

Министерство образования Российской Федерации  
Ивановский государственный энергетический университет

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**ТРУДЫ ИГЭУ**

**Выпуск 4**

*Под редакцией  
доктора техн. наук, профессора В.А. Шуина,  
доктора техн. наук, профессора М.Ш. Мисриханова*

**Москва  
Энергоатомиздат  
2001**

**УДК 621.311**

**ББК 31.37**

**П 42**

Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 432 с.

ISBN 5-283-02587-X

Приведены результаты научных исследований и разработок, выполненных ИГЭУ, МЭС Центра РАО «ЕЭС России» и других организаций по вопросам расчета и моделирования установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетических системах и их элементах, расчета и моделирования электромагнитных полей и исследования влияния линий электропередачи сверхвысокого напряжения на экологию окружающей среды, эксплуатации и диагностики электрооборудования ЛЭП и подстанций, совершенствования принципов выполнения и устройств релейной защиты и автоматики электрических сетей.

Книга рассчитана на специалистов-электроэнергетиков, работающих в области эксплуатации, разработки и проектирования электрических сетей и систем их автоматического управления.

**Редакционная коллегия:**

д-р техн. наук, проф. В.Н. Нуждин, д-р техн. наук, проф. М.Ш. Мисриханов,  
д-р техн. наук, проф. Б.М. Ларин, д-р техн. наук, проф. А.В. Мошкарин,  
д-р техн. наук, проф. В.А. Савельев, д-р техн. наук, проф. В.А. Строев,  
д-р техн. наук, проф. С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук, проф. В.А. Шуин,  
д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов, д-р техн. наук, проф. Ю.Я. Щелькалов,  
д-р техн. наук, проф. И.В. Якимец.

ISBN 5-283-02587-X

© Авторы, 2001

УДК 621.315.1

## Тросовые экраны и их применение на ВЛ-500 кВ

*Дикой В.П., Токарский А.Ю., кандидаты техн. наук,  
Рубцова Н.Б., д-р биол. наук, Красин О.В., инж.*

**Введение.** Расширение городов и посёлков часто приводит к необходимости сближения зон жилой застройки с трассами уже существующих высоковольтных воздушных линий (ВВЛ) электропередачи. Возникает необходимость в одном из следующих мероприятий: переносе ВЛ из зон застройки, увеличении высоты подвеса проводов фаз линий (т.е. увеличении высоты опор), переоборудовании нескольких параллельных одноцепных ВВЛ в многоцепные, переводе ВЛ на более низкое напряжение или на кабельные линии и т.д. Каждое из них требует больших капитальных затрат и не всегда по ряду причин может быть выполнено. Поэтому используются экраны, снижающие уровни напряжённости электрических и магнитных полей (ЭП и МП), создаваемых ВВЛ. В статье рассмотрены три типа экранов для ЭП: пассивные тросовые экраны (ТЭ), активные ТЭ и резонансные ТЭ [1].

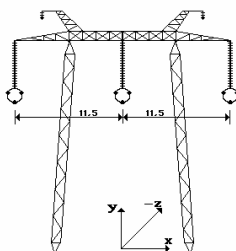


Рис.1. Промежуточная опора ВЛ-500 кВ

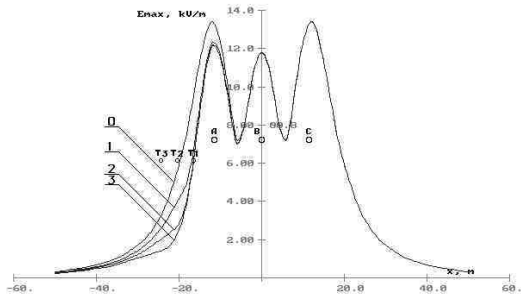


Рис. 2. Распределение  $E_{\max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли при пассивных ТЭ

