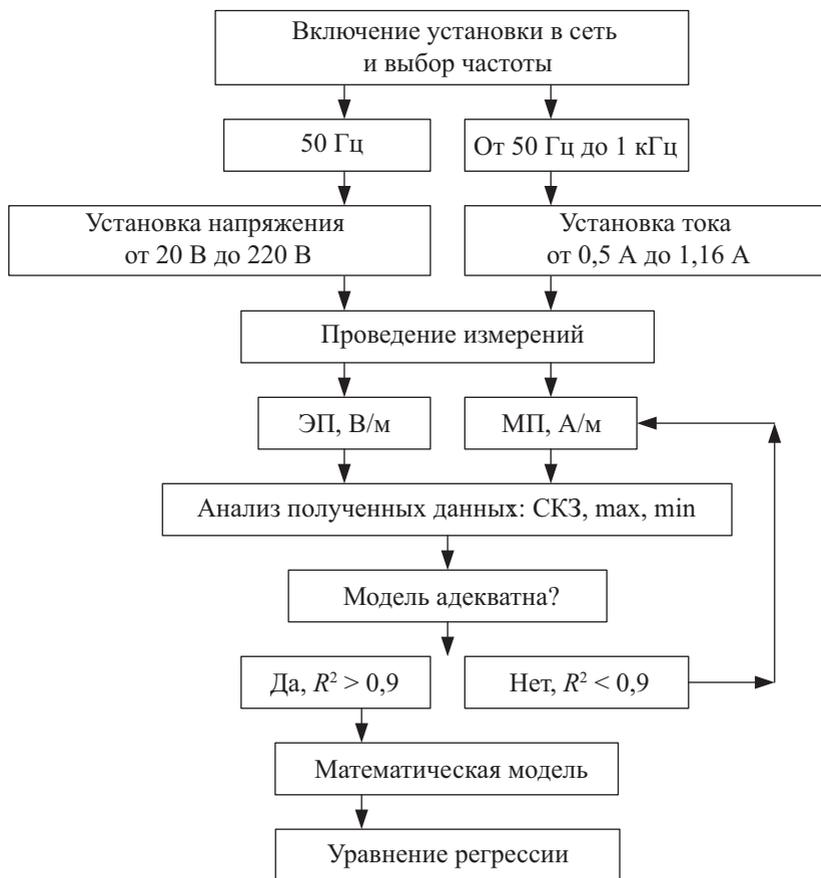


Рис. 1.12. Схема проведения экспериментальных исследований по моделированию ЭМП

Коэффициент детерминации также называют величиной достоверности аппроксимации. Коэффициент детерминации  $R^2$  показы-

вает долю общей вариации зависимой переменной, обусловленной регрессией (линией тренда) или изменчивостью объясняющей переменной. Этот коэффициент можно рассматривать как меру качества уравнения регрессионной модели: чем ближе  $R^2$  к единице, тем лучше регрессия описывает зависимость между объясняющими и зависимой переменными [123].

Кроме этого, коэффициент детерминации показывает, какая доля вариации объясняемой переменной  $y$  учтена в модели и обусловлена влиянием на неё включённых в модель факторов. Он может быть рассчитан по формуле [123]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1.47)$$

где  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $y_i$  – значения наблюдаемой переменной;  $\bar{y}$  – среднее значение по наблюдаемым данным;  $\hat{y}_i$  – модельные значения, построенные по оцененным параметрам.

В настоящей работе коэффициент детерминации рассчитан в программе Microsoft Office Word 2003 (Excel).

При неадекватности полученной модели ( $R^2 < 0,9$ ) экспериментальные исследования начинают заново с проведения измерений ЭП и МП определенной величины и частоты.

### ***Результаты полученных уровней напряженностей магнитных полей 50 Гц в зависимости от величины переменного тока***

Полученные результаты напряженностей магнитных полей 50 Гц в зависимости от величины тока, подаваемого на обмотку соленоида, представлены в таблице 1.15.

Из таблицы 1.15 видно, что для каждого уровня тока формируется определенный уровень напряженности магнитного поля. Значение напряженности магнитного поля внутри соленоида вычисляется по формуле (1.44). То есть напряжённость магнитного поля соленоида равна числу ампер-витков на метр [121]. Согласно формуле (1.47), зависимость значения напряжённости переменного магнитного

поля от величины тока частотой 50 Гц в обмотке соленоида является прямолинейной.

Таблица 1.15

Уровни напряжённости магнитного поля частотой 50 Гц при разной величине переменного тока

Величина тока $I$ , А	Среднеквадратичное значение напряжённости магнитного поля $H_{\text{срз}}$ , А/м	Минимальное значение напряжённости магнитного поля $H_{\text{мин}}$ , А/м	Максимальное значение напряжённости магнитного поля $H_{\text{max}}$ , А/м
0,5	34	33,4	35,1
0,55	37,3	33,9	38,6
0,6	41,5	41,5	41,7
0,65	45,8	45,8	45,9
0,7	49	48,9	49,1
0,75	52,2	51,9	52,4
0,8	56,8	56,6	56,8
0,85	59,8	59,6	59,9
0,9	62,4	62,1	63,4
0,95	67,8	67,7	68
1	71,2	71,2	71,3
1,07	76,7	76,6	76,7
1,16	83,2	82,5	83,2

График зависимостей максимального, среднеквадратичного и минимального значений напряжённости магнитного поля 50 Гц от величины тока, представленный на рис. 1.13, подтверждает, что зависимость максимального значения, как и минимального и среднеквадратичного значений напряжённости МП 50 Гц от величины тока, является прямолинейной.

На рис. 1.13 также представлены уравнения регрессионных моделей для вышеуказанных значений МП; коэффициенты детерминации  $R^2 > 0,9$ . Модель может быть использована для проведения экспериментальных исследований влияния МП 50 Гц на биологические объекты.

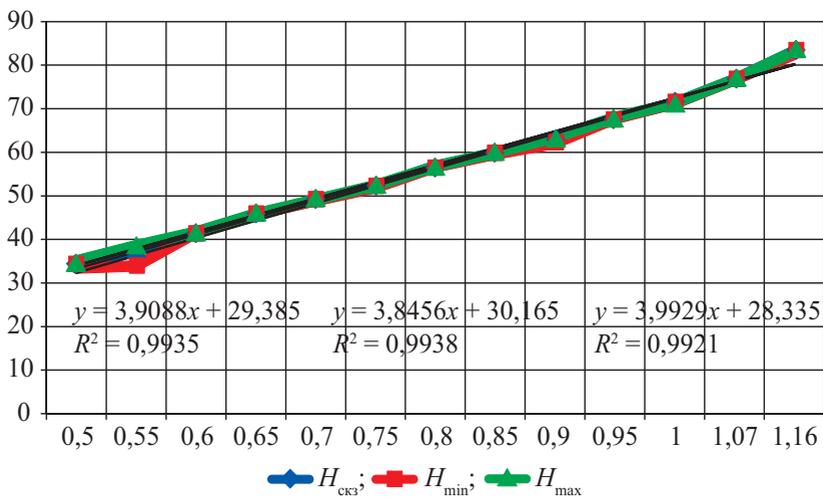


Рис. 1.13. Зависимости максимального, среднеквадратичного и минимального значений напряженностей МП 50 Гц от величины тока

### Результаты полученных уровней напряженностей магнитных полей 100 Гц в зависимости от величины переменного тока

По описанной схеме также проведены экспериментальные исследования МП 100 Гц. На обмотку соленоида подаётся переменный ток от 0,5 А до 1,07 А частотой 100 Гц. Для каждой величины тока приведены измеренные среднеквадратичные, минимальные и максимальные значения напряженности магнитного поля (таблица 1.16).

Данные таблицы 1.16 дают возможность определить процентные изменения напряженности МП; они изменяются не более чем на 2,59%, не превышая принятой стандартной погрешности (5%).

На рис. 1.14 представлен график зависимостей максимального, среднеквадратичного и минимального значений напряженности магнитного поля 100 Гц от величины тока.

Из рис. 1.14 видно, что зависимость максимального, минимального и среднеквадратичного значений напряженности МП 100 Гц от величины тока прямолинейная.

Таблица 1.16

Уровни напряжённости магнитного поля частотой 100 Гц при разной величине переменного тока

Величина тока $I$ , А	Среднеквадратичное значение напряжённости магнитного поля $H_{\text{скз}}$ , А/м	Минимальное значение напряжённости магнитного поля $H_{\text{min}}$ , А/м	Максимальное значение напряжённости магнитного поля $H_{\text{max}}$ , А/м
0,5	38,2	38,1	38,2
0,55	41,1	41	41,3
0,6	44,2	44,1	44,4
0,65	48,5	48,4	48,5
0,7	51,3	50,9	51,6
0,75	55,6	55,5	55,8
0,8	59,5	58	59,5
0,85	61,6	61	61,7
0,9	65,6	65,4	65,6
0,95	69,8	69,8	69,9
1	72,8	72,6	72,8
1,07	76,1	76,1	77,2

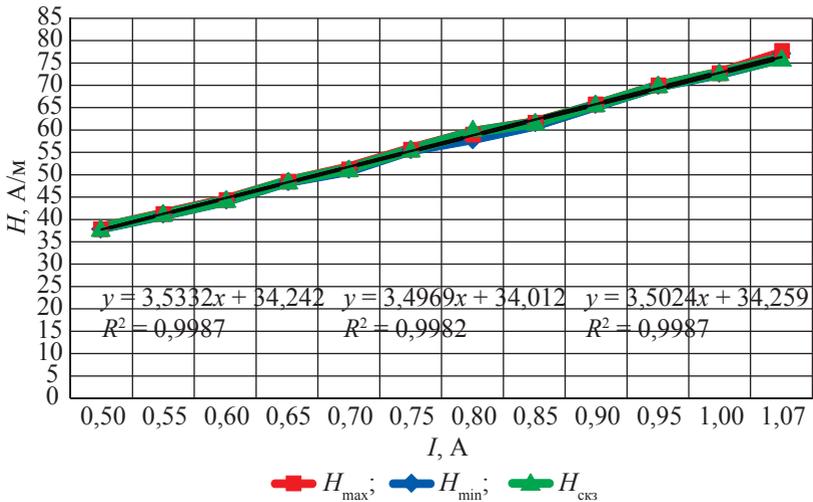


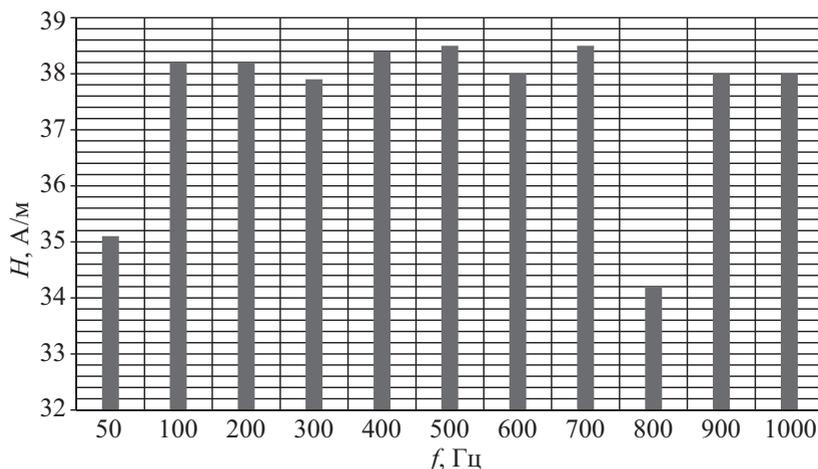
Рис. 1.14. График зависимости максимального, среднеквадратичного и минимального значений напряжённости МП 100 Гц от величины тока

Коэффициенты детерминации, представленные на рис. 1.20,  $R^2 > 0,9$ , значит, эту модель можно использовать для проведения экспериментальных исследований влияния МП 100 Гц на биологические объекты.

### **Результаты полученных уровней напряженностей уровней магнитных полей в частотном диапазоне до 1 кГц в зависимости от величины переменного тока**

Далее аналогично проведены экспериментальные исследования МП частотой от 200 до 1000 Гц.

На рис. 1.15 представлены зависимости максимального значения напряжённости переменного магнитного поля от разной частоты при величине тока в 0,5 А.



*Рис. 1.15.* Зависимость максимального значения напряжённости переменного магнитного поля от разной частоты при величине тока в 0,5 А

Из рис. 1.15 видно, что при одном и том же уровне тока в 0,5 А значения напряженностей МП для разных частот отличаются друг от друга не более чем на 10%. При токе 0,5 А для МП 50 Гц максимальное значение напряжённости составило 35,1 А/м.

Рассчитаем процентное соотношение максимальных значений МП для частот от 100 до 1000 Гц к напряженности МП 50 Гц, результаты сведем в таблицу 1.17.

Таблица 1.17

Значения соотношений максимальных значений МП для частот от 100 до 1000 Гц к напряженности МП 50 Гц при токе 0,5 А

Частота, Гц	% по отношению к 50 Гц
50	—
100 и 200	>8,83
300	>7,98
400	>9,4
500 и 700	>9,69
800	<2,56
600; 900 и 1000	>2,95

При формировании МП от 100 до 1000 Гц наблюдается прямо пропорциональное увеличение поля в зависимости от частоты, кроме напряженности МП 800 Гц: поле не увеличивается, как в предыдущих случаях, наоборот, снижается по отношению к МП 50 Гц.

Далее на обмотку соленоида подаётся переменный ток в 1 А для частот от 200 до 1000 Гц. Полученные измеренные максимальные значения МП до 1 кГц представлены на рис. 1.16.

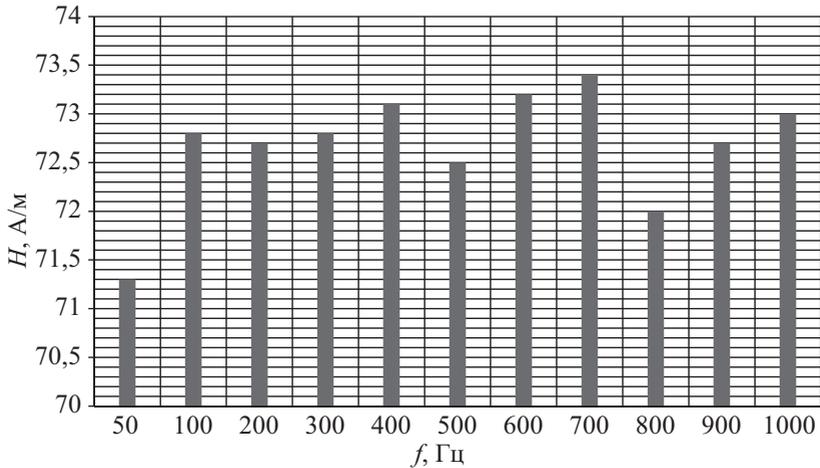


Рис. 1.16. Зависимость максимального значения напряженности переменного магнитного поля от частоты тока при токе 1 А

Из рис. 1.16 видно, что максимальное значение напряжённости МП 700 Гц составляет 73,4 А/м, минимальное зафиксировано на частоте 50 Гц и равно 71,3 А/м.

Значения соотношений максимальных значений МП для частот от 100 до 1000 Гц к напряженности МП 50 Гц при токе 1 А приведены в таблице 1.18.

*Таблица 1.18*

Значения соотношений максимальных значений МП для частот от 100 до 1000 Гц к напряженности МП 50 Гц при токе 1 А

Частота, Гц	% по отношению к 50 Гц
50	—
100 и 300	>2,1
200 и 900	>1,96
400	—
500	>1,68
600	>2,66
700	>2,95
800	>0,98
1000	>2,38

При формировании МП от 100 до 1000 Гц наблюдается прямо пропорциональное увеличение поля в зависимости от частоты.

Обобщив полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

при подаче на обмотку соленоида тока в 0,5 А для рассматриваемых частот формируется определенный уровень напряженности МП; сравнение полученных данных с уровнем напряженности МП 50 Гц показывает, что они изменяются не более чем на 10 %;

выделяется частота 800 Гц, при формировании МП которой уровень её уменьшается при сравнении с МП 50 Гц, а не увеличивается, как для других частот;

чем выше величина тока, подаваемая на обмотку соленоида, тем ниже разница между сформированным МП разной частоты; в данном случае разница не превысила 3 % от МП 50 Гц.

Значит, установку можно использовать для проведения экспериментальных исследований по воздействию магнитных полей частотой до 1кГц на биологические объекты.

**Результаты полученных уровней напряженностей  
электрического поля 50 Гц в зависимости от величины  
напряжения**

На две металлические пластины, находящиеся внутри соленоида, подаётся напряжение от 20 до 220 В. Для каждого значения напряжения в таблице 1.19 приведены измеренные среднеквадратичные и максимальные значения напряжённости ЭП 50 Гц (с увеличением напряжения величина напряженности ЭП 50 Гц прямо пропорционально возрастает).

*Таблица 1.19*

Уровни напряжённости ЭП 50 Гц при разных значениях  
напряжения

Напряжение, $U$ , В	Среднеквадратичное значение напряжённости электрического поля $E_{\text{ср.кв}}$ , В/м	Максимальное значение напряжённости электрического поля $E_{\text{max}}$ , В/м
20	785	841
40	1270	1740
60	1850	1910
80	2180	2370
100	2450	2480
120	2610	2860
140	3370	3660
160	3710	3820
180	3990	4380
200	4050	4070
220	5180	5410

При построении графиков зависимостей максимального и среднеквадратичного значений напряжённости ЭП 50 Гц от величины напряжения (зависимость напряжённости ЭП 50 Гц от величины напряжения является прямолинейной) получены уравнения регрессионных моделей и коэффициенты детерминации (таблица 1.20).

Таблица 1.20

Характеристики зависимостей напряжённости ЭП 50 Гц  
от величины напряжения

Уравнение регрессионной модели	Коэффициент детерминации	Возможность использования зависимости
Для максимальных значений $y = 19,843x + 668$	$R^2 = 0,9592$	Да
Для среднеквадратичных значений $y = 19,77x + 486$	$R^2 = 0,9769$	Да

Анализ показал высокую степень точности результатов моделирования ЭМП по магнитному и электрическому полям – погрешность не превышает 5%. Данную установку можно использовать для проведения экспериментальных исследований по воздействию электрических полей на биологические объекты.

### Результаты проведенных исследований воздействия магнитных полей 50 Гц на биологические объекты с помощью экспериментальной установки

Метод постановки опыта позволяет изучить биологическое действие ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц на планариях и растениях в зависимости от частоты и продолжительности воздействия данного фактора. Планарии и растения помещались в МП 50 Гц. Ежедневно проводились наблюдения за ростом их после декапитации в зависимости от частотного диапазона ЭМП по методике, приведенной в [109]. Продолжительность проведения испытаний – три года, за это время экспериментально определен порог вредного действия ЭМП на биологические объекты в зависимости от частоты и продолжительности воздействия данного фактора.

Методика проведения экспериментальных исследований по воздействию ЭП, МП и суммарного ЭМП на биологические объекты представлена рис. 1.17, 1.21, 1.22.

Начало работы по изучению влияния действия низкочастотных электромагнитных полей на регенерацию планарий отражено в [124]. В эксперименте для исследования взята бесполовая раса

пресноводных червей *Dugesia* (*Girardia tigrina*). Планарии содержали в соответствующих условиях при температуре 26 °С. Декапитацию производили на уровне головного конца. Декапитированных планарий разделили на опытную и контрольную группы, по 20 червей.



Рис. 1.17. Структурная схема проведения эксперимента по исследованию воздействия МП 50 Гц на биологические объекты

Для проведения экспериментальных исследований влияния МП 50 Гц на биологические объекты (рис. 1.17) на обмотку соленоида

подавался переменный ток и с помощью генератора частот устанавливалась частота 50 Гц (см. рис. 1.11). Внутри соленоида формировалось переменное магнитное поле данной частоты. Опытную группу ежедневно, в одно и то же время на четыре часа помещали в магнитное поле 83 А/м с частотой 50 Гц.

Схема эксперимента:

$$H_{AC}(83)f(50)n(5)T(4). \quad (1.48)$$

Единицы измерения: для напряженности МП переменного  $H_{AC}$  – А/м, для частоты  $f$  – Гц,  $T$  – время воздействия, ч, количество повторов –  $n$ .

Такие манипуляции проводят до тех пор, пока не произойдет полная регенерация головного отдела *Girardia tigrina*. На пятый день планарии полностью регенерировали. Интенсивность регенерации в опытной и контрольной группе различна (рис. 1.18), в опытной регенерация происходила интенсивнее.

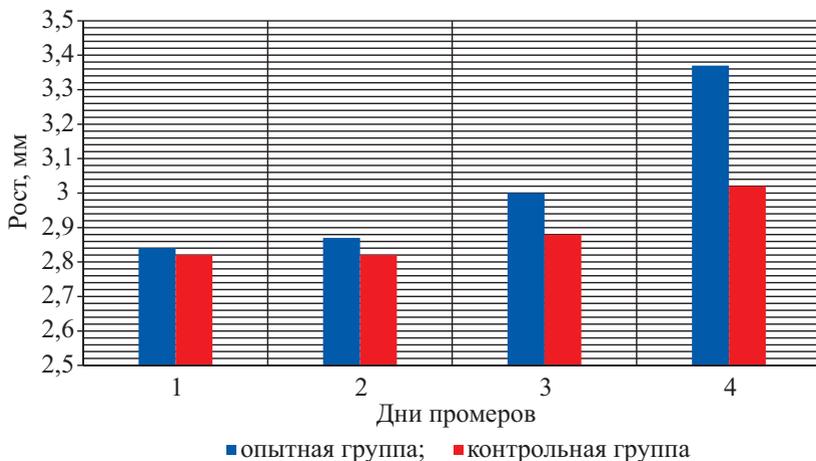


Рис. 1.18. Регенерация планарий при воздействии МП 50 Гц

Опытная группа имела более интенсивный рост декапированной части тела, из чего следует, что воздействие магнитного поля частотой 50 Гц усиливает регенерацию, а значит, и учащает митоз.

На семена *Triticum aestivum* (по 30 штук в контрольной и опытной группах) магнитное поле воздействовало аналогично. Зерна

*Triticum aestivum* сутки замачивали и на следующий день использовали в эксперименте. Семена помещали в чашку Петри и погружали в магнитное поле 83 А/м на 4 ч с частотой 50 Гц; температура воздуха во время эксперимента – 28–33 °С.

Каждый день в течение четырех дней проводили тщательное наблюдение за проростками, все изменения фиксировались в журнале наблюдений.

На четвертый день эксперимента большая часть семян, находившихся в опытной группе, под влиянием магнитного поля проросла, а в контрольной группе проросших семян меньше. Корешки проросших семян из опытной группы достигали размеров более 1 мм, а в контрольной – менее 1 мм (рис. 1.19).

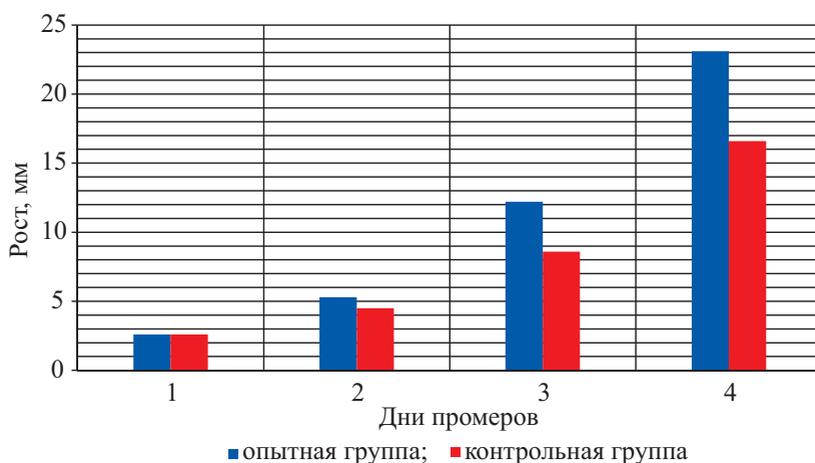


Рис. 1.19. Рост корешков пшеницы под действием магнитного поля 50 Гц

Со второго дня наблюдалась разность длины проросших корешков в контрольной и опытной группах (4,5 и 5,3 мм). На четвертый день исследования эта разница была явной: 23,1 мм в опытной и 16,6 мм в контрольной.

Выборочно корешки от пяти семян каждой группы закрепляли в фиксаторе для дальнейших исследований.

Остальные проростки семян (по 14 экземпляров из опытной группы и такое же количество из контрольной) были высеяны в грунт (в комнатных условиях, при температуре 28–33 °С; рис. 1.20).

Промеры проростков проводили через каждые три дня. Максимальный рост, который давали проростки в опытной группе через каждые три дня, составлял в среднем 8 мм при температуре 33 °С.

Максимальный рост, который давали проростки из контрольной группы через каждые три дня, составлял в среднем 6,5 мм при температуре 33 °С.

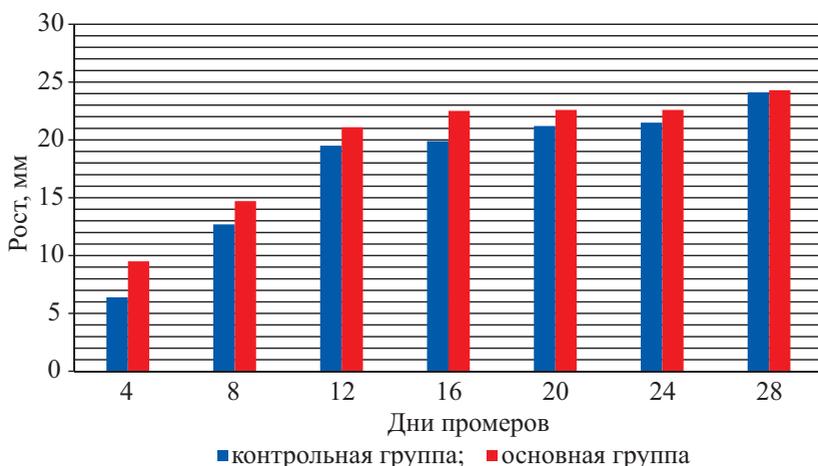


Рис. 1.20. Изменение длины надземной части пшеницы после посева в грунт

Длина опытных экземпляров проростков опережала такую у контрольной группы. Так, на четвертый день после посадки в грунт высота растений в контрольной и опытной группах составила 6,4 и 9,5 мм (разница в 3,1 мм). Через восемь дней – 12,7 и 14,7 мм (разница в 2 мм), а через 12 дней – 19,5 и 22,5 мм (разница в 3 мм).

С 24-го дня промеров средняя длина опытных и контрольных растений нивелировалась (22,5 и 22,5 мм), а к 28-му дню стала почти равной (24,1 и 24,3 мм).

