

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

5.1. Снижение влияния электрических и магнитных полей промышленной частоты на человека

5.1.3. Обеспечение защиты человека от неблагоприятного влияния

электрического и магнитного полей промышленной частоты

Мисриханов М.Ш. и Токарский А.Ю., ОАО МЭС Центра; Рубцова Н.Б., ГУ НИИ медицины труда РАМН

Сложившиеся в нашей стране подходы к обеспечению защиты человека от неблагоприятного влияния ЭМП, в том числе от неблагоприятного влияния ЭМП ПЧ, основаны на четырех принципах.

Защита временем. Она применяется, когда отсутствует возможность уменьшить интенсивность воздействия ЭМП до предельно допустимых уровней. Этот принцип реализован в гигиенических нормативах ЭМП ПЧ как для условий производственных, так и для условий воздействия на население.

Защита расстоянием. Это — наиболее эффективный метод. По условиям производственных воздействий он заключается в выведении работающих из зоны повышенного воздействия ЭМП. Он осуществляется посредством применения механизации, автоматизации производственных процессов, использования дистанционного управления, манипуляторов, размещения рабочих мест с учетом направления и свойств излучателя. По условиям воздействия на население он реализуется путем максимального удаления мест проживания (постоянного пребывания) населения от источника ЭМП. В частности, для обеспечения защиты населения от ЭП, создаваемых ВЛ, организуются санитарно-защитные зоны (в настоящее время им дано название «санитарные разрывы»).

Защита с помощью применения средств защиты. Средства защиты могут быть коллективными и индивидуальными. В качестве средств коллективной защиты для условий производственных воздействий используются устройства, ограничивающие поступление электромагнитной энергии на рабочие места (экранирование). Для индивидуальной защиты от ЭП ПЧ применяют защитные экраны, экранирующие комплекты. Основной характеристикой любого средства защиты является степень ослабления ЭП, выражающаяся в коэффициенте экранирования.

Защита с применением метода самокомпенсации ЭМП, создаваемого самим источником поля. В этом случае конструкция источника ЭМП выбирается такой, чтобы напряженности полей, создаваемые отдельными его частями, компенсировали друг друга в окружающем источнике пространстве или в отдельной части пространства.

В целях обеспечения сохранения здоровья как лиц, профессионально связанных с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП ПЧ, так и населения, подвергающегося их воздействию, устанавливаются ПДУ для электрической и магнитной составляющих ЭМП ПЧ. Традиционно гигиенические нормативы ЭМП в России разрабатываются, как правило, на основании комплексных гигиенических, клинко-физиологических, эпидемиологических и экспериментальных исследований. Гигиенические исследования ставят своей целью определение интенсивности и временных параметров ЭМП в реальных производственных или внепроизводственных условиях; клинко-физиологические — направлены на выявление нарушений в состоянии здоровья и физиологи-

ческих функций человека; эпидемиологические — на выявление отдаленных последствий воздействия фактора; экспериментальные — на изучение особенностей и характера биологического действия ЭМП. Однако основной вклад в обоснование гигиенических нормативов ЭМП вносят экспериментальные исследования.

В настоящее время в РФ действует несколько нормативно-методических документов, регламентирующих ПДУ производственных воздействий ЭМП ПЧ.

Основными являются следующие:

- СанПиН 2.2.4.1191—03 «Электромагнитные поля в производственных условиях», который регламентирует условия производственных воздействий ЭП и МП ПЧ;
- ГОСТ 12.1.002—84 ССБТ «Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах». Он регламентирует условия производственных воздействий только ЭП ПЧ.

Согласно СанПиН 2.2.4.1191—03 и ГОСТ 12.1.002—84 предельно допустимый уровень напряженности ЭП на рабочем месте в течение всей рабочей смены устанавливается равным 5 кВ/м.

При напряженности ЭП от 5 до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания в ЭП рассчитывается по формуле:

$$T = 50/E - 2,$$

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

При напряженности от 20 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.

Согласно требованиям нормативно-методических документов допустимое время пребывания в ЭП может быть реализовано однократно или дробно в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния ЭП или применять средства защиты.

Предельно допустимые уровни воздействия МП ПЧ, создаваемых электросетевыми объектами, устанавливаются для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл. 5.12) по значениям напряженности и соответственно индукции.

Однако наряду с лицами, профессионально связанными с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП ПЧ, в электроэнергетике, как и в других отраслях промышленности, на рабочих местах ряда категорий работающих согласно действующим в настоящее время санитарно-эпидемиологическим регламентам должны соблюдаться гигиенические нормативы, принятые для населения, т.е. гигиеническая регламентация внепроизводственных воздействий охватывает население в целом, включая лиц, профессионально не связанных с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП ПЧ, но подвергающихся их воздействию в процессе производствен-

ной деятельности.

Таблица 5.12. **Предельно допустимые уровни воздействия периодического магнитного поля частотой 50 Гц**

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП H/B , (А/м)/мкТл, при воздействии	
	общем	локальном
1 ч и менее	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Регламентация ЭП 50 Гц осуществляется в соответствии с требованиями «Санитарных норм и правил защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты» № 2971—84; МСанПиН 001—96 «Санитарные нормы допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях» и СанПиН 2.1.2.1002—00 «Санитарно - эпидемиологические требования к жилым зданиям и сооружениям».

Причем до недавнего времени регламентировались лишь уровни ЭП 50 Гц, создаваемые ВЛ напряжением 330 кВ и выше. При этом установленные ПДУ дифференцировались в зависимости от возможного времени пребывания населения: от 0,5 кВ/м внутри жилых зданий и сооружений и 1 кВ/м на территории жилой застройки до 20 кВ/м в труднодоступной местности. Дополнительно в документе содержатся требования по определению границ СЗЗ воздушных линий электропередачи и максимального уровня напряженности ЭП на их границе 1 кВ/м.

В МСанПиН были установлены ПДУ ЭП 50 Гц, создаваемых лишь товарами народного потребления. В СанПиН 2.1.2.1002—00 устанавливаемые ПДУ распространяются на любые типы жилых помещений и территорию жилой застройки и составляют 0,5 и 1 кВ/м соответственно вне зависимости от источника ЭМП.

Вплоть до 2000 г. в РФ отсутствовали гигиенические регламенты внепроизводственных воздействий магнитной составляющей ЭМП 50 Гц. В настоящее время имеется временный норматив, изложенный в СанПиН 2.1.2.1002—00 «Санитарно - эпидемиологические требования к жилым зданиям и сооружениям», в котором предложены два нормативных значения МП 50 Гц: внутри жилых помещений и на территории жилой застройки, которые составляют соответственно 10 и 50 мкТл.

В 2002—2003 гг. по заданию Московского комитета по науке и технологиям была проведена работа по созданию научно обоснованных ПДУ МП 50 Гц для населения. На основании комплекса гигиенических, эпидемиологических и экспериментальных исследований была осуществлена разработка проекта нормативно-методического документа, регламентирующего ПДУ МП 50 Гц для населения, создаваемых постоянно действующими источниками, включающего в себя ПДУ МП внутри жилых помещений жилых (и приравненных к ним) зданий и сооружений и для зоны жилой застройки, а также ПДУ МП 50 Гц для лиц, профессионально не связанных с эксплуатацией оборудования, являющегося источником МП 50 Гц, но подвергающихся воздействию в процессе производственной деятельности, и устанавливающего принципы и методы контроля уровней МП 50 Гц и обеспечения защиты населения.

Отсюда для жилых помещений внутри жилых и приравненных к ним зданий предложенный ПДУ составляет 5 мкТл. Вне жилых помещений жилых зданий и на территории зоны жилой застройки (также для воздействий МП от постоянно действующих источников) с учетом не круглосуточного пребывания предлагается ПДУ в 2 раза выше, равный 10 мкТл. Для условий временного пребывания (в том числе при выполнении работ лицами, профессионально не связанными с эксплуатацией электроустановок), в частности, под ВЛ и в зоне прохождения кабельных линий представляется целесообразным установление в качестве максимального значения ПДУ МП 50 Гц, равного 20 мкТл. В дальнейшем представляется необходимой апробация настоящих нормативных значений.

