

ISSN 1995-5685

# ЭЛЕКТРО

**4'2015**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

# ТОКОПРОВОДЫ С ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Долин А.П., канд. техн. наук, Отморский С.Г.

Русов В.А., канд. техн. наук

Смекалов В.В., канд. техн. наук

Рассмотрены пофазно изолированные токопроводы с литой изоляцией (ТПЛ), все шире используемые на электрических станциях и подстанциях. Предложен метод послемонтажного и текущего эксплуатационного диагностического контроля на основе измерения и локализации частичных и других электрических разрядов. Приведен пример диагностики электрических дефектов ТПЛ на действующей подстанции.

Ключевые слова: напряженность магнитного поля; частичные разряды; пофазно изолированные токопроводы с литой изоляцией; диагностический контроль; безопасность

В последние годы на электрических станциях и подстанциях находят применение токопроводы с литой изоляцией. Область применения таких токопроводов в Российской Федерации пока ограничивается напряжением 35 кВ, за рубежом – 170 кВ. Рабочий ток токопроводов достигает 12000 А. В отечественной практике достаточно широкое применение получили пофазно-изолированные литые токопроводы (ТПЛ) напряжением выше 1 кВ, предназначенные для работы как во внутренних, так и наружных электроустановках.

ТПЛ состоят из однофазных секций (прямых или с поворотами) длиной до 10 м. Между секциями токопровода устанавливаются соединительные муфты. Токопроводы могут иметь защитные кожуха (обязательные в наружных установках), изготовленные из гофрированного полиамида, нержавеющей стали или алюминия.

Токоведущие шины 1 токопроводов (рис.1 а,б) выполнены из алюминиевых сплавов или меди кольцевого (труба) или круглого (пруток) поперечного сечения. На концах шины каждой секции токопровода предусмотрены контакты 5. Изоляция 3 секции токопроводов изготовлена из крепированной бумаги и эпоксидного компаунда. Для выравнивания потенциала внутри изоляции секций предусмотрены полупроводящие слои, а также слой заземления 4. Секции каждой фазы токопровода соединяются компенсаторами температурных деформаций 6 (рис. 1,б), как правило, пластинчатого типа. Соединительные муфты в зависимости от класса напряжения могут иметь воздушную изоляцию без полупроводящих слоев (до 12 м кВ) и с полупроводящими слоями (до 72,5 кВ) или масляную изоляцию с полупроводящими слоями (выше 72,5 кВ). Выравнивающие обкладки каждой секции и муфты ТПЛ заземляются.

Incrementally insulated electrical pathways with cast insulation, which are increasingly used in power stations and substations, are discussed in this paper. A method for post-construction and ongoing operational diagnostic control, based on the measurement and location of partial and other electrical discharges, is proposed. An example of diagnostics of electrical defects of cast insulation electrical pathways (CIEP) in the existing substation is given.

Key words: magnetic field intensity; partial discharges; incrementally insulated electrical pathways with cast insulation; diagnostic inspection; safety

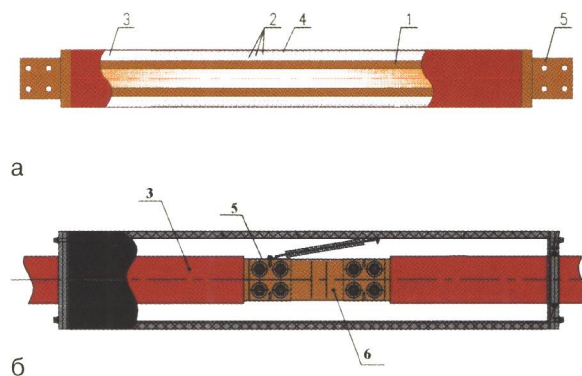


Рис. 1 Конструкции секции (а) и муфты (б) ТПЛ

ТПЛ предназначены для передачи, а при использовании Т-образных муфт – распределения электроэнергии (и, соответственно, выполняют функции токопроводов, а также при необходимости сборных шин РУ). ТПЛ имеют изоляцию на полное рабочее напряжение и, следовательно, обеспечивают высокую электробезопасность. Токопроводы компактны, могут быть изготовлены для трасс различной конфигурации, удобны при прокладке в стесненных пространствах. Они изготавливаются для внутренних и наружных электроустановок, различных климатических районов и условий эксплуатации [1], могут использоваться в условиях морского климата, а также в зонах с неблагоприятными условиями атмосферы (например, вблизи предприятий металлургической, нефтехимической промышленности и др.). Монтаж ТПЛ не требует проведения сварочных работ. Токопроводы до 72,5 кВ взрыво- и пожаробезопасны. Кроме того, ТПЛ обладают достаточно