Итак, магнитное поле 50 Гц влияет на рост семян пшеницы, стимулируя образование и рост её корней. Длина корней в опытной группе заметно превышала такую в контрольной группе. Но уже к 28 дню наблюдений разница в длине надземной части растений сглаживалась.

Воздействие МП на семена растений перед посадкой стимулирует более быстрое образование корней и может использоваться

в сельском хозяйстве для ускорения прорастания семян в первые дни высадки их в почву.

В соответствии со схемами работы, представленными на рис. 1.21, 1.22, запланировано продолжение эксперимента:

$$E(230 \text{ В/м})f(50)n(5)T(4;8); \quad (1.49)$$

$$E(230 \text{ В/м})H_{AC}(83)f(50)n(5)T(4;8). \quad (1.50)$$

Единицы измерения соответствуют часто употребляемым в подобных экспериментах: для напряженности МП переменного  $H_{AC}$  – А/м, для напряженности электрического поля  $E$  – В/м или  $V/m$ , для частоты  $f$  – Гц,  $T$  – время воздействия, ч, количество повторов –  $n$ .



Рис. 1.21. Структурная схема проведения эксперимента по исследованию воздействия ЭП 50 Гц на биологические объекты

Для экспериментальных исследований влияния ЭП 50 Гц на биологические объекты на обмотку соленоида подается переменное напряжение 220 В (рис. 1.21), внутри соленоида между пластинами сформируется переменное электрическое поле 50 Гц. Для последующих экспериментальных исследований влияния электрического поля 50 Гц на биологические объекты последние будут помещены в соленоид.

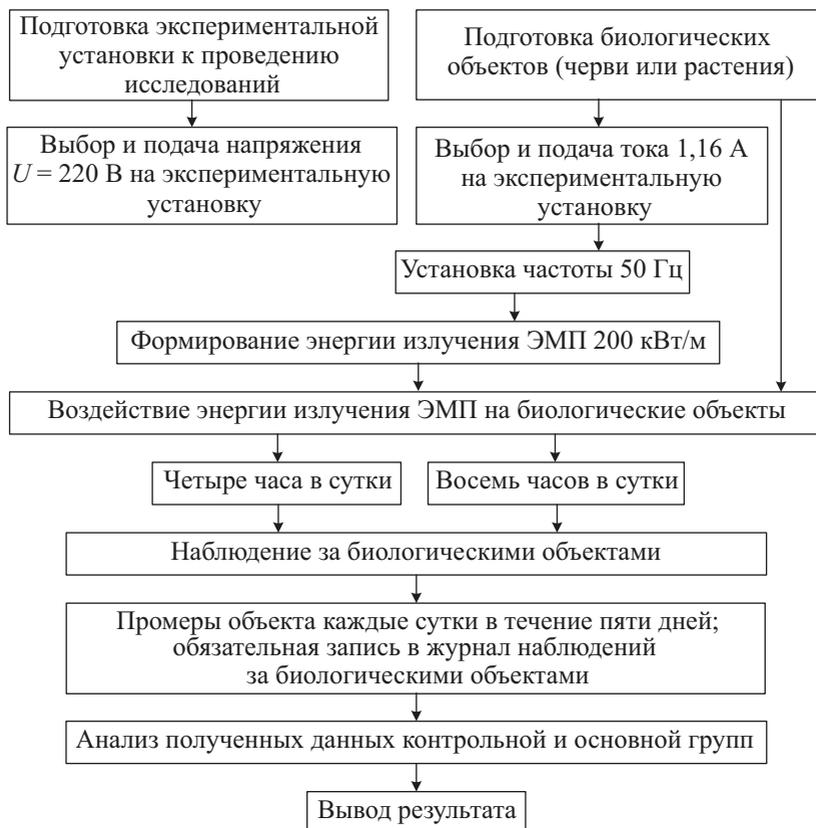


Рис. 1.22. Структурная схема проведения эксперимента по исследованию воздействия энергии излучения ЭМП 50 Гц на биологические объекты

Для проведения экспериментальных исследований влияния суммарного или сочетанного воздействия МП и ЭП 50 Гц на биологические объекты на обмотку соленоида одновременно будет

подаваться регулируемый переменный ток 1,16 А и переменное напряжение 220 В (см. рис. 1.22); внутри соленоида может формироваться переменное магнитное поле и электрическое поле 50 Гц, что позволит провести экспериментальные исследования влияния энергии излучения электромагнитного поля 50 Гц на биологические объекты.

Следующим шагом будет определение дозы низкого ЭМП, поглощенного червями, по формуле (1.21) (заменяя  $m_{\text{чел}}$  на  $m_{\text{чер}}$  или  $m_{\text{раст}}$  соответственно).

Итак, можно изменять напряженности электрических и магнитных полей, а также их суммарную величину с помощью экспериментальной установки, переносного устройства для генерирования электромагнитных полей с заданными параметрами. С использованием устройства для создания переменного магнитного и электрического полей можно определить влияние магнитных, электрических и суммарных электромагнитных полей на рост и развитие живого организма.

Разработаны структурные схемы проведения эксперимента по исследованию электрических и магнитных полей, энергии излучения электромагнитных полей на биологические объекты.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований по изучению сочетанного биологического действия ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц на планарий и растения.

Определено, что воздействие низкочастотного МП усиливает развитие корней у растений и регенерацию планарий; у последних это может привести к изменению роста стволовых клеток и в дальнейшем к изменению геномных участков, сходных с генами важнейших нейродегенеративных заболеваний человека.

Для решения вопросов электромагнитной безопасности человека и окружающей среды усилия специалистов разных государств объединены в рамках ВОЗ, Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений, Европейского комитета электротехнической стандартизации и Международной организации труда.

В России же по-прежнему существуют пробелы в области нормирования электромагнитных полей в частотном диапазоне до 10 кГц. На сегодняшний день существуют источники электромагнитных полей, работающие на частотах, для которых в России нет разработанных предельно допустимых уровней. Необходимые предельно допустимые соотношение «величина напряженности поля/частота» и время воздействия, создаваемые искусственными

источниками ЭМП, не установлены, что актуально для защиты электротехнического персонала от воздействия электромагнитных полей электроустановок железнодорожного транспорта. Определение и установление безопасных уровней напряженности электрического и магнитного полей, энергии излучения ЭМП, дозы ЭМП в низкочастотном диапазоне позволит сохранить здоровье персоналу, работающему вблизи электроустановок.

Нами представлено устройство для создания переменного и электрического полей низкочастотного диапазона для исследования воздействия малых уровней энергии ЭМП на биологические объекты. Его можно использовать для проведения экспериментальных исследований по воздействию электромагнитного поля в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты в зависимости от частоты и продолжительности воздействия.

Для проведения экспериментальных исследований по влиянию ЭП и МП низкой частоты, энергии ЭМП 50 Гц и продолжительности на биологические объекты разработана программа совместных экспериментальных исследований между Уральским государственным университетом путей сообщения и Ингушским государственным университетом (приложение 1).

## Глава 2

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЧАСТОТОЙ ДО 10 кГц, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### Источники электромагнитных полей, вредно воздействующих на электротехнический персонал

Считается, что в идеальной электроэнергетической системе энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. В реальных энергосистемах эти условия не выполняются. Отклонение форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих.

Для производства и потребления электрической энергии требуются ее преобразование для передачи электрической энергии на расстояние, изменения рода потребляемого тока, частоты потребляемого переменного тока и других параметров для реализации различных целей [125]. Преобразование электроэнергии осуществляется:

в электроэнергетике – для передачи электрической энергии на большие расстояния на постоянном токе, питания статических компенсаторов реактивной мощности, систем возбуждения электрических машин, накопителей энергии и других устройств,

электрическом транспорте – для электрической тяги железнодорожного магистрального и промышленного транспорта, трамваев, троллейбусов, метро,

электрометаллургии — для электролиза цветных металлов, производства и переработки стали и чугуна, электрографитации огнеупорных материалов и других процессов,

электроприводе — для питания приводов постоянного тока, переменного тока с преобразователями частоты и полупроводниковыми пусковыми устройствами,

электрохимии — для электролиза хлора, водорода, капролактама.

Системы электроснабжения (СЭС) энергоемких потребителей постоянного тока цветной и черной металлургии (алюминиевое, цинковое, магниевое, сталеплавильное производства), электродной и химической промышленности, городского и магистрального электрического транспорта строятся с использованием мощных выпрямительных агрегатов. Качество электрической энергии на выходе выпрямительных агрегатов и эффективность ее преобразования в энергию постоянного тока или в другие виды энергии определяются спектром высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения [126–128].

Как правило, спектр высших гармонических составляющих переменного тока выпрямительного преобразователя индивидуален, так как зависит не только от несимметрии и несинусоидальности переменного тока питающей энергосистемы, но и от схем выпрямительных преобразователей, эффективности работы сглаживающих устройств и других технических особенностей преобразователя.

Преобразователи тяговых подстанций (ТП) служат генераторами высших гармоник тока и напряжения. Помимо постоянного ЭП и МП, на рабочих местах электротехнического персонала присутствуют переменное ЭП и МП как промышленной частоты, так и высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения с частотой до 10 кГц, которые необходимо нормировать [127–128].

В общем случае частота  $f_k$  при симметричном питающем напряжении определяется следующим образом:

$$f_k = 2 \cdot n \cdot f_c = 100 \cdot n \text{ Гц}, \quad (2.1)$$

где  $n$  — натуральный ряд целых чисел от 1 до  $\infty$ ;  $f_c$  — частота тока питающей сети, Гц.

Поэтому частоту возникающего ЭМП можно представить в виде следующего ряда: 100, 200, 300, 400, 500 и т. д. — через каждые 100 Гц и теоретически до бесконечности.

Условия работы преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях электрического транспорта весьма специфичны. Они характеризуются значительной неравномерностью нагрузки, короткими замыканиями в контактной сети и на шинах подстанций, наличием коммутационных и атмосферных перенапряжений больших амплитуд и длительности, искажением питающего напряжения и напряжения собственных нужд [129].

К основным параметрам преобразовательных агрегатов относятся: номинальные выпрямительная мощность и напряжение, максимальные допустимые напряжение и токи перегрузки, пределы регулирования напряжения, коэффициент полезного действия. Номинальные значения постоянного напряжения и тока определяют возможные максимальные уровни напряженностей электрического и магнитного полей.

Принципиальная схема протекания выпрямленного тока по тяговой сети и высших гармонических составляющих по элементам ТП представлена на рис. 2.1.

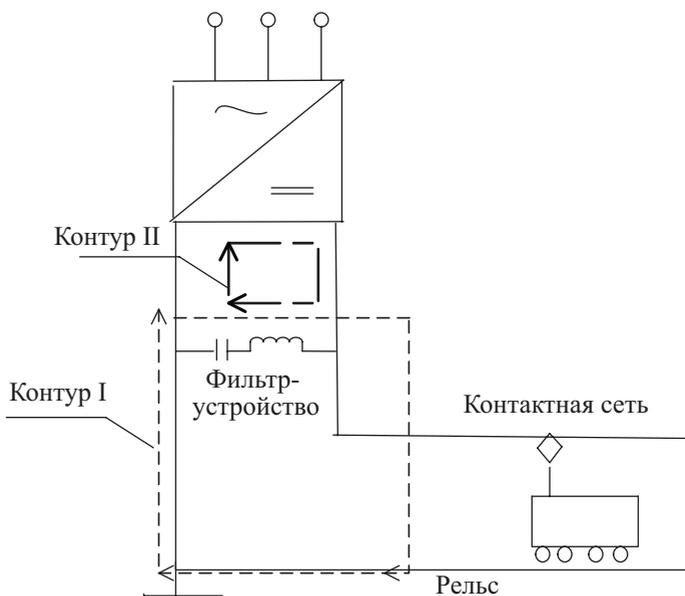


Рис. 2.1. Принципиальная схема протекания выпрямленного тока по рельсам и высших гармонических составляющих по элементам ТП на участке постоянного тока

Основной спектр высших гармонических составляющих протекает по контуру II. Для защиты контактной сети от протекания токов высших гармоник применяют сглаживающие фильтры (фильтр устройства).

В соответствии с Европейским стандартом EN 50163 (1995), номинальным напряжением в контактной сети на токоприемнике электроподвижного состава принято 3,0 кВ, максимальным рабочим стабильным – 3,6 кВ, по допустимым нормам изоляции (нестабильным) – 3,9 кВ. Максимальные отклонения напряжения на шинах тяговой подстанции при номинальном напряжении питающей сети не более 550 В, т.е. 14,3 %, или в пределах 3,3–3,85 кВ. При допустимых отклонениях питающего напряжения энергосистем (ГОСТ 13109–67) в пределах  $\pm 5\%$  верхний уровень от 3,85 кВ может составить до 4,04 кВ, а нижний – от 3,3 до 3,135 кВ. Нормированные максимальные отклонения напряжения на шинах подстанций лежат в пределах от 3,135 до 4,04 кВ (18,6 %) [130].

## Гармонический состав выпрямленного напряжения на тяговых подстанциях

Для выпрямительных преобразователей (ВП) тяговых подстанций номинальное выпрямленное напряжение  $U_{a1}$  принимается равным 3300 В, а максимальное допустимое – 4000 В.

В зависимости от числа фаз питающей сети различают ВП однофазного и многофазного тока. Выпрямители однофазного тока могут быть однопulseвыми ( $q = 1$ ) и двухpulseвыми ( $q = 2$ ).

На ТП используются 6-pulseвые преобразователи ( $m = 3, q = 6$ ) по нулевой (схема Кюблера) и мостовой (схема Ларионова) схемам выпрямления, 12-pulseвые ( $m = 3, q = 12$ ) последовательного и параллельного типов [131] и 24-pulseвые. Выпрямитель, построенный по схеме, приведенной на рис. 2.2, состоит из трехфазного двухобмоточного преобразовательного трансформатора, вторичные обмотки которого соединяются в звезду или треугольник, и двух групп диодов ( $UD$ ), включенных по мостовой схеме.

В трехфазной мостовой схеме выпрямления ток нагрузки проходит по вентилям и вентильным обмоткам двух фаз, а при коммутациях – трех. В работе участвуют вентили анодной и катодной групп (группы вентилялей  $VD2, VD4, VD6$  и  $VD1, VD3, VD5$ ).

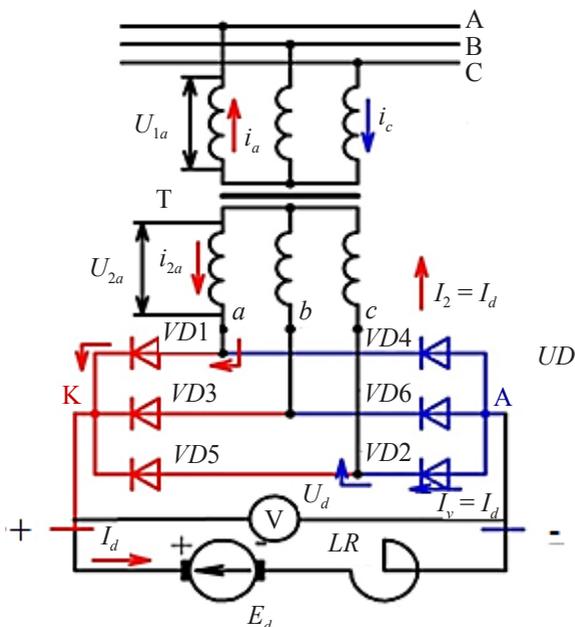


Рис. 2.2. 6-пульсовая мостовая схема

Примем допущение: напряжения в питающей сети и, следовательно, во вторичной обмотке преобразовательного трансформатора синусоидальные.

Выпрямленное напряжение образуется как сумма фазных напряжений (рис. 2.3).

Ток  $i_d$  одновременно проводят два диода: один в анодной группе, потенциал которого минимален, другой в катодной, потенциал которого максимален относительно нулевой точки вторичной обмотки трансформатора. На интервале между точками 1 и 2 ток проводят диоды  $VD6$  и  $VD1$ , на интервале 2–3 –  $VD2$  и  $VD3$  и т. д. В результате на выходе формируется выпрямленное напряжение  $U_d$ , мгновенные значения которого равны на соответствующих интервалах линейным напряжениям  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ba}$  и т. д. Кривая  $U_d$  имеет шесть пульсаций за один период питающего напряжения. Ток диода имеет форму, близкую к прямоугольной, со средней высотой прямоугольника  $I_d$  и длительностью  $2\pi/3 = 120$  эл. град. Обратное напряжение диодов формируется линейными напряжениями.

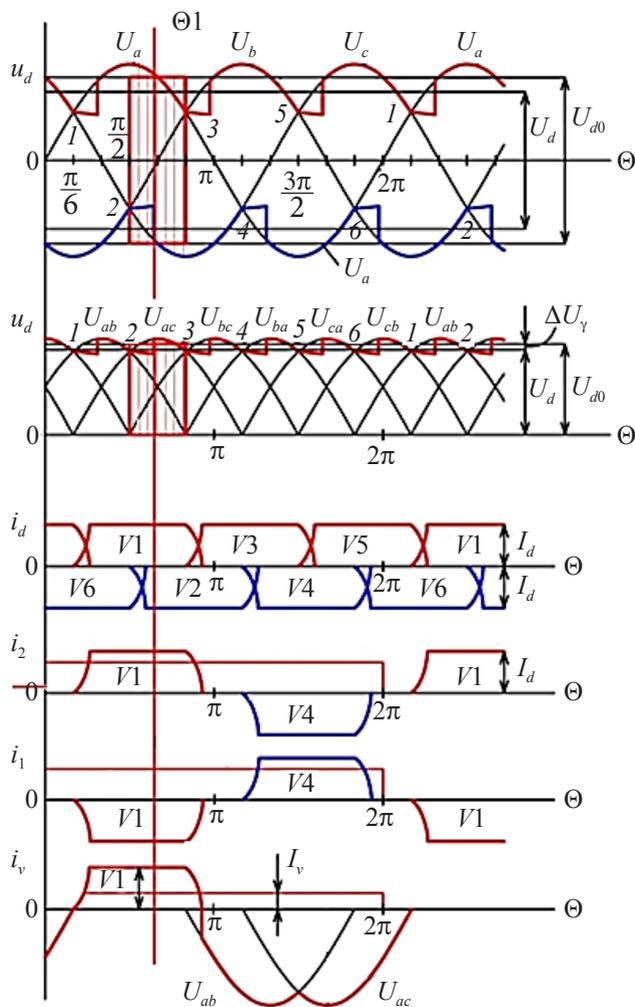


Рис. 2.3. Временные диаграммы напряжений  $u_2$ , выпрямленного напряжения  $u_d$ , диодного плеча  $u_v$ , токов нагрузки  $i_d$ ,  $i_2$ ,  $i_1$  и диодного плеча  $i_v$

Кривая напряжения на выходе выпрямителя является пульсирующей. Мгновенное значение выпрямленного напряжения представляет собой сумму постоянной составляющей  $U_d$  и переменной составляющей, состоящей из бесконечного ряда гармоник [132]:

$$U_m = U_d + \sum_{n=1}^{\infty} U_{d0} \sin(n\Theta + \varphi_n), \quad (2.2)$$

где  $U_d$  – постоянная составляющая,  $U_{d0}$  – амплитуда напряжения  $n$ -й гармоники,  $B$ ;  $n$  – порядок гармоники выпрямленного напряжения;  $\varphi_n$  – начальная фаза  $n$ -гармоники.

Рассмотрим соотношение между напряжениями и токами шестипульсовой схемы выпрямления; при рассмотрении электромагнитных процессов в схеме выпрямления примем:

индуктивность в цепи выпрямленного тока  $X_d = \infty$ ,

коммутация вентильных токов мгновенной, т.е. угол коммутации вентильных токов  $\gamma = 0$ .

Расчетное среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе [132]:

$$U_{d0} = K_{cx} \cdot A \cdot U_{2\phi}, \quad (2.3)$$

где  $K_{cx}$  – коэффициент схемы, для 6-пульсовой мостовой – 1,73;  $A$  – коэффициент выпрямления.

$$A = \sqrt{2} \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2.4)$$

где  $m$  – число пульсаций кривой выпрямленного напряжения, для 6-пульсовой мостовой  $A = 1,352$ ;  $U_{2\phi}$  – действующее значение фазного напряжения,  $B$ .

Среднее значение выпрямленного напряжения [129]

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} U_m \cdot \sin \Theta d\Theta = \frac{3\sqrt{6} \cdot U_{2\phi}}{\pi} \approx 2,34U_{2\phi}. \quad (2.5)$$

В процессе работы преобразователя происходит переход тока с одного плеча преобразователя на другое. Этот процесс называется коммутацией тока, а время, в течение которого происходит процесс коммутации, выраженное в угловых единицах, называется углом коммутации  $\gamma$ .

Из-за коммутации изменяются формы кривых тока и напряжений в цепях схемы, среднее значение выпрямленного напряжения, высшие гармоники выпрямленного напряжения и сетевого тока, коэффициенты мощности и полезного действия.

Величина угла коммутации  $\gamma$  зависит от схемы преобразователя, режима его работы и индуктивного сопротивления цепи коммутации.

Угол коммутации  $\gamma$  – это функция нагрузочных токов  $I_{dH} = I_d$ , приходящихся на один преобразователь, и определяется по формуле, град:

$$\gamma_m = \arccos \left[ 1 - 2 \cdot U_{кз} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \frac{I_d}{I_{dH}} \right]. \quad (2.6)$$

Из уравнения (2.6) следует, что применение сложных мостовых схем с увеличенным числом пульсаций выпрямленного напряжения приводит к уменьшению угла коммутации.

Действующее значение напряжения гармонических составляющих при симметричном питающем напряжении определяется по формуле, В:

$$U_{dk} = \frac{U_{d0} \sqrt{2}}{3(k^2 - 1)} \cdot k_\gamma.$$

Результаты расчета переменных напряжений высших гармонических составляющих при 6-пульсовом выпрямителе без применения сглаживающих фильтров на тяговой подстанции приведены в [127,128]. С ростом угла коммутации амплитудные значения гармонических составляющих выпрямленного напряжения увеличиваются, пропорционально увеличиваются и уровни электрических полей.

Наличие мощных однофазных нагрузок приводит к появлению несимметрии напряжения фаз трехфазных электрических систем.

При замене шестипульсовых выпрямителей на 12- или 24-пульсовые из кривой выпрямленного напряжения [132] выпадает ряд гармоник (таблица 2.1).

Из таблицы 2.1 следует, что в зависимости от схемы выпрямления формируется спектр высших гармонических составляющих, позже вблизи электроустановок создаются электрические поля с таким спектром. Наиболее безопасен с точки зрения воздействия электрического поля на электротехнический персонал тягового

электропитания 24-пульсовый выпрямитель, имеющий минимальный спектр частот (1200 и 2400 Гц).

Таблица 2.1

Наличие спектра высших гармонических составляющих в кривой выпрямленного напряжения в режиме холостого хода выпрямителя\*

Схема выпрямления	300 Гц	600 Гц	900 Гц	1200 Гц	1500 Гц	1800 Гц	2100 Гц	2400 Гц
	$k = 6$	$k = 12$	$k = 18$	$k = 24$	$k = 30$	$k = 36$	$k = 42$	$k = 48$
6-пульсовые	+	+	+	+	+	+	+	+
12-пульсовые	–	+	–	+	–	+	–	+
24-пульсовые	–	–	–	+	–	–	–	+

\* (+) частота присутствует, (–) частота отсутствует.

Первичное питающее напряжение от энергосистемы редко бывает симметричным синусоидальным. Это вносит коррективы в состав гармонических составляющих выпрямленного напряжения.

Действующее значение напряжения гармонических составляющих при несимметричном питающем напряжении [133]:

$$U_{dk} = \frac{U_{d0} \sqrt{2}}{3(k^2 - 1)} \cdot \left[ 1 + 2\sqrt{b_n^2 - b_n + 1} \cdot [\cos(k \cdot \alpha_n)] (-1)^{\frac{k}{2}} \right] \cdot k_\gamma, \quad (2.7)$$

где  $U_{d0}$  – напряжение холостого хода выпрямителя (3300 В);  $k$  – номер гармонической составляющей выпрямленного напряжения;  $b_n$  – коэффициент несимметрии фазных напряжений питающей ЛЭП, определяемый отношением максимального значения фазного напряжения на вторичной обмотке тягового трансформатора к минимальному значению (1 и 1,03).

Угол  $\alpha_n$  является функцией коэффициента несимметрии, град:

$$\alpha_n = \arctg \frac{2 \cdot b_n - 1}{\sqrt{3}}. \quad (2.8)$$

Коэффициент  $k_\gamma$ , зависящий от угла коммутации, находится из выражения [133]:

$$K_{\gamma} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{(-k \cdot \sin k_{\gamma} \cdot \sin \gamma - \cos k_{\gamma} \cdot \cos \gamma - 1)^2 + (k \cdot \cos k_{\gamma} \cdot \sin \gamma - \sin k_{\gamma} \cdot \cos \gamma)^2}{}}. \quad (2.9)$$

Напряжение гармонических составляющих выпрямленного тока на выходе выпрямителя в зависимости от угла коммутации при несимметрии питающего напряжения  $b_n = 1,03$  определяют по графикам, представленным в [133].

Если на тяговых подстанциях отсутствуют сглаживающие фильтр устройства, то на человека воздействует целый ряд гармонических составляющих электрического поля, ПДУ которых в настоящее время в РФ не нормируются, а их вредное воздействие на электротехнический персонал не учитывается.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения на тяговых подстанциях устанавливают одно- или двухзвенные сглаживающие фильтры (СФ). Целесообразность применения той или иной схемы СФ определяется расчетами мешающих напряжений в цепях связи и уровня помех на входе устройств железнодорожной автоматики, сравнением их с допустимыми значениями и технико-экономическими соображениями [133]. Но на объектах железнодорожного транспорта нет должного внимания контролю СФ. Здесь применяется оптико-волоконная связь, а приведенные высшие гармонические составляющие на линии связи мешающего влияния не оказывают.

### **Расчет электрического поля длинных разноименно заряженных параллельных осей без учета потенциала земли**

Проведем расчет напряженности ЭП на рабочих местах в зоне «+» и «-» шины в РУ-3,3 кВ. Основные параметры, характеризующие электрическое поле постоянного тока вблизи линии: потенциал ( $\varphi$ , кВ) и напряженность ( $E$ , кВ/м). Эти величины рассчитываются методом наложения, с учетом влияния земли. Схема для определения напряженности ЭП представлена на рис. 2.4.