Таким образом, в стране сейчас создана основополагающая нормативная документация, которая осуществляет регламентацию как производственных, так и внепроизводственных воздействий ЭМП ПЧ.

Однако обеспечение нормативных значений ЭП и МП ПЧ как на рабочих местах, так и в местах проживания населения не всегда возможно. Так, защита работающих от ЭП ПЧ на ОРУ СВН достигается как применением конструкций, снижающих уровни ЭП путем использования компенсирующего действия разноименных фаз токоведущих частей и экранирующего влияния высоких стоек под оборудование, выполнением шин с минимальным количеством расщепленных проводов в фазе и минимально возможным их провесом и другими мероприятиями. Причем средства защиты от воздействия ЭП частотой 50 Гц должны соответствовать:

- стационарные экранирующие устройства — требованиям ГОСТ 12.4.154—85 ССБТ «Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры»;
- экранирующие комплекты — требованиям ГОСТ 12.4.172—87 ССБТ «Комплект индивидуальный экранирующий для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования и методы контроля».

Накопленный опыт решения проблемы обеспечения защиты персонала от воздействия ЭП показывает, что наиболее предпочтительным является применение в комплексе специальных конструкций и компоновок электроустановок, защитных средств, заземления изолированных от земли проводящих объектов, рациональных методов ремонтно-эксплуатационного обслуживания и организационных мероприятий.

Практика эксплуатации объектов СВН показывает, что зачастую не представляется возможным реализовать защитные мероприятия технического и организационного характера. Это связано с недостаточной эффективностью и весьма ограниченной зоной применения стационарных экранов. Далеко от разрешения и вопрос о применении как метода защиты персонала подстанций от воздействия ЭП специальных конструктивно-компоновочных решений, обеспечивающих выполнение гигиенических нормативов при минимальном объеме экранирования. Рационализация методов ремонтно-эксплуатационного обслуживания, направленная в основном на сокращение работ в условиях ЭП (использование «блочного» принципа ремонта оборудования, удлинение межремонтных сроков, сокращение периодичности осмотров оборудования, внедрение дистанционно-

го управления и др.), оказывается применима далеко не во всех случаях и носит, скорее, эпизодический характер.

Многолетний опыт эксплуатации установок СВН в России и за рубежом показывает, что наиболее универсальным и эффективным средством защиты персонала от неблагоприятного влияния ЭП являются индивидуальные экранирующие комплекты (ЭК) спецодежды.

Современный ЭК представляет собой высокотехнологичное изделие, создающее замкнутое электропроводящее пространство вокруг тела человека (индивидуальную «клетку Фарадея»), исключая проникновение ЭП даже очень высокой интенсивности внутрь экранированного пространства. Обладая высокой электропроводностью, комплекты шунтируют тело человека, исключая протекание через него тока смещения и импульсных токов.

Комплекты для работы под напряжением, кроме того, защищают органы дыхания пользователя от опасных аэроионов, образующихся в результате ионизации воздуха под воздействием высокого напряжения. Экранирующие комплекты лучших мировых производителей этих изделий сочетают в себе высокие защитные показатели с требуемыми санитарно-гигиеническими. Такие комплекты разработаны и производятся сегодня в США, Японии, Германии. Осваивается их производство и в некоторых других странах. Комплекты широко применяются во всем мире при ремонте и обслуживании установок СВН, в частности при проведении различных видов работ на ВЛ под напряжением. В России применение индивидуальных ЭК является обязательным при ремонте и обслуживании оборудования в зоне влияния установок СВН. Это регламентировано рядом документов отраслевого и федерального уровня.

Персонал РАО «ЕЭС России», Федеральной сетевой компании, предприятий «Росэнергоатома», других российских организаций, обслуживающих ПС и ВЛ СВН, оснащен сегодня отечественными ЭК, разработанными и серийно выпускаемыми московской организацией ЗАО «НПО «Энергоформ». Эти ЭК отвечают всем требованиям российских и международных стандартов, сертифицированы органом по сертификации средств индивидуальной защиты Госстандарта России, имеют санитарно-эпидемиологическое заключение.

Применение в производстве комплектов самых современных высокоэффективных (в том числе российской разработки) материалов, оригинальность конструктивных решений, большой набор специальных дополнительных аксессуаров и широта модельного ряда поставили ЭК в один ряд с лучшими мировыми аналогами. Следует отметить, что по целому ряду важных технических показателей российские ЭК существенно превосходят лучшие зарубежные образцы (табл. 5.13).

Как уже говорилось ранее, проверка экранирующих свойств комплекта осуществляется с помощью макетов вертикально стоящего человека (МВСЧ), разработанных и выполненных в 1986—2000 гг. ПЭО «Дальние электропередачи»; МВСЧ применялись для определения значений емкостных токов в теле человека (МВСЧ-1 и МВСЧ-3) и уровней напряженности ЭП на поверхности тела человека, находящегося на потенциале земли (МВСЧ-2 и МВСЧ-3); значений емкостных и аэроионных токов (МВСЧ-4 и МВСЧ-6), а также напряженности ЭП (МВСЧ-5 и МВСЧ-6) на поверхности тела человека, проводящего работы под напряжением. В настоящее время устройства используются для квалификационных испы-

таний ЭК типа ЭП-1 и ЭП-3 на стендовой базе ГУ НИИ медицины труда РАМН, которые проводятся сотрудниками НПО «Техносервис-Электро» и филиала ОАО «ФСК ЕЭС» МЭС Центра. Макет МВСЧ-5(6) размещается горизонтально в стенде высокого напряжения переменного тока сначала лицом к верхней пластине — источнику ЭП, затем спиной.

Таблица 5.13. Технические показатели (защитные свойства) экранирующих комплектов типа Эп-4 (л)

Коэффициент экранирования ткани, дБ, не менее:	
при частоте 50 Гц	90
до 10 МГц	90
10...500 МГц	80
500...20 000 МГц	60
Коэффициент экранирования комплекта в целом при частоте 50 Гц, дБ, не менее	60
Сопrotивление экранирующей одежды, Ом, не более	10
Сопrotивление экранирующих перчаток, Ом, не более	30
Сопrotивление экранирующей обуви, Ом, не более	500
Коэффициент снижения концентрации аэроионов во вдыхаемом воздухе, отн. ед., не менее:	
легких	3
тяжелых (аэрозолей)	12

В этих положениях производятся измерения емкостного тока, проходящего через тело МВСЧ, при различной напряженности E неискаженного ЭП между пластинами стенда высокого напряжения. Такие измерения тока проводятся для МВСЧ без ЭК I_1 и одетого в экранирующий комплект I_2 . Коэффициент экранирования комплекта $K_{э.к}$ определяется как отношение токов I_1/I_2 . На рис. 5.23 показан процесс измерения емкостного тока, проходящего через МВСЧ-5(6), одетый в ЭК. В табл. 5.14 приведены результаты проверки экранирующих свойств ЭК типа ЭП-1 с помощью устройства МВСЧ-5(6), расположенного лицом к источнику ЭП, а в табл. 5.15 — спиной к источнику.

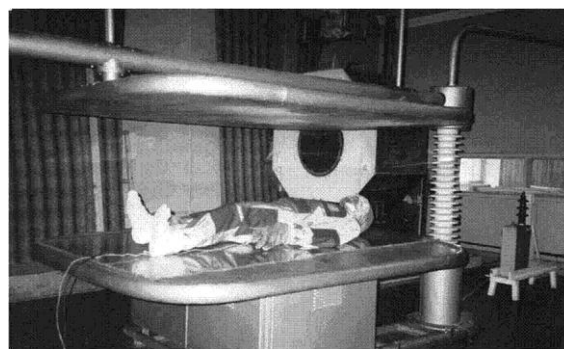


Рис. 5.23. Измерение емкостного тока, проходящего через устройство МВСЧ-5, одетое в ЭК

Согласно ГОСТ 12.4.172—87 ССБТ «Комплект индивидуальный экранирующий для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования и методы контроля» коэффициент экранирования ЭК не должен быть менее 100. Таким образом, испытания экранирующего комплекта ЭП-1 подтверждают высокую эффективность экранирования ЭП ПЧ.