Экранирование электрических полей ВЛ с помощью пассивных тросовых экранов. Для экранирования ЭП применяются заземлённые (пассивные) тросовые экраны. На примере ВЛ-500 кВ (рис.1) рассмотрим эффективность применения таких экранов. На рис.2 показана картина распределения напряжённости ЭП в поперечном сечении линии на уровне 1,8 м от поверхности земли при экранировании ЭП с левой

Экранирование электрических полей ВЛ с помощью пассивных тросовых экранов. Для экранирования ЭП применяются заземлённые (пассивные) тросовые экраны. На примере ВЛ-500 кВ (рис.1) рассмотрим эффективность применения таких экранов. На рис.2 показана картина распределения напряжённости ЭП в поперечном сечении линии на уровне 1,8 м от поверхности земли при экранировании ЭП с левой

стороны от оси линии с помощью горизонтально размещённых относительно друг друга ТЭ, установленных на высоте 5 м над поверхностью земли. Рассмотрим три варианта экранирования ЭП с помощью пассивных ТЭ (ПТЭ) (см. рис. 2): с помощью одного ТЭ, установленного на расстоянии 16,5 м от оси линии (кривая 1), с помощью двух ТЭ, установленных на расстояниях 16,5 и 19,5 м от оси линии (кривая 2) и с помощью трёх ПТЭ, установленных на расстояниях 16,5; 19,5 и 22,5 м от оси линии (кривая 3). Оси ТЭ параллельны оси ВЛ. Кривая «0» показывает распределение напряжённости ЭП на том же уровне в поперечном сечении ВЛ-500 кВ, но без ТЭ. Как видно из рис. 2, изменения  $E_{max}$  с правой стороны от оси линии при установке ТЭ практически нет.

Возможно горизонтально-вертикальное расположение пассивных ТЭ, когда под горизонтально расположенным тросовым экраном размещаются вертикально ещё два ТЭ на высоте 4 м и на высоте 3 м. На рис. 3 показана картина распределения  $E_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли для смешанного расположения ТЭ. В этом случае на расстоянии 18 м от оси линии напряжённость ЭП в результате экранирования снижается на 6 кВ/м, т.е. экранирование более эффективно.

**Экранирование электрических полей ВЛ с помощью активных тросовых экранов.** ТЭ могут быть активными (на тросовые экраны подаётся напряжение). Вернёмся к ВЛ-500 кВ (габарит «нижний провод фазы–земля» 8 м) с применением одного активного ТЭ, установленного на высоте 7 м от поверхности земли на расстоянии 18,5 м от оси ВЛ-500 кВ. На ТЭ подаётся напряжение  $\dot{U}_\phi = 63,5 e^{-j180}$  кВ ( $U_\phi = 110$  кВ). На рис. 4 дана картина распределения  $E_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли для ВЛ без ТЭ (кривая 0) и с установкой

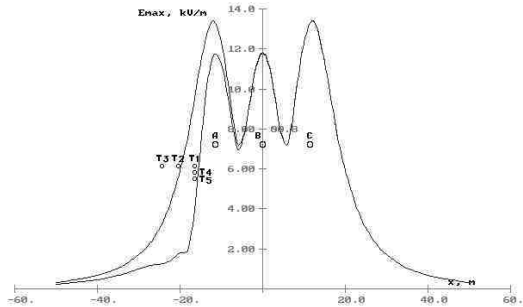


Рис. 3. Распределение  $E_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли при горизонтально-вертикальном размещении пассивных ТЭ

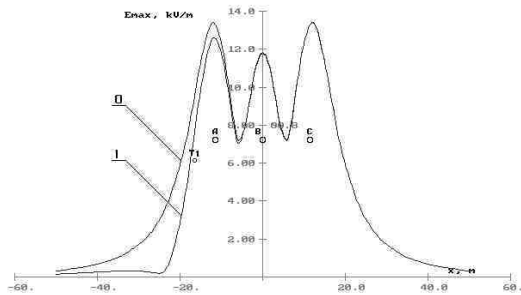


Рис. 4. Распределение  $E_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли при напряжении на активном ТЭ  $63,5 e^{-j180}$  кВ ( $U_\phi = 110$  кВ)

активного ТЭ (кривая 1). В данном случае также достигается высокая степень экранирования ЭП, т.к. за экраном на расстоянии, большем 22 м от оси ВЛ,  $E_{max} < 1$  кВ/м.

