

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПО ИХ ТРАССАМ

Кадомская К.П., Степанов И.М.

В статье доказывается справедливость разработанного аналитического метода расчета магнитного поля по трассам воздушных линий высокого напряжения. Также исследуются оптимальные конструкции воздушных линий электропередачи с точки зрения минимизации магнитных полей по их трассам. Кроме того, произведены расчеты индуктированных токов в теле человека при воздействии магнитных полей промышленной частоты в случае ремонта воздушных линий электропередач под напряжением.

Введение.

Уже не одно десятилетие в России и за рубежом ведутся дискуссии о степени влияния магнитного поля промышленной частоты на здоровье человека. В различной технической литературе изложено два диаметрально противоположных взгляда ученых и специалистов на этот вопрос. По мнению одних авторов существующие нормы предельных значений напряженности магнитных полей, воздействующих на человека, достаточны и каких-либо причин для их пересмотра нет. Вместе с тем в различных публикациях периодически появляются сообщения о повышенном риске онкологических заболеваний, в частности заболеваний детей лейкемией при нахождении в течение длительного времени вблизи источника магнитного поля, в частности вблизи высоковольтных линий электропередач. По мнению других авторов, существующие нормативы являются слишком завышенными, либо недостаточными для оценки степени влияния электромагнитного поля на организм человека. Эти противоречия возникают вследствие отсутствия комплексных медико-биологических исследований воздействия магнитных полей промышленной частоты на организм человека.

Сложность этих исследований заключается в том, что человек не ощущает воздействие магнитного поля, в отличие, например, от воздействия электрического поля. В связи с этим все проводимые исследования сведены к рассмотрению предполагаемых механизмов воздействия магнитного поля. Однако, действие магнитного поля на человека может носить кумулятивный характер, то есть изменения в организме человека происходят не мгновенно, а накапливаются со временем и могут сказаться на последующих поколениях.

Основным документом, регламентирующим предельные воздействия электромагнитных полей на организм человека, являются «Санитарные правила и нормативы» изданные в 2003 году [1]. Согласно этому документу допускается воздействие магнитного поля промышленной частоты напряженностью 80 А/м в течение рабочего дня, то есть в течение 8 часов (при общем воздействии, т.е. без детализации, связанной с направлением вектора напряженности магнитного поля и различием в уровнях воздействия на различные органы человеческого тела). Следует отметить, что в предыдущем издании СанПиН [2], нормируемое значение напряженности магнитного поля промышленной частоты при общем воздействии составляло 3.2 кА/м. Одним из последних документов, в которых ограничиваются предельные значения вредных воздействий промышленных установок на организм человека, является [3]. Предельное значение вредных факторов вне санитарно-защитной зоны промышленной установки, в том числе и электромагнитных полей

промышленной частоты, согласно этому документу не должно превышать 10% от нормы СанПиН. Таким образом, очевидна тенденция к снижению предельно-допустимых нормативов воздействия магнитных полей. И если ранее без проведения каких-либо расчетов, можно было заранее говорить о том, что магнитные поля промышленной частоты на большей части электроэнергетических объектов не превышают нормы, то сегодня этого сказать нельзя.

Одним из наиболее мощных источников магнитных полей промышленной частоты являются воздушные линии высокого напряжения (ВЛ ВН). В связи с этим встает вопрос как об оптимальных методах расчета электромагнитных полей, так и о конструктивных мерах, позволяющих снизить их напряженность.

Расчет напряженности магнитных полей под воздушными линиями высокого напряжения можно производить, применяя два альтернативных метода: аналитический и численный. Основное преимущество аналитического метода – его простота. Однако, на точность результатов расчета с помощью аналитического метода могут существенно влиять допущения, принятые при его разработке. В качестве альтернативы аналитическим методам выступают разнообразные численные методы расчета, в частности, получивший в последнее время широкое распространение метод конечных элементов. При современном развитии вычислительной техники точность расчета магнитного поля методом конечных элементов очень высока. Главным же недостатком численных методов является их трудоемкость.