Экранирующий комплект защищает человека от воздействия ЭП и сопутствующих ему факторов. В отличие от ЭП ПЧ защита работающих от неблагоприятного влияния МП ПЧ может быть обеспечена практически только посредством защиты временной и защитной расстоянием; применение средств защиты ограничено. Это объясняется тем, что для МП любое экранирующее от

ЭП средство, в том числе экранирующий комплект, прозрачно, т.е. от воздействия МП экранирующий комплект человека не защищает.

Таблица 5.14. Эффективность экранирования комплекта ЭП-1 при положении МВСЧ-5(6) лицом к источнику ЭП

E , кВ/м	I_1 , мкА	I_2 , мкА	$K_{э,к}$, отн. ед.
6,25	55,0	0,2	275
12,50	108	0,4	270
18,75	160	0,6	267
25,00	212	0,8	265
31,25	267	1,0	267
37,50	319	1,2	266
50,00	425	1,6	266
56,25	480	1,8	267
62,50	542	2,0	271

Для населения основными источниками ЭП и МП ПЧ повышенной интенсивности являются ВЛ высокого напряжения, проходящие по селитебным территориям, а также кабельные линии, проходящие как по зоне жилой застройки, так и в жилых зданиях, проложенные по наружным поверхностям стен, в межэтажных перекрытиях, под потолком встроенных трансформаторных подстанций и т.п. В связи с этим одной из первостепенных задач становится необходимость снижения уровней МП, создаваемых постоянно действующими источниками, размещенными как внутри, так и вне жилых и общественных зданий, в том числе на селитебной территории. При этом следует упомянуть, что решение вопросов экранирования источников МП ПЧ или мест проживания населения традиционными методами (применением материалов с высокой магнитной проницаемостью) для протяженных источников, таких как воздушные и кабельные линии электропередачи, практически невозможно. В связи с этим представлялась необходимой разработка принципиально новых методов снижения (экранирования) МП, создаваемых ВЛ на селитебной территории.

Таблица 5.15. Эффективность экранирования комплекта ЭП-1 при положении МВСЧ-5(6) спиной к источнику ЭП

E , кВ/м	I_1 , мкА	I_2 , мкА	$K_{э,к}$, отн. ед.
6,25	65	Н.ч.п*	—
12,50	129	То же	—
18,75	191	»	—
25,00	258	»	—
31,25	321	»	—
37,50	386	0,1	3860
50,00	515	0,1	5150
56,25	580	0,1	5800
62,50	644	0,2	3220

* Н.ч.п. — ниже чувствительности прибора.

Для защиты населения от ЭП ПЧ, создаваемых ВЛ высокого напряжения, филиалом ОАО «ФСК ЕЭС» — МЭС Центра разработаны конструкции пассивных, активных и резонансных тросовых экранов, позволяющих уменьшить напряженность ЭП под линией до значений меньше 5 кВ/м (ПДУ для населенной местности), а также уменьшить в 1,5...2,0 раза ширину зоны, в которой напряженность ЭП превышает 1 кВ/м (ПДУ для зоны жилой застройки).

Решение задачи по снижению уровней МП ПЧ в местах проживания населения обеспечивается разработанными конструкциями пассивных, активных и резонансных вертикальных и направленных контурных экранов (НКЭ). На рис. 5.24 показана конструкция НКЭ на ВЛ 500 кВ. На рис. 5.25 дано распределение напряженности H_{max} (действующее значение по большей полуоси эллипса) МП на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом «провод фазы — земля» 10 м, оснащенной НКЭ. Все параметры НКЭ определены с учетом провисания в пролете проводов как фаз ВЛ, так и НКЭ.

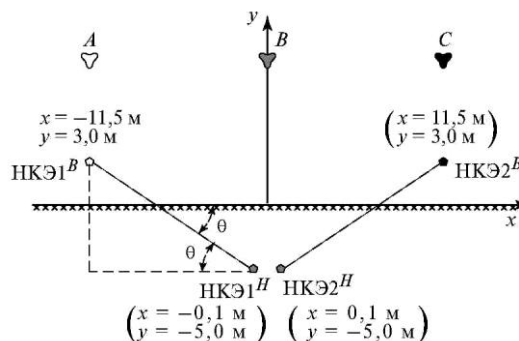


Рис. 5.24. Направленный контурный экран, предназначенный для ограничения уровня напряженности МП ВЛ 500 кВ

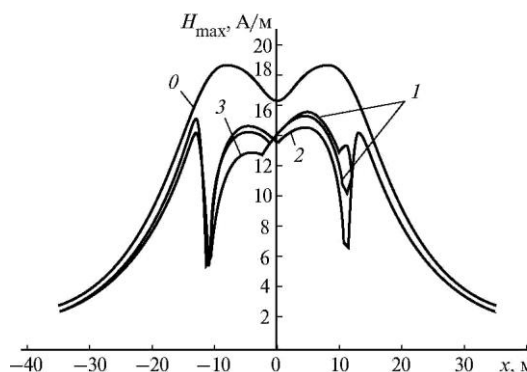


Рис. 5.25. Распределение на уровне 1,8 м от поверхности земли напряженности МП в сечении ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом «провод — земля» 10 м:

кривая 0 — неэкранированная ВЛ; кривая 1 — экранирование с помощью пассивных (короткозамкнутых) НКЭ; кривая 2 — экранирование с помощью активных НКЭ (в цепь экрана включены источники ЭДС); кривая 3 — экранирование с помощью резонансных НКЭ (в цепь экранов включены конденсаторы)

Применение контурных экранов позволяет ограничить уровень напряженности МП под ВЛ до значений меньше 16 А/м (ПДУ для населенной местности), а также сократить зону с напряженностью МП, превышающей 8 А/м (ПДУ для зоны жилой застройки по проекту нового нормативного документа).

На рис. 5.26 показано распределение напряженности ЭП и МП на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ 500 кВ с минимальным габаритом 10 м, оснащенной пассивными НКЭ, а также активными и совмещенными с НКЭ пассивными тросовыми экранами (АТЭ и ПТЭ): неэкранированное ЭП — кривая $E0$; ЭП, экранированное с помощью двух АТЭ, трех ПТЭ и верхних проводов двух НКЭ — кривая $E1$; неэкранированное МП — кривая $H0$; МП, экранированное с помощью двух пассивных НКЭ, — кривая $H1$.

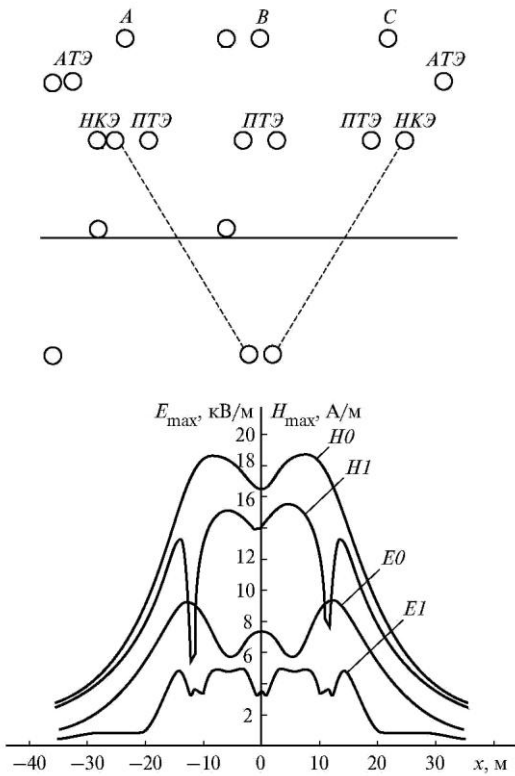


Рис. 5.26. Расположение фаз ВЛ, АТЭ, ПТЭ и НКЭ и распределение E_{max} и H_{max} на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ 500 кВ с габаритом 10 м при горизонтальном расположении верхних проводов НКЭ и проводов ПТЭ

Основными источниками МП ПЧ в производственных условиях являются линии электропередачи с их коммутационным оборудованием и реакторы без замкнутого ферромагнитного магнитопровода. Причем кабельные линии электропередачи (КЛ) играют особенно важную роль, так как до недавнего времени они не рассматривались как потенциальный источник неблагоприятного влияния на человека МП ПЧ.