Применение активных тросовых экранов более эффективно по сравнению с пассивными ТЭ. Так, при практически одинаковой эффективности экранирования ЭП ВЛ-500 кВ пять горизонтально-вертикально размещённых пассивных ТЭ могут быть заменены двумя горизонтально расположенными активными ТЭ, на которые напряжение подаётся от трансформатора ТМН-2500/110. Экономичность выбираемого варианта определяется протяжённостью экранируемой вдоль линии зоны.

**Экранирование электрических полей ВЛ с помощью резонансных тросовых экранов.** Активные тросовые экраны позволяют эффективно ограничивать зону влияния ЭП, создаваемых ВЛ СВН, однако не всегда возможно активировать ТЭ, подав на них необходимое напряжение, т.к. не везде, где нужна установка ТЭ, имеются источники необходимого напряжения. Для решения поставленной задачи могут быть использованы резонансные тросовые экраны. На примере ВЛ-500 кВ (см. рис.1) рассмотрим работу резонансных ТЭ двух конструкций. ТЭ размещаются слева от оси линии на расстоянии 18,5 м. При минимальном габарите «нижний провод фазы – земля» 8 м высота расположения оси ТЭ 7 м. В первом случае ТЭ состоит из одного провода марки АС-400/22, во втором ТЭ расщеплён на три провода марки АС-400/22 с радиусом расщепления 0,231 м (шаг расщепления 0,4 м). ТЭ заземлены через активно-индуктивное сопротивление  $Z_{ТЭ} = R + jX$ , где  $R$  и  $X$  - активная и индуктивная составляющие сопротивления заземлителя тросового экрана. Комплексное значение напряжения, наведенного на ТЭ, определим по выражению

$$\dot{U}_T = \frac{\dot{U}_A \cdot C_{TA} + \dot{U}_B \cdot C_{TB} + \dot{U}_C \cdot C_{TC}}{C_{TA} + C_{TB} + C_{TC} + C_{T0} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot (R + jX) \cdot l}}, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  - фазные напряжения фаз А, В и С линии;  $C_{TA}$ ,  $C_{TB}$

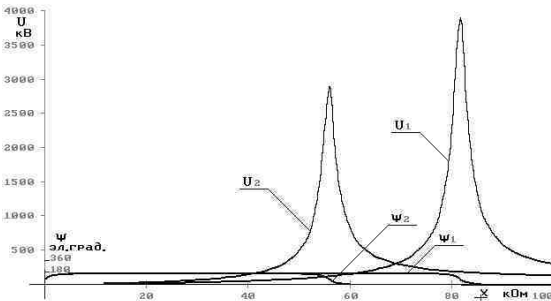


Рис. 5. Графики изменения модулей и фазных углов комплексных напряжений, наведённых на ТЭ, в зависимости от индуктивной составляющей  $X$  сопротивления заземлителя ТЭ

и  $C_{TC}$  - частичные ёмкости между ТЭ и фазами А, В и С;  $C_{T0}$  - ёмкость ТЭ относительно земли;  $l$  - протяжённость ТЭ;  $\omega = 2 \times \pi \times f$  - угловая частота.

На рис. 5 показаны графики изменения модулей  $U_i$  и фазных углов  $\psi_i$  комплексов напряжений, наведенных на ТЭ первой конструкции,  $U_1$  и  $\psi_1$  и второй конструкции

$U_2$  и  $\psi_2$ , в зависимости от индуктивной составляющей  $X$  сопротивления заземлителя ТЭ при  $l_T = 5000$  м и  $R = 1000$  Ом.

При минимуме значения знаменателя выражения (1) наступает резонанс, когда  $U_i$  максимально, а  $\psi_i$  изменяется на  $180^\circ$ .