Существует несколько путей снижения напряженности магнитных полей по трассам воздушных линий высокого напряжения. Во-первых, увеличение габарита ВЛ до земли. Этот способ самый простой, но требует больших затрат, связанных с увеличением высоты опор ВЛ ВН. Во-вторых, это симметрирование канала передачи электроэнергии, то есть расположение проводов ВЛ ВН в углах равностороннего треугольника. Этот метод является наиболее предпочтительным, так как путем сближения фаз и симметричного их расположения можно добиться не только значительного снижения интенсивности магнитных полей по трассам ВЛ, но и существенного увеличения их пропускной способности. В-третьих, под многоцепными линиями электропередачи существенно уменьшить напряженность магнитного поля можно путем оптимальной фазировки их проводов.

В последние годы все большее внимание уделяется такому механизму воздействия магнитного поля на организм человека, как индуктированные в нем токи. Величины индуктированных токов зависят от частоты магнитного поля, направления вектора и величины модуля напряженности магнитного поля, проводимости тканей и формы тела человека. При всестороннем изучении этого механизма можно оценить степень влияния каждого из этих факторов на значение индуктированных токов, а значит и степень влияния магнитного поля на определенные части тела человека. В частности оценка интенсивности воздействия магнитных полей на организм человека, посредством расчета индуктированных токов вполне применима при ремонте ВЛ ВН под напряжением. При проведении таких ремонтов человек находится в непосредственной близости от токоведущих проводов, поэтому определенное расположение человека под проводами ВЛ может существенно влиять на плотности индуктированных в его теле токов.

Методика расчета электромагнитного поля по трассе ВЛ ВН.

При разработке аналитической методики расчета МП ставилась задача при достаточной точности получить относительно простые выражения, позволяющие показать влияние конструкции ВЛ на интенсивность магнитного поля по её трассе. Поэтому предварительно была показана правомочность следующих допущений: не учета эффекта близости в системе проводов ВЛ и не учета поля, генерируемого токами в земле. Первое допущение было проверено на основе аналитического решения соответствующей задачи, второе - на основе сравнения результатов расчета по разработанной методике с результатами, полученными путем численного моделирования уравнений в частных производных, учитывающих поля, инициируемые токами в земле.

Плотность тока в проводе, расположенном вблизи другого провода, моделируемого в виде длинной нити, записывается в виде:

$$J(r, \varphi) = -\frac{kI}{2\pi a} \frac{I_0(kr)}{I_1(ka)} - \frac{kI}{\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^n}{b^n} \frac{I_n(kr)}{I_{n-1}(kr)} \cos n\varphi, \quad (1)$$

где a – радиус провода, b – расстояние между осями двух проводов, $k = \sqrt{j\omega\mu_0\gamma}$ – комплексное волновое число, γ – проводимость материала провода, I_n – модифицированная функция Бесселя первого рода n -го порядка.

Влияние эффекта близости, обуславливающего неравномерное распределение плотности тока по периметру провода, при горизонтальной подвеске проводов на опорах ВЛ 110-1150 кВ отражено в табл.1. В случае подвески расщепленной фазы плотность тока определялась на поверхности эквивалентного провода, радиус которого определялся как:

$r_3 = \sqrt[n]{r_0 r_p^{n-1}}$, где r_0 – радиус составляющей провода, $r_p = \frac{s}{\sin(\pi/n)}$ – радиус расщепления фазы, состоящей из n составляющих, расположенных симметрично относительно центра фазы на расстоянии друг от друга s (шаг расщепления).

Таблица 1

Максимальное процентное содержание в плотности тока на внешнем периметре провода составляющей, обусловленной эффектом близости

Параметры фазы	$U_{ном}$, кВ				
	110	220	500	750	1150
r_0 , мм	10.53	12	15.3	11.2	12.6
n	1	1	3	4	8
s , см	-	-	40	60	40
$S_{фф}$, м	5.0	5.6	11.3	14.5	22.4
$J_{6л}/J \cdot 100\%$	4.12	4.26	2.26	3.3	3.3

Из таблицы видно, что неравномерность распределения плотности тока по периметру провода, обусловленная эффектом близости, не превышает 2.3...4.3%. Столь небольшая неравномерность плотности тока не принесет сколь-нибудь значимой погрешности при определении напряженности магнитного поля по трассе ВЛ над поверхностью земли. Влияние поля, инициируемого токами в земле (за счет естественной несимметрии подвески проводов ВЛ относительно земли), проиллюстрировано в табл.2. В таблице приведены различия в % напряженностей магнитного поля, рассчитанных на расстоянии 2-х м от поверхности земли, без учета поля, инициируемого токами в земле, по приведенной ниже методике и при учете этого поля в случае различных удельных проводимостях грунта (численные расчеты проведены с помощью пакета COMSOL).