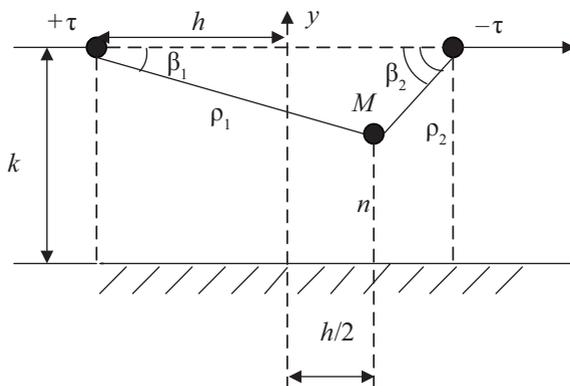


Рис. 2.4. Электрическое поле от «+» и «-» шины без учета потенциала земли

Примем потенциал разноименных заряженных параллельных осей в бесконечности равным нулю.

Выражение для потенциала  $+\tau$  в какой-либо точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $\rho_1$  от оси, будет равно

$$\varphi'_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{h}{\rho_1}. \quad (2.10)$$

Выражение для потенциала  $-\tau$  в какой-либо точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $\rho_2$  от оси, будет равно

$$\varphi''_M = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{h}{\rho_2}. \quad (2.11)$$

Полное значение потенциала в точке  $M$ :

$$\varphi_M = \varphi'_M + \varphi''_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (2.12)$$

Величина напряженности в точке  $M$ , обусловленной зарядом  $+\tau$ , распределенным вдоль левой заряженной оси, равна  $E_{+\tau} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 \cdot \rho_1}$ , а ее составляющие по координатным осям —

$$E_{(+\tau)x} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 \cdot \rho_1} \cos\beta_1 \quad \text{и} \quad E_{(+\tau)y} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 \cdot \rho_1} \sin\beta_1. \quad (2.13)$$

Аналогичным путем определяются составляющие по координатным осям напряженности поля, обусловленной зарядом  $-\tau$ , распределенным вдоль правой заряженной оси:

$$E_{(-\tau)x} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 \cdot \rho_2} \cos\beta_2 \quad \text{и} \quad E_{(-\tau)y} = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_0 \cdot \rho_2} \cos\beta_2. \quad (2.14)$$

Полное выражение электрического поля:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \left( \frac{\cos\beta_1}{\rho_1} + \frac{\cos\beta_2}{\rho_2} \right) i + \left( \frac{\sin\beta_1}{\rho_1} + \frac{\sin\beta_2}{\rho_2} \right) j \right\}. \quad (2.15)$$

Числовое значение напряженности поля можно получить из соотношения:

$$\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} = \frac{U}{2 \ln \frac{2h}{r}} = \frac{3300}{2 \ln \frac{2 \cdot 1}{0,04}} = 844, \text{ В};$$

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{1}{\rho_1^2} + \frac{1}{\rho_2^2} + \frac{2}{\rho_1 \cdot \rho_2} \cdot \cos(\beta_1 + \beta_2)} = \frac{\tau}{\pi\epsilon_0} \cdot \frac{h}{\rho_1 \cdot \rho_2}. \quad (2.16)$$

Расстояние от «+» шины до точки  $M$ :

$$\rho_1 = \sqrt{\left(h + \frac{h}{2}\right)^2 + (k - n)^2} = 2,3 \text{ м.}$$

Расстояние от «-» шины до точки  $M$ :

$$\rho_2 = \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (k - n)^2} = 1,77 \text{ м.}$$

Соответственно, напряженность электрического поля:  $E = 207 \text{ В/м}$ , что не превышает ПДУ ЭП ( $5 \text{ кВ/м}$ ).

**Расчет электрического поля  
длинных разноименно заряженных параллельных осей  
с учетом потенциала земли**

Схема для определения напряжения ЭП с учетом потенциала земли приведена на рис. 2.5.

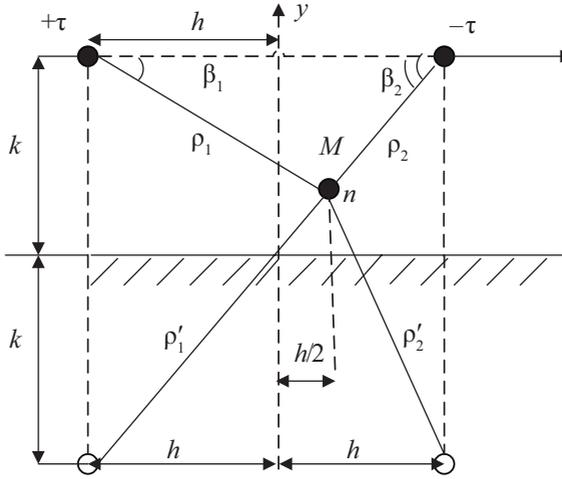


Рис. 2.5. Электрическое поле от «+» и «-» шины с учетом потенциала земли

Составим выражение для потенциала  $+τ$  в какой-либо точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $ρ_1$  от оси:

$$\varphi'_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}. \quad (2.17)$$

Напряженность электрического поля для потенциала  $+τ$  в какой-либо точке  $M$ :

$$E_+ = U_{dk} \frac{\ln \left( \frac{\rho'_1}{\rho_1} \right)}{\ln \left( \frac{2k}{r} \right)}. \quad (2.18)$$

Расстояние от «+» шины до точки  $M$ :  $ρ_1 = 2,3$  м, от «+» шины до точки  $M$  с учетом зеркального отображения:

$$\rho'_1 = \sqrt{(k+n)^2 + \left(h + \frac{h}{2}\right)^2} = 5,51 \text{ м.}$$

Значение потенциала  $-\tau$  в какой-либо точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $\rho_2$  от оси:

$$\phi'_M = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}. \quad (2.19)$$

Напряженность электрического поля для потенциала  $-\tau$  в какой-либо точке  $M$ :

$$E_- = U_{dk} \frac{\ln\left(\frac{\rho'_2}{\rho_2}\right)}{\ln\left(\frac{2k}{r}\right)}. \quad (2.20)$$

Расстояние от « $\leftarrow$ » шины до точки  $M$ :  $\rho_2 = 1,77$  м; от « $\leftarrow$ » шины до точки  $M$  с учетом зеркального отображения:

$$\rho'_2 = \sqrt{(k+n)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} = 5,32 \text{ м.}$$

Полное значение потенциала в точке  $M$ :

$$\phi_M = \phi'_M + \phi''_M.$$

Так как « $\leftarrow$ » шина заземлена на рельс, то  $E_-$  будет около нуля, поэтому напряженность ЭП в точке  $M$ :

$$E_M = E_+.$$

Напряженность электрического поля для исходных условий в точке  $M$  составляет 1,613 кВ/м, что не превышает ПДУ ЭП (5 кВ/м).

Результаты расчета напряженности ЭП при 6-пульсовом выпрямителе без применения сглаживающих фильтров на тяговой подстанции по формулам (2.17)–(2.20) для условий  $h = 1,7$  м,  $k = 3,5$  м,  $n = 1,8$  м,  $r = 0,04$  м приведены в таблице 2.2.

Из таблицы 2.2 можно сделать вывод, что наибольшая напряженность ЭП при указанных условиях составит 40 В/м, что не превышает ПДУ ЭП 50 Гц (5кВ/м). Предполагается присутствие

спектра частот от 100 Гц до 1200 Гц от переменных составляющих выпрямленного напряжения. Значения напряженности ЭП вблизи электроустановок оценить с точки зрения электрической безопасности для электротехнического персонала нельзя, так как нет ПДУ ЭП для рассматриваемых частот.

Таблица 2.2

Расчетные значения напряженности ЭП вблизи электроустановок

$k$	$f$ , Гц	$U_{dk}$ , В при $b_n = 1,03$ , $\gamma = 40$ град	$E$ , В/м	ПДУ $E$ , В/м в РФ (8 ч)
2	100	54	9	—
6	300	235	40	—
8	400	30	5	—
10	500	28	5	—
12	600	150	25	—
14	700	26	4	—
16	800	24	4	—
18	900	100	17	—
20	1000	30	5	—
22	1100	20	3	—
24	1200	70	12	—

Выпрямленное напряжение ВП обладает спектром высших гармонических составляющих, вредное воздействие которых на персонал до настоящего времени не изучалось.

## Гармонический состав выпрямленного тока на тяговых подстанциях

Полупроводниковые преобразователи тяговых подстанций постоянного тока относятся к классу нагрузок, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику. Нелинейные нагрузки потребляют из сети несинусоидальный ток, который можно представить как сумму синусоидальных составляющих, называемых гармониками.

Каждой высшей гармонике выпрямленного напряжения порядка  $k = m \cdot l$  в переменном токе преобразователя соответствуют две высшие гармоники с порядковыми номерами [129–134]:

$$k = m \cdot l \pm 1, \quad (2.21)$$

где  $m$  – число пульсаций кривой выпрямленного напряжения;  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$  – натуральное число.

Для учета воздействия на электротехнический персонал магнитного поля токов выпрямительного преобразователя рассмотрим первичный ток 6-пульсового выпрямителя.

При идеально сглаженном выпрямленном токе ( $X_d = \infty$ ) и мгновенной коммутации вентилей ( $X_a = 0$ ) кривая выпрямленного первичного тока имеет прямоугольную либо ступенчатую форму. Для этих условий амплитуда  $k$ -й гармоники первичного тока при 6-пульсовых (12- и 24-пульсовых) преобразователях равна [133]:

$$I_k = \frac{2\sqrt{3} \cdot I_d}{\pi \cdot k_T \cdot k}. \quad (2.22)$$

Из формулы (2.22) следует, что применение на тяговых подстанциях многопульсовых преобразователей снижает уровень и состав высших гармонических составляющих в первичном токе и в питающих сетях (таблица 2.3).

Таблица 2.3

Спектр высших гармонических составляющих в кривой выпрямленного тока\*

Схема выпрямления	50 Гц	250 Гц	350 Гц	550 Гц	650 Гц	850 Гц	950 Гц	1150 Гц	1250 Гц
	$k = 1$	$k = 5$	$k = 7$	$k = 11$	$k = 13$	$k = 17$	$k = 19$	$k = 23$	$k = 25$
6-пульсовые	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12-пульсовые	+	–	–	+	+	–	–	+	+
24-пульсовые	+	–	–	–	–	–	–	+	+

\* (+) – частота присутствует, (–) – частота отсутствует.

Итак, у 12-пульсовых преобразователей в кривой первичного выпрямленного тока помимо основной гармоники с частотой 50 Гц присутствуют высшие гармонические составляющие с частотами начиная с одиннадцатой (11, 13, 23, 25 и т. д.), а у 24-пульсовых преобразователей в кривой первичного выпрямленного тока помимо основной гармоники с частотой 50 Гц присутствуют высшие гармонические составляющие с частотами начиная с двадцать третьей (23, 25 и т. д.).

Значение заданного максимального выпрямленного тока подстанции  $I_{дтп}$  определяется по формуле

$$I_{дтп} = \frac{P_T}{U_{дн}}, \quad (2.23)$$

где  $U_{дн}$  – номинальное выпрямленное напряжение на шинах подстанций (3,3 кВ);  $P_T$  – заданное значение мощности на тягу поездов (12700 кВт).

### **Расчет магнитного поля длинных разноименно заряженных параллельных осей без учета потенциала земли**

Для бесконечно длинных проводов с противоположно направленными токами величина напряженности магнитного поля может быть определена из рис. 2.6.

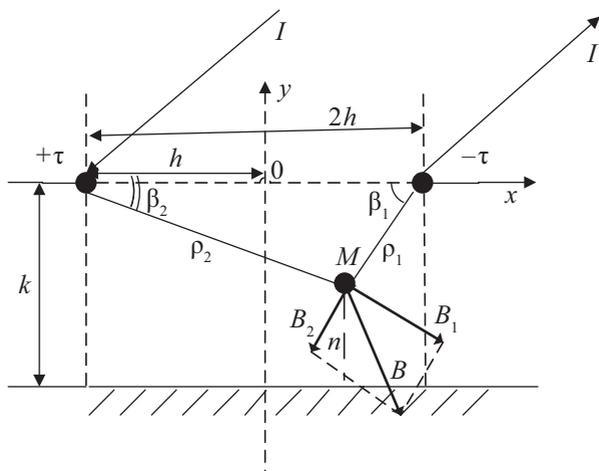


Рис. 2.6. Магнитное поле длинных разноименных заряженных параллельных осей без учета потенциала земли

Пусть линия состоит из длинных, параллельных друг другу шин. Окружающая среда – воздух. Поместим начало координат в точку 0, находящуюся посередине линий, соединяющих центры проводов.

Величина скалярного магнитного потенциала в точке  $M$ :

$$\varphi_M = \frac{I}{2\pi}\beta_1 + \frac{I}{2\pi}\beta_2 + \text{const.}$$

Вектор магнитной индукции в точке  $M$  найдем из подобия треугольников:

$$\frac{B}{B_1} = \frac{2h}{\rho_2}; \quad B = \mu_0 \frac{I_k \cdot 2h}{2\pi \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}; \quad H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I_k \cdot h}{\pi \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}. \quad (2.24)$$

Результаты расчета переменных токов высших гармонических составляющих при 6-пульсовом выпрямителе для условий:  $I_d = 3150$  А,  $2h = 2$  м (расстояние между осями проводов);  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – это расстояние от осей проводов до точки  $M$ , равные соответственно 2,3 м и 1,77 м;  $B_1, B_2, B$  – вектора магнитной индукции; высота подвеса проводов  $k = 3,5$  м; расстояние от земли до точки  $M$  составляет  $n = 1,8$  м (таблица 2.4).

Таблица 2.4

Расчетные значения переменных токов высших гармонических составляющих максимального выпрямленного тока (3150 А)

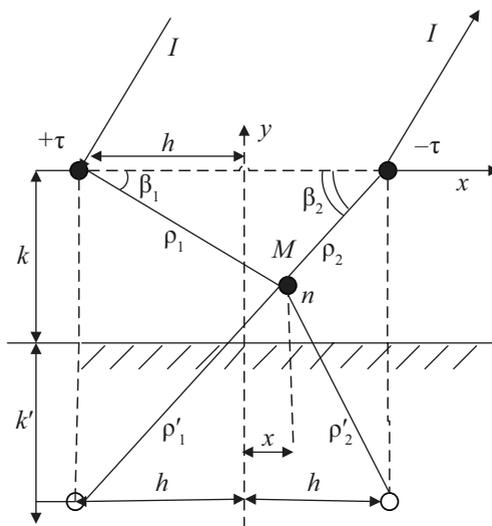
$k$	$f$ , Гц	$I_k$ , А	$H$ , А/м	ПДУ $H$ , А/м в РФ (8 ч)
Машинный зал тяговой подстанции				
1	50	1100	85	80
5	250	220	17	Не нормируется
7	350	157	12	
11	550	100	8	
13	650	85	7	
17	850	65	5	
19	950	58	4	
23	1150	48	4	
25	1250	44	3	

На рабочем месте электротехнического персонала, обслуживающего электроустановки РУ-3,3 кВ, присутствует спектр частот от 50 до 1250 Гц. Нормируется магнитное поле только для частоты 50 Гц; при сравнении полученных максимальных уровней МП 50 Гц с ПДУ МП 50 Гц наблюдается превышение 80 А/м. Необходимо

сократить время нахождения электротехнического персонала вблизи электроустановок до безопасного или разработать организационно-технические мероприятия, например, использовать на рабочих местах сигнальные устройства, предупреждающие о превышении ПДУ МП. Так как нормирование предельно допустимых значений напряженности МП частотой до 10 кГц в России осуществляется только для 50 Гц и 10 кГц, необходимо разработать методику нормирования ЭМП данного диапазона частот.

### **Расчет магнитного поля длинных разноименно заряженных параллельных осей с учетом потенциала земли**

Расчет магнитного поля длинных разноименных заряженных параллельных осей с учетом потенциала земли представлен на рис. 2.7.



*Рис. 2.7.* Магнитное поле длинных разноименных заряженных параллельных осей с учетом потенциала земли

Пусть линия состоит из длинных, параллельных друг другу шин. Окружающая среда – воздух. Аналогично, по подобию треугольников для расчета магнитного поля без учета земли, найдем напряженность магнитного поля с учетом земли:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I_k \cdot h}{\pi \cdot \rho'_1 \cdot \rho'_2}. \quad (2.25)$$

Результаты расчета переменных токов высших гармонических составляющих при 6-пульсовом выпрямителе для условий:  $I_d = 3150$  А;  $B_1, B_2, B$  – векторы магнитной индукции; высота подвеса проводов  $k = 3,5$  м; расстояние от земли до точки  $M$  составляет  $n = 1,8$  м;  $\rho'_1$  и  $\rho'_2$  – это расстояние от осей проводов до точки  $M$  с учетом зеркального отображения, равные соответственно 5,51 м и 5,32 м (таблица 2.5).

Таблица 2.5

Расчетные значения переменных токов высших гармонических составляющих максимального выпрямленного тока (3150 А) с учетом потенциала земли

$k$	$f$ , Гц	$I_k$ , А	$H$ , А/м	ПДУ $H$ , А/м в РФ (8 ч)
Машинный зал тяговой подстанции				
1	50	1100	11,95	80
5	250	220	2,39	Не нормируется
7	350	157	1,71	
11	550	100	1,09	
13	650	85	0,92	
17	850	65	0,70	
19	950	58	0,63	
23	1150	48	0,52	
25	1250	44	0,48	

Из таблицы 2.5 можно сделать вывод, что на рабочем месте электротехнического персонала, обслуживающего электроустановки РУ-3,3 кВ, присутствует спектр частот от 50 до 1250 Гц. Нормируется магнитное поле только для частоты 50 Гц; при сравнении полученных уровней МП 50 Гц с ПДУ МП 50 Гц превышения ПДУ МП 80 А/м не наблюдается.

Выпрямленный ток выпрямительного преобразователя обладает спектром высших гармонических составляющих напряженностей магнитных полей, которые могут оказывать вредное воздействие на персонал; до настоящего времени эта ситуация как научная проблема в России и за рубежом не рассматривалась.

При применении 6-пульсовых выпрямительных преобразователей (схема Кюблера) в тяговых электрических сетях железнодорожного транспорта при реализуемой мощности электрических локомотивов электрической тяги в окружающем пространстве создаются напряженности магнитных полей, которые могут превышать нормируемые уровни для отдельных частот гармонических составляющих.

До настоящего времени оценивалось негативное индуктивное влияние высших гармонических составляющих переменного тока на работу промышленных систем автоматики, телемеханики и связи. С применением для систем связи волоконно-оптических способов передачи сигналов роль мешающего воздействия ЭМП на проводные линии связи перестала быть актуальной, поэтому планово-предупредительные работы сглаживающих фильтр-устройств на ТП стали проводиться реже. Со сглаживающего устройства подстанции МП с высшими гармоническими составляющими попадают в контактную сеть и могут оказывать вредное воздействие на электротехнический персонал тягового электроснабжения.

## Глава 3

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЧАСТОТОЙ ДО 10 кГц, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ

Экспериментальные исследования уровней ЭП и МП проводятся для получения объективной информации об их фактических уровнях, обеспечения электромагнитной безопасности электротехнического персонала и принятия оптимальных проектных решений при проектировании объектов тягового электроснабжения. Если ПДУ МП и ЭП превышены, то необходимо разработать мероприятия, минимизирующие их воздействие на электротехнический персонал.

### *Требования к проведению контроля уровней электромагнитных полей на рабочих местах*

Контроль ЭП и МП направлен на обеспечение защиты персонала, профессионально связанного с эксплуатацией и обслуживанием источников ЭМП.

Защита персонала, профессионально не связанного с эксплуатацией и обслуживанием источников ЭМП, обеспечивается в соответствии с требованиями гигиенических нормативов ЭМП, установленных для населения.

ЭМП на рабочих местах контролируется при проектировании, приемке в эксплуатацию, изменении конструкции источников ЭМП и технологического оборудования, их включающего, организации новых рабочих мест, специальной оценке условий труда, а также текущем надзоре за действующими источниками ЭМП [13].

Уровни ЭМП контролируются путем использования расчетных методов и/или измерениями на рабочих местах.

Расчетные методы используются преимущественно при проектировании новых или реконструкции действующих объектов – источников ЭМП.

На действующих объектах ЭМП контролируется инструментальными измерениями, которые достаточно точно оценивают напряженности ЭП и МП или плотность потока энергии (ППЭ). Для оценки уровней ЭМП используются приборы направленного приема (однокоординатные) и приборы ненаправленного приема, оснащенные изотропными (трехкоординатными) датчиками.

Измерения выполняются при работе источника с максимальной мощностью.

Измерения и расчет напряженности (индукции) МП частотой 50 Гц должны производиться при максимальном рабочем токе электроустановки или измеренные значения должны пересчитываться на максимальный рабочий ток ( $I_{\max}$ ) умножением измеренных значений на отношение  $I_{\max}/I$ , где  $I$  – ток электроустановки при измерениях.

Измерения и расчет напряженности ЭП частотой 50 Гц должны производиться при наибольшем рабочем напряжении электроустановки или измеренные значения должны пересчитываться на это напряжение путем умножения измеренного значения на отношение  $U_{\max}/U$ , где  $U_{\max}$  – наибольшее рабочее напряжение электроустановки,  $U$  – напряжение электроустановки при измерениях.

Гигиеническая оценка результатов измерений проводится с учетом погрешности используемого средства метрологического контроля.

Нельзя проводить измерения при наличии атмосферных осадков и при температуре и влажности воздуха, выходящих за предельные рабочие параметры средств измерений.

Результаты измерений следует оформлять в виде протокола и (или) карты распределения уровней электрических, магнитных или электромагнитных полей, совмещенной с планом размещения оборудования или помещения, где производились измерения.

Для работодателей периодичность контроля ЭП и МП на рабочих местах – один раз в три года.

В рамках нашего исследования проведены измерения ЭМП на ТП Свердловской железной дороги – филиала «ОАО РЖД» в РУ-3,3 кВ постоянного тока (машинный зал). Условия проведения эксперимента приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

## Условия проведения эксперимента

Дата и время измерений	22.12.09 г., 11.00–17.00
Прибор	«Экофизика МИ»*
Температура в помещении, °С	+18
относительная влажность, %	40
Температура наружная, °С	–25
ветер, м/с	3–5
Рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$ , кВ	3,3
рабочий выпрямленный ток $I_{\text{раб}}$ , А	До 3150
Коэффициент загрузки сети	0–1

\*Прибор «Экофизика МИ ПКФ-09–001» обеспечивает автоматическое измерение модулей напряженности ЭП и МП при любой ориентации датчика в пространстве с допустимой относительной погрешностью измерения  $\pm 20\%$ .

Структурная схема измерения электромагнитных полей на рабочих местах электротехнического персонала приведена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Структурная схема измерения электромагнитных полей

## Измерения электромагнитных полей от переменной составляющей выпрямленного напряжения и тока в ячейке выключателя АБ фидера № 11

Эскиз ячейки выключателя АБ фидера № 11 приведен на рис. 3.2, 3.3 с указанием расположения точек измерения ЭП и МП.

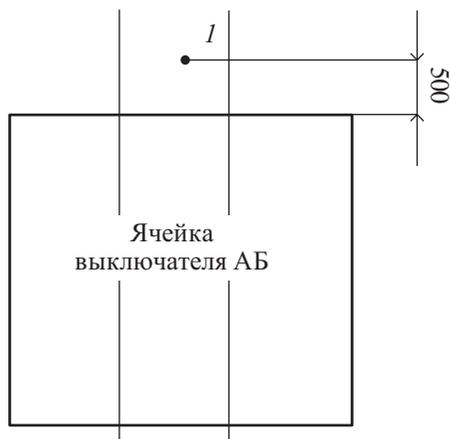


Рис. 3.2. Эскиз ячейки выключателя АБ фидера № 11 (вид сверху)

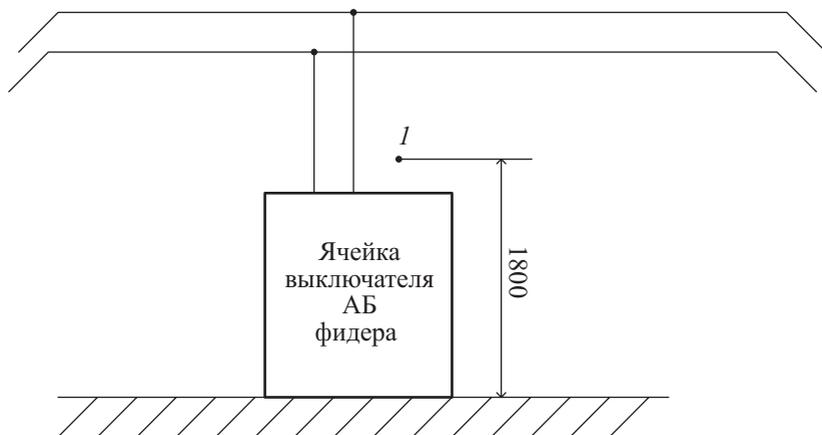


Рис. 3.3. Эскиз ячейки АБ фидера № 11 (вид сбоку)

Измерения проводились в ячейке АБ фидера № 11 на высоте 1,8 и 1,5 м от поверхности пола и 0,5 м от ячейки. Результаты измерений напряженности электрического поля от переменной составляющей выпрямленного напряжения в точке 1 при рабочем напряжении и токе  $U_{\text{раб}} = 3,3 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{раб}} = 200 \text{ А}$ , в диапазоне частот от 25 Гц до 675 Гц приведены на рис. 3.4.

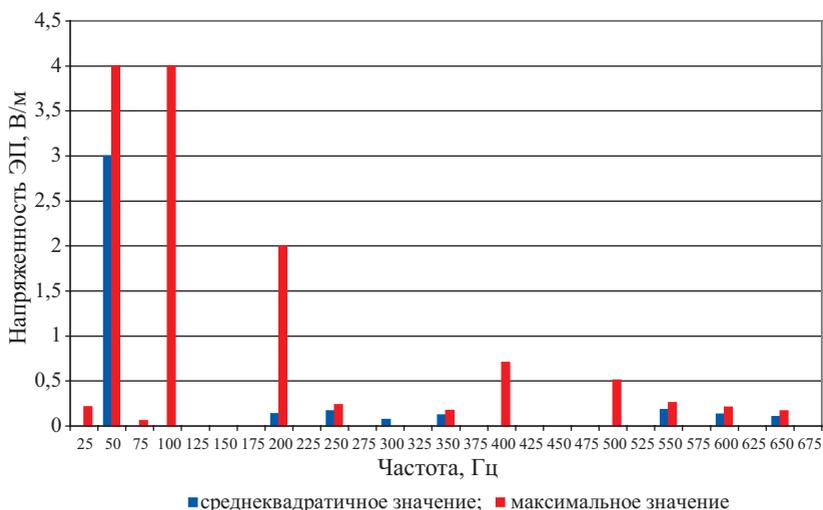


Рис. 3.4. Напряженность электрического поля в точке 1

На рис. 3.4 представлен спектр высших гармонических составляющих электрического поля от 25 Гц до 650 Гц. Наибольшее значение напряженности ЭП зафиксировано при частотах 50 Гц и 100 Гц и составляет 4 В/м; также можно выделить напряженность ЭП в 2 В/м при частоте 200 Гц. Методики оценки напряженности электрического поля с такими частотами в промышленных условиях в РФ нет.