При изменении  $X$  от 0 до  $\infty$  конец вектора  $\dot{U}_i$  описывает на комплексной плоскости окружность. Резонанс для 1-й конструкции наступает при  $X = 81$  кОм, а для второй при  $X = 56$  кОм. Для компенсации электрического поля необходимо, чтобы вектор напряжения ТЭ  $\dot{U}_i$  был направлен на комплексной плоскости встречно фазному напряжению ближайшей фазы, в нашем случае фазы А с  $\dot{U}_A \text{ фА} = 500/\sqrt{3} = 288,675$  кВ. Тогда рабочая зона экранирования находится в той области значений  $X$ , где  $\psi_i \approx 180^\circ$ , т.е. до резонанса. На рис. 6 показана картина изменения  $U_i$  и  $\psi_i$  для обеих конструкций ТЭ в области до резонанса при  $X$ , изменяющемся от 0 до 100 кОм. Как видно из рисунка,  $U_2$  при увеличении  $X$  растёт быстрее  $U_1$ , хотя  $\psi_2$  остаётся  $\approx 180^\circ$  дольше, чем  $\psi_1$ .

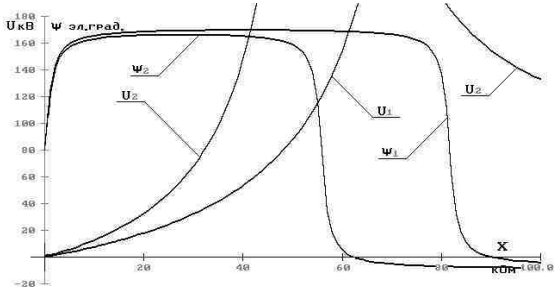


Рис. 6. Зависимости  $U_i(X)$  и  $\psi_i(X)$  для обеих конструкций ТЭ в области изменения  $X$  до резонанса

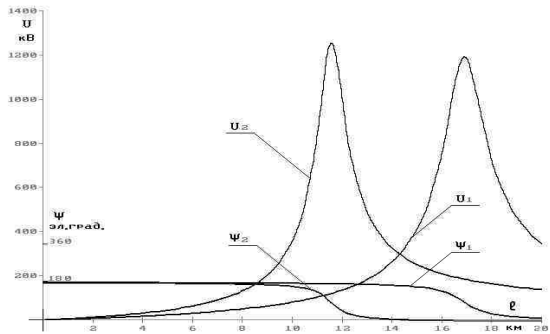


Рис. 7. Зависимости  $U_i(l)$  и  $\psi_i(l)$  при изменении  $l$  от 0 до 20 км

до резонанса при  $X$ , изменяющемся от 0 до 100 кОм. Как видно из рисунка,  $U_2$  при увеличении  $X$  растёт быстрее  $U_1$ , хотя  $\psi_2$  остаётся  $\approx 180^\circ$  дольше, чем  $\psi_1$ . В качестве заземлителя тросового экрана используем трансформатор ТДТН-10000/110 с входным сопротивлением со стороны обмотки ВН (при холостом ходе на сторонах СН и НН)  $Z_{xx} = 1132 + j24140$  Ом ( $Z_{xx} = Z_{m3}$ ).

Для неизменного значения  $Z_{m3}$  резонанс наблюдается при изменении протяжённости ТЭ ( $l$ ). На рис. 7 показаны зависимости  $U_i$  и  $\psi_i$  при изменении  $l$  от 0 до 20 км.

Для конструкции ТЭ с одним проводом резонанс наступает при  $l \approx 16,8$  км, а для конструкции ТЭ с тремя проводками - при  $l \approx 11,7$  км. И в этом случае рабочая зона ТЭ находится в области до резонанса. На рис. 8 показаны кривые изменения  $U_i(l)$  и  $\psi_i(l)$  в зоне изменения  $l$  до резонанса.