Из таблицы видно, что учет токов, протекающих по земле, практически не влияет на интенсивность магнитного поля над поверхностью земли. В разработанной методике не учитывались также поперечные токи в земле, что, как показано Карсоном [4], не вносит существенных погрешностей для частот до 1 МГц и удельного сопротивления земли не более 100 Ом*м. При определении напряженности магнитного поля не учитывалось также влияние постороннего тела на поверхности земли (например, человека). При приведенных выше допущениях напряженность ЭМ поля под ВЛ на некоторой высоте над поверхностью земли может быть определено по выражению (рис.1):

Составляющие вектора напряженности электромагнитного поля, инициируемого током в i -ом проводе, определяются как:

$$H_{y_i} = H_i \cos \varphi_i, \quad H_{z_i} = H_i \sin \varphi_i, \quad \operatorname{tg} \varphi_i = \frac{h_i - z}{y_i}, \quad \dot{I}_i = \frac{I_i}{2\pi \sqrt{(h_i - z)^2 + y_i^2}}. \quad (2)$$

Модуль напряженности электромагнитного поля, инициируемого токами в n проводах, будет:

$$H = \sqrt{(H_{y1} + H_{y2} + \dots + H_{yn})^2 + (H_{z1} + H_{z2} + \dots + H_{zn})^2} . \quad (3)$$

Таблица 2

Влияние удельного сопротивления земли на напряженность ЭМП на высоте 2-х метров над поверхностью земли

ρ , Ом·м	Максимальное значение напряженности, Δ , %	Напряженность на расстоянии 30 м от оси опоры, Δ , %	Напряженность на оси опоры, Δ , %
100	$2.84 \cdot 10^{-2}$	$6.08 \cdot 10^{-2}$	$4.07 \cdot 10^{-2}$
500	$7.1 \cdot 10^{-3}$	$1.01 \cdot 10^{-2}$	$2.44 \cdot 10^{-2}$
1000	$1.42 \cdot 10^{-2}$	$2.03 \cdot 10^{-2}$	$1.63 \cdot 10^{-2}$
∞	$2.13 \cdot 10^{-2}$	$3.04 \cdot 10^{-2}$	$4.89 \cdot 10^{-2}$

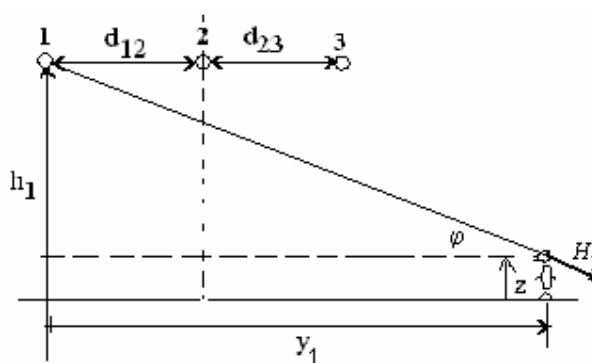


Рис.1 К пояснению примененных обозначений

Меры снижения интенсивности магнитных полей по трассам ВЛ ВН.

В настоящее время в России для передачи больших мощностей на дальние расстояния используются ВЛ ВН 500 и 750 кВ традиционного исполнения с горизонтальным расположением проводов фаз и металлическими конструкциями в окне опоры (рис. 2). Такая конструкция опор линий электропередачи не позволяет уменьшить междуфазные расстояния. Вместе с тем сокращение междуфазных расстояний является одной из самых действенных мер, уменьшающих интенсивность электромагнитных полей по трассам ВЛ ВН. Такое сокращение может быть достигнуто, в частности, при расположении проводов фаз линии электропередачи в вершинах треугольника.