Напряженность ЭП 50 Гц измерялась при работе электроустановки с рабочим напряжением 3,3 кВ, поэтому проведем пересчет на максимальное рабочее напряжение электроустановки – 4 кВ. При таком пересчете значение напряженности ЭП 50 Гц не превышает нормируемое значение 5 кВ/м. А это значит, что нахождение электротехнического персонала вблизи ячейки АБ фидера № 11 безопасно.

Методики суммарного воздействия на организм электротехнического персонала ЭП с высшими гармониками, составляющими

различную частоту (50 Гц, 100 Гц, 200 Гц), не существует. Поэтому нельзя оценить ЭП указанного спектра частот.

Результаты измерений напряженности магнитного поля от переменной составляющей выпрямленного тока в точке *I* при  $U_{\text{раб}} = 3,3 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{раб}} = 600 \text{ А}$ , в диапазоне от 25 до 675 Гц приведены на рис. 3.5.

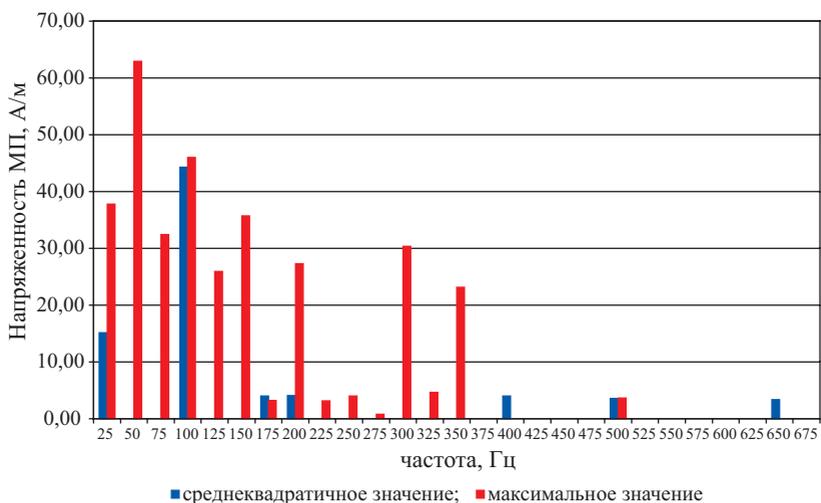


Рис. 3.5. Напряженность магнитного поля в точке *I*

Из рис. 3.5 видно, что присутствует спектр высших гармонических составляющих магнитного поля от 25 до 650 Гц. Можно выделить напряженности МП со следующими частотами:

Гц	А/м
25	38
50	65
75	32
100	46
125	28
150	36
200	29
300	30
350	24

И опять-таки в России нет методики оценки магнитного поля этих частот в промышленных условиях.

Наибольшее значение напряженности МП от переменной составляющей выпрямленного тока на высоте 1,8 м отмечено при частоте 50 Гц и составляет 65 А/м, что не превышает ПДУ для МП 50 Гц (80А/м).

Напряженность МП частотой 50 Гц измерялась не при максимальном рабочем токе электроустановки, поэтому пересчитаем на нужное нам максимальное. При пересчете на максимальный рабочий ток 3150 А зафиксировано превышение ПДУ МП 50 Гц. Уровни напряженности МП 50 Гц у данной ячейки представляют опасность для здоровья электротехнического персонала.

Методики суммарного воздействия на организм электротехнического персонала МП с высшими гармоническими составляющими с частотами 25, 75, 100, 125, 150, 200, 300 и 350 Гц не существует. Значит, из-за отсутствия ПДУ МП оценить магнитное поле данного спектра частот нельзя.

В результате проведенных экспериментальных исследований ЭП и МП у ячейки фидера № 11 ЗРУ-3,3 кВ можно сделать следующие выводы.

1. У ячейки фидера № 11 зафиксирован спектр высших гармонических составляющих электрического поля от 25 до 650 Гц. Но в России нормирование предельно допустимых значений напряженности ЭП частотой до 1 кГц осуществляется только для 50 Гц, поэтому необходимо разработать методику нормирования ЭП данного диапазона частот.

2. Уровни напряженности ЭП 50 Гц у данной ячейки не представляют опасности для здоровья электротехнического персонала.

3. Результаты измерений напряженностей МП показывают, что величина напряженности МП 50 Гц при максимальной работе выпрямителя в 3150 А превышает ПДУ для 8-часового воздействия, значит, возникает необходимость в контроле уровней МП вблизи ячейки фидера № 11 и сокращении времени пребывания электротехнического персонала вблизи ячейки фидера №11.

4. Методика оценки электрического поля с частотами 100 и 200 Гц в промышленных условиях в РФ отсутствует. Методики суммарного 400, 500 Гц воздействия на организм ЭМП от высших гармонических составляющих различной частоты (50, 100, 200, 400 и 500) не существует.

## Измерения электромагнитных полей под шинным мостом от выключателя автоматического быстродействующего до ячеек РУ-3,3 кВ

Измерения напряженности ЭП и МП от «+» и «-» шины (от выключателя автоматического быстродействующего (ВАБ) преобразователя ВП) проводились на высоте 1,8 м от поверхности пола и на расстоянии 0,5 м от него (рис. 3.6, 3.7).

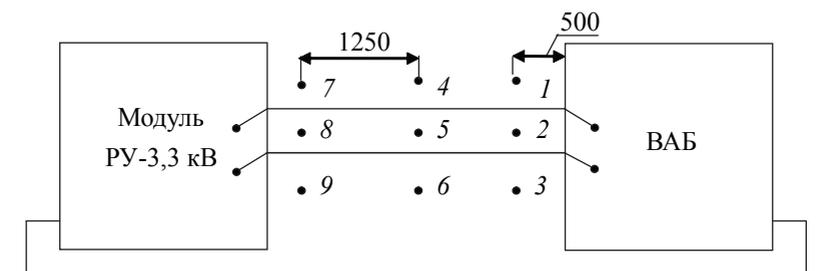


Рис. 3.6. Расположение шин от модуля РУ-3,3 кВ до автоматического быстродействующего выпрямителя ВАБ (вид сверху)

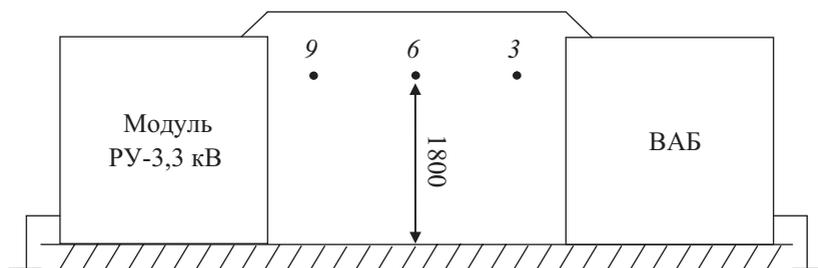


Рис. 3.7. Шины от модуля РУ-3,3 кВ до автоматического быстродействующего выпрямителя ВАБ (вид сбоку)

Под шинным мостом у ВАБ в точке 1 зафиксирован спектр высших гармонических составляющих электрического поля от 25 до 650 Гц.

В таблице 3.2 приведен анализ напряженности ЭП (основных гармоник) в точках 1–9 под шинным мостом в РУ-3,3 кВ.

Таблица 3.2

Анализ напряженности ЭП (В/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

$U_{\text{раб}} = 3,3 \text{ кВ}$										
№ точки $f_{\text{кз}}, \text{ Гц}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$E_{\text{норм}}, \text{ В/м}$
25	12	8	12	28	12	12	17	53	12	Не норм.
50	9	9,8	10	17	10	42	42	14	10	5000
100	2	2	2	4	2	3	3	4	2	Не норм.
150	5	7,5	5	8	7	7	8	8	7	Не норм.
200	1	0,7	0,6	1	0,8	0,9	1	1	1	Не норм.
300	2	3	2	4	3	4	3	3	3	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	Не норм.
500	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
600	1	2,1	1	3	2	0,3	3	3	2	Не норм.

Из таблицы 3.2 видно, что определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности ЭП. Уровни напряженности ЭП под шинным мостом показали невысокие значения, что обусловлено нахождением токоведущих частей в металлических ячейках; силовые линии напряженности ЭП от шин, проходящих над ячейками, замыкаются на них. Так как напряжение электроустановок практически остается неизменным, то для напряженности ЭП характерны неизменные значения величины напряженности для разных частот.

Измерения напряженности ЭП частотой 50 Гц проведены не при максимальном рабочем напряжении (3,3 кВ) электроустановки, поэтому пересчитаем на наибольшее рабочее напряжение. При пересчете на 4 кВ превышение ПДУ ЭП 50 Гц не зафиксировано. Уровни напряженности ЭП 50 Гц под шинным мостом в точке 1 не опасны для здоровья электротехнического персонала.

Методики суммарного воздействия на организм электротехнического персонала высших гармонических составляющих вышеуказанных частот не существует.

В таблице 3.3 приведен анализ напряженности МП (основных гармоник) в точках 1–9 под шинным мостом в РУ-3,3 кВ.

Таблица 3.3

Анализ напряженности МП (А/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

№ точки $f_k, \text{ Гц}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$H_{\text{норм}}, \text{ А/м}$
50	8	6	12	<b>125</b>	<b>125</b>	<b>125*</b>	15	8,5	6,5	80
100	6	5	5	8	10	9	6	5	4	Не норм.
200	2	1	1	5	7	7	3	2	2	Не норм.
250	5	4	0	18	18	18	15	4	4	Не норм.
350	3	2	2	10	10	5	11	3	3	Не норм.
400	0,5	0,5	0,7	2	2	2	1	0,5	0,8	Не норм.
500	0,5	0,5	0,7	0,2	0,1	0,2	0,5	0,5	0,8	Не норм.
550	0,5	0,5	0,7	7	6	8	7	0,5	0,8	Не норм.
$I_{dk}, \text{ А}$	400	300	600	1000	1000	1000	750	420	350	

\* Выделенные значения превышают нормируемые по СанПиН 2.2.4.3359–16.

Из таблицы 3.3 видно, что определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности МП.

Так как измерения напряженности МП 50 Гц в точках 1–3 и 7–9 проведены при работе электроустановки в рабочем режиме ( $I = 400, 300, 600, 750, 420$  и  $450 \text{ А}$ ), то проведем пересчет на максимальный рабочий ток – 3150 А – электроустановки. При пересчете значение напряженности МП 50 Гц будет изменяться и составит 62–64 А/м в зависимости от рабочего тока, что не превышает нормируемого значения: 80 А/м.

Для точек 4–6 уровни напряженности МП составляют 125 А/м, что превышает значения ПДУ МП по СанПиН 2.2.4.3359–16 [13] в 1,5 раза. Это вредно для здоровья электротехнического персонала. Необходимо разработать средства защиты для ограничения влияния МП на персонал.

Проанализировав полученные результаты экспериментальных исследований ЭП и МП под шинным мостом вблизи ячеек АБ, можно сделать следующие выводы.

1. Под шинным мостом вблизи ячеек РУ-3,3 кВ зафиксирован спектр высших гармонических составляющих электрического поля от 25 до 650 Гц. Методики оценки электрического поля с частотами: 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600 Гц в РФ нет. Оценить ЭП данного спектра частот с точки зрения безопасных условий труда при воздействии данного фактора на электротехнический персонал из-за отсутствия ПДУ нельзя. Так как нормирование предельно

допустимых значений напряженности ЭП частотой до 1 кГц в России осуществляется только для 50 Гц, то необходимо разработать методику нормирования ЭП данного диапазона частот.

2. Уровни напряженности ЭП 50 Гц у данной ячейки не представляют опасности для здоровья электротехнического персонала.

3. Результаты измерений напряженностей МП показывают, что величина напряженности МП 50 Гц при определенных условиях превышает ПДУ для 8-часового воздействия, поэтому возникает необходимость в контроле уровней МП под шинным мостом от ВП до ячеек РУ-3,3 кВ и при необходимости в сокращении времени пребывания электротехнического персонала вблизи данных электроустановок.

4. Методика оценки магнитного поля с частотами 50, 100, 200, 250, 350, 550 Гц в промышленных условиях в РФ отсутствует. Методики оценки суммарного воздействия высших гармонических составляющих различной частоты на человека не существует. Из-за отсутствия ПДУ МП нельзя оценить магнитное поле указанного спектра частот.

5. Так как нормирование предельно допустимых значений напряженности МП частотой до 1 кГц в России осуществляется только для МП 50 Гц, а на рассмотренных рабочих местах электротехнического персонала зафиксирован спектр частот до 550 Гц, то необходимо разработать методику нормирования МП данного диапазона частот.

## **Измерения электрических и магнитных полей под шинным мостом вблизи ячеек выключателя АБ**

Проведены измерения напряженности ЭП и МП под шинным мостом вблизи ячеек выключателя АБ высоте 1,8 м от поверхности пола (рис. 3.8, 3.9).

Результаты измерений напряженности магнитного поля при токах 180 А, 200 А в точках 1–3 приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 демонстрирует наличие спектра высших гармонических составляющих магнитного поля от 25 до 550 Гц.

Наибольшее значение напряженности МП в точке 1 составляет 4,85 А/м при частотах 50 Гц и 100 Гц, что не превышает уровень ПДУ (80 А/м).

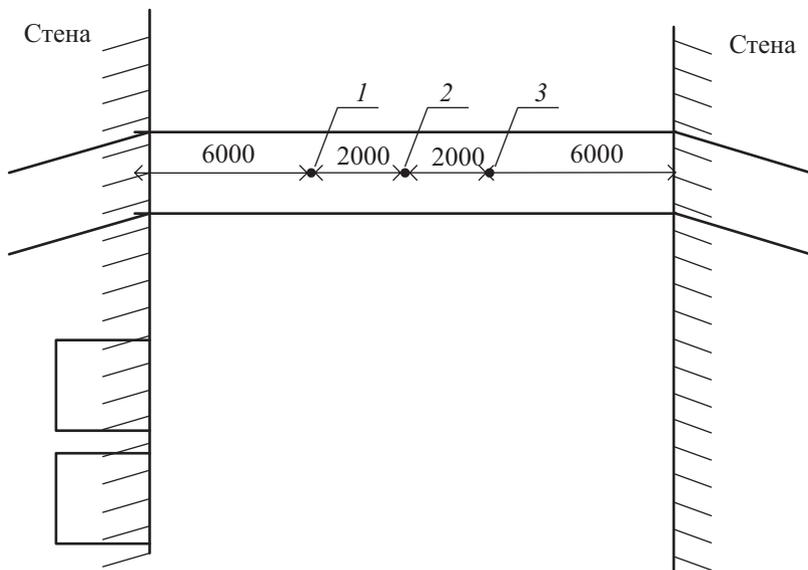


Рис. 3.8. Эскиз шинного моста (вид сверху)

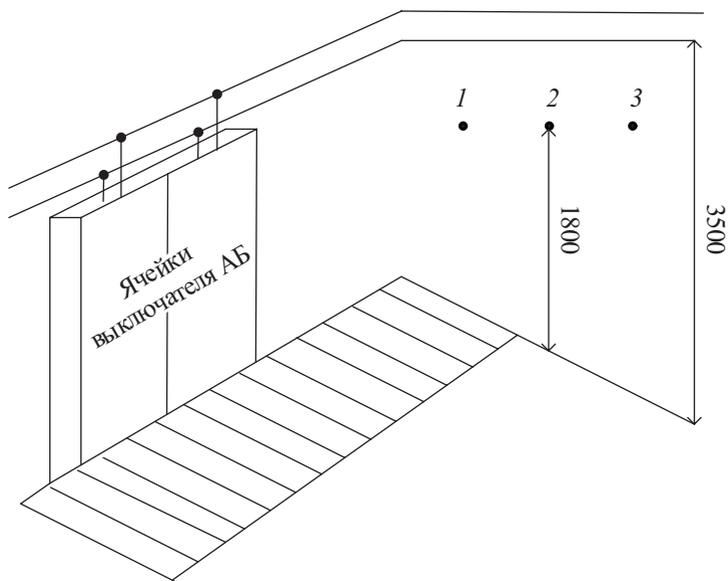


Рис. 3.9. Эскиз шинного моста (вид сбоку)

Таблица 3.4

Анализ напряженности МП (А/м) под шинным мостом

$f_k, \text{Гц}$ \diagdown № точки	1	2	3	$H_{\text{норм}}, \text{А/м}$
50	4,85	4,0	4,0	80
100	4,85	4,0	4,0	Не норм.
200	2,2	2,0	2,0	Не норм.
250	0,4	0,3	0,3	Не норм.
350	0,3	0,2	0,3	Не норм.
400	0,8	0,8	0,8	Не норм.
500	0,7	0,5	0,5	Не норм.
550	0,45	0,3	0,2	Не норм.
$I_{\text{дк}}, \text{А}$	200	180	180	

Так как напряженности МП 50 Гц в точке 1 измерялись при работе электроустановки  $I_{\text{раб}} = 200 \text{ А}$ , то проведем пересчет на максимальный рабочий ток – 3150 А – электроустановки. Тогда значение напряженности МП 50 Гц составит 77 А/м, что не превышает нормируемого значения 80 А/м. Уровень напряженности МП для частоты 50 Гц у данной ячейки не опасен для здоровья электротехнического персонала [13]. Значения для частот более 50 Гц в [13] не нормируются, требуется разработка методики.

Результаты измерений напряженности электрического поля в точках 1–3 при  $U_{\text{раб}} = 3,0 \text{ кВ}$  приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Анализ напряженности ЭП (В/м) под шинным мостом

$f_k, \text{Гц}$ \diagdown № точки	1	2	3	$E_{\text{норм}}, \text{В/м}$
25	25	0,8	0,3	Не норм.
50	34	7	7	5000
100	1	0,8	0,5	Не норм.
150	3	0,7	0,2	Не норм.
200	0,5	0,3	0,1	Не норм.
300	0,3	0,5	0,6	Не норм.
400	0,1	0,2	0,1	Не норм.
500	0,01	0,1	0,1	Не норм.
600	10	10	10	Не норм.

Из таблицы 3.5 видно, что наибольшее значение напряженности ЭП при частоте 50 Гц и составляет 34 В/м. Так как напряженности ЭП частотой 50 Гц измерялись не при наибольшем рабочем напряжении — 3,3 кВ — электроустановки, то проведем пересчет на максимальное рабочее напряжение 4 кВ; превышение ПДУ ЭП 50 Гц не зафиксировано. Уровни напряженностей ЭП 50 Гц в точках 1–3 не опасны для здоровья электротехнического персонала. Значения для частот более 50 Гц в [13] не нормируются, требуется разработка методики.

Методики суммарного воздействия на организм электротехнического персонала ЭП от высших гармонических составляющих различной частоты (от 25 Гц до 600 Гц) в России не существует, нет и ПДУ ЭП. Поэтому оценить магнитное поле указанного спектра частот нельзя.

Проанализировав результаты проведенных экспериментальных исследований ЭП и МП под шинным мостом вблизи ячеек АБ, можно сделать следующие выводы.

1. Под шинным мостом вблизи ячеек АБ зафиксирован спектр высших гармонических составляющих электрического поля от 25 до 600 Гц с преобладанием ЭП 50 Гц. Превышения ПДУ ЭП 50 Гц не наблюдается, возможно, это связано с нахождением токоведущих частей в металлических ячейках, а силовые линии напряженности ЭП от шин, проходящих над ячейками, замыкаются на них.

2. Результаты измерений напряженностей МП показывают, что величина напряженности МП 50 Гц не превышает ПДУ для 8-часового воздействия.

3. Под шинным мостом вблизи ячеек АБ присутствуют МП спектра высших гармонических составляющих с напряженностью магнитного поля от 2,2 А/м до 4,85 А/м: 50, 100, 200 Гц. Методики оценки магнитного поля с указанными частотами в промышленных условиях в РФ нет. Методики суммарного воздействия на организм высших гармонических составляющих различной частоты не существует. Оценить магнитное поле этого спектра частот не представляется возможным из-за отсутствия ПДУ МП.

4. Нормирование предельно допустимых значений напряженности МП частотой до 1 кГц в России осуществляется только для МП 50 Гц, а на рассмотренных рабочих местах электротехнического персонала зафиксирован спектр частот до 550 Гц, поэтому необходимо разработать методику нормирования МП данного диапазона частот.

## Измерения магнитных полей у уравнительного реактора

Проведены измерения напряженности МП у уравнительного реактора на высоте 1,8 м от поверхности земли и на расстоянии 0,5 м от него (рис. 3.10).

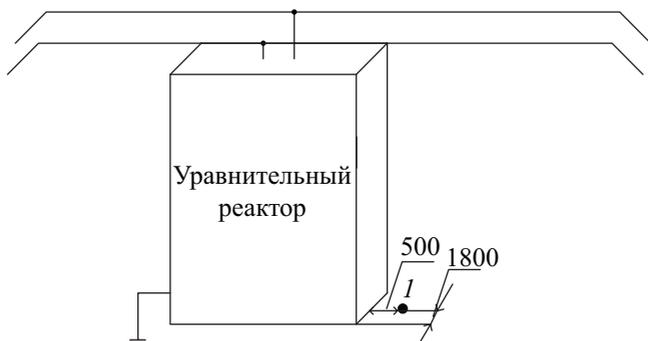


Рис. 3.10. Уравнительный реактор

Результаты измерений напряженности магнитного поля в точке *I* при токе 500 А в диапазоне 25–675 Гц приведены на рис. 3.11.



Рис. 3.11. Напряженность магнитного поля в точке *I*

Из рис. 3.11 видно, что в точке 1 у уравнительного реактора отсутствует спектр высших гармонических составляющих. Это связано с тем, что на выходе ТП установлены сглаживающие фильтр устройства, которые сглаживают спектр высших гармонических составляющих, поэтому присутствует только магнитное поле частотой 50 Гц.

Так как напряженность МП 50 Гц измерялась при работе электроустановки  $I_{\text{раб}} = 500$  А, проведем пересчет на максимальный рабочий ток электроустановки. При пересчете на максимальный рабочий ток 3150 А значение напряженности МП 50 Гц составит 2,5 А/м, что не превышает нормируемого значения 80 А/м. Уровни напряженности МП 50 Гц у уравнительного реактора не опасны для обслуживающего электротехнического персонала.

## Измерения электромагнитных полей под отходящими шинами выпрямителя к тяговому трансформатору

Проведены измерения напряженности ЭП и МП под отходящими шинами выпрямителя (ВП) к тяговому трансформатору на расстоянии 1,8 м от поверхности пола и на расстоянии 0,5 м от него (рис. 3.12, 3.13).

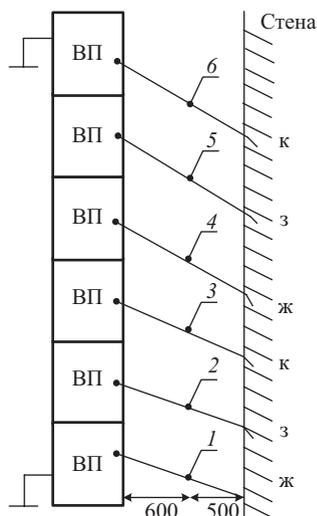


Рис. 3.12. Шина от ВП к РУ-10 кВ  
(вид сверху)

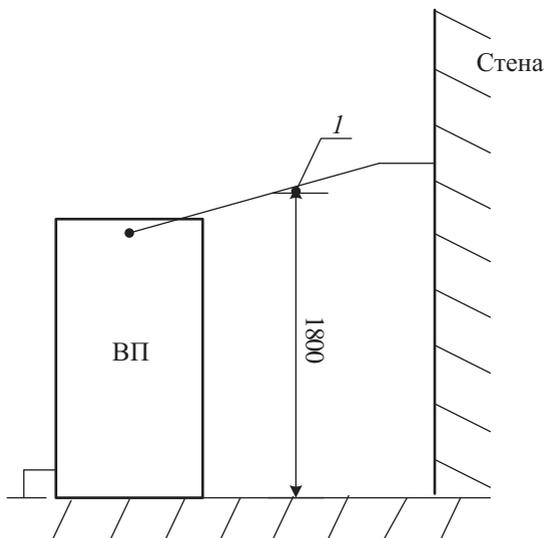


Рис. 3.13. Шина от ВП к РУ-10 кВ (вид сбоку)

В таблице 3.6 приведен анализ напряженности МП в диапазоне частот 25–675 Гц при  $I_{\text{раб}} = 1000$  А в точках 1–6 под отходящими шинами ВП.

Таблица 3.6  
Анализ напряженности МП (А/м) под отходящими шинами ВП

$f_k$ , Гц \ № точки	1	2	3	4	5	6	$H_{\text{норм}}$ , А/м
50	125	125	125	125	125	125*	80
100	6	10	5	8	10	9	Не норм.
200	3	2	2	3	4	2	Не норм.
250	18	18	17	18	18	18	Не норм.
350	15	2	2	10	16	10	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,1	0,5	0,5	Не норм.
500	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
550	0,5	8	7	7	8	8	Не норм.
$I_{\text{дк}}$ , А	1000	1000	1000	1000	1000	1000	

\* Выделенные значения превышают нормируемые по СанПиН 2.2.4.3359–16.

Итак, определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности МП. Для точек 1–6 напряженность МП составляет 125 А/м, что превышает значения ПДУ МП, указанные в [13], в 1,5 раза.

Напряженности МП 50 Гц измерялись при работе электроустановки  $I_{\text{раб}} = 1000$  А, поэтому проведем пересчет на максимальный рабочий ток электроустановки – 3150 А. В этом случае значение напряженности МП 50 Гц составит 394 А/м, что превышает нормируемое значение 80 А/м в 4,9 раза. Значит, необходимо разработать средства защиты для снижения продолжительности воздействия МП при работе электроустановки выше 1000 А.

Но методики суммарного воздействия на организм электротехнического персонала МП от высших гармонических составляющих различной частоты 50–550 Гц нет. Из-за отсутствия ПДУ МП нельзя и полностью оценить магнитное поле этого спектра частот на рабочем месте электротехнического персонала.

Результаты измерений напряженности электрического поля в точках 1, 3 и 6,  $U_{\text{раб}} = 3,1$  кВ, приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Анализ напряженности ЭП (В/м) под шинным мостом  
в РУ-3,3 кВ

$f_k$ , Гц \ № точки	1	3	6	$E_{\text{норм}}$ , В/м
25	60	50	50	Не норм.
50	72	73	55	5000
100	68	69	69	Не норм.
150	44	45	44	Не норм.
200	32	31	31	Не норм.
300	20	20	20	Не норм.
400	17	18	18	Не норм.
500	12	13	12	Не норм.
600	10	10	10	Не норм.