высокой электродинамической и термической стойкостью, могут применяться в сейсмически активных районах, не требуют дополнительного охлаждения.

Вместе с тем ТПЛ имеют относительно высокую стоимость. В токопроводах применяется большое число болтовых соединений токоведущих элементов; изоляция токопроводов не допускает значительных механических воздействий (ударов, несанкционированных нагрузок и т.п.). Нарушения при транспортировке, проведении такелажных и монтажных работ, условий хранения и эксплуатации могут приводить (а в ряде случаев уже приводили) к отказам токопроводов. В результате указанных нарушений, а также (в редких случаях) нарушений технологии изготовления (брака) имели место дефекты контактных соединений и твердой изоляции, потеря контактов выравнивающих обкладок и заземления токопроводов.

Одним из путей повышения надежности этого оборудования является необходимая подготовка монтажников, повышение контроля со стороны шеф-инженеров при производстве монтажных работ, строгое соблюдение инструкций при транспортировке, хранении и эксплуатации.

Также необходим эффективный контроль технического состояния ТПЛ после монтажа и в процессе эксплуатации. Следует отметить, что требования к диагностическому контролю токопроводов с литой изоляцией, так же как и другого нового оборудования, отсутствуют в СО 34.45-51.300-97 [2]. Рекомендуемые производителями контрольные испытания токопроводов не всегда эффективны и достаточны для обнаружения дефектов (в том числе при вводе токопроводов в эксплуатацию).

Кроме того, сложилось мнение о практически «полной» безопасности токопроводов. Действительно, по уровню электробезопасности ТПЛ близки к экранированным токопроводам с воздушной или элегазовой изоляцией. Эти токопроводы превосходят по уровню электробезопасности так называемые токопроводы комплектные литые (ТКЛ), у которых все шины и соединения залиты эпоксидной смолой и находятся в едином блоке.

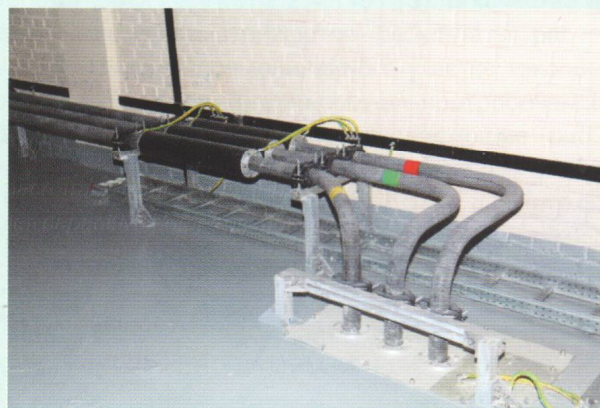
Однако оболочка ТПЛ и геометрия расположения шин практически не снижают магнитное поле проводников. Негативное влияние магнитного поля на персонал не учитывается при проектировании, а также эксплуатации токопроводов (что особенно опасно при больших рабочих токах). Ниже рассматриваются методы диагностического контроля ТПЛ, уровни напряженности их магнитных полей и разрабатываются предложения по безопасной и безаварийной эксплуатации этих токопроводов.

Для всех типов токопроводов выполняются необходимые расчеты и квалификационные испытания, в том числе на нагрев в рабочих режимах, термическую и электродинамическую стойкость, а также испытания повышенным напряжением и измерение частичных разрядов (ЧР). Приемосдаточные испытания выполняются для каждой секции токопровода и включают

испытания повышенным напряжением с контролем уровня ЧР.