Эффект уменьшения результирующего магнитного поля в таких конструкциях достигается за счет взаимной компенсации магнитных полей, инициируемых токами в разных фазах линии. Одной из наиболее прогрессивных конструкций линий является конструкция линии повышенной пропускной способности, сооруженная в Швеции (рис. 3).

Междуфазные расстояния на этой линии при расположении фаз в вершинах правильного треугольника (оптимальное расположение) уменьшены до 5 м (междуфазные расстояния линии 500 кВ традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз 11.5 и 23 м).

Добиться снижения значений напряженностей магнитных и электрических полей по трассам многоцепных ВЛ ВЛ (рис.4). можно счет выбора оптимальной «фазировки» напряжения на проводах линии.

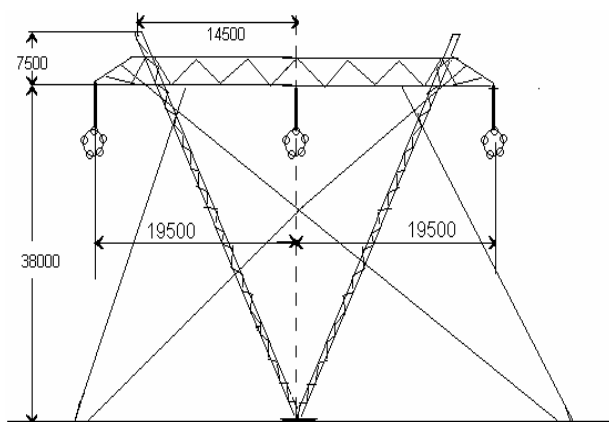


Рис.2 Опора ВЛ 750 кВ традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз

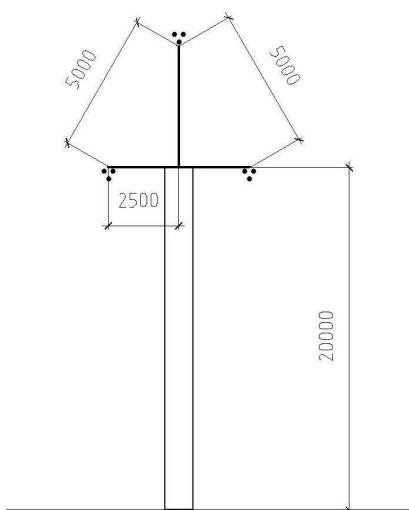


Рис.3 Эскиз опоры линии 420 кВ повышенной пропускной способности (Швеция)

Междуфазные расстояния на этой линии при расположении фаз в вершинах правильного треугольника (оптимальное расположение) уменьшены до 5 м (междуфазные расстояния линии 500 кВ традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз 11.5 и 23 м).

Добиться снижения значений напряженностей магнитных и электрических полей по трассам многоцепных ВЛ ВЛ (рис.4). можно счет выбора оптимальной «фазировки» напряжения на проводах линии.

В настоящее время максимальное количество цепей на многоцепных ВЛ ВН не превышает четырех. Одной из таких линий, построенных в последние годы, является четырехцепная ВЛ 500 кВ, возведенная в провинции Гуангдонг в Китае [4].

Авторами настоящей статьи были исследованы магнитные поля ВЛ ВН следующих конструкций: ВЛ 500 и 750 кВ традиционного исполнения с горизонтальной подвеской фаз, двухцепной линии 220 кВ (Россия), трехцепной линии 500 кВ (Саяно-Шушенская ГЭС- ОРУ 500 кВ), четырехцепной линии 500 кВ (Китай) и линии повышенной пропускной способности 420 кВ (Швеция). Расчеты производились при помощи изложенной выше аналитической методики.

Расчет магнитных полей производился при протекании тока, обусловленного передачей по ВЛ натуральной мощности. Характеристики поля определялись на различном расстоянии от оси линии вплоть до нормируемого расстояния в Европе - 30 м.. Графики изменения

напряженностей магнитных полей в направлении, перпендикулярном трассам ВЛ, по трассам одноцепных линии 500 кВ и 420 кВ (рис.3) приведены на рис. 5.