Под шинным мостом в точках 1, 3 и 6 зафиксирован спектр высших гармонических составляющих электрического поля от 25 Гц до 600 Гц.

Из таблицы 3.6 видно, что наибольшее значение напряженности ЭП отмечено при частоте 50 Гц, составляет 73 В/м, что не превышает уровень ПДУ (0,5 кВ/м). Уровень напряженности ЭП для частоты 50 Гц в рассмотренных точках не представляет опасности для здоровья электротехнического персонала.

ПДУ электрического поля (кроме 50 Гц) с вышеуказанными частотами для промышленных условий в РФ отсутствуют, как и при аддитивном воздействии ЭП спектра высших гармонических составляющих.

Для защиты электротехнического персонала от спектра высших гармонических составляющих и сочетанного воздействия спектра высших гармонических составляющих ЭП на электротехнический персонал необходимо разработать методику оценки данного фактора. Уровень ЭП 50 Гц не превышает ПДУ ЭП 50 Гц (5 кВ/м), то есть не опасен для обслуживающего электротехнического персонала.

### ***Организационно-технические мероприятия для защиты электротехнического персонала от вредного воздействия магнитного поля***

Оградить место под шинным мостом от тягового трансформатора до преобразователя в ЗРУ-3,3 кВ и на открытой части для свободного прохода повесить плакат «Магнитное поле».

Установить сигнализатор, оповещающий электротехнический персонал о превышении нормируемого ПДУ напряженности магнитного поля и предупреждающий, что находиться в это время у оборудования можно не более 1 часа\*.

После установки сигнализатора провести внеплановый инструктаж с работниками РУ-3,3 кВ и проинформировать их о допустимых уровнях ЭМП, регламентированных действующими нормативными документами в РФ.

---

\* Это снизит время действия вредного воздействия ЭМП на работника, находящегося вблизи токоведущих частей ЭУ, на которых осуществляется работа, а также вблизи других ЭУ.

## Сравнение теоретических и экспериментальных исследований ЭМП вблизи электроустановок в частотном диапазоне до 1 кГц

Расчет электрического поля вблизи шин РУ-3,3 кВ показывает, что наибольшая ожидаемая напряженность ЭП для условий  $h = 1,7$  м,  $r = 0,04$  м,  $k = 3,5$  м,  $U_{dk} = 235$  В,  $b_n = 1,03$ ,  $\gamma = 40$  град не будет превышать 40 В/м для частоты 300 Гц, ЭП которой в РФ не нормируется, а наибольшая ожидаемая напряженность магнитного поля 50 Гц вблизи шин РУ-3,3 кВ будет равна 85 А/м, что превышает уровни ПДУ МП 50 Гц (80 А/м).

Проанализировав проведенное экспериментальное исследование ЭМП в характерных точках на рабочих местах персонала в ЗРУ-3,3 кВ, можно сделать следующие выводы.

Напряженность ЭП постоянного тока и переменной составляющей 50 Гц выпрямленного тока во всех случаях не превышает нормируемых значений и не представляет опасности вредного воздействия на электротехнический персонал (оперативный и ремонтный), занятый обслуживанием ЭУ.

Напряженность МП переменной составляющей выпрямленного тока 50 Гц на рабочих местах под отходящими шинами ВП в точках 4, 5 и 6 при рабочих токах 1000 А превышает ПДУ МП 50 Гц (80 А/м) в 1,56 раза, следовательно, представляет опасность для здоровья обслуживающего электротехнического персонала. При пересчете на максимальный рабочий ток 3150 А значение напряженности МП 50 Гц составит 394 А/м, что превышает нормируемое значение 80 А/м в 4,9 раза (на расстоянии 1 м от шин ВП).

Измеренные значения напряженности ЭП и МП у уравнительного реактора на высоте 1,8 м от поверхности земли и на расстоянии 0,5 м от него не представили опасности для здоровья электротехнического персонала.

Воздействие на электротехнический персонал напряженностей ЭП и МП от высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока (МП и ЭП до 10 кГц) в настоящее время не оценивается, соответственно и методики нормирования ЭП и МП данного спектра частот нет.

Уровни напряженности магнитного поля превышают ПДУ только при высоких уровнях значения выпрямленного тока, значит, необходимо разработать и установить на тяговых подстанциях

устройства для контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок выпрямленного переменного тока.

Теоретическое исследование ЭП и МП совпадает с экспериментальным на 80% по наличию высших гармонических составляющих ( $k$ ), так как в расчете невозможно реально оценить гармонические составляющие частотой 100 Гц и кратные ей частоты из-за наличия несимметрии и несинусоидальности кривых питающего напряжения трехфазной системы. А в соответствии с теорией Д. Максвелла, электрические и магнитные поля не могут существовать по отдельности, изменяющееся магнитное поле порождает электрическое, а электрическое порождает магнитное, поэтому при экспериментальных исследованиях встречаются ЭП и МП разных частот.

Проведенный анализ электромагнитной обстановки на рабочих местах электротехнического персонала, обслуживающего ЗРУ-3,3 кВ, показывает, что вблизи обслуживаемых электроустановок присутствуют электрические и магнитные поля со спектром высших гармонических составляющих от 25 до 600 Гц.

Для электрического и магнитного полей частотный спектр различается, но настоящее время этот спектр не нормируется. Выявлено, что в ЗРУ-3,3 кВ на некоторых рабочих местах персонала при рабочих токах свыше 1000 А наблюдается превышение ПДУ МП 50 Гц (80 А/м). Необходимо разработать мероприятия для минимизации воздействия данного фактора на электротехнический персонал с целью сохранения его здоровья. С учетом специфики работы электроустановок, необходимо контролировать уровни магнитных полей, чего до сих пор не делается.

## Глава 4

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### Нормирование ЭМП частотного диапазона до 30 кГц в производственных условиях в России

Гигиеническое нормирование вредного воздействия электромагнитных полей ведется на основе установления предельно допустимых уровней параметров электрических и магнитных полей низкочастотного диапазона [13, 18, 135, 136]. Основные нормируемые показатели – напряженность ЭП, МП и продолжительность экспозиции напряженностей ЭМП на рабочем месте.

Показатели электрической и магнитной составляющих ЭМП нормируются отдельно, а оценка их совместного воздействия на организм человека не предусмотрена.

В России оценка ЭМП в производственных условиях от таких источников, как контактная сеть, оборудование на тяговых подстанциях и на подвижном составе, осуществляется по [13]. Установлены ПДУ на рабочих местах: электростатического поля (ЭСП), постоянного магнитного поля (ПМП), электрического и магнитного полей промышленной частоты 50 Гц (ЭП и МП ПЧ), электромагнитных полей в диапазоне частот  $\geq 10$ –30 кГц, электромагнитных полей в диапазоне частот  $\geq 30$  кГц – 300 ГГц.

Предельно допустимые уровни ЭМП в диапазоне 50–10 кГц в России не установлены (кроме частоты 50 Гц и 10 кГц).

#### *Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля*

Постоянное магнитное поле (ПМП) оценивают и нормируют по уровню магнитного поля дифференцированно, в зависимости

от времени его воздействия на работника за смену для условий общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье) воздействия.

Уровень ПМП оценивают в единицах напряженности магнитного поля ( $H$ ) в А/м или в единицах магнитной индукции ( $B$ ) в мТл (таблица 4.1).

*Таблица 4.1*

**ПДУ постоянного магнитного поля**

Время воздействия за рабочий день, мин	Условия воздействия			
	общее		локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0–10	24	30	40	50
11–60	16	20	24	30
61–480	8	10	12	15

Если персоналу необходимо находиться в зонах с различной напряженностью (индукцией) ПМП, то общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью.

***Предельно допустимые уровни напряженности периодического магнитного поля 50 Гц***

ЭМП ПЧ (50 Гц) оценивается отдельно по напряженности электрического поля ( $E$ ), кВ/м, напряженности магнитного поля ( $H$ ), А/м, или индукции магнитного поля ( $B$ ), мкТл. Нормирование электромагнитных полей 50 Гц на рабочих местах персонала дифференцировано в зависимости от времени пребывания в электромагнитном поле.

Предельно допустимые уровни напряженности периодических (синусоидальных) МП 50 Гц устанавливаются для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействий (таблица 4.2).

Таблица 4.2

ПДУ переменного магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП, $H$ [А/м] / $B$ [мкТл]	
	при общем	при локальном
$\leq 1$	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Допустимая напряженность МП в зависимости от продолжительности времени воздействия определяется в соответствии с кривой интерполяции (рис. 4.1) [13].

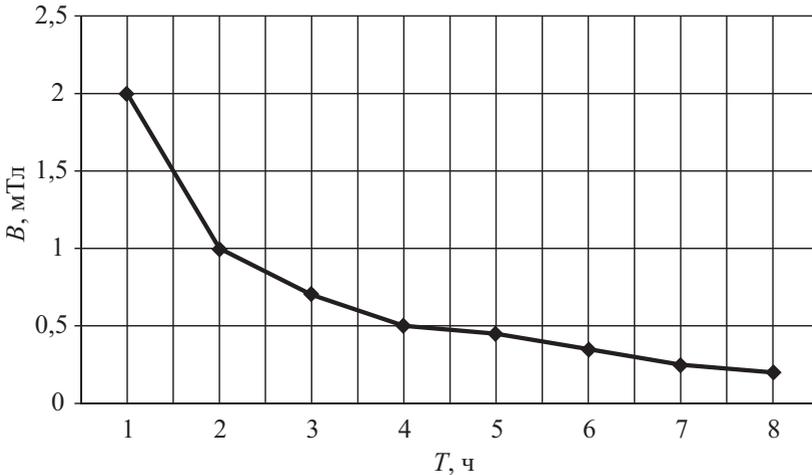


Рис. 4.1. Кривая интерполяции ПДУ магнитных полей 50 Гц в зависимости от продолжительности времени воздействия

При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью (индукцией) МП общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимого для зоны с максимальной напряженностью.

### **Предельно допустимые уровни напряженности электрического поля 50 Гц**

Предельно допустимый уровень напряженности ЭП на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м.

При напряженностях в интервале больше 5 кВ/м (до 20 кВ/м включительно) допустимое время пребывания в ЭП  $T$ , ч, рассчитывается по формуле:

$$T = \left( \frac{50}{E} \right) - 2, \quad (4.1)$$

где  $E$  – напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м;  $T$  – допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч.

При напряженности свыше 20 кВ/м (до 25 кВ/м) допустимое время пребывания в ЭП составляет 10 мин.

Пребывание в ЭП с напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается.

Время пребывания персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью ЭП ( $T_{\text{пр}}$ ) вычисляются по формуле:

$$T_{\text{пр}} = 8 \cdot \left( \frac{t \cdot E_1}{T \cdot E_1} + \frac{t \cdot E_2}{T \cdot E_2} + \frac{t \cdot E_n}{T \cdot E_n} \right), \quad (4.2)$$

где  $T_{\text{пр}}$  – приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности;  $t \cdot E_1$ ,  $t \cdot E_2$ ,  $t \cdot E_n$  – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью  $E_1$ ,  $E_2$ , ...  $E_n$ , ч;  $T \cdot E_1$ ,  $T \cdot E_2$ ,  $T \cdot E_n$  – допустимое время пребывания для соответствующих контролируемых зон.

Приведенное время не должно превышать 8 ч.

### **Предельно допустимые уровни электромагнитных полей диапазона частот 10–30 Гц**

ЭМП оценивается и нормируется отдельно по напряженности электрического ( $E$ ), В/м, и магнитного ( $H$ ), А/м, полей в зависимости от продолжительности воздействия (таблица 4.3).

Таблица 4.3

Предельно допустимые уровни электромагнитных полей  
диапазона частот 10–30 кГц

ПДУ напряженности электрического и магнитного поля 10–30 кГц	Уровень воздействия
При воздействии в течение смены	500 В/м и 50 А/м
При воздействии в течение двух часов	1000 В/м и 100 А/м

Нормы для ЭМП 50–10000 Гц, кроме 50 Гц и 10 кГц, в России не установлены, а значит, нельзя определить, к какому классу (допустимому или вредному) следует отнести условия труда на рабочем месте. Класс условий труда для неионизирующих излучений определяется в соответствии с таблицей 4.4.

Таблица 4.4

Классы условий труда по фактору ЭП и МП

Наименование	Превышение предельно допустимых уровней (раз)					
	класс (подкласс) условий труда					
	допустимый	вредный				опасный
		2	3.1	3.2	3.3	
Электрические поля 50 Гц	≤ ПДУ	≤ 5	≤ 10	>	=	> 40
Магнитные поля 50 Гц	≤ ПДУ	≤ 5	≤ 10	>	=	=

В системе санитарно-эпидемиологического нормирования ЭМП в Российской Федерации:

– отсутствуют ПДУ, регламентирующие воздействие ЭМП в производственных условиях для частотного диапазона частот до 10 кГц, кроме 50 Гц и 10 кГц;

– оценка напряженности ЭМП проводится отдельно по электрической и магнитной составляющей, однако при эксплуатации тягового электроснабжения на персонал одновременно действуют высокие уровни электрического и магнитного полей.

Необходимо разработать мероприятия и устройства для снижения влияния ЭМП, что позволит сохранить здоровье работникам как обслуживающим электроустановки, так и находящимся вблизи.

В Евросоюзе нормирование также основано на отдельной оценке ПДУ показателей ЭМП с более глубокой проработкой зависимости показателей от частотного спектра [135].

У нас в стране практика гигиенического нормирования имеет оценку продолжительности воздействия показателей ПДУ ЭМП, правда, в отдельных случаях с достаточно большим шагом временного воздействия; в практике ЕС такой принцип отсутствует.

Интересно сравнить предельно допустимые показатели нормируемых значений ЭМП для ЭУ переменного тока промышленной частоты в отечественных нормативных документах и в странах Евросоюза (таблица 4.5).

*Таблица 4.5*

Нормируемые показатели ЭМП для промышленной частоты (50 Гц) в России и странах Евросоюза

	Длительность, ч	Электрическая напряженность, В/м	Магнитная напряженность, А/м	Магнитная индукция, мкТл
Россия	8	5000 (500 – для населения)	80	100
Евросоюз	–	10 000	400	500

Даже неполные данные таблицы 4.5 показывают, что в странах Евросоюза установлены значительно менее жесткие нормы показателей ЭМП в сравнении с российскими. Но длительность пребывания при экспозиции ЭМП не нормируется.

## **Нормирование ЭМП частотного диапазона до 10 МГц в производственных условиях в странах ЕС**

Нормирование ЭМП в производственных условиях частотного диапазона от 1 Гц до 10 кГц в странах ЕС осуществляется в соответствии с Директивой Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2013/35/ЕС, устанавливающей минимальные требования в отношении защиты работников от рисков для их здоровья и безопасности, которые возникают или могут возникнуть в связи с воздействием на них во время работы электромагнитных полей [135].

Директива распространяет действие на все известные прямые биофизические эффекты и не прямые эффекты, вызванные электромагнитными полями.

Директива не распространяет действие на предполагаемые отдаленные эффекты.

Для целей настоящей Директивы должны применяться следующие определения:

электромагнитные поля — это постоянные электрические, постоянные магнитные и изменяющиеся во времени электрические, магнитные и электромагнитные поля частотой до 300 ГГц;

величины предельно допустимых воздействий (ELVs) — величины, установленные на основании рассмотрения биофизических и биологических факторов, в частности, на основании научно установленных краткосрочных и резких прямых эффектов, то есть термальных эффектов и электрической стимуляции мышц;

ELVs для возникновения последствий для здоровья — такие величины предельно допустимых воздействий, при превышении которых у работников могут возникнуть такие неблагоприятные последствия, как тепловой нагрев или стимуляция нервной и мышечной тканей;

ELVs для образования сенсорных эффектов — величины предельно допустимых воздействий, при превышении которых работники могут испытывать краткосрочные расстройства чувственного восприятия и незначительные изменения мозговых функций;

рабочие уровни (ALs) — операционные уровни, установленные, чтобы упростить процесс доказательства соответствия релевантным ELVs или в случае необходимости для принятия соответствующих защитных или профилактических мер, указанных в настоящей Директиве;

для электрических полей «низкие ALs» и «высокие ALs» — уровни, которые соответствуют специальным защитным или профилактическим мерам, указанным в настоящей Директиве;

для магнитных полей «низкие ALs» — уровни, которые соответствуют ELVs для образования сенсорных эффектов, «высокие ALs» — ELVs для возникновения последствий для здоровья.

### ***Рабочие уровни***

***(профессиональное воздействие производственного фактора)***

Следующие физические величины и значения используются для определения рабочих уровней (ALs), которые устанавливаются, чтобы упростить оценку соблюдения требований в отношении ELVs

или для определения значений, при которых должны быть приняты соответствующие профилактические или защитные меры.

Низкие ALs ( $E$ ) и высокие ALs ( $E$ ) рабочие уровни напряженностей электрического поля  $E$ , изменяющиеся во времени, определены в таблице 4.6.

Низкие ALs ( $B$ ) и высокие ALs ( $B$ ) рабочие уровни плотности магнитного потока  $B$ , изменяющиеся во времени, определены в таблице 4.7.

ELVs ( $B_0$ ) рабочие уровни плотности магнитного потока (постоянное поле) определены в таблице 4.8.

ALs рабочие уровни соответствуют значениям магнитных полей, рассчитанным или измеренным на рабочем месте в отсутствие работника.

В существующей системе санитарно-эпидемиологического нормирования ЭМП в ЕС:

- разработаны ПДУ ЭМП до 10 кГц и выше, регламентирующие воздействие ЭМП в производственных условиях для рассматриваемого частотного диапазона частот до 10 кГц, которые можно гармонизировать и в России;

- оценка ПДУ напряженностей ЭП и МП проводится отдельно по электрической и магнитной составляющей (а это неверно).

Таблица 4.6

Рабочие уровни ALs электрических полей частотой от 1 Гц до 10 МГц

Диапазон частот	Низкие ALs ( $E$ ) (В/м) для напряженности электрического поля (среднеквадратичные значения)	Высокие ALs ( $E$ ) (В/м) для напряженности электрического поля (среднеквадратичные значения)
$1 \leq f < 25$ Гц	$2,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^4$
$25 \leq f < 50$ Гц	$5,0 \cdot 10^5 / f^{*}$	$2,0 \cdot 10^4$
$50 \text{ Гц} \leq f < 1,64$ кГц	$5,0 \cdot 10^5 / f^{*}$	$1,0 \cdot 10^6 / f^{*}$
$1,64 \leq f < 3$ кГц	$5,0 \cdot 10^5 / f^{*}$	$6,1 \cdot 10^2$
$3 \text{ кГц} \leq f \leq 10$ МГц	$1,7 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^2$

$f^*$  – частота, Гц.

Низкие ALs ( $E$ ) и высокие ALs ( $E$ ) – среднеквадратичные значения напряженности электрического поля, соответствующие пиковым максимальным мгновенным значениям, деленным на  $\sqrt{2}$  для синусоидальных полей.

Таблица 4.7

Рабочие уровни ALs магнитных полей частотой  
от 1 Гц до 10 МГц

Диапазон частот	Низкие ALs ( $B$ ) для плотности магнитного потока ( $\mu\text{T}$ ) (среднеквадратичные значения)	Высокие ALs ( $B$ ) для плотности магнитного потока ( $\mu\text{T}$ ) (среднеквадратичные значения)	ALs плотности магнитного потока для воздействия на конечности локализованного магнитного поля ( $\mu\text{T}$ ) (среднеквадратичные значения)
$1 \leq f < 8 \text{ Гц}$	$2,0 \cdot 10^5 / f^2$	$3,0 \cdot 10^5 / f^*$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
$8 \leq f < 25 \text{ Гц}$	$2,5 \cdot 10^4 / f$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
$25 \text{ Гц} \leq f < 300 \text{ Гц}$	$1,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
$300 \text{ Гц} \leq f < 3 \text{ кГц}$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
$3 \text{ кГц} \leq f \leq 10 \text{ МГц}$	$1,0 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^2$

$f^*$  – частота, Гц.

Низкие ALs и высокие ALs – среднеквадратичные значения напряженности электрического поля, соответствующие пиковым максимальным значениям, деленным на  $\sqrt{2}$  для действующих значений синусоидальных полей.

Таблица 4.8

Рабочие уровни ALs плотности магнитного потока  
(постоянные магнитные поля)

Опасность	Рабочий уровень ( $B_0$ ), мТ
Взаимодействие с активными имплантируемыми изделиями медицинского назначения, например, кардиостимуляторами	0,5
Риск притяжения и переноса в краевое поле источников поля высокой напряженности ( $> 100 \text{ мТ}$ )	3

## Методические рекомендации к оценке ЭМП частотой от 50 Гц до 1 кГц в производственных условиях на основе существующей практики нормирования ЭМП в России и странах Евросоюза

Анализ нормирования напряженности ЭМП низкочастотного (НЧ) диапазона в разных странах показывает, что нормируются разные уровни напряженности ЭМП, причем значения величин нормируемых значений отличаются в десятки раз.

На персонал, находящийся в зоне воздействия ЭМП постоянного и однофазного переменного тока тяговой сети, могут действовать одновременно высокие уровни напряженности ЭМП со спектром высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока до 10 кГц, ПДУ которых не нормируются (кроме значений для частоты 50 Гц и 10 кГц).

Методические рекомендации разработаны на основании действующих в России и странах ЕС нормативных документов по фактору ЭМП в частотном диапазоне от 50 Гц до 1 кГц [13, 18, 135, 136].

На основе анализа нормативных документов по нормированию показателей электромагнитных полей в России и странах ЕС до утверждения ПДУ параметров ЭМП указанного спектра частот целесообразно придерживаться предельно безопасных уровней (ПБУ) для высших гармонических составляющих.

Оценка электромагнитных полей проводится по некоторым адаптируемым показателям ЭМП от высших гармонических составляющих в соответствии с [13, 18, 135, 136]. Это связано с отсутствием ПДУ ЭП и МП в промышленных условиях для частот от 50 Гц до 1 кГц, кроме ПДУ ЭП и МП для частоты 50 Гц.

Методические рекомендации устанавливают на рабочих местах:

- 1) предельно безопасные уровни (ПБУ) энергии излучения ЭП и МП ПЧ;
- 2) ПБУ дозы ЭМП ПЧ;
- 3) ПБУ спектра высших гармонических составляющих напряженностей электрической и магнитной составляющей ЭМП от 50 Гц до 1 кГц;
- 4) ПБУ энергии излучения электромагнитных полей в диапазоне частот  $\geq 50-1000$  Гц;
- 5) ПБУ дозы электромагнитных полей в диапазоне частот  $\geq 50-1000$  Гц.

## **Предельно безопасные уровни энергии излучения ЭП и МП ПЧ**

В соответствии с действующими нормативными документами [13], оценка и нормирование ЭМП ПЧ (50 Гц) осуществляется отдельно по напряженности электрического поля ( $E$ ) в кВ/м, напряженности магнитного поля ( $H$ ) в А/м или индукции магнитного поля ( $B$ ) в мкТл.

При наличии на рабочих местах источников, работающих при высоких уровнях напряжения и тока, рекомендуется оценивать не только отдельно уровни электрических и магнитных полей, но и их аддитивное воздействие на электротехнический персонал в виде предельно безопасной энергии излучения электромагнитного поля 50 Гц  $\mathcal{E}_{\text{пбу}}(50)$  в Вт·ч как основного фактора:

$$\mathcal{E}_{\text{пбу}}(50) = P_{\text{пбу}}(50) = \frac{E_{\text{пду}}(50) \cdot H_{\text{пду}}(50)}{2}, \quad (4.3)$$

где  $E_{\text{пду}}$  и  $H_{\text{пду}}$  – предельно допустимые уровни электрических и магнитных полей [13];  $P_{\text{пбу}}$  – предельно безопасные уровни электромагнитных полей 50 Гц.

Снижение при определении ПБУ нормируемых значений ПДУ напряженностей электрической и магнитной составляющих ЭМП в два раза связано с оценкой аддитивного характера воздействия данных полей, которое можно принять в два раза ниже по сравнению с воздействием отдельных составляющих напряженностей ЭП и МП.

Нормирование электромагнитных полей 50 Гц на рабочих местах персонала осуществляется дифференцированно, в зависимости от времени пребывания в электромагнитном поле; ПДУ энергии излучения ЭМП 50 Гц при разной продолжительности экспозиции представлены в таблице 4.9.

*Таблица 4.9*

ПБУ энергии излучения ЭМП 50 Гц вблизи электроустановок при разной продолжительности экспозиции на обслуживающий персонал

Продолжительность, ч	ПДУ электрической напряженности, В/м	ПДУ магнитной напряженности, А/м	ПБУ энергии излучения ЭП Э (50), Вт/м <sup>2</sup>
≤ 1	5000	1600	4 000 000
2	5000	800	2 000 000
4	5000	400	1 000 000
8	5000	80	200 000

Из таблицы 4.9 видно, что безопасные уровни энергии излучения ЭМП изменяются в зависимости от величины экспозиции (1–8 ч), достигают значений от 400 кВт/м<sup>2</sup> до 200 кВт/м<sup>2</sup>.

### **ПБУ дозы ЭМП ПЧ**

Оценку и нормирование ЭМП 50 Гц предлагается осуществлять также по величине дозы ЭМП 50 Гц, Вт/м<sup>2</sup>·кг

$$D(50) = \frac{\mathcal{E}(50) \cdot k}{m}, \quad (4.4)$$

где  $\mathcal{E}(50)$  – энергия излучения электромагнитного поля, Вт/м<sup>2</sup>;  $m$  – масса тела человека, кг;  $k$  – коэффициент дозы ЭМП, который равен

$$k = \frac{N \cdot t \cdot n_{\text{лет}}}{t_{\text{см}} \cdot 8760}, \quad (4.5)$$

где  $t_{\text{см}}$  – продолжительность рабочей смены, ч;  $t$  – продолжительность экспозиции за смену, ч;  $n_{\text{лет}}$  – стаж работы в электроустановках, год;  $N$  – число рабочих смен в году (например, в 2016 г. при 40-часовой рабочей неделе – 247 рабочих смен); 8760 – кол-во часов в году, ч.

Коэффициент дозы ЭМП для разной продолжительности воздействия и стажа работы персонала в электроустановках приведен в таблице 4.10.