Если использовать в качестве заземлителя ТЭ трансформатор ТДТН-10000/110 при протяжённости зоны экранирования  $l = 7,6$  км для 1-й конструкции тросового экрана и  $l = 5$  км для 2-й конструкции ТЭ, то соответственно напряжения, наведенные на экранах, будут равны (см. рис. 8)

$$\dot{U}_1 = 45 e^{-j169} \text{ кВ и } \dot{U}_2 = 45 e^{-j167} \text{ кВ.}$$

На рис. 9 показано распределение напряжённости ЭП в поперечном сечении ВЛ-500 кВ (габарит «нижний провод фазы – земля» 8 м) на уровне 1,8 м от поверхности земли при экранировании ЭП с помощью резонансных ТЭ: кривая 0 – ЭП без ТЭ; кривая 1 – ТЭ, состоящий из одного провода марки АС-400/22; кривая 2 – ТЭ выполнен тремя проводами марки АС-400/22.

Эффективность экранирования второго варианта конструкции ТЭ выше, чем первого: на рассмотренном уровне  $E_{max}$  становится  $\leq 1$  кВ/м (предельно допустимый уровень для населения в зоне жилой застройки) для первой конструкции ТЭ при расстоянии от оси линии более 27 м, а для второй – более 20 м (более 15,5 и 8,5 м от проекции провода крайней фазы на поверхность земли соответственно).

Установка ТЭ за проводами крайних фаз ВЛ позволяет уменьшить ширину зоны воздействия ЭП линий на человека, но практически не влияет на максимумы напряжённости  $E_{max}$  под фазами линий электропередачи (см., например, рис. 9). Попробуем уменьшить напряжённость ЭП под фазами линии, установив под ними пассивные ТЭ, оставляя по бокам ВЛ активные

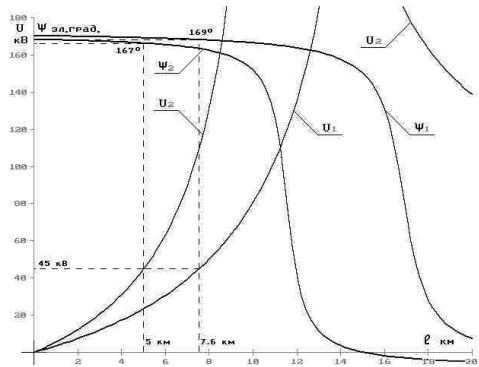


Рис. 8. Зависимости  $U(l)$  и  $\psi(l)$  в дорезонансной зоне изменения  $l$

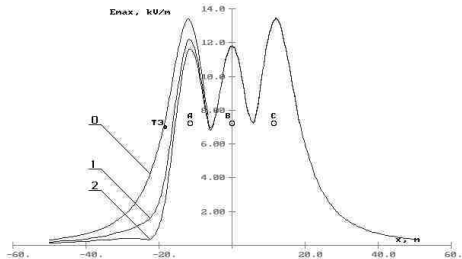


Рис. 9. Распределение напряжённости ЭП в поперечном сечении линии на уровне 1,8 м от поверхности земли при экранировании ЭП с левой стороны от оси линии с помощью резонансных ТЭ

экраны с напряжением  $63,5 \times e^{-j180}$  кВ со стороны фазы А и  $63,5 \times e^{-j60}$  кВ со стороны фазы С. Активные ТЭ расположены на высоте 7 м и на расстоянии  $\pm 18,5$  м от оси ВЛ-500 кВ. Пассивные экраны разместим на высоте 2 м от земли и на расстоянии  $\pm 12$  м, а также 0 м от оси линии. На рис. 10 показаны кривые распределения  $E_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли при наличии активных, но отсутствии пассивных ТЭ (кривая 1) и при установке как активных, так и пассивных экранов (кривая 2).