Для решения вопросов обеспечения безопасности человека в условиях воздействия МП ПЧ, Филиалом ОАО «ФСК ЕЭС» — МЭС Центра совместно с ГУ НИИ МТ РА М Н разработан принцип компоновки КЛ по методу сближения как осей кабелей фаз и нулевого провода, входящих в КЛ или в кабельный пучок, так и виртуальных осей этих кабелей [11, 12].

На рис. 5.27 показаны схемы традиционной компоновки КЛ 0,4 кВ, проложенной к встроенной в жилой дом трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ.

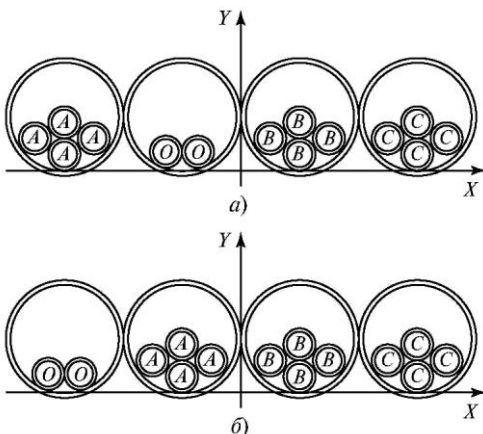


Рис. 5.27. Схемы традиционной компоновки кабельных линий 0,4 кВ в асбоцементных трубах

Над КЛ на расстоянии 965 мм находится поверхность пола жилого помещения, где напряженность МП не должна превышать 4 А/м (ПДУ для жилых помещений). При максимальной нагрузке проектное значение фазного тока в КЛ в симметричном режиме составляет 1800 А.

На рис. 5.28 дано распределение напряженности H_{max} на поверхности пола жилого помещения над ТП в симметричном режиме нагрузки: для КЛ по схеме рис. 5.27, а — кривая 1 и по схеме рис. 5.27, б — кривая 2.

Для компоновки по рис. 5.27, а H_{max} превышает ПДУ 4 А/м для жилых помещений в 25, а для компоновки по рис. 5.27, б — в 16 раз.

В традиционной конструкции КЛ используется пофазная компоновка кабельных пучков с их горизонтальным расположением.

В качестве примера рассмотрим две конструкции КЛ: одну, содержащую по одному фазному кабелю и нулевому проводнику, расположенным горизонтально с расстоянием 20 см между осями соседних кабелей (рис. 5.29, а), и вторую, содержащую те же кабели, но расположенные в углах квадрата с наименьшими расстояниями между осями кабелей (рис. 5.29, б). Радиус каждого кабеля 2 см, модуль фазного тока при симметричной нагрузке $I_{\phi} = 1800$ А.

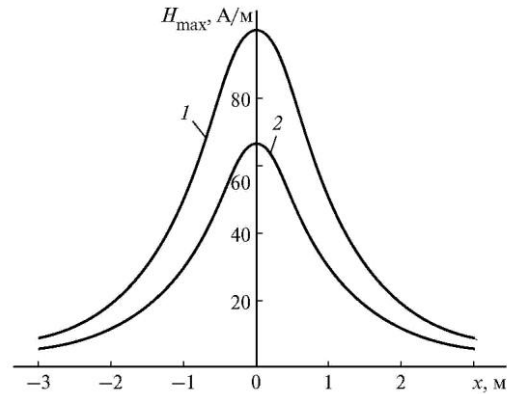


Рис. 5.28. Распределение напряженности H_{max} МП, создаваемого на поверхности пола жилого помещения ($y = 965$ мм)

В точке Д, расположенной над осью средней фазы КЛ горизонтального расположения (фазы В на рис. 5.29, а), векторы напряженности \vec{H}_A , \vec{H}_B и \vec{H}_C явно имеют различные модули и сдвинуты в пространстве на значительные углы.

Составляющие \vec{H}_{AX} , $\vec{H}_{BX} = \vec{H}_B$ и \vec{H}_{CX} направлены в одну сторону и при определении модуля результирующего вектора по оси ОХ их комплексные значения складываются: $\vec{H}_X = \vec{H}_{AX} + \vec{H}_{BX} + \vec{H}_{CX}$, компенсируя друг друга (рис. 5.30, а).

Составляющие \vec{H}_{AY} , $\vec{H}_{BY} = \vec{H}_B$ и \vec{H}_{CY} направлены встречно и при определении модуля результирующего вектора по оси ОУ их комплексные значения вычитаются: $\vec{H}_Y = \vec{H}_{AY} + \vec{H}_{BY} + \vec{H}_{CY}$, что приводит к увеличению значения \vec{H}_Y (рис. 5.30, б).

Таким образом, результирующая составляющая полного вектора \vec{H} напряженности МП в основном определяется составляющей \vec{H}_Y по оси ОУ.

Для КЛ с расположением кабелей по углам квадрата составляющие напряженности по оси OY в той же точке D (см. рис. 5.29, б) значительно меньше составляющих по оси OX , так как векторы \vec{H}_A , \vec{H}_B и \vec{H}_C имеют небольшие углы расхождения и модули их близки по значению. Это приводит к большей степени компенсации напряженности МП, создаваемого такой КЛ.

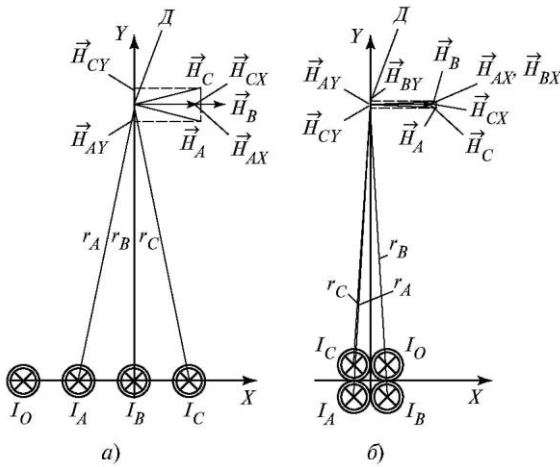


Рис. 5.29. Составляющие напряженности МП, создаваемого КЛ горизонтального расположения (а) и КЛ с прокладкой кабелей по углам квадрата (б) при симметричной нагрузке

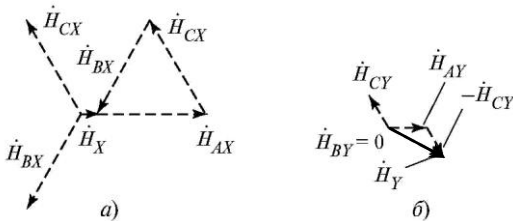


Рис. 5.30. К определению по оси OX (а) и по оси OY (б) модуля результирующего вектора напряженности МП, создаваемого КЛ горизонтального расположения

На рис. 5.31 показано распределение напряженности МП, создаваемого КЛ горизонтального расположения — кривая 1 и КЛ с расположением кабелей по углам квадрата — кривая 2 на поверхности пола жилого помещения ($y = 965$ мм) при симметричной нагрузке ($I_\phi = 1800$ А).

Перекомпоновка КЛ горизонтального расположения кабелей в КЛ с расположением кабелей по углам квадрата привело к сближению осей кабелей, что позволило снизить напряженность H_{\max} МП на уровне $y = 965$ мм с 98 до 16 А/м.

На рис. 5.32 показан один из вариантов компоновки кабельных пучков (КП) КЛ рассмотренной ранее встроенной ТП 10/0,4 кВ по углам квадрата.