*Таблица 4.10*

Коэффициент дозы ЭМП для разной продолжительности воздействия и стажа работы персонала в электроустановках

Продолжительность, ч	Стаж работы персонала в электроустановках, год				
	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
≤ 1	0,004	0,007	0,011	0,014	0,018
2	0,007	0,014	0,021	0,028	0,035
4	0,014	0,028	0,042	0,056	0,070
8	0,028	0,056	0,085	0,113	0,141

ПБУ дозы ЭМП для разной продолжительности воздействия и стажа работы персонала в электроустановках приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11

ПБУ дозы ЭМП для разной продолжительности воздействия и стажа работы персонала в электроустановках, Вт/м<sup>2</sup>·кг

Продолжительность, ч	Стаж работы персонала в электроустановках, год				
	1	2	3	4	5
1	201	403	604	806	1007
2	201	403	604	806	1007
4	201	403	604	806	1007
8	81	161	242	322	403

**ПБУ энергии излучения электромагнитных полей  
в диапазоне частот ≥ 50–1000 Гц**

Оценку и нормирование электромагнитного поля в диапазоне частот ≥ 50–1000 Гц предлагается осуществлять по величине энергии излучения ЭМП Э, Вт/м<sup>2</sup>:

$$\mathcal{E}(f_i) = P(f_i) = \frac{E(f_i) \cdot H(f_i)}{2}. \quad (4.6)$$

Соотношение частота/напряженность поля для расчета ПБУ электрических и магнитных полей частотой от 50 до 1000 Гц по [136] приведены в таблице 4.12, по [135] – в таблице 4.14.

Таблица 4.12

ПДУ электрических и магнитных полей  
частотой от 50 до 1000 Гц [136]

Диапазон частот, кГц	ПБУ напряженности электрического поля, Е, В/м	ПБУ напряженности магнитного поля, Н, А/м
0,05–0,8	250 / f*	4 / f*
0,8–1	250 / f*	5

f\* – частота ЭМП, кГц.

ПБУ электрических и магнитных полей, ПБУ энергии электромагнитного поля частотой от 50 до 1000 Гц [136], рассчитанной по (4.6), приведены в таблице 4.13, для [135] – в таблице 4.15.

Таблица 4.13

ПБУ энергии излучения ЭМП в диапазоне частот  
 $\geq 50-1000$  Гц [136]

Частота, Гц	ПБУ		ПБУ энергии излучения ЭМП, Вт/м <sup>2</sup>
	электрическая напряженность, В/м	магнитная напряженность, А/м	
50	5000	80,00	200000
100	2500	40,00	50000
150	1667	26,67	22222
200	1250	20,00	12500
250	1000	16,00	8000
300	833	13,33	5556
350	714	11,43	4082
400	625	10,00	3125
450	556	8,89	2469
500	500	8,00	2000
550	455	7,27	1653
600	417	6,67	1389
650	385	6,15	1183
700	357	5,71	1020
750	333	5,33	889
800	313	5,00	781
800	313	5,00	781
850	294	5,00	735
900	278	5,00	694
950	263	5,00	658
1000	250	5,00	625

Таблица 4.14

ПБУ электрических и магнитных полей частотой  
от 50 до 1000 Гц [135]

Диапазон частот, Гц	Напряженность электрического поля, $E$ , В/м	Напряженность магнитного поля, $H$ , А/м
50–300	$5,0 \cdot 10^5 / f^*$	800
300–1000	$5,0 \cdot 10^5 / f$	$3,0 \cdot 10^5 / 1,25 \cdot f$

$f^*$  – частота ЭМП, Гц.

Таблица 4.15

ПБУ энергии излучения ЭМП в диапазоне частот  $\geq 50$ –1000 Гц  
по [135]

Частота, Гц	ПБУ		ПБУ энергии излучения ЭМП, Вт/м <sup>2</sup>
	электрическая напряженность, В/м	магнитная напряженность, А/м	
50	10000	800	4000000
100	5000	800	2000000
150	3333	800	1333333
200	2500	800	1000000
250	2000	800	800000
300	1667	800	666667
350	1429	686	489796
400	1250	600	375000
450	1111	533	296296
500	1000	480	240000
550	909	436	198347
600	833	400	166667
650	769	369	142012
700	714	343	122449
750	667	320	106667
800	625	300	93750
850	588	282	83045
900	556	267	74074
950	526	253	66482
1000	500	240	60000

По результатам сравнения напряженностей ЭП и МП составляющей ЭМП и (или) энергии излучения ЭМП по диапазонам частот  $\geq 50$ –1000 Гц, полученных при измерениях ЭМП, с ПДУ принимается решение о превышении или непревышении ПДУ. При превышении ПБУ разрабатываются мероприятия для снижения уровней ЭМП и (или) энергии излучения ЭМП.

**ПБУ спектра высших гармонических составляющих напряженностей электрических и магнитных полей ЭМП от 50 Гц до 1кГц**

При наличии на рабочих местах спектра высших гармонических составляющих напряженностей электрической и магнитной составляющей ЭМП (одновременно от двух и более частот), входящих в частотный диапазон от 50 Гц до 1 кГц, необходимо привести полученные величины напряженностей магнитного и электрического составляющей ЭМП к номинальной величине (взвешенной) с учетом суммы частотных составляющих по их среднеквадратичным значениям:

$$\Delta h_{\text{пр}i}(f) = \sum_1^i \sqrt{\left(\frac{H_f}{h_{\text{ПБУ}(f)}}\right)^2}; \quad \Delta e_{\text{пр}i}(f) = \sum_1^i \sqrt{\left(\frac{E_f}{e_{\text{ПБУ}(f)}}\right)^2}, \quad (4.7)$$

где  $\sqrt{\left(\frac{H_f}{h_{\text{ПБУ}(f)}}\right)^2}$  – среднеквадратичное значение отношений на-

пряженностей магнитного поля от частоты  $f$ ;  $H_f$  – напряженность магнитного поля (измеренная) на частоте  $f$ ;  $h_{\text{ПБУ}(f)}$  – напряженность магнитного поля на частоте  $f$ , полученная в соответствии с таблицами 4.12 или 4.14;  $E_f$  – напряженность электрического поля (измеренная) на частоте  $f$ ;  $e_{\text{ПБУ}(f)}$  – напряженность электрического поля на частоте  $f$ , полученная в соответствии с таблицами 4.12 или 4.14;  $\Delta h_{\text{пр}i}(f)$  и  $\Delta e_{\text{пр}i}(f)$  – значения суммарных приведенных уровней напряженностей для магнитной и электрической составляющих ЭМП.

Полученные приведенные значения суммарных гармоник напряженностей электрической  $\Delta e_{\text{пр}i}(f)$  и магнитной  $\Delta h_{\text{пр}i}(f)$  составляющих ЭМП по диапазонам частот не должны превышать единицы.

### **ПБУ дозы ЭМП от 50 до 1000 Гц**

Оценку и нормирование ЭМП предлагается осуществлять также по величине дозы ЭМП, Вт/кг·м<sup>2</sup>

$$D_i(f) = \frac{\mathcal{E}_i(f) \cdot k}{m}, \quad (4.8)$$

где  $\mathcal{E}_i(f)$  – энергия излучения электромагнитного поля, Вт/м<sup>2</sup>;  $m$  – масса тела человека, кг;  $k$  – коэффициент дозы ЭМП, полученный в соответствии с таблицами 4.10 и 4.11.

Полученные зависимости ПБУ дозы ЭМП от частоты за смену, за год и пятилетний период приведены в таблицах 4.16 и 4.17.

*Таблица 4.16*

ПБУ дозы ЭМП (50–1000 Гц) для разной частоты поля  
и стажа работы персонала в электроустановках по [136]

Частота, Гц	Стаж работы персонала в электроустановках, год				
	1	2	3	4	5
50	80,00	160,00	242,86	322,86	402,86
100	20,00	40,00	60,71	80,71	100,71
150	8,89	17,78	26,98	35,87	44,76
200	5,00	10,00	15,18	20,18	25,18
250	3,20	6,40	9,71	12,91	16,11
300	2,22	4,44	6,75	8,97	11,19
350	1,63	3,27	4,96	6,59	8,22
400	1,25	2,50	3,79	5,04	6,29
450	0,99	1,98	3,00	3,99	4,97
500	0,80	1,60	2,43	3,23	4,03
550	0,66	1,32	2,01	2,67	3,33
600	0,56	1,11	1,69	2,24	2,80
650	0,47	0,95	1,44	1,91	2,38
700	0,41	0,82	1,24	1,65	2,06
750	0,36	0,71	1,08	1,43	1,79
800	0,31	0,63	0,95	1,26	1,57
850	0,29	0,59	0,89	1,19	1,48
900	0,28	0,56	0,84	1,12	1,40
950	0,26	0,53	0,80	1,06	1,33
1000	0,25	0,50	0,76	1,01	1,26

В соответствии с нормами в России, доза ЭМП для частоты 50 Гц составит  $80 \text{ Вт/кг} \cdot \text{м}^2$ , для частоты 1000 Гц –  $0,25 \text{ Вт/кг} \cdot \text{м}^2$ . Коэффициент удельного поглощения энергии SAR (среднее значение для всего тела) для частоты 100 кГц в соответствии с [136] составляет  $0,08 \text{ Вт/кг} \cdot \text{м}^2$ .

Таблица 4.17

ПБУ дозы ЭМП (50–1000 Гц) для разной частоты поля и стажа работы персонала в электроустановках [135]

Частота, Гц	Стаж работы персонала в электроустановках, год				
	1	2	3	4	5
50	1600	3200	4857	6457	8057
100	800	1600	2429	3229	4029
150	533	1067	1619	2152	2686
200	400	800	1214	1614	2014
250	320	640	971	1291	1611
300	267	533	810	1076	1343
350	196	392	595	791	987
400	150	300	455	605	755
450	119	237	360	478	597
500	96	192	291	387	483
550	79	159	241	320	400
600	67	133	202	269	336
650	57	114	172	229	286
700	49	98	149	198	247
750	43	85	130	172	215
800	38	75	114	151	189
850	33	66	101	134	167
900	30	59	90	120	149
950	27	53	81	107	134
1000	24	48	73	97	121

В соответствии с нормами Евросоюза, доза ЭМП в виде допустимой энергии для частоты 50 Гц составит  $1600 \text{ Вт/кг}$ , для частоты 1000 Гц –  $24 \text{ Вт/кг} \cdot \text{м}^2$ .

В России рекомендуется пользоваться ГОСТ Р 54148–210 (ЕН 50366:2003) «Воздействие на человека электромагнитных полей от бытовых и аналогичных электрических бытовых приборов» и СанПиН 2.2.4.3359–16 [13], в случае пересмотра норм и гармонизации их с нормами ЕС можно применять методику, основанную на их нормировании.

При превышении ПБУ по любому из перечисленных пунктов, в зависимости от специфики работы электроустановок работодатель обязан разработать организационно-технические мероприятия для защиты электротехнического персонала от вредного воздействия ЭМП.

В результате исследования разработана методика учета воздействия на человека ЭМП от высших гармонических составляющих выпрямленного переменного тока, которая решает проблему нормирования ЭМП частотой до 1 кГц, и комплексного воздействия электрической и магнитной составляющих на электротехнический персонал.

Методика дает возможность в полном объеме оценить такие производственные факторы, как электрические и магнитные поля с учетом специфики работы электроустановок, которые могут являться источниками электромагнитных полей разного спектра частот. Эту методику целесообразно применить при оценке работодателем рабочих мест по ЭМП, в том числе и при проведении специальной оценки условий труда на рабочих местах.

# Глава 5

## СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

### Принципы системного подхода к защите персонала от вредного воздействия параметров ЭМП

ЭМП оказывают вредное воздействие на организм человека в зависимости от уровня поля, частоты и времени воздействия [19] (таблица 5.1).

*Таблица 5.1*

Известные изменения в организме человека при действии электромагнитных полей (частота около 50 Гц) различной интенсивности

Параметр поля	Время воздействия	Наблюдаемая реакция	Источник, год
1,15 и 20 кВ/м	До 2 ч	Изменение времени реакции в пределах физиологической нормы	S.M. Michaelson, 1976 Б. Савин, Н. Рубцова, 1978
0,2 мТл	3 ч	Отсутствие влияния на время реакции и электроэнцефалограмму	Б. Савин, Н. Рубцова, 1978
До 10 мкТл	До 10 ч с перерывом	Изменение артериального давления, изменение частоты сердечных сокращений	Б. Савин, Н. Рубцова, 1978 А. Комарова, 1983
4–7 мкТл	От 1 до 7 лет	Увеличение числа случаев лейкозов у детей. Появление опухолей различной локализации и вида	L. Tomenius, 1982, 1986 Verkasalo et al., 1993 Olsen et al., 1995 Szmigielski et al., 1982

Для защиты работающих от неблагоприятного влияния ЭМП проводят организационные, инженерно-технические и лечебно-профилактические мероприятия [13].

### ***Организационные мероприятия***

Выбор рациональных режимов работы оборудования.

Выделение зон воздействия ЭМП (зоны с уровнями ЭМП, превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала, должны ограждаться и обозначаться соответствующими предупредительными знаками).

Расположение рабочих мест и маршрутов передвижения обслуживающего персонала на расстояниях от источников ЭМП, обеспечивающих соблюдение ПДУ.

Ремонт оборудования, являющегося источником ЭМП, следует производить (по возможности) вне зоны влияния ЭМП от других источников.

Соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП.

### ***Инженерно-технические мероприятия***

Инженерно-технические мероприятия снижают уровни ЭМП на рабочих местах путем внедрения новых технологий и применения средств коллективной и индивидуальной защиты (когда фактические уровни ЭМП на рабочих местах превышают ПДУ, установленные для производственных воздействий); например, заземленное экранирующее устройство (рис. 5.1). Однако не всегда экраны можно использовать из-за конструктивных особенностей электроустановок.

### ***Применение специальной экранирующей одежды***

Одежда специальная [137] и другие средства индивидуальной защиты от воздействия электростатического, электрического, магнитного и электромагнитного полей, в том числе средства индивидуальной защиты от воздействия статического электричества.

Комплект индивидуальный экранирующий (средства индивидуальной защиты глаз (очки защитные) и лица (щитки защитные лицевые) (рис. 5.2)) для защиты от электрических полей токов промышленной частоты.

Представленная специальная экранирующая одежда защищает работника только от электрического поля.

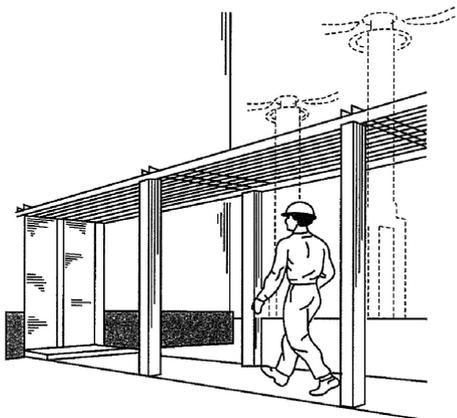


Рис. 5.1. Заземленное экранирующее устройство



Рис. 5.2. Специальная экранирующая одежда

### ***Лечебно-профилактические мероприятия***

В целях предупреждения и раннего обнаружения изменений состояния здоровья все лица, профессионально связанные с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП, должны проходить предварительный (при поступлении) и периодические профилактические медосмотры в соответствии с действующим законодательством.

Направление работников на прохождение обязательных медицинских осмотров осуществляется в соответствии с приказом Минздрава РФ [138]. В приказе утверждены:

перечень вредных и (или) опасных производственных факторов, при наличии которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования);

перечень работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования) работников.

На сегодняшний день требуется разработка технической составляющей (способов и устройств) для упрощения реализации организационных мероприятий в вопросах выделения зон воздействия ЭМП на человека и предупреждения о превышении ПДУ МП и ЭП.

## **Системы устройств для защиты электротехнического персонала от электромагнитных полей**

Для безопасности электротехнического персонала от вредного и опасного воздействия ЭП, МП и ЭМП под руководством д-ра техн. наук, проф. К. Б. Кузнецова (УрГУПС) разработаны системы защиты.

Это:

- способ контроля уровня напряженности МП электроустановок переменного тока и устройство для его осуществления;
- способ контроля напряженности МП по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока и устройство для его осуществления;
- устройство для контроля напряженности МП переменного и постоянного токов;
- устройство для измерения плотности потока энергии ЭМП.

## **Способ контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока и устройства для его осуществления**

Способ контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока и устройства для его осуществления (рис. 5.3) разработан для снижения заболеваемости работников железнодорожного транспорта, вызванной длительным воздействием магнитного поля 50 Гц на организм человека за счет своевременного предупреждения и информирования работников, выполняющих работы в электроустановках, о превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) магнитного поля.

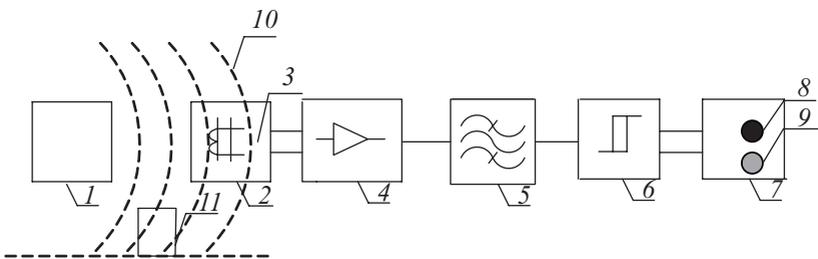


Рис. 5.3. Схема устройства контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока

Устройство [139] работает следующим образом: переменное магнитное поле  $10$  электроустановки переменного тока  $1$  воздействует на спиралевидную рамку  $3$  антенного датчика  $2$ , подключенного к блоку питания (на схеме не представлен), создает в нем переменный ток, пропорциональный величине напряженности воздействующего магнитного поля  $10$ . Полученный сигнал переменного тока поступает на вход усилителя  $4$ , имеющего входное полное сопротивление, близкое к нулю. На выходе усилителя  $4$  формируется сигнал переменного напряжения, кратный величине входящего переменного тока. Переменное напряжение с выхода усилителя  $4$  поступает на звено частотной коррекции  $5$ , учитывающее особенности частотных свойств антенного датчика  $2$  и усилителя  $4$ . После звена частотной коррекции  $5$  на вход порогового элемента  $6$  подается сигнал переменного напряжения с заданной величиной, соответствующей напряженности магнитного поля в  $100 \text{ мкТл}$  [15], при этом, если величина сигнала переменного напряжения будет ниже соответствующего ему максимального ПДУ напряженности магнитного поля в  $100 \text{ мкТл}$ , то на сигнальном устройстве  $7$  горит зеленая лампа  $8$ , при превышении максимального ПДУ напряженности магнитного поля сигнал с порогового элемента  $6$  поступает на красную лампу  $9$  сигнального устройства  $7$ .

Внешний вид индикатора магнитного поля ИМП УрГУПС-1 приведен на рис. 5.4.

ИМП УрГУПС-1 применяется для обеспечения электромагнитной безопасности на рабочих местах локомотивных бригад. Прибор устанавливают в машинном отделении электроподвижного состава с выводом сигнала о превышении нормируемого ПДУ ЭМП в кабину машиниста в виде красного или зеленого сигнала.



Рис. 5.4. Индикатор магнитного поля ИМП УрГУПС-1

## Способ контроля напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока и устройство для его осуществления

В Уральском государственном университете путей сообщения предложено устройство, позволяющее учитывать суммарное воздействие гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока в частотном диапазоне от 0 до 10 кГц и предупреждать персонал об опасном превышении уровня напряженности МП в электроустановках, осуществлять «защиту временем».

На рис. 5.5 представлена схема устройства [140] для контроля уровня напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока, включающая электроустановку переменного тока 1, антенный датчик 2 со спиралевидной рамкой 3, усилитель 4, звено частотной коррекции 5, детектор 6, процессор 7 с логическим элементом И, пороговый элемент 8 с логическим элементом ИЛИ, сигнальное устройство 9 с красной 11 и зеленой 10 лампами, индикатор 12, магнитное поле 13, объект воздействия 14.

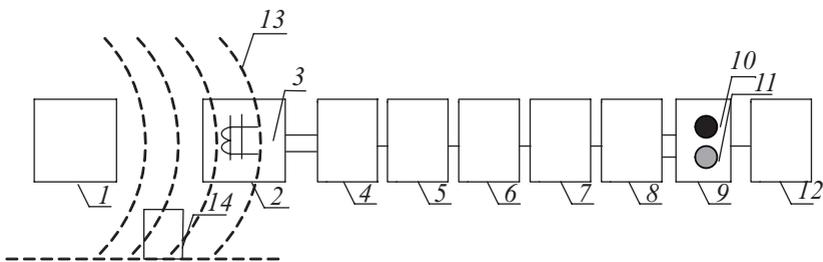


Рис. 5.5. Схема устройства для контроля уровня напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока

Предлагаемые способ и устройство работают следующим образом.

В электроустановке переменного тока  $1$  переменное магнитное поле  $13$  воздействует на спиралевидную рамку  $3$  антенного датчика  $2$ , подключенного к блоку питания (на схеме не представлен), создает в нем переменный ток, пропорциональный величине напряженности воздействующего магнитного поля  $13$ . Полученный сигнал переменного тока поступает на вход усилителя  $4$ , имеющего входное полное сопротивление, близкое к нулю. На выходе усилителя  $4$  формируется сигнал переменного напряжения, кратный величине входящего переменного тока. Переменное напряжение с выхода усилителя  $4$  поступает на звено частотной коррекции  $5$ , учитывающее особенности частотных свойств антенного датчика  $2$  и усилителя  $4$ . После звена частотной коррекции  $5$  напряжение подается на вход детектора  $6$ , который преобразует входное переменное напряжение в постоянное с величиной, равной амплитуде входного переменного напряжения. Полученный сигнал переменного напряжения, пропорциональный напряженности магнитного поля, поступает на вход процессора  $7$ , в котором значения напряженности магнитного поля по частотам перемножаются на приведенный коэффициент  $\alpha$  (в зависимости от частоты в диапазоне до  $10$  кГц, при этом приведенный коэффициент  $\alpha$  отражает степень увеличения вредного воздействия напряженности магнитного поля при увеличении частоты переменного тока экспоненциальной зависимостью и используется для приведения численных значений напряженности магнитного поля гармонических составляющих до  $10$  кГц к величине напряженности при частоте  $50$  Гц для сравнения с предельно допустимым уровнем). Затем значения напряженности последнего суммируются и сравниваются с заданной величиной,

соответствующей напряженности магнитного поля в 80 А/м. Если величина сигнала переменного напряжения будет ниже соответствующего ему максимального ПДУ напряженности магнитного поля в 80 А/м [15], то на сигнальном устройстве 9 горит зеленая лампа 10, при превышении максимального ПДУ напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока сигнал с порогового элемента 8 поступает на красную лампу 11 сигнального устройства 9; далее результат измерений индицируется на индикаторе 12.

Разработанное нами устройство применяется для обеспечения магнитной безопасности электротехнического персонала при обслуживании контактной сети, тяговых подстанций и электроподвижного состава.

## Устройство для контроля напряженности магнитных полей переменного и постоянного токов

Это устройство предназначено для непрерывного контроля напряженности магнитных полей переменного и постоянного токов и информирование персонала о превышении ПДУ [141].

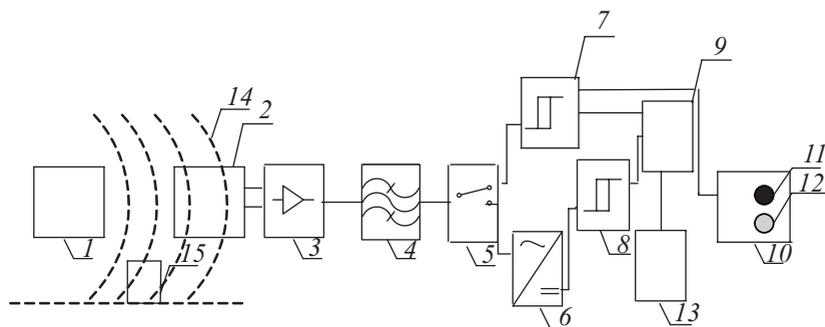


Рис. 5.6. Схема устройства для контроля напряженности магнитных полей переменного и постоянного токов

Разработанное нами устройство (рис. 5.6) работает следующим образом.

Магнитное поле *14* электроустановки переменного или постоянного тока *1* воздействует на датчик Холла *2*, подключенный к блоку внешнего питания (на схеме не представлен). При подаче на подмагничивающую катушку датчика Холла *2* импульса тока возникнет импульс напряжения, пропорциональный по величине измеряемому магнитному полю. Полученный сигнал поступает на вход усилителя сигнала *3*, имеющего входное сопротивление, близкое к нулю. На выходе усилителя сигнала *3* формируется сигнал напряжения, кратный величине входящего тока. Напряжение с выхода усилителя сигнала *3* поступает на звено частотной коррекции *4*, который выделяет частоту 50 Гц из спектра частот, считываемых с датчика *2*. После звена частотной коррекции *4* сигнал напряжения подается на двухпозиционный I и II переключатель *5*, причем выход переключателя в позиции I соединен с пороговым элементом постоянного магнитного поля *7*, а выход переключателя в позиции II соединен с амплитудным детектором *6*, выход которого соединен со входом порогового элемента переменного магнитного поля *8*, при этом оба пороговых элемента выходами подключены к сигнальному устройству *10* и к жидкокристаллическому алфавитно-цифровому дисплею *9*. Если величина сигнала напряжения превысит допустимый уровень напряженности постоянного магнитного поля в 10 мТл, то на сигнальном устройстве *10* загорится красная лампа *11*. При превышении сигнала напряжения переменного магнитного поля в 100 мкТл загорится желтая лампа *14*.

Чтобы контролировать заряженность батарей питания предлагаемого устройства, к дисплею *9* подключен элемент контроля уровня заряда *13* батарей питания (на схеме не представлен).

Предлагаемое нами устройство для контроля напряженности магнитных полей переменного и постоянного токов позволяет непрерывно измерять напряженность как постоянного, так и переменного магнитных полей и сигнализировать персоналу о превышении ПДУ напряженности магнитного поля.

Устройство, разработанное в Уральском государственном университете путей сообщения, применяется для обеспечения электромагнитной безопасности локомотивных бригад при вредном воздействии на них МП разного рода (постоянного и переменного) тока. Может применяться при выполнении работ электротехническим персоналом со съемной изолированной вышки.

## Устройство для измерения плотности потока энергии электромагнитного поля

Это устройство предназначено для измерения уровня плотности потока энергии электромагнитного поля (энергетической нагрузки) для оценки энергии излучения электромагнитного поля (рис. 5.7) [142] вблизи ЭУ.