Эксплуатационные (в том числе послемонтажные) испытания, рекомендуемые производителями и поставщиками ТПЛ, включают испытание повышенным напряжением, измерение сопротивления постоянному току и в ряде случаев тепловизионный контроль. Следует отметить, что рекомендуемые методы (за исключением тепловидения) требуют вывода токопровода из работы. Кроме того, подача повышенного напряжения является разрушающим методом контроля технического состояния. Воздействие повышенного напряжения (особенно при значительном сроке эксплуатации) может спровоцировать в эпоксидно-бумажной изоляции развитие ЧР, которые могут привести к пробое изоляции в достаточно отдаленном будущем после проведения испытаний. Кроме того, опыт эксплуатации показывает недостаточную эффективность рекомендуемых методов для обнаружения дефектов электрического характера, связанных с развитием частичных разрядов в изоляции, а также искровых разрядов в различных контактных соединениях (включая выравнивающие обкладки и систему заземления).

С целью определения возможности диагностического контроля ТПЛ под рабочим напряжением в эксплуатационных условиях, а также проверки эффективности различных методов и измерительных систем для поиска дефектов токопроводов были проведены обследования и измерения электрических разрядов токопроводов с литой изоляцией напряжением 6 кВ (рис. 2) на действующей подстанции.



**Рис. 2. Токопровод с литой изоляцией напряжением 6 кВ**

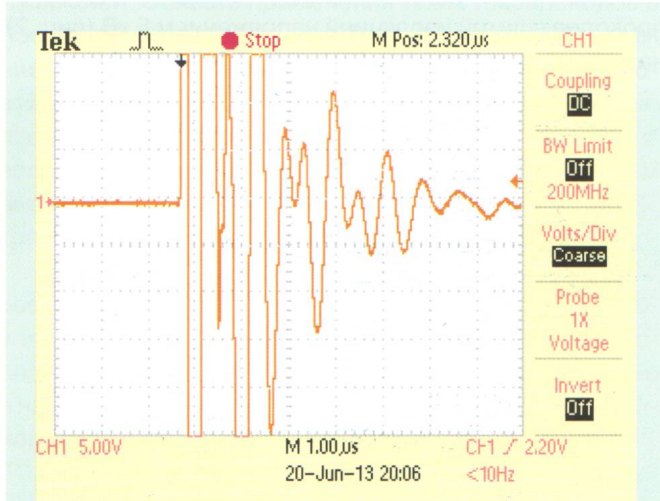
Следует отметить, что до проведенного обследования на одной из муфт токопровода были отмечены периодические характерные для электрического разряда потрескивания, которые в темном помещении давали отблеск. Испытания повышенным напряжением однозначно не выявили место дефекта. Предполагаемая дефектная муфта фазы В была демонтирована и заменена на новую специалистами завода-производителя токопровода. В дальнейшем при разборке на заводе-изготовителе этой демонтированной муфты никаких дефектов не обнаружено. Других видов работ в зоне демонтированной муфты документально не зафиксиро-

ровано. Однако нельзя исключить перенос проводника заземления с одного конца муфты соседней фазы на другой конец муфты. Через несколько дней после ремонта эксплуатационным персоналом вновь были зафиксированы разрядные явления. Повторные испытания повышенным напряжением всех фаз токопровода не привели к пробою. Эксплуатация токопровода на холостом ходу была продолжена.

Обследование проводилось в режиме холостого хода токопровода. Для поиска дефектов выполнены следующие работы:

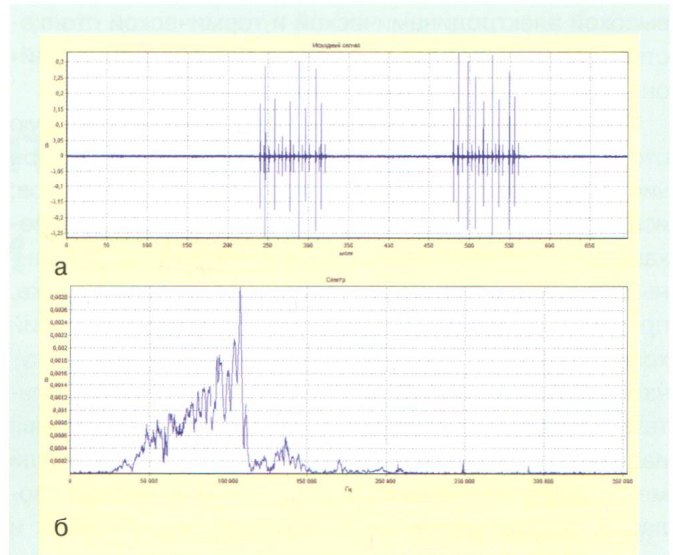
- измерения ЧР и других электрических разрядов с использованием высокочастотных трансформаторов (датчиков-клещей), устанавливаемых на проводах заземления выравнивающих обкладок (экранов) секций и муфт токопровода;
- локация ЧР акустическим методом;
- локация ЧР в изоляции токопроводов электромагнитным (бесконтактным) методом по длине токопровода с использованием высокочастотного сканера и различного вида антенн (индукционных датчиков).

В результате обследования обнаружено два типа полезных сигналов, вызванных двумя разными дефектами. Так, в одной из муфт фазы «А» зафиксировано искрение. Разряды фиксировались всеми измерительными методами (рис. 3, 4, 5 а,б) и возникали периодически с интервалом 1-5 мин. и более. Дефектная фаза идентифицировалась по уровню сигнала.

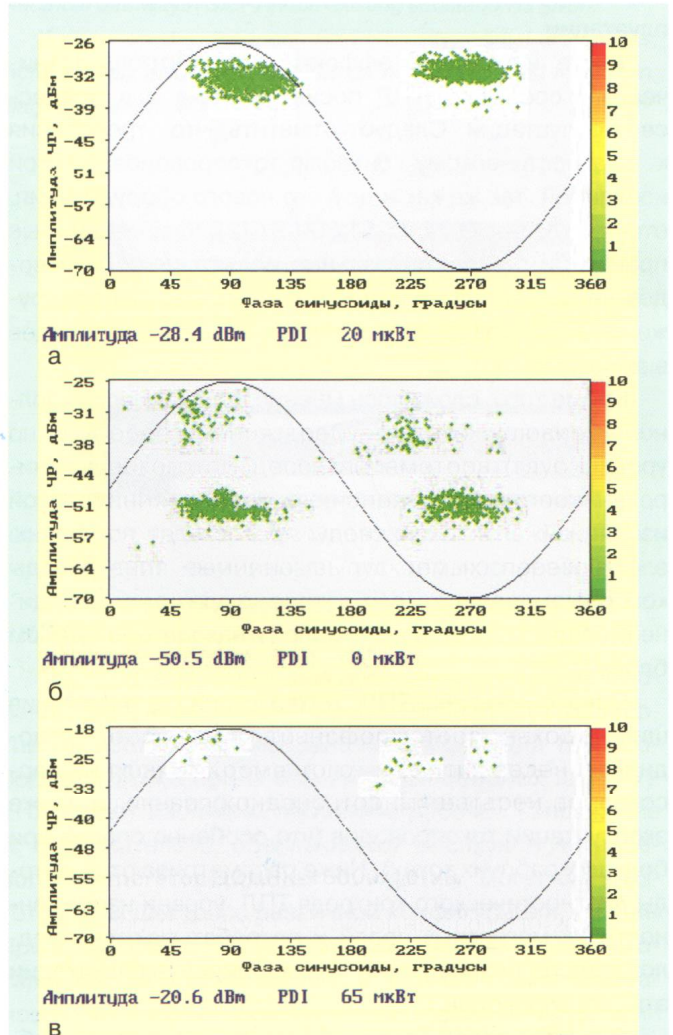


**Рис. 3. Осциллограмма импульса искрового разряда при развертке 1 мкс/дел, зарегистрированного при помощи датчиков - высокочастотных трансформаторов с ферромагнитным сердечником, установленных на проводе заземления муфты экраны фазы А токопровода**

Обнаруженный дефект визуально наблюдался со стороны фаз «В» и «С» в верхней части муфты в зоне соединения алюминиевого фланца и тела муфты. Как показал анализ полученных результатов (который подтвердили последующая разборка и осмотр этой муфты), искровые разряды вызваны потерей контакта алюминиевого фланца и выравнивающей потенциал обкладкой.