На рис. 5.33 показаны кривые распределения H_{\max} на поверхности пола жилого помещения над ТП для рассматриваемого варианта компоновки КП кабельной линии по углам квадрата: $y = 965$ мм, кривая 1 — симметричный, кривая 1' — несимметричный режимы; $y = 1065$ мм, кривая 2 — симметричный и кривая 2' — несимметричный режимы. Для несимметричного режима значения токов фаз и нулевого провода приняты следующими:

$$I_A = 1800 \text{ А}, I_B = 900e^{-j120} \text{ А}, I_C = 900e^{j120} \text{ А}, I_0 = 900e^{j180} \text{ А}$$

При такой компоновке кабельных пучков КЛ H_{\max} в

несимметричном режиме всегда меньше, чем в симметричном.

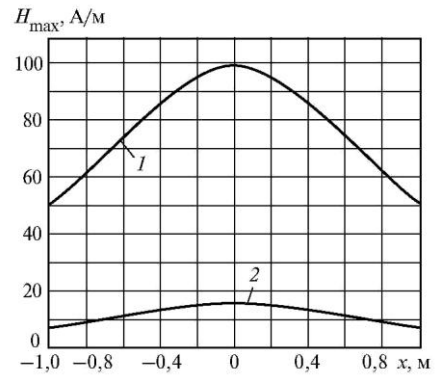


Рис. 5.31. Распределение напряженности МП, создаваемого КЛ горизонтального расположения и КЛ с расположением кабелей по углам квадрата на поверхности пола жилого помещения ($y = 965$ мм) при симметричной нагрузке ($I_\phi = 1800$ А)

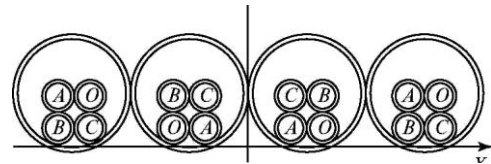


Рис. 5.32. Вариант компоновки кабельных пучков КЛ по углам квадрата

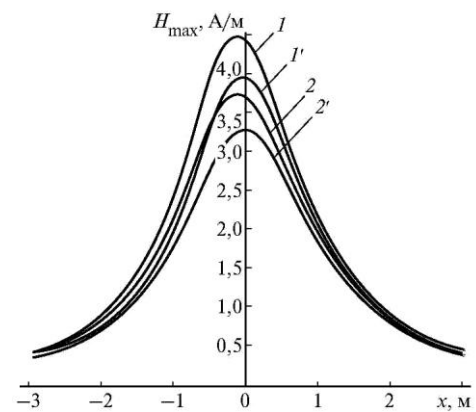


Рис. 5.33. Распределение напряженности H_{\max} МП на поверхности пола жилого помещения над ТП для компоновки КП кабельной линии по углам квадрата

Для уровня $y = 965$ мм $H_{\max 1} = 4,481$ А/м,

$H_{\max 1'} = 3,914$ А/м, т.е. для того, чтобы рассмотренная КЛ соответствовала ПДУ для жилых помещений ($H \leq 4$ А/м), ее надо отодвинуть от поверхности пола жилого помещения на 10 см, тогда для уровня $y = 1065$ мм $H_{\max 2} = 3,710$ А/м, и $H_{\max 2'} = 3,244$ А/м.

Размещение КП, состоящих из кабелей фаз и нулевого провода в асбоцементных трубах, по углам квадрата позволяет значительно снизить напряженность МП, создаваемого КЛ на уровне $y \approx 1$ м от осей КП кабельной линии. Однако при прохождении КЛ по внешним стенам жилых зданий или в межэтажных перекрытиях, когда расстояние от оси КП до поверхности внутренней стены или пола жилого помещения составляет 30...70 см, такая компоновка КП и КЛ уже не будет удовлетворять условию $H \leq 4$ А/м, т.е. ПДУ напряженности МП для жилых

помещений не будут соблюдаться.

Наилучшим вариантом компенсации напряженности МП, создаваемого токами кабелей, входящих в КП, является вариант полного совмещения осей кабелей. Тогда напряженности МП, создаваемых током каждого кабеля в любой точке окружающего кабель пространства, будут совпадать по направлению, а результирующее значение напряженности $H = H_{\max}$ определится выражением:

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}_A}{2\pi r_A} + \frac{\dot{I}_B}{2\pi r_B} + \frac{\dot{I}_C}{2\pi r_C} + \frac{\dot{I}_0}{2\pi r_0}, \quad (5.1)$$

а так как при совпадении осей кабелей в КП $r_A = r_B = r_C = r_0 = r$, то выражение (5.1) примет вид:

$$\dot{H} = \frac{1}{2\pi r} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_A) = 0, \quad (5.2)$$

поскольку сумма всех токов КЛ всегда равна нулю. Однако реально осуществить такую схему компоновки КП мешают физические размеры (диаметр) кабеля.

Удовлетворить условию (5.2) может только коаксиальное расположение кабелей в КП, как показано на рис. 5.34. Чередование фаз и нулевого провода значения не имеет и может быть произвольным.

Рассмотрим два параллельных кабеля $A1$ и $A2$ с током \dot{I} в каждом, расположенных один от другого на расстоянии $2R$. Из середины расстояния между кабелями проведем окружность радиусом R и в центре окружности разместим оси координат XOY так, чтобы ось OX находилась к прямой, соединяющей оси кабелей, под углом α (рис. 5.35).

В точке D , расположенной на расстоянии h от центра окружности по оси OY , токами кабелей создается МП, составляющие напряженности которого по осям OX и OY для каждого кабеля определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_{A1X} &= \vec{x}^0 \frac{\dot{I}}{2\pi} \frac{h - R \sin \alpha}{R^2 \cos^2 \alpha + (h - R \sin \alpha)^2}; \\ \dot{H}_{A1Y} &= \vec{y}^0 \frac{\dot{I}}{2\pi} \frac{R \cos \alpha}{R^2 \cos^2 \alpha + (h - R \sin \alpha)^2}; \\ \dot{H}_{A2X} &= \vec{x}^0 \frac{\dot{I}}{2\pi} \frac{h - R \sin (\alpha + 180)}{R^2 \cos^2 (\alpha + 180) + [h - R \sin (\alpha + 180)]^2}; \\ \dot{H}_{A2Y} &= \vec{y}^0 \frac{\dot{I}}{2\pi} \frac{R \cos (\alpha + 180)}{R^2 \cos^2 (\alpha + 180) + [h - R \sin (\alpha + 180)]^2} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

где \vec{x}^0 и \vec{y}^0 — единичные векторы по осям OX и OY .

Поскольку все составляющие напряженности МП имеют одинаковые фазные углы, так как создаются одним фазным током, то положение результирующего вектора в пространстве определяется по выражению:

$$\dot{H}_A = \dot{H}_{A1X} + \dot{H}_{A1Y} + \dot{H}_{A2X} + \dot{H}_{A2Y},$$

а его модуль по формуле:

$$H_A = \sqrt{(H_{A1X} + H_{A2X})^2 + (H_{A1Y} + H_{A2Y})^2}, \quad (5.4)$$

$H_{AX} = H_{A1X} + H_{A2X}$; $H_{AY} = H_{A1Y} + H_{A2Y}$ — где действующие значения составляющих результирующего вектора по осям координат.