Сравнивая максимумы напряжённостей неэкранированного ЭП (кривая 0 на рис.9) и при установке двух активных и трёх пассивных ТЭ, находим, что при экранировании они уменьшаются на 3 кВ/м: с 13,5 до 10,5 кВ/м. Согласно ПУЭ напряжённость ЭП под ВЛ на уровне 1,8 м от поверхности земли не должна превышать 5 кВ/м. Низкая эффективность экранирования ЭП рассмотренной системой экранов объясняется малым габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 8 м, и тем, что установка активных или резонансных тросовых экранов (АТЭ или РТЭ) под линией невозможна из-за соображений изоляционной прочности воздушного промежутка «провод АТ или РТЭ - провода фаз».

Рассмотрим ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 11,5 м, с высотой расположения проводов ПТЭ 3 м и неизменной по сравнению с предыдущим случаем высотой расположения проводов АТЭ. На рис. 11 показана геометрия расположения фаз линии и проводов

расположения фаз линии и картина распределения напряжённости  $E_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли: неэкранированная линия - кривая 0, при экранировании только АТЭ - кривая 1 и при экранировании как АТЭ, так и ПТЭ - кривая 2.

Максимумы напряжённости ЭП под крайними фазами при их габарите, равном 11,5 м, для неэкраниро-

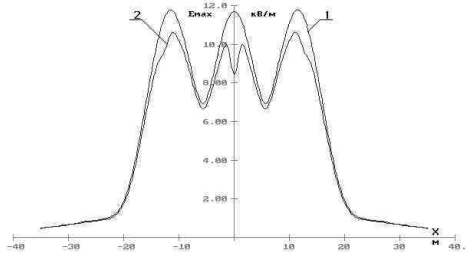


Рис.10. Распределение  $E_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли при наличии активных, но отсутствии пассивных ТЭ (кривая 1) и при установке как активных, так и пассивных экранов (кривая 2)

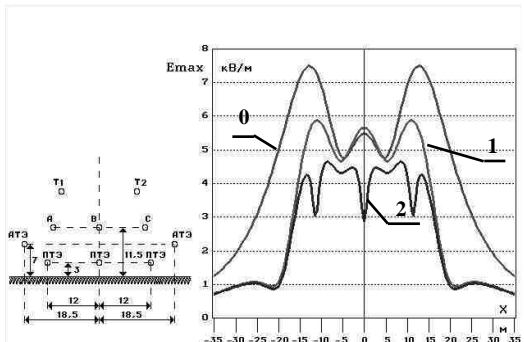


Рис.11. Геометрия расположения фаз линии и проводов ТЭ, а также распределение  $E_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли



ванной линии составляют 7,5 кВ/м. Установка двух АТЭ приводит к снижению максимумов напряжённости поля до значений 5,9 кВ/м, но при этом происходит увеличение  $E_{max}$  под средней фазой на 0,2 кВ/м. АТЭ уменьшают зону с  $E_{max} > 1$  кВ/м до  $\pm 20$  м от оси линии, т.е. сокращают её почти в два раза. Правда, на участках  $\pm 23 - \pm 27$  м напряжённость поля превышает 1 кВ/м до значений 1,07 кВ/м. При последующей установке трёх ПТЭ максимумы  $E_{max}$  под фазами линии не превышают 4,7 кВ/м и на участках  $\pm 23 - \pm 27$  м напряжённость поля уменьшается и не превышает 1 кВ/м.

Таким образом, для рассмотренной ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 11,5 м, установка двух АТЭ на высоте 7 м и на расстоянии  $\pm 18,5$  м от оси линии, а также трёх ПТЭ на высоте 3 м и на расстоянии от оси линии  $\pm 12$  м и 0 м позволяет вдвое уменьшить зону, где человек не может находиться в течение суток, а под фазами ВЛ уменьшить  $E_{max}$  до значений, меньших 5 кВ/м, т.е. обеспечить соблюдение предельно допустимого уровня напряжённости ЭП для населённой местности.

#### Литература

1. Программы расчёта, результаты расчётов и измерений электрических и магнитных полей высоковольтных воздушных линий электропередачи. Т. 3 «Пути улучшения электромагнитной обстановки вдоль трасс ВЛ СВН». Ч. I «Экранирование электрических полей ВЛ СВН с помощью тросовых экранов». Отчёт НИР (тема № 118/3-1). – М.: Электросетьсервис. – 1999.