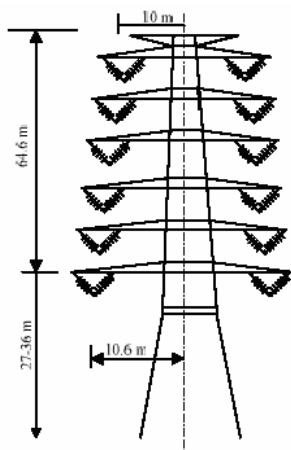


Рис. 4. Опора четырехцепной линии 500 кВ (Китай)

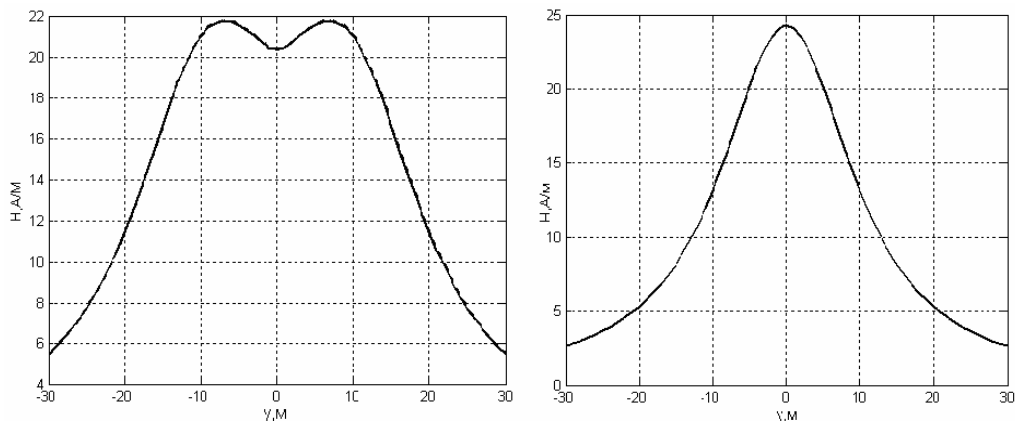


Рис.5 Графики напряженности электромагнитного поля по трассам одноцепной ВЛ 500 кВ традиционного исполнения (слева) и ВЛ 420 кВ повышенной пропускной способности (справа)

Максимальные значения напряженностей магнитных полей и соответствующие значения на нормируемом расстоянии сведены в табл.3. В этой же таблице приведены натуральные мощности и номинальные токи в фазах рассмотренных ВЛ.

Как видно из таблицы, минимальные значения напряженностей магнитного поля на нормируемом расстоянии наблюдаются по трассе линии повышенной пропускной способности, не смотря на то, что значение расчетного тока в этой линии максимально, а также по трассе трехцепной ВЛ. В случае четырехцепной линии достаточно большое значение напряженности магнитного поля на нормируемом расстоянии обусловлено малыми габаритами от нижних проводов до земли. Следует отметить, что в таблице приведены значения напряженностей магнитных полей многоцепных линий при фазировке напряжения на их проводах, отвечающих минимальному значению напряженности. Оптимальная фазировка позволила снизить значение напряженностей магнитных полей по трассам многоцепных ВЛ ВН в среднем в 1,6 раза, по сравнению с фазировкой, принятой в эксплуатации.

В табл.3 были приведены значения напряженностей электромагнитного поля под ВЛ напряжением 420 кВ -750 кВ различного конструктивного исполнения. Вместе с тем самой распространенной конструкцией многоцепной ВЛ ВН, по трассе которой напряженность магнитного поля достаточно высока, в России являются линии 220 кВ. Влияние фазировки

проводов на интенсивность магнитного поля по трассе ВЛ проиллюстрировано на примере поля под стандартной опорой ВЛ 220 кВ (рис.6). На рис.6 показаны оптимальная и принятая в эксплуатации фазировки напряжения на проводах линии. Как видно они отличаются лишь перефазировкой двух фаз. Таким образом, поменяв на двухцепной линии электропередачи, находящейся в эксплуатации, фазировку двух проводов, можно снизить напряженность электромагнитного поля практически в 2 раза.