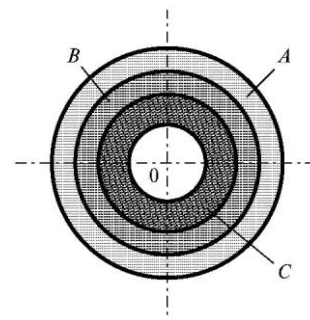


Рис. 5.34. Коаксиальное расположение фаз и нулевого провода в кабельном пучке

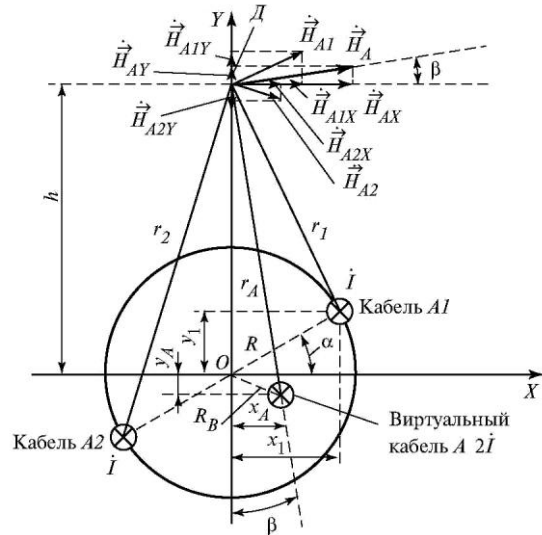


Рис. 5.35. К определению координат оси виртуального кабеля A с током $2\dot{I}$, создающим в точке D напряженность МП, равную напряженности МП, создаваемой двумя реальными параллельными кабелями $A1$ и $A2$ с током \dot{I}

Угол наклона вектора \dot{H}_A к оси OX находится по выражению:

$$\beta = \arctg \frac{\dot{H}_{AY}}{\dot{H}_{AX}}. \quad (5.5)$$

Из точки D проведем перпендикуляр к вектору \dot{H}_A в направлении координат XOY (рис. 5.35). Тогда на расстоянии

$$r_A = \frac{2\dot{I}}{2\pi \dot{H}_A} \quad (5.6)$$

от точки D на полученном перпендикуляре можно поместить ось кабеля A , который является виртуальным аналогом кабелей $A1$ и $A2$, создающим своим током, равным $2\dot{I}$, в рассмотренной точке D МП, вектор напряженности которого равен векто-

пу \vec{H}_A .

Для любой k -й фазы или нулевого проводника, содержащих N_k кабелей, центры которых равномерно рас-

$$\vec{H}_{kX} = \vec{x} \cdot \sum_{i=0}^{N_k-1} \frac{i k}{2\pi} \frac{h - R_k \sin\left(\alpha + \alpha_k + i \frac{2\pi}{N_k}\right)}{R_k^2 \cos^2\left(\alpha + \alpha_k + i \frac{2\pi}{N_k}\right) + \left[h - R_k \sin\left(\alpha + \alpha_k + i \frac{2\pi}{N_k}\right)\right]^2};$$

$$\vec{H}_{kY} = \vec{y} \cdot \sum_{i=0}^{N_k-1} \frac{j}{2\pi} \frac{R_k \cos\left(\alpha + \alpha_k + i \frac{2\pi}{N_k}\right)}{R_k^2 \cos^2\left(\alpha + \alpha_k + i \frac{2\pi}{N_k}\right) + \left[h - R_k \sin\left(\alpha + \alpha_k + i \frac{2\pi}{N_k}\right)\right]^2},$$

Координаты оси кабеля A определяются по выражениям:

$$x_A = r_A \sin \beta; \quad y_A = h - r_A \cos \beta. \quad (5.7)$$

где α_k — угол наклона первого провода k -й фазы или нулевого проводника к оси OX .

Также изменятся выражения (5.4) и (5.6), которые для общего случая с N_k и R_k для k -й фазы или нулевого проводника будут:

$$H_k = \sqrt{H_{kX}^2 + H_{kY}^2}; \quad r_k = \frac{N_k J_k}{2\pi H_k}.$$

Ось виртуального кабеля расположена внутри окружности на расстоянии от центра $R_B < R$. При увеличении числа N_k составляющих кабелей и неизменном значении $N_k J_k$ в результате взаимной компенсации модуль составляющей H_{kX} уменьшается, а модуль составляющей H_{kY} увеличивается, что, согласно выражениям (5.5) и (5.7), приводит к уменьшению как угла β , так и координат x_A и y_A , т.е. центр виртуального кабеля стремится к центру окружности.

Равномерно размещая кабели фаз и нулевого проводника по периметру окружностей, имеющих один центр, получим КЛ, у которой оси виртуальных кабелей фаз и нулевого проводника будут находиться на расстояниях, значительно меньших диаметров реальных кабелей.

Применяя принцип максимального сближения осей виртуальных кабелей [11, 12], получаем различные конструкции КЛ, некоторые из которых показаны на рис. 5.36.

Кабельная линия, показанная на рис. 5.36, *a*, имеет один кабельный пучок и содержит по $N_A = N_B = N_0 = 4$ кабеля фаз A, B и нулевого проводника сечением 240 мм^2 каждый, диаметры кабелей $D_A = D_B = D_0 = 3 \text{ см}$, а также $N_C = 8$ кабелей фазы C сечением 120 мм^2 и диаметром $D_C = 2 \text{ см}$ каждый. Оси кабелей нулевого проводника находятся на периметре окружности с радиусом $R_0 = 2,12 \text{ см}$ с углом наклона $\alpha_0 = 45^\circ$ к оси OX . Для фазы A : $R_A = 4,1 \text{ см}$, $\alpha_A = 0$. Для фазы B : $R_B = 5,1 \text{ см}$, $\alpha_B = 45^\circ$. Для четырех кабелей полуфазы $C1$: $R_{C1} = 5,75 \text{ см}$, $\alpha_{C1} = 20^\circ$, а для полуфазы $C2$: $R_{C2} = 5,75 \text{ см}$, $\alpha_{C2} = -20^\circ$.

Компоновка кабельного пучка КЛ, показанной на рис. 5.36, *б*, отличается тем, что меняются местами наименования фаз кабелей, входящих в КП: нуль на A , A на B , B на C и C на нуль.

Кабельная линия на рис. 5.36, *в* содержит один КП, один кабель нулевого проводника ($N_0 = 1$) диаметром $D_0 = 5 \text{ см}$, расположенный в центре пучка, и по четыре кабеля фаз A, B и C ($N_A = N_B = N_C = 4$) диаметром $D_A = D_B = D_C = 3 \text{ см}$ каждый. $R_A = 0,04 \text{ м}$, $R_B = R_C = 0,07 \text{ м}$, $\alpha_A = \alpha_C = 0$, $\alpha_B = 45^\circ$.

положены по периметру окружности радиусом R_k , выражения (5.3) для составляющих напряженности МП по осям OX и OY , имеют вид:

Кабельный пучок КЛ, показанной на рис. 5.36, *г*, состоит из 14 кабелей равных диаметров, $D = 3 \text{ см}$. Нуле-

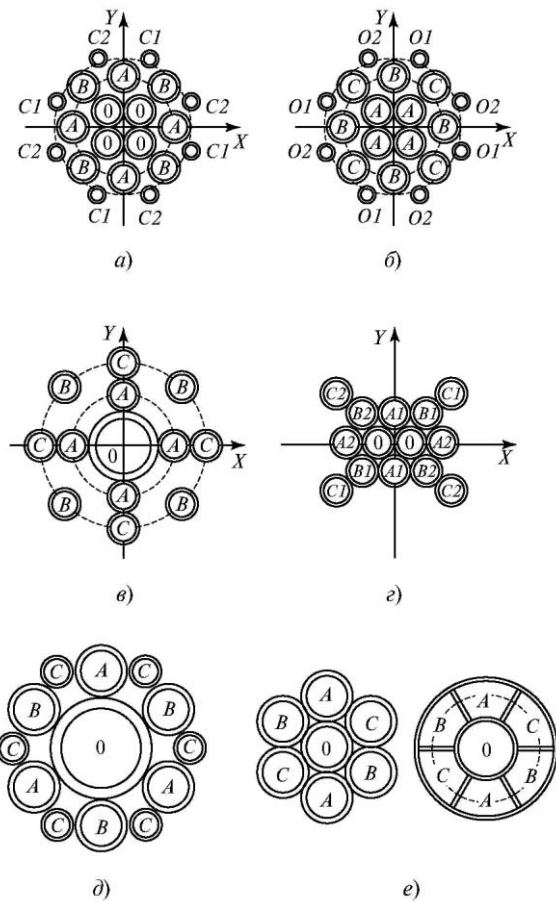


Рис. 5.36. Некоторые конструкции КЛ, построенные по методу максимального сближения осей виртуальных кабелей
вой проводник содержит два кабеля с $R_0 = 15 \text{ см}$, $\alpha_0 = 45^\circ$. Каждая фаза разбита на две полуфазы, состоящие из четырех кабелей. Параметры полуфаз следующие: $A1—R_{A1} = 2,5 \text{ см}$, $\alpha_{A1} = 90^\circ$; $A2—R_{A2} = 4,5 \text{ см}$, $\alpha_{A2} = 0$; $B1—R_{B1} = 3,9 \text{ см}$, $\alpha_{B1} = 39,8^\circ$; $B2—R_{B2} = 3,9 \text{ см}$, $\alpha_{B2} = -39,8^\circ$; $C1—R_{C1} = 7,0 \text{ см}$, $\alpha_{C1} = 39,8^\circ$; $C2—R_{C2} = 7,0 \text{ см}$, $\alpha_{C2} = -39,8^\circ$.