УДК 621.3.01

## Методы расчёта и измерения эллипсоидных магнитных полей промышленной частоты

*Дикой В.П., Токарский А.Ю., кандидаты техн. наук,  
Иостсон Ю.А., Красин О.В., инженеры*

**Введение.** Трёхфазные ВЛ создают в окружающем пространстве электрическое и магнитное поля (ЭП и МП), которые в результате несовпадения на комплексной плоскости векторов напряжённости, создаваемых различными фазами, имеют в общем случае эллипсоидный характер. Определение действующего значения напряжённости эллипсоидного, допустим, магнитно-

го поля по выражению  $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$ , где  $H_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$  – модули дей-

ствующих значений составляющих вектора  $\vec{H}$  по осям ОХ, ОУ и ОZ, может

дать погрешность в  $\sqrt{3}$  раз в сторону увеличения. В статье рассмотрена методика расчёта эллипсоидных полей, Начнём с плоской задачи – эллиптического поля.

**Пространственно-временные характеристики напряжённости эллиптического МП.** Значение суммарного вектора напряжённости магнитного поля в мгновенной форме  $\vec{h}$  в произвольный момент времени  $t$  может быть определено по выражению (рис.1)

$$h = \sqrt{h_z^2 + h_y^2} = h_z \sin \alpha + h_y \cos \alpha .$$

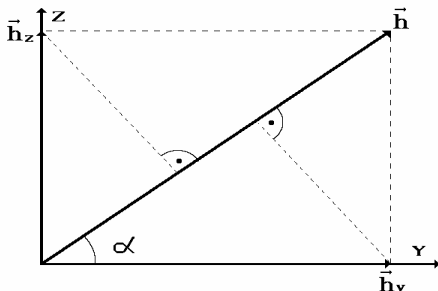


Рис. 1. К определению угла наклона и скорости вращения вектора  $\vec{h}$

Конец вектора  $\vec{h}$  на плоскости описывает эллипс. Угловая скорость вращения вектора описывается выражением (1), а время прохождения экстремальных положений (большая и меньшая полуоси эллипса) – выражением (2). В общем случае скорость прохождения большей полуоси эллипса меньше, чем при прохождении меньшей полуоси.

$$\omega_0 = \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{H_y \cdot H_z \cdot \sin(\psi_z - \psi_y)}{H_y^2 \cdot \sin^2(\omega t + \psi_y) + H_z^2 \cdot \sin^2(\omega t + \psi_z)}; \quad (1)$$

$$t_{\text{ЭК}} = \frac{1}{2\omega} \arctg \left[ 1 - \frac{H_y^2 \sin^2(2\psi_y) + H_z^2 \sin^2(2\psi_z)}{H_y^2 \cos^2(2\psi_y) + H_z^2 \cos^2(2\psi_z)} \right]. \quad (2)$$

Действующее значение напряжённости поля в плоскости YOZ по большей полуоси эллипса находится по выражению [1]:

$$H_{yz}^{max} = \sqrt{\frac{1}{2}(H_z^2 + H_y^2) + \frac{1}{2}\sqrt{\left(H_z^2 + H_y^2\right)^2 - 4H_z^2 H_y^2 \sin^2(\psi_z - \psi_y)}}. \quad (3)$$

Угол наклона вектора  $\vec{h}$  к оси OY определяется по выражению

$$\alpha = \arctg \frac{H_{mz} \sin(\omega \cdot t + \psi_z)}{H_{my} \sin(\omega \cdot t + \psi_y)}, \quad (4)$$

а составляющие вектора напряжённости  $\vec{H}_{yz}^{max}$  – по выражениям (рис. 2):

$$H_z^{max} = H_{yz}^{max} \cdot \cos(\alpha); \quad (5)$$

$$H_y^{max} = H_{yz}^{max} \cdot \sin(\alpha). \quad (6)$$

**Определение результирующего вектора напряжённости эллипсоидного МП.** При наличии третьей составляющей напряжённости МП  $\vec{h}$  мы получим эллипсоидное поле, т.е. конец вектора  $\vec{h}$  будет