**Рис. 4. Осциллограмма импульсов (а) и спектр акустического сигнала (б) зафиксированных бесконтактным способом (микрофоном) в момент искрения в муфте токопровода фазы «А» ТПЛ**



**Рис. 5. Амплитудно-фазовое распределение импульсов, зарегистрированных высокочастотным сканером в момент искрения в экранах (а, б) и при отсутствии искрения (в). Кривая промышленной частоты напряжения получена от сети 0,4 кВ и не привязана к обследуемой фазе**

Кроме того, электромагнитной локацией (рис. 5 б, в) и электрическим методом (рис. 6) зафиксированы устойчивые (регулярные) разрядные процессы (частичные разряды), максимальная интенсивность которых сдвинута относительно искровых разрядов в фазе А примерно на 120 (-60) электрических градусов. Инструментально установлено, что уровень разрядов в зоне токопровода с дефектной муфтой снижается в одном направлении токопровода и возрастает в другом направлении ближе к соседнему кабельному помещению 6 кВ №4. Сигнал зафиксирован и в некоторых других помещениях РУ 6 кВ. Источник ЧР однозначно не установлен, так как не было организационной возможности произвести измерения на всех отсеках токопровода. Источник может находиться в изоляции токопровода, отходящих кабельных линиях или муфтах (в том числе у трансформатора). По результатам измерений с высокой степенью вероятности ЧР находится в фазе «С».

Другой проблемой внедрения ТПЛ прежде всего на большие рабочие токи является отсутствие внимания вопросам определения напряженности магнит-

ного поля и его воздействия на персонал при проектировании и эксплуатации токопроводов. В отличие, например, от пофазно экранированных генераторных токопроводов, у которых практически полностью компенсируется магнитное поле токов шин токами, протекающими в экранах, в ТПЛ такой компенсации нет. Здесь снижение уровня напряженности магнитного поля достигается геометрией расположения фаз токопровода, а также увеличением расстояния до возможного нахождения эксплуатационного персонала. Последнее в ряде случаев не ограничивается ни конструктивными решениями, ни требованиями к эксплуатации токопроводов (см. рис. 2 и 7).



Рис. 7. Работа персонала вблизи токопроводов

Вместе с тем, при больших напряженностях магнитного поля необходимо ограничение времени нахождения персонала вблизи токопроводов в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.4.1191 [3]. В качестве примера ниже рассматриваются результаты расчетов магнитных полей прямолинейного участка токопровода с литой изоляцией при номинальном рабочем токе 6500 А. Параметры токопровода следующие (рис. 8): внешний диаметр и толщина стенки шин  $d_{ш} = 190$  мм,  $t_{ш} = 10$  мм; толщина изоляции  $t_{из} = 7,5$  мм; диаметр фазы токопровода  $D = 205$  мм; расстояния между осями фаз а составляют от 300 до 650 мм.