На рис. 5.36, *д* показан пример компоновки КП, содержащего по три кабеля фаз A и B ($N_A = N_B = 3$, $D_A = D_B = 3 \text{ см}$, $R_A = R_B = 4 \text{ см}$, $\alpha_A = -30^\circ$, $\alpha_B = 30^\circ$), шесть кабелей фазы C ($N_C = 6$, $D_C = 1,5 \text{ см}$, $R_C = 4,5 \text{ см}$, $\alpha_C =$

0) и один кабель нулевого проводника ($N_0 = 1, D_0 = 5 \text{ см}, R_0 = 0, \alpha_0 = 0$).

На рис. 5.36, е показан кабельный пучок КЛ, состоящий из двух кабелей в каждой фазе и одного нулевого проводника: $N_A = N_B = N_C = 2, N_0 = 1, D_A = D_B = D_C = D_0 = 5 \text{ см}, R_A = R_B = R_C = 5 \text{ см}, \alpha_A = 90^\circ, \alpha_B = -30^\circ, \alpha_C = 30^\circ$.

В качестве примера рассмотрим КЛ, показанную на рис. 5.36, в. Определим значения напряженности МП, создаваемого при симметричной нагрузке токами фаз кабельной линии в точке D , расположенной на расстоянии $h = 0,5 \text{ м}$ по оси OY от ее центра. Модуль фазного

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2} (H_{Y\Sigma}^2 + H_{X\Sigma}^2) + \frac{1}{2} \sqrt{(H_{Y\Sigma}^2 + H_{X\Sigma}^2)^2 - 4H_{Y\Sigma}^2 H_{X\Sigma}^2 \sin^2(\psi_{Y\Sigma} - \psi_{X\Sigma})}}.$$

Таблица 5.16. Координаты осей виртуальных кабелей $\vec{H}_{ix}, \vec{H}_{iy}, \vec{H}_i, \vec{H}_{X\Sigma}, \vec{H}_{Y\Sigma}$, и \vec{H}_{\max} в точке D с $A = 0,5 \text{ м}$ по оси OY для КЛ на рис. 5.36, в

Фаза	КОВК, x/y , мм	\dot{H}_{ix}	\dot{H}_{iy}	\dot{H}_i	$\dot{H}_{X\Sigma}$	$\dot{H}_{Y\Sigma}$	H_{\max}
		А/м					
A	0/0,020	318,32	0	318,32			0,2122 (0,2122)*
B	0/0,192	$318,19e^{-j120}$	0	$318,19e^{-j120}$			
C	0/-0,192	$318,43e^{j120}$	0	$318,43e^{j120}$	$0,2122e^{j120}$	0	
0	0/0	0	0	0			

* В скобках дано значение напряженности МП, создаваемого в точке D фазными токами ($I = 1000 \text{ А}$), протекающими в виртуальных кабелях фаз.

При модуле фазных токов 1000 А H_{\max} на расстоянии $0,5 \text{ м}$ от центра КЛ по оси OY составляет всего $0,2 \text{ А/м}$.

Если поворачивать кабельный пучок КЛ, показанной на рис. 5.36, в, вокруг ее оси, координаты осей виртуальных аналогов кабелей и напряженность H_{\max} в точке D изменяются. На рис. 5.37 показаны кривые изменения координат осей виртуальных кабелей при изменении угла α поворота кабельного пучка вокруг своего центра от нуля до $\pi/2$.

Как видно из рис. 5.37, расстояния между осями виртуальных аналогов кабелей A, B, C и нулевого (для кабеля нулевого проводника $x_0 = y_0 = 0$) не превышают $0,4 \text{ мм}$ (между осями виртуальных аналогов кабелей B и C максимальное расстояние $2 \times 0,19 \text{ мм}$).

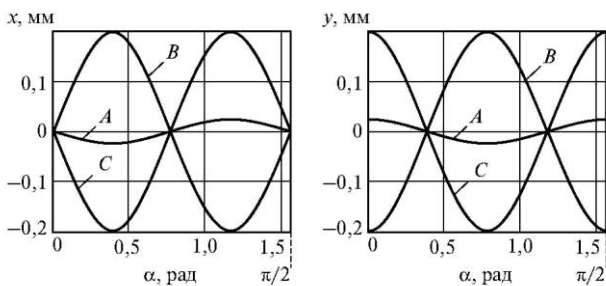


Рис. 5.37. Кривые изменения координат осей виртуальных кабелей при изменении угла α поворота кабельного пучка вокруг своего центра от нуля до $\pi/2$

Модули составляющих \dot{H}_{ix} колеблются в пределах $318,3 \pm 0,122 \text{ А/м}$, а составляющих \dot{H}_{iy} изменяются от $-0,122$ до $+0,122 \text{ А/м}$ (рис. 5.38). Расстояния между осями виртуальных кабелей очень малы, что приводит к резкому снижению составляющих \dot{H}_{ix} и высокой степени компенсации составляющих \dot{H}_{iy} , в результате чего

тока равен 1000 А . В табл. 5.16 приведены результаты расчета координат осей виртуальных аналогов кабелей (КОВК), составляющих $\dot{H}_{ix}, \dot{H}_{iy}$ и результирующей \dot{H}_i напряженности МП, создаваемого каждой фазой, результирующих составляющих $\dot{H}_{X\Sigma}$ и $\dot{H}_{Y\Sigma}$, а также напряженности H_{\max} по большей полуоси эллипса, полученной по выражению [36]:

результирующая напряженность H_{\max} изменяется в очень узких границах: от $0,2121904$ до $0,2121965 \text{ А/м}$ (рис. 5.39).

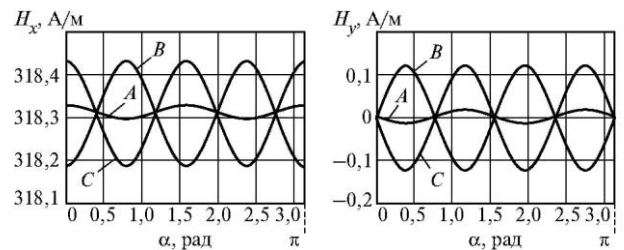


Рис. 5.38. Кривые изменения модулей составляющих \dot{H}_{ix} и \dot{H}_{iy} при изменении угла α поворота кабельного пучка (см. рис. 5.36, в) вокруг своего центра от нуля до π

С уменьшением числа кабелей фаз (нулевого провод-

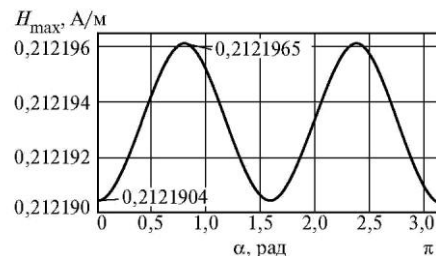


Рис. 5.39. Изменение напряженности H_{\max} при изменении угла α поворота кабельного пучка (см. рис. 5.36, в) вокруг своего центра от нуля до π

ника), входящих в кабельный пучок, расстояния между осями виртуальных аналогов кабелей увеличиваются, что при прочих равных условиях приводит к увеличению значения результирующей напряженности H_{\max} МП, создаваемого токами кабельного пучка.