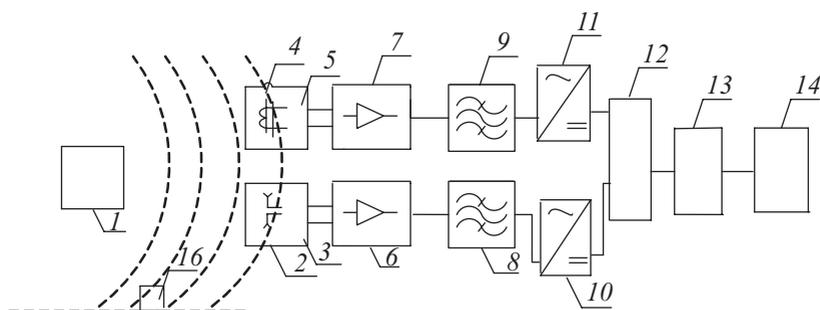


Рис. 5.7. Схема устройства для измерения плотности потока энергии электромагнитного поля

Схема устройства для измерения плотности потока энергии (энергетической нагрузки) электромагнитного поля включает электроустановку переменного тока 1, измеряемую антенну 4 магнитного поля со спиралевидной рамкой 5, измеряемую антенну 2 электрического поля с двумя плоскими проводящими пластинами 3, расположенными параллельно друг другу и разделенными слоем диэлектрика, усилитель 7 для магнитного поля и усилитель 6 для электрического поля, звено частотной коррекции 9 для магнитного поля и звено частотной коррекции 8 для электрического поля, амплитудный детектор 11 для магнитного поля и амплитудный детектор 10 для электрического поля, цифроаналоговый преобразователь 12, процессор с множительным логическим элементом И 13, жидкокристаллический алфавитно-цифровой дисплей 14, магнитные волны 15, объект их воздействия 16.

Предлагаемое устройство работает следующим образом.

Переменное электромагнитное поле 16 электроустановки переменного тока 1, воздействуя на спиралевидную рамку 5 измеряемой антенны магнитного поля 4 и на две плоские проводящие

параллельные пластины 3, разделенные слоем диэлектрика измеряемой антенны 2 электрического поля, подключенные к блоку питания (на схеме не представлен), создает переменный ток, пропорциональный величине напряженности воздействующего электромагнитного поля 16. Полученный сигнал переменного тока поступает на вход соответствующего усилителя 7 магнитного поля и усилителя 6 электрического поля, имеющие входное полное сопротивление, близкое к нулю. На выходе усилителей 6 и 7 формируется сигнал переменного напряжения, кратный величине входящего переменного тока. Переменное напряжение с выхода усилителей 6 и 7 поступает на соответствующее звено частотной коррекции 9 для магнитного поля и звено частотной коррекции 8 для электрического поля, учитывающие особенности частотных свойств измеряемой антенн 4 и 5 и усилителей 6 и 7. После звена частотной коррекции 8 и 9 сигнал переменного напряжения подается на вход соответствующего амплитудного детектора 11 для магнитного поля и амплитудного детектора 10 для электрического поля, которые преобразуют входное переменное напряжение в постоянное с величиной, равной амплитуде входного переменного напряжения.

Полученный сигнал переменного напряжения, пропорциональный напряженности электромагнитного поля, поступает на вход цифроаналогового преобразователя 12, результирующего числовые значения величин зарегистрированных сигналов электромагнитных полей, которые анализируются в процессоре 13, и с помощью множительного логического элемента И рассчитывается плотность потока энергии (энергетическая нагрузка) электромагнитного поля; результат расчетных значений индуцируется на жидкокристаллический алфавитно-цифровой дисплей 14.

Использование в предлагаемом устройстве процессора с множительным логическим элементом И позволяет определить плотность потока энергии, то есть энергетическую нагрузку электромагнитного поля.

Устройство для измерения плотности потока энергии преобразует полученные значения напряженности магнитного и электрического поля и тем самым дает возможность комплексно оценить уровень энергии излучения ЭМП.

Прибор, разработанный в Уральском государственном университете путей сообщения, используется при обслуживании электроустановок любых напряжений для оценки энергии излучения электромагнитного поля.

Все предлагаемые нами организационно-технические мероприятия направлены на сохранение жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности. При использовании вышеуказанных устройств и методов контроля электрических и магнитных полей работодатель сможет минимизировать вредное воздействие ЭП, МП и энергии излучения ЭМП на электротехнический персонал. При разработке устройств учтена специфика работы электроустановок, поэтому их можно использовать как на подвижном составе, так и при выполнении работ вблизи контактной сети и на тяговых подстанциях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью сохранения здоровья электротехнического персонала, на основе выполненных исследований в монографии решена важная научно-техническая задача охраны труда: защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия ЭМП путем реализации обоснованных предложений по нормированию и оценке напряженности ЭМП, а также разработаны технические предложения по защите персонала.

На рабочих местах персонала, обслуживающего РУ-3,3 кВ, экспериментально и теоретически получены уровни напряженности ЭМП спектра частот в диапазоне до 1 кГц, оценка действия которых на персонал требует специальной методики. В ряде случаев уровни напряженности МП частотой 50 Гц превышают нормируемые значения и требуется разработка устройств защиты персонала от его вредного влияния.

Для защиты электротехнического персонала разработаны методические рекомендации к оценке ЭМП частотой от 50 Гц до 1 кГц в производственных условиях на основе существующей практики нормирования ЭМП в России и странах Евросоюза, дающие возможность при проведении специальной оценки условий труда на рабочих местах комплексно оценить уровни напряженностей ЭП и МП от устройств тягового электроснабжения.

Для сохранения жизни и защиты здоровья персонала при воздействии ЭМП от высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока предложены следующие устройства и способы:

способ контроля уровня напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока и устройство для его осуществления;

устройство для контроля напряженности МП переменного и постоянного токов;

способ контроля уровня напряженности магнитного поля электростановок переменного тока и устройство;

устройство для измерения плотности потока энергии ЭМП.

Вышеуказанные способы и устройства позволяют измерять уровни напряженностей ЭП и МП, энергию излучения ЭМП на рабочих местах электротехнического персонала, осуществлять непрерывный контроль этих уровней и предупреждать персонал о превышении их ПДУ, позволяя минимизировать время воздействия данных производственных факторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ширшов А. Б. Средства защиты от вредного и опасного воздействия электромагнитных полей тяговой сети : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2006. 104 с. Защищена 27.09.2006.
2. Закирова А. Р. Защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия электромагнитных полей : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2013. 160 с. Защищена 23.05.2013.
3. Закиев Е. Э. Опасные электромагнитные поля на подвижном составе и в локомотивном депо электрифицированных железных дорог : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. М. : ВНИИЖТ, 2007. 175 с. Защищена 25.04.2007.
4. Nakagawa M.A. Study extremely low-frequency electric and magnetic field in car: Discussion of EMF safety limits // J. Occupat. Health. 1997. Vol. 39. Pp.18–28.
5. Pool R. Electromagnetic fields: Biological evidence // Science. 1990. Vol. 249. Pp. 1378–1381.
6. Рубцова Н. Б., Перов С. Ю., Богачева Е. В. Информационные технологии как источник неблагоприятного воздействия на человека электромагнитных полей. Классификация // Безопасность в техносфере. 2012. № 2 (март–апрель). С. 25–29. ISSN 1998-071X.
7. Пальцев Ю. П., Походзей Л. В., Рубцова Н. Б., Богачева Е. В. Проблемы гармонизации гигиенических регламентов электромагнитных полей мобильных средств радиосвязи // Гигиена и санитария (гигиена труда). 2013 № 3. С 39–42. ISSN 0016-9900.
8. Рубцова Н. Б., Марков Д. В., Шеина А. Н. Электромагнитные поля физиотерапевтического оборудования как источник потенциальной опасности для медицинского персонала // Физיותרapia, бальнеология и реабилитация. 2012. № 4. С. 48–54. ISSN 1681-3456.
9. Рубцова Н. Б., Токарский А. Ю., Лазаренко Н. В., Самусенко Т. Г. Методические принципы гигиенической оценки электромагнитных полей промышленной частоты на рабочих местах персонала электросетевых объектов и их реализация // Бюллетень ВШЦ СО РАМН. 2006. № 3 (49). С 7–12. ISSN 1811-0649.

10. Кузнецов А. Н. Биофизика электромагнитных воздействий: основы дозиметрии. М. : Энергоатомиздат, 1994. 256 с. ISBN 5-283-03113-6.
11. Шимони К. Теоретическая электротехника. М. : Мир, 1964. 775 с.
12. Закирова А. Р., Кузнецов К. Б. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник УрГУПС. 2014. № 4 (24). С. 82–89. ISSN 2079-0392.
13. СанПиН 2.2.4.3359–16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. М. : Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2016. 75 с.
14. Закирова А. Р., Кузнецов К. Б. Формирование понятия «доза воздействия электромагнитного поля низкочастотного диапазона на организм человека» // Вестник УрГУПС. 2015. № 4 (28). С. 91–98. ISSN 2079-0392.
15. Кузнецов К. Б. Применение электроэнергетических характеристик электромагнитного поля для нормирования их вредного воздействия на человека // Безопасность жизнедеятельности. 2009. Вып. 79 (162). С. 76–80.
16. Аполлонский С. М., Каляда Т. В., Синдаловский Б. Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: учеб. пособие. СПб : Политехника, 2006. 263 с. ISBN 5-7325-0854-6.
17. Рубцова Н. Б., Марков Д. В., Шейна А. Н. Электромагнитные поля физиотерапевтического оборудования как источник потенциальной опасности для медицинского оборудования // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2012. Вып. 4. С. 48–54. ISSN 1681-3456.
18. МР 2.1.10.0061–12. Оценка риска для здоровья населения при воздействии переменных электромагнитных полей (до 300 ГГц) в условиях населенных мест. М. : Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2012. 29 с.
19. Птицына Н. Г. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // УФН. 1998. Т. 168. № 7. С. 767–791.
20. Холодов Ю. А., Козлов А. Н., Горбач А. М. Магнитные поля биологических объектов. М. : Наука, 1987. 144 с.
21. Бинги В. Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. – 2-е изд. – М. : Милта, 2002. 592 с. ISBN 5-94505-033-4.

22. Barnothy J. M. Influence of a magnetic field upon the leukocytes of the mouse // *Nature*. 1956. Vol. 177. Pp. 577–578.
23. Ramirez et al E. Oviposition and development of *Drosophila* modified by magnetic fields // *Bioelectromagnetics*. 1983. Vol. 4. Pp. 315–326. ISSN 1521-186X.
24. Strand J. A., Abernethy C. S., Skalski J. R., Genoway R. G. Effects of magnetic field exposure on fertilization success in rainbow trout *Salmo gairdneri* // *Bioelectromagnetics*. 1983. Vol. 4. Pp. 295–301. ISSN 1521-186X.
25. Cremer-Bartels G., Krause K., Mitoskas G., Brodersen D. Magnetic field of the Earth as additional zeitgeber for endogenous rhythms // *Naturwissenschaften*. 1984. Vol. 71. Pp. 567–574.
26. Persson B. R., Stahlberg F. Health and safety of clinical NMR examinations // Boca Raton : CRC Press. 1989.
27. Kato R. Effects of a magnetic field on the growth of primary roots of *Zea mays* // *Plant Cell Physiol*. 1988. Vol. 29. № 7. Pp. 1215–1219.
28. Kato R., Kamada H., Asashima M. Effects of high and very low magnetic fields on the growth of hairy roots of *Daucus carota* and *Atropa belladonna* // *Plant Cell Physiol*. 1989. Vol. 30. № 4. Pp. 605–608.
29. Semm P., Beason R. C. Responses to small magnetic variations by the trigeminal system of the bobolink // *Brain Res. Bull*. 1990. Vol. 25. № 5. Pp. 735–740.
30. Luben, R. A. Effects of low-energy electromagnetic fields (pulsed and DC) on membrane signal transduction processes in biological systems // *Health Phys*. 1991. July. Vol. 61. № 1. Pp. 15–28.
31. Ho M.-W., Stone T. A., Jerman I. et al. Brief exposures to weak static magnetic field during early embryogenesis cause cuticular pattern abnormalities in *Drosophila* larvae // *Phys. Med. Biol*. 1992. Vol. 37. № 5. Pp. 1171–1179.
32. Ružič R., Jerman I., Jeglič A., Fefer D. Electromagnetic stimulation of buds of *Castanea sativa*, Mill. in tissue culture // *Electro Magnetobiol*. 1992. Vol. 11. № 2. Pp. 145–153.
33. Malko J. A., Constantinidis I., Dillehay D., Fajman W. A. Search for influence of 1.5 Tesla magnetic field on growth of yeast cells // *Bioelectromagnetics*. 1994. Vol. 15. Pp. 495–501. ISSN 1521-186X.
34. Никольская К. А., Штемлер В. М., Савоненко А. В. и др. Слабые магнитные поля и познавательная деятельность // *Биофизика*. 1996. Т. 41, № 4. С. 887–893. ISSN 0006-3029.

35. Shiga T., Okazaki M., Maeda N., Seiyama A. Effects of static magnetic fields on erythrocyte rheology // Ed. by S. Ueno. New York 10013: Plenum, 1996. Pp. 11–16.
36. Espinar A., Piera V., Carmona A., Guerrero J.M. Histological changes during development of the cerebellum in the chick embryo exposed to a static magnetic field // *Bioelectromagnetics*. 1997. Vol. 18. Pp. 36–46.
37. Berk S. G., Srikanth S., Mahajan S. M., Ventrice C. A. Static uniform magnetic fields and amoebae // *Bioelectromagnetics*. 1997. Vol. 18. Pp. 81–84. ISSN 1521-186X.
38. Markov M.S., Muehsam D.S., Pilla A.A. A possible model for the static  $\mu\text{T}$ -level magnetic field modulation of calcium binding to calmodulin in cellfree myosin phosphorylation // *BEMS*. – Frederick MD: W/L Associates. 1998. June 7–11. Pp. 143–144.
39. Kavaliers M., Ossenkopp K. P. Magnetic field inhibition of morphine-induced analgesia and behavioral activity in mice: Evidence for involvement of calcium ions // *Brain Res*. 1986. Vol. 379. Pp. 30–38.
40. Semm P., Beason R.C. Responses to small magnetic variations by the trigeminal system of the bobolink // *Brain Res. Bull*. 1990. Vol. 25, № 5. Pp. 735–740.
41. Музалевская Н. И., Урицкий В. М. Противоопухолевое действие слабого сверхнизкочастотного стохастического магнитного поля со спектром  $1/f$  // *Биофизика*. 1997. Т. 42. № 4. С. 961–970. ISSN 0006-3029.
42. Delgado J. M., Leal J., Monteagudo J. L., Garcia M. J. Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields // *J. Anat*. 1982. Vol. 134. Pp. 553–561.
43. Goodman R., Bassett C., Henderson A. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription // *Science*. 1983. Vol. 220. Pp. 1283–1285.
44. Akimine T., Muramatsu H., Hamada H., Sakou T. Effects of pulsed electromagnetic field on growth and differentiation of embryonal carcinoma cells // *J. Cell. Physiol*. 1985. Vol. 124. Pp. 247–254.
45. Кузнецов А. Н., Кшуташили Т. Ш., Колоколов А. С., Лазарев А. В. Квазирезонансные зависимости аритмогенного действия низкочастотного магнитного поля на сократительную активность миокарда // *Известия АН СССР. Серия биологическая*. 1990. № 2. С. 178–183. ISSN 0002-3434.
46. Whitson G. L., Carrier W. L., Francis A. A. et al. Effects of extremely-low-frequency (ELF) electric fields on cell growth and NA repair

- in human skin fibroblasts // *Cell Tissue Kinet.* 1986. Vol. 19. № 1. Pp. 39–47.
47. Saali K., Juutilainen J., Lahtinen T. Effects of low frequency magnetic fields on chick embryos and embrional chick tibia // *New York and London : Plenum.* 1986.
  48. Takahashi K., Kaneko I., Date M., Fukada E. Effect of pulsing electromagnetic fields on DNA synthesis in mammalian cells in culture // *Experientia.* 1986. Vol. 42. Pp. 185–186.
  49. Smith S.D., McLeod B.R., Libo A.R., Cooksey K. Calcium cyclotron resonance and diatom mobility // *Bioelectromagnetics.* 1987. Vol. 8. Pp. 215–227. ISSN 1521-186X.
  50. Lyle D.B., Ayotte R. D., Sheppard A. R., Adey W. R. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to 60 Hz sinusoidal electric fields // *Bioelectromagnetics.* 1988. Vol. 9. № 3. Pp. 303–313.
  51. Fitzsimmons R. J., Farley J. R., Adey W. R., Baylink D. J. Frequency dependence of increased cell proliferation, in vitro, in exposure to a low-amplitude, low-frequency electric field: Evidence for dependence on increased mitogen activity released into culture medium // *J. Cell. Physiol.* 1989. Vol. 139. № 3. Pp. 586–591.
  52. Ross S. M. Combined DC and ELF magnetic fields can alter cell proliferation // *Bioelectromagnetics.* 1990. Vol. 11. Pp. 27–36.
  53. Ed. by Wilson B. Stevens Anderson R., Extremely L. *Low Frequency Electromagnetic Fields: The Question of Cancer* // Columbus OH: Battelle Press. 1990.
  54. Lyle D. B., Wang X., Ayotte R. D. et al. Calcium uptake by leukemic and normal Tlymphocytes exposed to low frequency magnetic fields // *Bioelectromagnetics.* 1991. Vol. 12. Pp. 145–156. ISSN 1521-186X.
  55. Reese J.A., Fraizer M. E., Morris J. E. et al. Evaluation of changes in diatom mobility after exposure to 16-Hz electromagnetic fields // *Bioelectromagnetics.* 1991. Vol. 12. Pp. 21–25. ISSN 1521-186X.
  56. Агаджанян Н.А., Власова И. Г. Влияние инфранизкочастотного магнитного поля на ритмику нервных клеток и их устойчивость к гипоксии // *Биофизика.* 1992. Т. 37. № 4. С. 681–689. ISSN 0006-3029.
  57. Мартынюк В.С. К вопросу о синхронизирующем действии магнитных полей инфранизких частот на биологические системы // *Биофизика.* 1992. Т. 37. № 4. С. 669–673. ISSN 0006-3029.

58. Сидякин В. Г. Влияние флуктуаций солнечной активности на биологические системы // Биофизика. 1992. Т. 37. № 4. С. 647–652. ISSN 0006–3029.
59. Темуриянц Н. А., Макеев В. Б., Малыгина В. И. Влияние слабых переменных магнитных полей крайне низких частот на инфрадианную ритмику симпатоадреналовой системы крыс // Биофизика. 1992. Т. 37. № 4. С. 653–655. ISSN 0006–3029.
60. Walleczek J., Budinger T. F. Pulsed magnetic field effects on calcium signaling in lymphocytes: dependence on cell status and field intensity // FEBS Lett. 1992. December. Vol. 314. № 3. Pp. 351–355.
61. Coulton L. A., Barker A. T. Magnetic fields and intercellular calcium: Effects on lymphocytes exposed to conditions for cyclotron resonance // Phys. Med. Biol. 1993. Vol. 38. Pp. 347–360.
62. Blackman C. F., Benane S. G., House D. E. Evidence for direct effect of magnetic fields on neurite outgrowth // FASEB J. 1993. Vol. 7. Pp. 801–806.
63. Alipov Ye. D., Belyaev I. Ya., Aizenberg O. A. Systemic reaction of *Escherichia coli* cells to weak electromagnetic fields of extremely low frequency // Bioelectroch. Bioener. 1994. Vol. 34. Pp. 5–12.
64. Kato M., Honma K., Shigemitsu T., Shiga Y. Recovery of nocturnal melatonin concentration takes place within one week following cessation of 50 Hz circularly polarized magnetic field exposure for six weeks // Bioelectromagnetics. 1994. Vol. 15. Pp. 489–492. ISSN 1521-186X.
65. Новиков В. В., Жадин М. Н. Комбинированное действие слабых постоянного и переменного низкочастотных полей на ионные токи в водных растворах аминокислот // Биофизика. 1994. Т. 39. № 1. С. 45–49. ISSN 0006–3029.
66. Новиков В. В. Иницирующее действие слабых магнитных полей на образование межмолекулярных связей в водных растворах аминокислот // Биофизика. 1994. Т. 39. № 5. С. 825–830. ISSN 0006–3029.
67. Dutta S. K., Verma M., Blackman C. F. Frequencydependent alterations in enolase activity in *Escherichia coli* caused by exposure to electric and magnetic fields // Bioelectromagnetics. 1994. Vol. 15. Pp. 377–383.
68. Fitzsimmons R. J., Ryaby J. T., Mohan S. et al. Combined magnetic fields increase insulinlike growth factor-II in TE-85 human osteosarcoma bone cell cultures // Endocrinology. 1995. Vol. 136. № 7. Pp. 3100–3106.

69. Prato F.S., Carson J.L., Ossenkopp K.P., Kavaliers M. Possible mechanism by which extremely low frequency magnetic fields affect opioid function // *FASEB J.* 1995. Vol. 9. Pp. 807–814.
70. Smith S.D., McLeod B.R. Testing the ion cyclotron resonance theory of electromagnetic field interaction with odd and even harmonic tuning for cations // *Bioelectroch. Bioener.* 1995. Vol. 38. Pp. 161–167.
71. Tofani S., Ferrara A., Anglesio L., Gilli G. Evidence for genotoxic effects of resonant ELF magnetic fields // *Bioelectroch. Bioener.* 1995. Vol. 36. Pp. 9–13.
72. Blank M., Soo L. The threshold for Na, K-ATPase stimulation by electromagnetic fields // *Bioelectroch. Bioener.* 1996. Vol. 40. Pp. 63–65.
73. Kato M., Shigemitsu T. Effects of exposure to 50 Hz magnetic field of melatonin in rats // Ed. by S. Ueno. – New York: Kluwer/Plenum. 1996.
74. Новиков В. В. Кооперативный эффект резонансного усиления ионного тока в водных растворах аминокислот при действии слабых электромагнитных полей // *Биофизика.* 1996. Т. 41. № 5. С. 973–978. ISSN 0006-3029.
75. Alipov Ye. D., Belyaev I. Ya. Difference in frequency spectrum of extremely low frequency effects on the genom's conformational state of AB1157 and EMG2 e.coli cells // *Bioelectromagnetics.* 1996. Vol. 17. Pp. 384–387.
76. Nazar A. S., Paul A., Dutta S. K. Frequency-dependent alteration of enolase activity by elf fields // *Bioelectroch. Bioener.* 1996. Vol. 39. Pp. 259–262.
77. West R.W., Hinson W.G., Swicord M.L. Anchorage independent growth with JB6 cells exposed to 60 Hz magnetic fields at several flux densities // *Bioelectroch. Bioener.* 1996. Vol. 39. Pp. 175–179.
78. Akerstedt T., Arnetz B., Ficca G. et al. A 50-Hz electromagnetic field impairs sleep // *J. Sleep Res.* 1999. Vol. 8. Pp. 77–81.
79. Harland J.D., Liburdy R.P. Environmental magnetic fields inhibit the antiproliferative action of tamoxifen and melatonin in a human breast cancer cell line // *Bioelectromagnetics.* 1997. Vol. 18. № 8. Pp. 555–562. ISSN 1521-186X.
80. Reinbold K. A., Pollack S. R. Serum plays a critical role in modulating  $[Ca^{2+}]_c$  of primary culture bone cells exposed to weak ion-resonance magnetic fields // *Bioelectromagnetics.* 1997. Vol. 18. Pp. 203–214. ISSN 1521-186X.

81. Litovitz T.A., Penafiel M., Krause D. et al. The role of temporal sensing in bioelectromagnetic effects // *Bioelectromagnetics*. 1997. Vol. 18. Pp. 388–395.
82. Katsir G., Baram S.C., Parola A.H. Effect of sinusoidal magnetic fields on cell proliferation and adenosine deaminase specific activity // *Bioelectromagnetics*. 1998. Vol. 19. № 1. Pp. 46–52. ISSN 1521-186X.
83. Ruzic R., Jerman I. Influence of Ca<sup>2+</sup> in biological effects of direct and indirect ELF magnetic field stimulation // *Electro Magnetobiol*. 1998. Vol. 17, № 2. Pp. 205–216.
84. Ružič, R., Jerman I., Gogala N. Water stress reveals effects of ELF magnetic fields on the growth of seedlings // *Electro Magnetobiol*. 1998. Vol. 17. № 1. Pp. 17–30.
85. Sastre A., Cook M.R., Graham C. Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm // *Bioelectromagnetics*. 1998. Vol. 19. № 2. Pp. 98–106. ISSN 1521-186X.
86. Galvanovskis J., Sandblom J., Bergqvist B. et al. Cytoplasmic Ca<sup>2+</sup> oscillations in human leukemia T-cells are reduced by 50 Hz magnetic fields // *Bioelectromagnetics*. 1999. Vol. 20. Pp. 269–276. ISSN 1521-186X.
87. Lai H., Carino M. 60 Hz magnetic fields and central cholinergic activity: Effects of exposure intensity and duration // *Bioelectromagnetics*. 1999. Vol. 20. Pp. 284–289. ISSN 1521-186X.
88. Ramundo-Orlando A., Morbiducci U., Mossa G., D’Inzeo G. Elect of low frequency, low amplitude magnetic fields on the permeability of cationic liposomes entrapping carbonic anhydrase // *Bioelectromagnetics*. 2000. Vol. 21. Pp. 491–498. ISSN 1521-186X.
89. Blackman C.F., Benane S.G., House D.E. The influence of 1.2 μT, 60 Hz magnetic fields on melatonin and tamoxifen induced inhibition of MCF-7 cell growth // *Bioelectromagnetics*. 2001. Vol. 22. № 2. Pp. 122–128.
90. Sontag W. Action of extremely-low-frequency electric fields on the cytosolic calcium concentration of differentiated HL-60 cells: Nonactivated cells // *Bioelectromagnetics*. 1998. Vol. 19. № 1. Pp. 32–40. ISSN 1521-186X.
91. Mir L.M., Orłowski S., Belehradek J. Jr. et al. Biomedical applications of electric pulses with special emphasis on antitumor electrochemotherapy // *Bioelectroch. Bioener*. 1995. Vol. 38. Pp. 203–207.