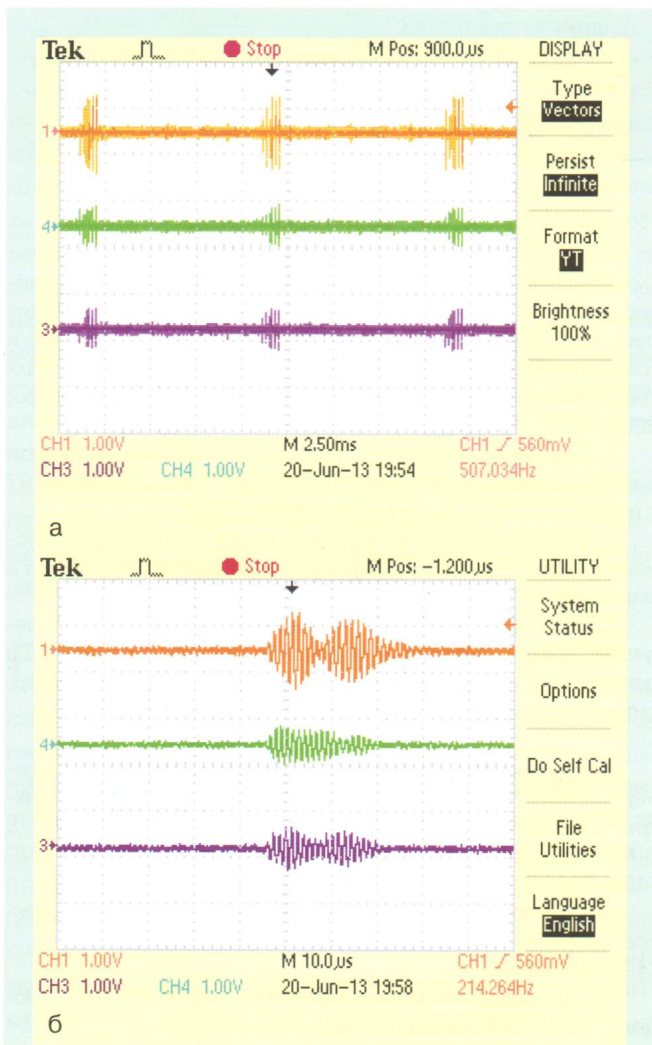


Рис. 6. Осциллограммы импульсов ЧР, зарегистрированных при помощи датчиков - высокочастотных трансформаторов в момент отсутствия искрения а – на развертке 2,5 мс/дел. (1 период сетевой частоты), б – на развертке 10 мкс/дел.

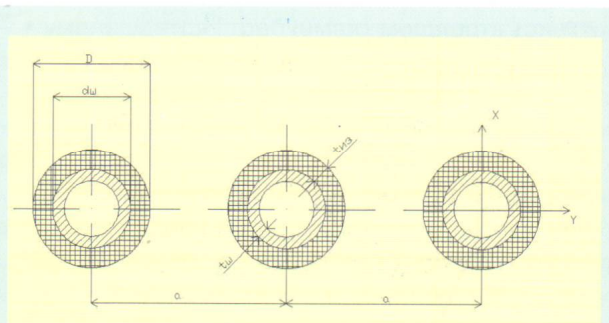
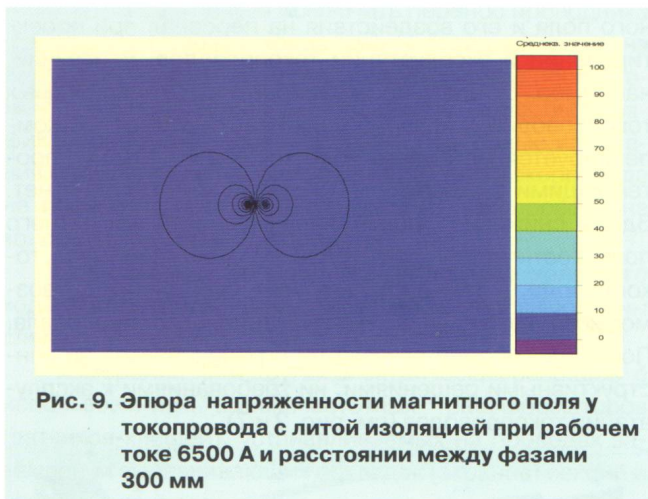


Рис. 8. Эскиз поперечного разреза ТПЛ

На рис. 9 приведена эпюра напряженности магнитного поля  $H$  рассматриваемого токопровода при расстояниях между осями фаз  $a$ , равных 300 мм, а на рис. 10 - зависимость  $H$  вдоль оси  $y$  при  $a = 600$  мм.

В таблице приведены значения предельно допустимых уровней напряженности периодического (синусо-