Таблица 3

Напряженности магнитных полей по трассам рассмотренных конструкций ВЛ

Наименование линии	Натуральная мощность линии ($P_{\text{нат}}$), МВт	Расчетный ток (I), А	Максимальное значение напряженности магнитного поля, А/м	Значение напряженности магнитного поля на расстоянии 30 м, А/м
500 кВ, традиционного исполнения	915	1057	21,8	5,4
750 кВ, традиционного исполнения	1968	1515	15,1	9,9
420 кВ, повышенной пропускной способности	1855	2550	24,3	2,6
500 кВ, трехцепная	3660	1057	3,3	1,77
500 кВ, четырехцепная	2776	1065	17,8	5,5

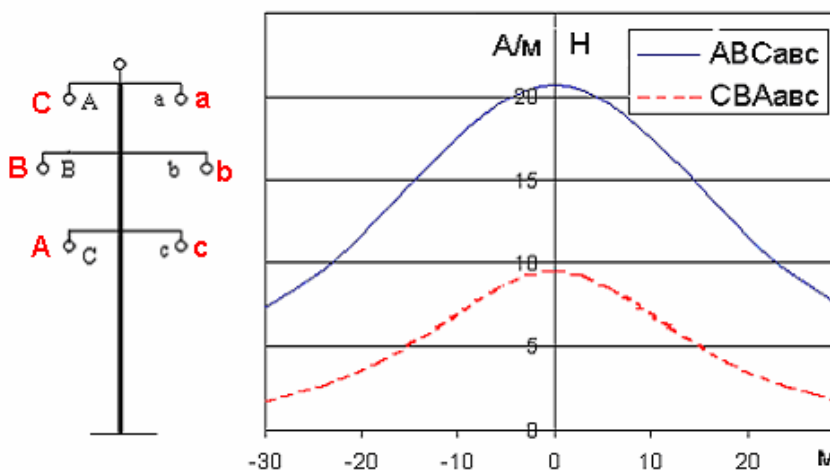


Рис.6 Эскиз двухцепной ВЛ 220 кВ и распределение напряженности магнитного поля в направлении, перпендикулярном оси ВЛ

Оценка воздействия электромагнитного поля на персонал при ремонте ВЛ под напряжением.

Как уже упоминалось выше, одним из возможных механизмов воздействия магнитного поля промышленной частоты на организм человека являются индуцированные токи. Средняя проводимость тканей человека, согласно [6], составляет 0.04 См/м. Тело человека неоднородно по своей геометрической и тканевой структуре. Таким образом, тело человека

представляет собой достаточно сложную структуру, что не позволяет без внесения существенных допущений применять аналитические методы расчета индуцированных токов. Поэтому эта задача решалась численно путем решения фундаментальных уравнений Максвелла с помощью метода конечных элементов.