92. Bawin S. M., Adey W. R. Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency // *P. Natl. Acad. Sci. USA*. 1976. Vol. 73. № 6. Pp. 1999–2003.
93. Liburdy R. P. Calcium signaling in lymphocytes and ELF fields // *FEBS Lett.* 1992. April. Vol. 301. № 1. Pp. 53–59.
94. Cho M. R., Thatte H. S., Lee R. C., Golan D. E. Reorganization of microfilament structure induced by ac electric fields // *FASEB J.* 1996. Vol. 10. Pp. 1552–1558.
95. Huang R., Peng L., Hertz L. Effects of low-voltage static electric field on energy metabolism in astrocytes // *Bioelectromagnetics*. 1997. Vol. 18. Pp. 77–80. ISSN 1521-186X.
96. Tang Q., Chen G., Zhao N. Effects of ELF electric field on proliferation of mouse osteoblastic cells // *Bioelectroch. Bioener.* 1998. Vol. 47. № 2. Pp. 349–353.
97. Blackman C. F., Benane S. G., Elliott D. J. et al. Influence of electromagnetic fields on the eflux of calcium ions from brain tissue in vitro: A three-model analysis consistent with the frequency response up to 5–10 Hz // *Bioelectromagnetics*. 1988. Vol. 9. Pp. 215–227. ISSN 1521-186X.
98. Blackman C. F., Benane S. G., House D. E., Elliott D. J. Importance of alignment between local DC magnetic field and an oscillating magnetic field in responses of brain tissue in vitro and in vivo // *Bioelectromagnetics*. 1990. Vol. 11. Pp. 159–167. ISSN 1521-186X.
99. Blank M., Soo L. Ion activation of the Na, K-ATPase in alternating currents // *Bioelectroch. Bioener.* 1990. Vol. 24. Pp. 51–61.
100. Liboff A. R., Parkinson W. C. Search for ioncyclotron resonance in an Na<sup>+</sup>-transport system // *Bioelectromagnetics*. 1991. Vol. 12. Pp. 77–83. ISSN 1521-186X.
101. Дерюгина О. Н., Писаченко Т. М., Жадин М. Н. Комбинированное действие переменного и постоянного магнитных полей на поведение крыс в «открытом поле» // *Биофизика*. 1996. Т. 41. № 3. С. 762–764. ISSN 0006-3029.
102. Blank M., Soo L. Frequency dependence of cytochrome oxidase activity in magnetic fields // *Bioelectroch. Bioener.* 1998. Vol. 46. Pp. 139–143.
103. Serspersu E. H., Tsong T. Y. Stimulation of a ouabain-sensitive Rb<sup>+</sup> uptake in human erythrocytes with an electric field // *J. Membrane Biol.* 1983. Vol. 74. Pp. 191–201.

104. Liboff A. R., Williams (Jr) T., Strong D. M., Wistar (Jr) R. Time varying magnetic fields: Effect on DNA synthesis // *Science*. 1984. Vol. 223. № 4638. Pp. 818–820.
105. Ruhenstroth Bauer G., Hoffmann G., Vogl S. et al. Artificial simulation of naturally occurring, biologically active atmospheric // *Electro Magnetobiol*. 1994. Vol. 13. № 1. Pp. 85–92.
106. Леднев В. В., Сребницкая Л. К., Ильясова Е. Н. и др. Слабое комбинированное магнитное поле, настроенное на параметрический резонанс ядерных спинов атомов водорода, увеличивает пролиферативную активность необластов в регенерирующих планариях *Dugesia tigrina* // *Доклады Академии наук*. 1996. Т. 348. № 6. С. 830–833. ISSN 0869-5652.
107. Blank M., Soo L. Frequency dependence of cytochrome oxidase activity in magnetic fields // *Bioelectroch. Bioener*. 1998. Vol. 46. Pp. 139–143.
108. Sontag W. Modulation of cytokine production by interferential current in differentiated HL-60 cells // *Bioelectromagnetics*. 2000. Vol. 21. № 3. Pp. 238–244. ISSN 1521-186X.
109. Тирас Х. П., Петрова О. Н., Мякишева С. Н., Асланиди К. Б. Биологические эффекты слабых магнитных полей: сравнительный анализ // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12 (Ч. 7). С. 1442–1451. ISSN 1812-7339.
110. Тирас Х. П., Петрова О. Н., Мякишева С. Н., Попова С. С., Асланиди К. Б. Влияние слабых магнитных полей в разные фазы регенерации планарии // *Биофизика*. 2015. Т. 60. № 1. С. 158–163. ISSN 0006-3029.
111. Тирас Х. П., Скавуляк А. Н., Асланиди К. Б., Иваницкий Г. Р. Почему эффекты от воздействия слабых комбинированных магнитных полей на биосистемы не всегда воспроизводимы? // *ДАН*. 2012. Т. 443. № 6. С. 1–3. ISSN 0869-5652.
112. Juutilainen I. Development effects of electromagnetic fields // *Bioelectromagnetics*. 2005. Suppl. 7. Pp. 107–115. ISSN 1521-186X.
113. Levin M. Bioelectromagnetics in Morphogenesis // *Bioelectromagnetics*. 2003. Voll. 24. Pp. 295–315. ISSN 1521-186X.
114. Jenrov K. A., Shmth C. H., Liboff A. R. Weak extremely-low-frequency magnetic fieldinduced regeneration anomalies in the planarian *Dugesia tigrina* // *Bioelectromagnetics*. 1996. Vol. 17. Pp. 467–474. ISSN 1521-186X.
115. Jenrow K. A., Smith C. H., Liboff A. R. Weak extremely-low-frequency magnetic fields and regeneration in the planarian *Dugesia*

- tigrina // Bioelectromagnetics. 1995. Vol. 16. Pp. 106–112. ISSN 1521-186X.
116. Picazo M.L., Vallejo D., Bardasano J.L. An introduction to the study of ELF magnetic field effects on white blood cells in mice // Electro Magnetobiol. 1994. Vol. 13. № 1. Pp. 77–84.
  117. Taoka S., Padmakumar R., Grissom C.B., Banerjee R. Magnetic field effects on coenzyme B12-dependent enzymes: Validation of ethanolamine ammonia lyase results and extension to human methylmalonyl CoA mutase // Bioelectromagnetics. 1997. Vol. 18. Pp. 506–513. ISSN 1521-186X.
  118. Phillips J.L., Winters W.D., Rutledge L. In vitro exposure to electromagnetic fields: Changes in tumor cell properties // Int. J. Radiat. Biol. 1986. Vol. 49. P. 463.
  119. Stern S., Laties V.G. 60 Hz electric fields and incandescent light as aversive stimuli controlling the behavior of rats responding under concurrent schedules of reinforcement // Bioelectromagnetics. 1998. Vol. 19. № 4. Pp. 210–221. ISSN 1521-186X.
  120. Приемопередающее устройство : пат. 2589497 Рос. Федерации.
  121. Ландсберг Г.С. Электричество и магнетизм : учеб. М. : Наука, 1985. Т. 2. 479 с.
  122. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. для вузов. 2-е изд. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с. ISBN 5-238-00573-3.
  123. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями : учеб. М. : Изд-во иностранной литературы, 1956. 664 с.
  124. Плиева А.М., Темеркеева Я.М. Влияние низкочастотных магнитных полей на регенерацию / Збірник центру наукових публікацій «Велес» за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції «IV осінні наукові читання». Київ : Центр наукових публікацій, 2015. С. 40–42.
  125. Хохлов Ю.И. Энергосберегающие технологии преобразования электрической энергии // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 2. С. 90. ISSN 1812-7320.
  126. Хохлов Ю.И., Гизатуллин Д.В., Осипов А.Г. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. : Энергетика. 2008. № 11 (111). С. 32–38. ISSN 2409-1057.

127. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. Higher Harmonic Components of Rectifiers Magnetic Fields and their Adverse Health Effects // *Procedia Engineering*. 2015. № 129. Pp. 415–419. ISSN 1877-7058.
128. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. Assessment of Harmful Health Effects of AC Rectifier Converters Harmonic Components // *Procedia Engineering*. 2015. № 129. Pp. 420–426. ISSN 1877-7058.
129. Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. М. : Транспорт. 1979. 264 с.
130. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : Из-во УрГУПС, 2012. 207 с. ISBN 978-5-94614-235-9.
131. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи : учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1999. 464 с.
132. Четвергов В. А., Маслов Г. П., Поздняков О. И., Шалимов М. Г., Опытнo-конструкторская разработка, исследование и эксплуатационное освоение двенадцатипульсовых выпрямителей тяговых подстанций : ОМГУПС. Отчет № 960. 1980. 149 с.
133. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость: учебник для вузов железнодорожного транспорта. М. : УМК МПС, 2002. 638 с. ISBN 5-89035-065-X.
134. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта : учеб. для вузов. М. : Интекс, 2008. 480 с. ISBN 978-5-89277-086-6.
135. Directive 2004/40/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents, official Journal of the Europe Union. Pp. 1–25.
136. ГОСТ Р 54148–2010 (ЕН 50366:2003) Воздействие на человека электромагнитных полей от бытовых и аналогичных электрических бытовых приборов. М. : Стандартинформ, 2011. 31 с.
137. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 019/2011 О безопасности средств индивидуальной защиты. М. : Таможенный союз, 2011. 370 с.
138. Приказ Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 № 302н «Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских

осмотров (обследований) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда». М. : Минюст России, 2011. 21 с.

139. Приемопередающее устройство : пат. 2436111 Рос. Федерации.
140. Приемопередающее устройство : пат. 2457500 Рос. Федерации.
141. Приемопередающее устройство : пат. 2572294 Рос. Федерации.
142. Приемопередающее устройство : пат. 2441248 Рос. Федерации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СОГЛАСОВАНО:  
Ректор ФГБОУ ВПО «УрГУПС»



УТВЕРЖДАЮ:  
Ректор ФГБОУ ВПО ИнГГУ



ПРОГРАММА

ПРОВЕДЕНИЯ СОВМЕСТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Проректор по научной работе и  
международным связям «УрГУПС»  
С.В. Бушуев

«    » \_\_\_\_\_  
*(Signature)*

Проректор по научной работе  
ИнГГУ  
З.Х. Султыгова

«    » \_\_\_\_\_  
*(Signature)*

Зав. кафедрой (НОЦ)  
«Техносферная безопасность»  
«УрГУПС»  
И.И. Гаврилин

« 1 » \_\_\_\_\_  
20.05.14

Зав. каф. «Биологии»

М.К. Дакиева *(Signature)*

«    » \_\_\_\_\_

Екатеринбург 2014, Магас, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие положения

Цель испытаний

Объект испытаний

Отбор и подготовка биологических объектов к эксперименту

Порядок проведения процедур на биологических объектах

Требования к экспериментатору и вспомогательному персоналу

Ответственность и контроль выполнения «Правил поведениям экспериментальных исследований и испытаний на биологических объектах»

Приборы и устройства для проведения испытаний

Методика проведения испытаний

Обработка результатов измерений и оформление

Ссылочные документы

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящая программа устанавливает порядок и методы проведения экспериментальных исследований воздействия электромагнитного поля (ЭМП) в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты (планарии) и растения в зависимости от частоты и времени воздействия данного фактора.

В настоящее время в России и в мировой практике отсутствует принцип нормирования ЭМП частотой до 1кГц [1, 2] как при аддитивном воздействии электрического поля (ЭП) и магнитного поля (МП) на человека, так и раздельном в зависимости от частоты и времени воздействия.

Анализ нормирования ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц в разных странах показывает, что аддитивное воздействие двух факторов (ЭП и МП) не рассматривалось [2]. В этом и заключается пробел в принципе нормирования ЭМП, так как переменные электрические и магнитные поля не могут существовать по отдельности: изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое порождает магнитное [3].

Существует потребность в проведении экспериментальных исследований на биологических объектах с целью определения вредных и опасных уровней напряженности ЭП и МП в зависимости от частоты и времени воздействия.

1.2. Программу для проведения экспериментальных исследований воздействия ЭМП на биологические объекты (червей) разработали:

А. Р. Закирова, канд. техн. наук, сотрудник ФГБОУ ВПО УрГУПС;

А. М. Плиева, д-р биолог. наук, сотрудник ФГБОУ ВПО ИнГГУ.

1.3. Сотрудник ФГБОУ ВПО УрГУПС предоставляет сотрудникам ФГБОУ ВПО ИнГГУ методику воздействия ЭП и МП на живые объекты и растения в частотном диапазоне до 1кГц.

1.4. Испытания на живых объектах и экстраполяцию результатов с животных на человека проводят сотрудники ФГБОУ ВПО ИнГГУ (Россия, г. Назрань).

1.5. Метод постановки опыта позволит изучить биологическое действие ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц на планарии или растения в зависимости от частоты и времени воздействия данного фактора [4]. Планарии (семена растений) будут помещаться ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц. Ежедневно будет проводиться наблюдение за ростом их после декапитации в зависимости

от частотного диапазона ЭМП согласно методике, разработанной Х. П. Тирас [4].

1.6. Продолжительность проведения испытаний – 3 года.

## **2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ**

Целью испытаний являются:

2.1. Экспериментальное изучение биологического действия ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты и растения в зависимости от частоты и времени воздействия данного фактора.

2.2. Определение порога вредного действия ЭМП на биологические объекты в зависимости от частоты и времени воздействия данного фактора.

2.3. Экстраполяция результатов с животных (растений) на человека.

Основной целью эксперимента является проведение исследований биологического действия ЭМП в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты и растения для решения вопросов фундаментальной биологии и создания безопасных условий труда для электротехнического персонала, подвергающего данному фактору.

## **3. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ**

3.1 Объектом испытаний является состояние здоровья биологических объектов (планарий), деление клеток растений.

## **4. ОТБОР И ПОДГОТОВКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И РАСТЕНИЙ К ЭКСПЕРИМЕНТУ**

4.1. Для проведения экспериментов в лабораторных условиях отобраны здоровые биологические объекты (планарии) одного возраста и с одинаковой массой тела. Для уменьшения статистического разброса экспериментальных данных используются биологические объекты чистых линий, свободных от патогенной микрофлоры.

4.2. В период подготовки к эксперименту и после него биологические объекты содержатся в стандартных лабораторных условиях и получают питание в соответствии с установленными нормами [4].

4.3. Перед проведением экспериментов биологические объекты (планарии) в течение двух недель проходят обследование. Данное

обследование включает общую оценку состояния животных, прибавку веса тела.

4.4. В период подготовки к эксперименту и после него для проведения экспериментов в лабораторных или полевых условиях семена растений всех групп должны иметь один размер и находиться в одинаковых условиях хранения (температура, освещение).

## **5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕДУР НА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ**

5.1. Все процедуры на биологических объектах проводятся строго в соответствии с требованиями, изложенными в «Правилах проведения работ с использованием экспериментальных животных» [5, 6].

## **6. ТРЕБОВАНИЯ К ЭКСПЕРИМЕНТАТОРАМ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОМУ ПЕРСОНАЛУ**

6.1. Экспериментальную работу с биологическими объектами ведут лица, допущенные к этой работе с разрешения руководства ФГБОУ ИнГГУ, имеющего лицензию на проведение исследовательских работ с использованием животных. Лица, допущенные к экспериментальной работе с биологическими объектами и ознакомленные с настоящими правилами, несут ответственность за соблюдение правил содержания и использования биологических объектов.

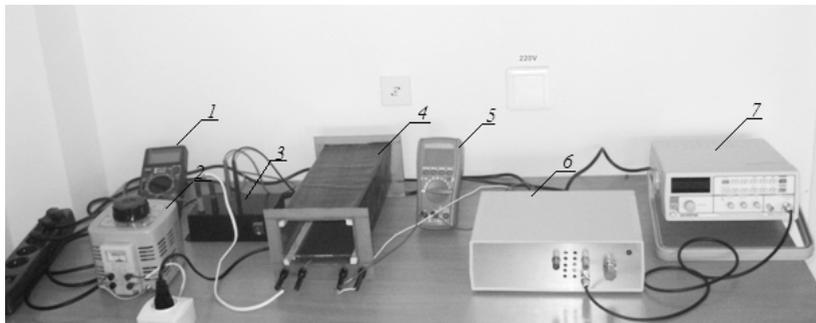
## **7. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ И КОНТРОЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ «ПРАВИЛ ПОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ»**

7.1. Ответственность за нарушение «Правил проведения экспериментальных исследований и испытаний на биологических объектах» несут (в соответствии с действующим законодательством РФ) руководители учреждений, заведующие лабораториями и ответственные исполнители эксперимента.

7.2. За подготовку экспериментатора к работе с биологическими объектами и за соблюдение правил их использования в целом отвечают заведующий лабораторией и ответственный исполнитель.

## 8. ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

8.1. Для создания ЭМП применяется лабораторная установка, представленная на рис. 1.



*Рис. 1. Устройство для создания переменного магнитного и электрического полей*

1 – вольтметр переменного напряжения; 2 – автотрансформатор; 3 – высоковольтный источник переменного напряжения; 4 – соленоид со встроенными металлическими пластинами; 5 – амперметр переменного тока; 6 – реостат регулировки тока (встроен в усилитель); 7 – генератор низкочастотный

В ходе экспериментов проверяется, какое воздействие оказывает электромагнитное поле в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты (планарии) и растения.

Для получения изображений планарий применяется бинокулярный микроскоп, оснащенный цифровой видеокамерой AxioCam MRc. Оцифрованные изображения регенерирующих планарий обрабатываются в программе Piana 5.0 [7–9]. Полученные значения длин и площадей проекции бластемы и регенерирующего фрагмента обрабатываются в программе Microsoft Office Excel 2010.

## 9. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

9.1 Проведение испытаний на биологических объектах начинается с подготовительного (уравнительного) периода; длительность – не менее двух недель. В течение этого периода биологические объекты всех групп должны быть здоровыми и находиться в одинаковых

условиях содержания и кормления. В учетный (опытный) период вводят весь комплекс изучаемых факторов и контрольных измерений, предусмотренных методикой опыта. В заключительный период все биологические объекты вновь должны находиться в однотипных условиях содержания и кормления.

9.2. Проведение испытаний на растениях начинается с подготовительного (уравнительного) периода, длительность – не менее двух недель. В течение этого периода семена растений всех групп должны находиться в одинаковых условиях хранения (температура, освещение). В учетный (опытный) период вводят весь комплекс изучаемых факторов и контрольных измерений, предусмотренный методикой опыта. В заключительный период все семена растений вновь должны находиться в однотипных условиях хранения.

Экспериментальные исследования воздействия ЭМП на живые объекты включают три этапа.

1. Оценка состояния здоровья биологических объектов (планарий) и растений от воздействия магнитного поля переменного тока в зависимости от времени воздействия данного фактора (1, 2, 4 и 8 ч) и частоты (до 1кГц). Продолжительность эксперимента на биологических объектах (червях) – 1 месяц, на растениях – 1 год.

Принцип воздействия МП в течение недели (с понедельника по пятницу) на биологические объекты и растения представлен в таблице П1.1.

*Таблица П1.1*

Принцип воздействия МП на биологические объекты и растения (время воздействия – 8 ч, с 9.00 до 13.00 с 14.00 до 18.00)\*

Частота, Гц	Н, А/м	Оценка состояния здоровья
25	~80	Еженедельный отчет
50	~80	
60	~80	
100	~80	
500	~80	
650	~80	

\* При обнаружении изменений исследуемых параметров у биологических объектах и растений нужно сократить время воздействия до 4 часов, при необходимости – до 1 часа.

2. Оценка состояния здоровья биологических объектов (червей) под воздействием электрического поля переменного тока в зависимости от времени воздействия данного фактора (1, 2, 4 и 8 ч) и частоты (до 1 кГц).

Продолжительность эксперимента на биологических объектах (планариях) – 1 месяц. Принцип воздействия ЭП в течение недели (с понедельника по пятницу) на биологические объекты представлен в таблице П1.2.

*Таблица П1.2*

Принцип воздействия ЭП на биологические объекты

Частота, Гц	Время воздействия, ч*	Е, кВ/м	Изменение контролируемых параметров
50	8	5	
	4		

\*При обнаружении изменений исследуемых параметров у биологических объектах и растений время воздействия сокращают до 4 часов, при необходимости – до 1 часа.

3. Оценка состояния здоровья биологических объектов (планарий) от воздействия электромагнитного поля в зависимости от времени воздействия данного фактора (4, 8 ч) и частоты (до 1 кГц).

Продолжительность эксперимента на биологических объектах (планариях) – 1 месяц. Принцип воздействия ЭМП в течение недели (с понедельника по пятницу) на биологические объекты представлен в таблице П1.3.

*Таблица П1.3*

Принцип воздействия ЭМП на биологические объекты

Частота, Гц	Время воздействия, ч*	Н, А/м	Е, кВ/м	Изменение контролируемых параметров
50	8 (с 9.00 до 13.00, с 14.00 до 18.00)	~80	5	Еженедельный отчет
	4	~80	5	

\*При обнаружении изменений исследуемых параметров у биологических объектах и растений время воздействия сокращается до 4 часов, при необходимости – до 1 часа.

Схема проведения опыта по методу латинского квадрата [7] приведена в таблице П1.4.

Таблица П1.4

Схема проведения опыта по методу латинского квадрата  
(КГ – контрольная группа; Ф1, Ф2 и Ф3 – изучаемые факторы)

Биологический объект	Период		
	I	II	III
1	КГ	КГ	КГ
2	ОР+Ф1	ОР+Ф1	ОР+Ф2
3	ОР+Ф2	ОР+Ф2	ОР+Ф1
4	ОР+Ф3	ОР+Ф3	ОР+Ф3

При проведении опыта необходимо учитывать следующие требования: число животных в группе должно быть кратным числу периодов опыта; при трех периодах – 3, 6, 9 животных; число периодов должно в точности соответствовать числу изучаемых факторов; все животные должны быть сохранены до конца опыта.

Исследуемые показатели состояния здоровья червей приведены в таблице П1.5.

Таблица П1.5

Исследуемые показатели состояния здоровья планарий

№	Показатель	Изменения показателей	Поведение биологических объектов
1			
2			

Исследуемые показатели растений приведены в таблице П1.6.

Таблица П1.6

Исследуемые показатели растений

№	Показатель	Изменения показателей	Рост/гибель
1			
2			

## **10. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОФОРМЛЕНИЕ**

10.1. Результаты испытаний обрабатываются в соответствии с задачами исследований и передаются представителю ФГБОУ ВПО УрГУПС еженедельно в форме отчета с заполнением таблицы П1.5.

Полученные данные являются собственностью Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ингушский государственный университет» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения».

С целью повышения качества проведения эксперимента могут быть приглашены представители Российской академии наук (по согласованию сторон).

Черновики испытаний и журналы хранятся и после составления отчета для возможности уточнения результатов, а также получения новой информации или более подробного анализа.

#### 10.2. Результаты испытаний.

Так как первичный материал является основой для суждения о выполненном исследовании, построения выводов и предложений, то он должен быть объективным, тщательно проверенным и правильно статистически обработанным. При статистической обработке данных используется современный пакет статистических программ STATISTICA.

Статистическая обработка данных может проводиться как представителями ФГБОУ ВПО ИнГГУ, так представителями ФГБОУ ВПО УрГУПС (по согласованию сторон).

10.3. Экстраполяцию результатов с животных на человека проводят сотрудники ФГБОУ ВПО ИнГГУ.

10.4. При представлении в печать результатов научных исследований, выполненных на биологических объектах (червях), указываются сотрудники, участвовавшие в разработке программы эксперимента и его проведении.

## 11. ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНЫХ ДОКУМЕНТОВ

1. СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М. : Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. 2003. 38 с.

2. Directive 2004/40/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents // Journal of the Europe Union. Pp. 1–25.

3. Кузнецов К. Б., Мишарин А. С. Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта. Екатеринбург : УрГАПС. 1999. С. 37. ISBN 5-89035-199-0.

4. Тирас Х. П., Асланиди К. Б. Тест-система для доклинического исследования медицинской и экологической безопасности на основе регенерации планарий. М. : Изд-во ТулГУ, 2013. 63 с.

5. Приказ № 755 от 12.08. 1977 г. О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных. М. : Министерство здравоохранения СССР, 1997. 7 с.

6. ОСТ 42-511–99. Правила проведения качественных клинических испытаний в Российской Федерации (утверждены МЗ РФ 29.12.98). М., 1998. 75 с.

7. Тирас Х. П., Петрова О. Н., Мякишева С. Н., Асланиди К. Б. Биологические эффекты слабых магнитных полей: сравнительный анализ // Фундаментальные исследования. 2014. № 12 (ч. 7). С. 1442–1451. ISSN 1812-7339.

8. Тирас Х. П., Петрова О. Н., Мякишева С. Н., Попова С. С., Асланиди К. Б. Влияние слабых магнитных полей в разные фазы регенерации планарии // Биофизика. 2015. Т. 60. № 1. С. 158–163. ISSN 0006-3029.

9. Тирас Х. П., Скавуляк А. Н., Асланиди К. Б., Иваницкий Г. Р. Почему эффекты от воздействия слабых комбинированных магнитных полей на биосистемы не всегда воспроизводимы? // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 1–3. ISSN 0869-5652.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНГУШСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



ГИАЛГАЙ  
ПАЧЧАХЪАЛКХА  
УНИВЕРСИТЕТ

386102, Республика Ингушетия,  
г. Магас, ул. Х-Б. Муталиева, 6

Тел/факс: (8732) 22-38-54

Http://www.inggu.ru

E-mail: [ing\\_gu@mail.ru](mailto:ing_gu@mail.ru)

№ 265 от 24.03.2016  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящий Акт свидетельствует, что установка, предназначенная для создания переменного магнитного и электрического полей, внедрена в ФГБОУ ВПО «Ингушский государственный университет» для проведения экспериментальных исследований воздействия электромагнитного поля в частотном диапазоне до 1 кГц на биологические объекты в зависимости от частоты и времени воздействия данного фактора. Процесс внедрения проходил с 24 августа по 28 августа 2015 г.

Данная установка разработана к.т.н., Закировой А.Р. под руководством д.т.н., Кузнецова К.Б. в рамках написания диссертационного исследования в области защиты персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия электромагнитных полей и передана для проведения экспериментальных исследований на животных кафедре «Биология».

Установка состоит из следующих основных частей:

1. Соленоид со встроенными пластинами;
2. Генератор переменного напряжения;
3. Усилитель переменного напряжения;
4. Реостат регулировки тока (встроен в усилитель);
5. Мультиметр переменного тока до 1кГц;
6. Высоковольтный источник переменного напряжения;
7. Автотрансформатор;
8. Мультиметр переменного напряжения.

Экспериментальные исследования на биологических объектах позволяют определить степень воздействия ЭМП различного уровня на живые организмы в зависимости от частоты и продолжительности воздействия и в дальнейшем интерпретировать эти исследования на человеке. Это позволит предложить допустимые дозы и уровни воздействия ЭМП на человека, что в свою очередь создаст условия для сохранения жизни и здоровья персонала, подвергнутого воздействию электромагнитных полей.

С уважением,  
ректор



А.М. Мартазанов

*Научное издание*

**Закирова Альфия Резавановна**

**ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО  
ПЕРСОНАЛА ОТ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Монография

Редактор Л.С. Барышникова  
Верстка С.Н. Наймушиной

Подписано в печать 16.01.2018.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 10,0.  
Тираж 800 экз. (1-й з-д 1–50). Заказ 23.

УрГУПС  
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66