Заменим поочередно КЛ, отходящую от трансформатора 10/0,4 кВ, на КЛ, состоящие из одного КП каждая, со схемами компоновки, приведенными на рис. 5.36.

На рис. 5.40 показано распределение напряженности H_{\max} МП, создаваемого на поверхности пола жилого помещения над ТП токами КЛ с компоновкой КП по схемам рис. 5.36, *a* и *б*: кривые *AI* и *BI* — симметричный ($I_{\phi} = 1800$ А) и кривые *AI'* и *BI'* — несимметричный режим нагрузки соответственно. Для компоновок по схемам рис. 5.36, *a* и *б* значение H_{\max} не превышает 0,0043 и 0,0040 А/м при симметричном и 0,0027 и 0,0020 А/м при несимметричном режиме нагрузки соответственно.

В сравнении с КЛ, показанной на рис. 5.32, КЛ по рис. 5.36, *a* и *б* в симметричном режиме (см. рис. 5.33, кривая *I*) создают более чем в 1000 раз меньшие значения H_{\max} .

На рис. 5.41, *a* показано распределение напряженности H_{\max} МП, создаваемого на поверхности пола жилого помещения токами КЛ, скомпонованной по схеме рис. 5.36, *в*, на рис. 5.41, *б* — по схеме рис. 5.36, *з*, на рис. 5.42, *a* — по схеме рис. 5.36, *д* и на рис. 5.42, *б* — по схеме рис. 5.36, *е*, в симметричном (кривые *I*) и несимметричном (кривые *I'*) режиме. На рис. 5.41, *б* кривые *XI* и *XI'* соответствуют перпендикулярному положению по-

верхности пола жилого помещения оси *OX*, а кривые *YI* и *YI'* — оси *OY* кабельного пучка рис. 5.36, *з*.

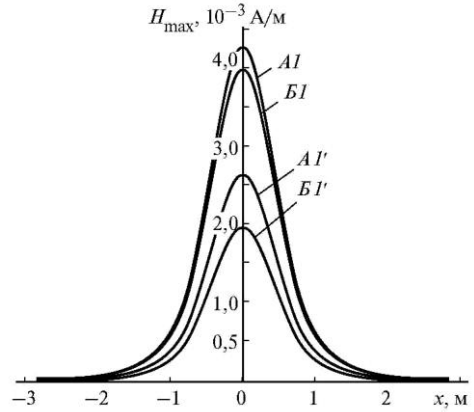


Рис. 5.40. Распределение напряженности H_{\max} МП, создаваемого на поверхности пола жилого помещения над ТП токами КЛ, скомпонованной по схемам рис. 5.36, *a* и *б*: кривые *AI* и *BI* — симметричный и кривые *AI'* и *BI'* — несимметричный режимы нагрузки

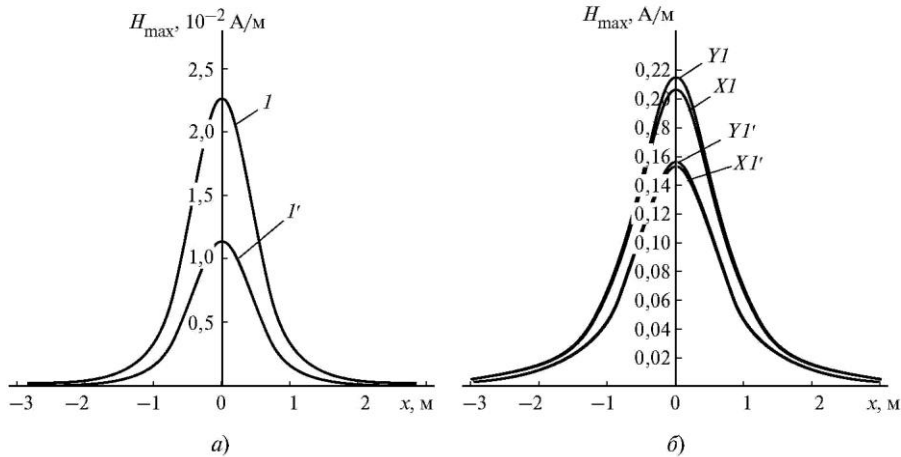


Рис. 5.41. Распределение напряженности H_{\max} МП, создаваемого на поверхности пола жилого помещения токами КЛ, скомпонованной по схеме рис. 5.36, *в* (*a*) и по схеме рис. 5.36, *з* (*б*)

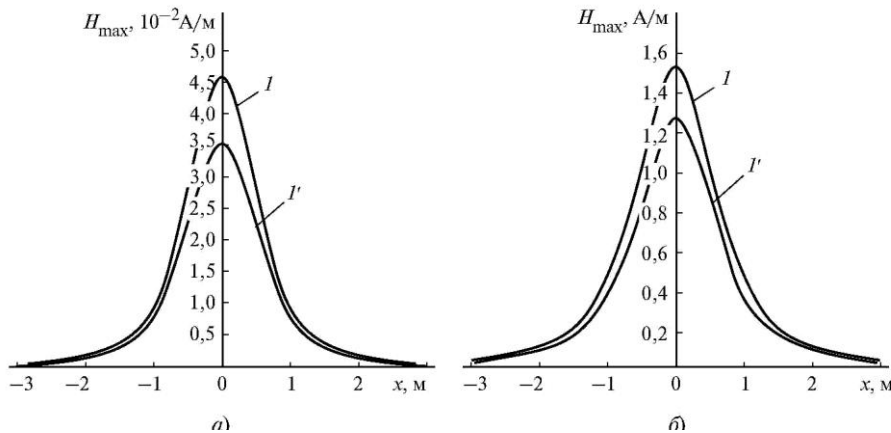


Рис. 5.42. Распределение напряженности H_{\max} МП, создаваемого на поверхности пола жилого помещения токами КЛ, скомпонованной по схеме рис. 5.36, *д* (*a*) и по схеме рис. 5.36, *е* (*б*)

С уменьшением числа кабелей, составляющих фазы и нулевой проводник КЛ, напряженность МП увеличивается

ется с $(4,0...4,3)10^{-3}$ А/м (рис. 5.40, симметричный режим нагрузки) до 1,53 А/м (рис. 5.42, симметричный режим нагрузки).

В отличие от КЛ, скомпонованных по принципу максимального сближения осей самих кабелей фаз и нулевого проводника, КЛ, построенные по принципу максимального сближения осей виртуальных отображений этих кабелей, могут проходить по наружным стенам и внутри межэтажных перекрытий.

Филиалом ОАО «ФСК ЕЭС» — МЭС Центра совместно с ГУ НИИ МТ РА М Н в 2006 г. разработаны принципы построения и конструкции электромагнитных экранов для реакторов без ферромагнитного сердечника, а также конструкции реакторов без ферромагнитного сердечника, содержащих экранирующие обмотки, позволяющие уменьшить интенсивность создаваемого реакторами МП в 5...50 раз.

Компоновка КЛ с размещением осей кабелей в ка-

бельных пучках по сторонам квадрата (см. рис. 5.32) внедрена при проектировании и строительстве ТП 10/0,4 кВ для жилого комплекса.

На КЛ, кабельные пучки которых скомпонованы по принципу сближения осей виртуальных кабелей, получен патент РФ на изобретение № 2273934 от 10 апреля 2006 г. [11].

На конструкции электромагнитных экранов для реакторов без ферромагнитного сердечника, а также на конструкции реакторов без ферромагнитного сердечника, содержащих экранирующие обмотки, поданы заявки на патент РФ.

Разработаны алгоритмы, составлены программы и получены свидетельства об официальной регистрации программ расчета ЭП линий электропередачи, электромагнитных параметров ВЛ СВН и МП, создаваемых многослойными и многорядными реакторами без ферромагнитного сердечника [37, 38].