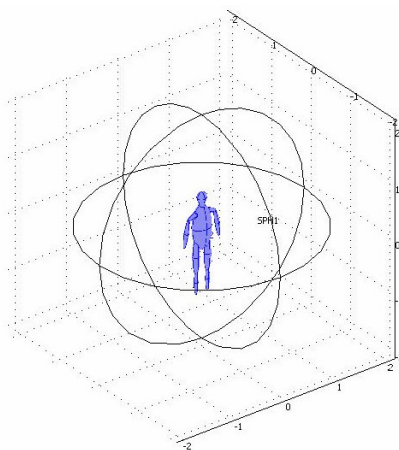


Рис.7 Модель тела человека внутри расчетной области

Значение напряженности электромагнитного поля увеличивается по мере приближения к проводам ВЛ, поэтому при ремонте под напряжением и нахождении в непосредственной близости от проводов ВЛ значения плотностей токов, индуцированных в теле человека, существенно превышают значения, возникающие при воздействии нормируемой в настоящее время напряженности электромагнитного поля 80 А/м. В качестве расчетных далее рассмотрены три расположения человека относительно проводов ВЛ при ремонте под напряжением. Во-первых, расположение человека перпендикулярно проводам на расстоянии 0.5 м от провода ВЛ 500 кВ традиционного исполнения. Это положение человек занимает при подъеме на провод ВЛ и при проведении работ под проводом. Во-вторых, расположение человека параллельно проводам на расстоянии 0.5 м от них. Это положение человек занимает при проведении ремонта на расщепленной фазе ВЛ 500 кВ и продвижении по ней на специальной каталке. В-третьих, расположение человека внутри расщепленной фазы ВЛ 750 кВ. Это положение человек занимает при продвижении внутри расщепленной фазы ВЛ, причем такое расположение человека характерно только при проведении ремонта на ВЛ 750 кВ и более высоких классов напряжения, так как только на этих ВЛ габариты расщепленной фазы позволяют человеку находиться внутри фазы.

Все варианты воздействия электромагнитных полей ВЛ рассчитаны при моделировании реального числа проводов ВЛ, то есть с учетом расщепленности всех трех фаз. Графики распределения плотности индуцированных токов по высоте человека для всех вариантов воздействия при ремонте под напряжением и их сравнение с нормированным воздействием магнитного поля напряженностью 80 А/м вертикального направления, показаны на рис. 8-10.

Согласно полученным результатам, максимальное значение индуцированных токов внутри тела человека наблюдается при его расположении внутри фазы ВЛ 750 кВ. Плотности индуцированных токов при этом воздействии намного превышают токи при нормированном воздействии.

Плотность индуцированных токов в теле человека при его перпендикулярном расположении существенно меньше, чем при параллельном расположении человека относительно провода ремонтируемой линии. Причем при перпендикулярном расположении человека, значения индуцированных токов, как правило, не превышают соответствующих значений при нормируемом воздействии напряженности магнитного поля. Это обстоятельство можно объяснить тем, что напряженность магнитного поля резко уменьшается по мере удаления от провода. При перпендикулярном же расположении

человека относительно провода на нижнюю часть его тела воздействует существенно меньшая напряженность электромагнитного поля, чем на верхнюю. При параллельном же расположении человека относительно провода все его тело подвергается воздействию большой напряженности магнитного поля.

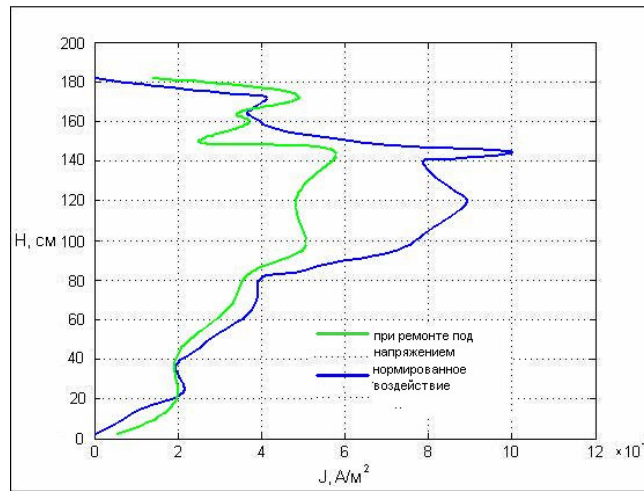


Рис. 8. Распределение индуктированной плотности токов при ремонте под напряжением (расположением человека перпендикулярно проводам) и нормированном воздействии 80 А/м

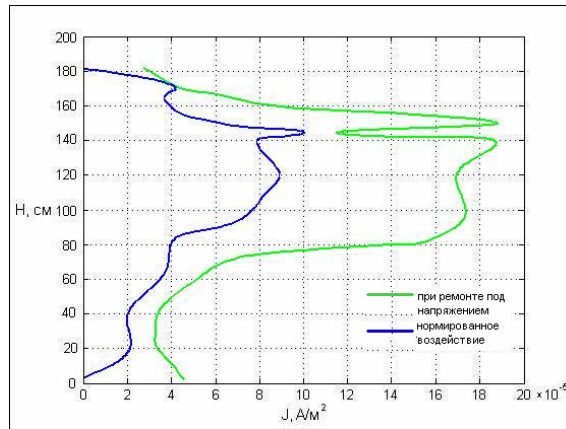


Рис. 9. Распределение индуктированной плотности токов при ремонте под напряжением (расположением человека параллельно проводам) и нормированном воздействии 80 А/м