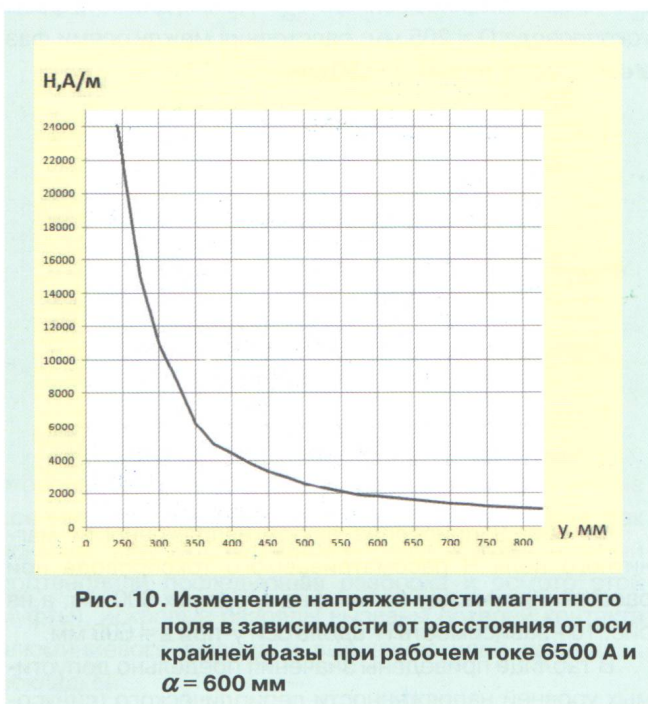


**Рис. 9. Эюра напряженности магнитного поля у токопровода с литой изоляцией при рабочем токе 6500 А и расстоянии между фазами 300 мм**

идального) магнитного поля для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия, установленные СанПиН 2.2.4.1191-03 [3]. Таким образом, у рассматриваемого токопровода при расстояниях между осями фаз  $a = 600$  мм эксплуатационный персонал не может находиться более 1 часа на расстоянии около 1 метра от крайней фазы.

Кроме того, согласно требованиям ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07 «Гигиенический норматив. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях» [4] допустимое значение напряженности магнитного поля (действующее значение) устанавливается равным 16 А/м. Это накладывает значительные ограничения на работу вблизи токопроводов уборщиков помещений, строителей и другого персонала, не связанных с эксплуатацией токопроводов.

Следует отметить, что вблизи поворотов токопроводов напряженность магнитного поля может быть в несколько раз выше, чем на прямолинейных участках.



**Рис. 10. Изменение напряженности магнитного поля в зависимости от расстояния от оси крайней фазы при рабочем токе 6500 А и  $\alpha = 600$  мм**

**Предельно допустимые уровни воздействия периодического магнитного поля частотой 50 Гц**

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

**ВЫВОДЫ**

Для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасного обслуживания токопроводов с литой изоляцией необходимо:

- проводить измерение ЧР при послемонтажном и периодическом эксплуатационном диагностическом контроле;
- при проектировании трассы и эксплуатации токопроводов учитывать уровень напряженности магнитного поля вблизи токопроводов и при высоких напряженностях ограничить зону и время пребывания персонала;
- включение указанных в пп. 1 и 2 требований в заводские инструкции по эксплуатации этих токопроводов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Введ. 01.01.71. М.: Стандартинфо, 2006. 57 с.
2. СО 34.45-51.300-97 (РД 34.45-51.300-97) Объем и нормы испытаний электрооборудования. 6-изд, утв. 08.05.97 с изм 01.10.2006. М.: НЦ ЭНАС, 2014. 255 с.
3. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Введ. 01.05.03 (с изменениями от 2 марта 2009 г.). М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 24 с.
4. ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07 «Гигиенический норматив. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях». Введ. 10.11.07. М.: Изд-во Технорматив, 2013. 9 с.

**Долин Анисим Петрович** - канд. техн. наук, доцент, генеральный директор ООО Научно-технический центр «Электроинжиниринг, Диагностика и Сервис» (ООО НТЦ «ЭДС»), г. Москва  
(495) 966 0234 apdol@mail.ru

**Отморский Сергей Георгиевич** – генеральный директор ЗАО НПО «Техносервис-Электро», г. Москва  
(495) 644 49 50

**Русов Валерий Александрович** – канд. техн. наук, доцент, главный инженер ОАО «ДимРус», г. Пермь  
+7 912 883 14 00 ValeriyRusov@vibrocenter.ru

**Смекалов Владимир Валентинович** – канд. техн. наук, лауреат премии Совета Министров СССР, Руководитель дирекции электрооборудования и ЛЭП ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»), г. Москва  
+7 925 302 86 39 Smekalov\_VV@ntc-power.ru