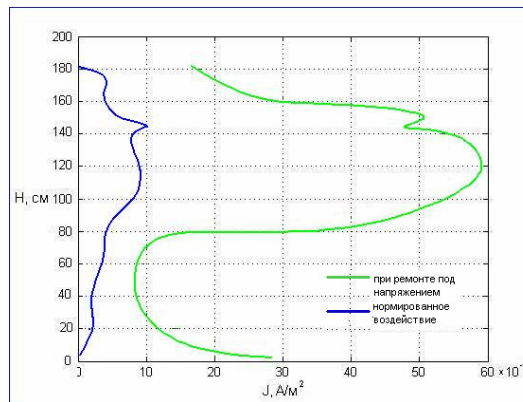


Рис. 10. Распределение индуктированной плотности токов при ремонте под напряжением (расположением человека внутри фазы 750 кВ) и нормированном воздействии 80 А/м

Таким образом, при ремонте под напряжением, максимальное значение индуцированных плотностей токов наблюдается при нахождении человека внутри расщепленной фазы, минимальное – при перпендикулярном его расположении относительно фазных проводов. Поэтому при ремонте ВЛ под напряжением можно рекомендовать использование приспособлений для ремонта, которые бы позволяли человеку в течение максимального времени находиться именно перпендикулярно проводам ВЛ и минимизировать по времени работы, при которых человек находится параллельно проводам либо внутри фаз. Нельзя забывать также и о такой радикальной мере, как снижение нагрузки ВЛ при её ремонте под напряжением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании ВЛ ВН, трассы которых проходит вблизи населенных пунктов или других зон продолжительного нахождения людей (например, зоны огородов, детских площадок и т.п.), необходимо в состав проектов включать анализ электромагнитной обстановки по трассе проектируемой ВЛ, в частности рассматривать значение напряженности электромагнитного поля по трассе ВЛ.

2. Наиболее неблагоприятной конструкцией с точки зрения интенсивностей электрического и электромагнитных полей по трассам ВЛ является конструкция на порталных опорах с металлом в окне опоры и с горизонтальным расположением фазных проводов. Для взаимной компенсации электромагнитных полей целесообразно фазные провода располагать в вершинах правильного треугольника.

3. Интенсивности магнитных полей могут быть существенно снижены (в 1.5-3.5) раза при соответствующей фазировке фазных проводов цепей многоцепных ВЛ, что не потребует изменения конструкции двухцепных опор.

4. Интенсивность воздействия магнитного поля промышленной частоты на организм человека и опасность этого воздействия необходимо оценивать не только при помощи значения напряженности магнитного поля, но и посредством оценки индуцированных токов в теле человека, которые зависят не только от модуля вектора напряженности электромагнитного поля, но и от его направления по отношению к человеку.

5. Индуцированные токи, возникающие внутри тела человека при проведении ремонта ВЛ под напряжением, могут существенно различаться в зависимости от его расположения относительно токоведущих проводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] СанПиН 2.2.4.1191—03. Гл. 3.4: Предельно допустимые уровни электромагнитного поля частотой 50 Гц
- [2] Санитарные нормы и правила СанПиН 2.2.4.723-98, издание официальное.-Минздрав России.-1999.
- [3] Постановление главного санитарного врача РФ №74 от 25 сентября 2007 г. о введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов"
- [4]. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return// Bell Syst. Techn. Journal.- 1926.-v.5..
- [5] Rong Zeng, Ben Niu, Jinliang He. Lightning performance analysis of four-circuit 500kV transmission line based on EMTDC-Embedded model of Insulators.- Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China // International symposium of high voltage engineering, Tsinghua university, Beijing, China.-2005.
- [6] Sharer A. Mahmoud, A. H. Gamza. Application of analytical and numerical methods to evaluate induced currents in human bodies by ELF magnetic fields. –Egyptian electricity holding company, Faculty of engineering of Shoubra// International symposium of high voltage engineering, Tsinghua university, Beijing, China.-2005.-A-09