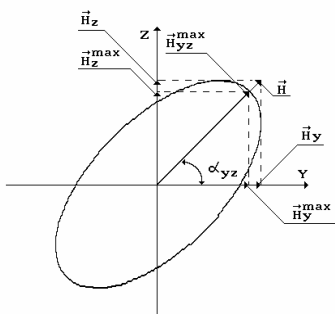


Рис. 2. К определению составляющих эллипсоидного поля по осям декартовой системы координат

вращаться по поверхности эллипсоида. Проекции этого эллипсоида на плоскости XOY, XOZ и YOZ будут эллипсы, каждый значением

$$\vec{H}_{xy}^{max}, \vec{H}_{xz}^{max}, \vec{H}_{yz}^{max} \text{ и}$$

$\vec{H}_{yz}^{max}$  по большим полу-

осям эллипсов (рис. 3)

Полный вектор напряжённости  $\vec{H}^{max}$  определяется как векторная сумма одного из векторов по большой полуоси «плоскостного» эллипса, допустим вектора,  $\vec{H}^{max}_{yz}$  и проекцией полного вектора на ось, перпендикулярную к этой плоскости, в нашем случае вектора  $\vec{H}^{max}_x$ . Действующее значение полного вектора  $H^{max}$  определяется по выражению

$$H^{max} = \sqrt{\left(H^{max}_{yz}\right)^2 + \left(H^{max}_x\right)^2}. \quad (7)$$

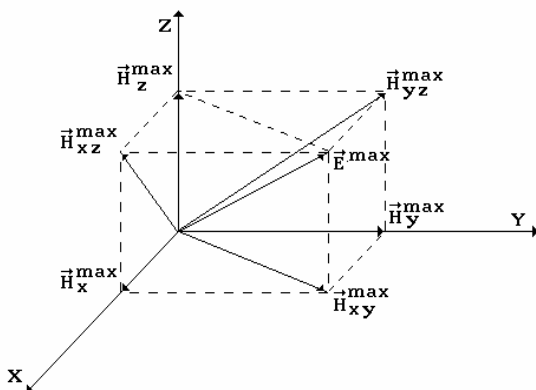


Рис. 3. К определению действующего значения напряжённости МП по большей полуоси эллипсоида

Следует отметить, что при определении составляющей  $H^{max}_x$  необходимо проверить правильность нахождения угла  $\alpha$  по выражению (4), в которое подставляется время  $t = t_{эк}$ , полученное по выражению (2). Выражение (2) даёт время прохождения ближайшего к моменту  $t = 0$  экстремума, а нам нужен момент прохождения большей полуоси эллипса. Чтобы убедиться в правильности определения угла  $\alpha$ , надо подставить  $t = t_{эк}$  в выражение (1). Если  $\omega_0 \leq 2 \cdot \pi \cdot f$ , где  $f$  – частота переменного поля, то угол найден правильно.

Если  $\omega_0 \geq 2 \cdot \pi f$ , то к  $t_{эк}$  надо добавить время, равное 1/4 периода изменения поля (для частоты 50 Гц это время составит 0,005 с) или увеличить угол  $\alpha$  на  $90^\circ$ .

**Измерение трёхмерного эллипсоидного МП.** Амплитудное значение напряженности ( $H_m$ ) МП для условий локального воздействия на человека, производящего работы под напряжением, ограничено величиной 5,2 кА/м [2]. С учетом двукратного превышения нормируемой величины верхний предел измерения  $H_m$  выбираем равным 10 кА/м. Для ВЛ СВН традиционной конструкции значение  $H_m$  на уровне 1,8 м от поверхности земли находится в пределах 10 – 30 А/м. Исходя из этого, за верхний предел нижнего диапазона измерения выбираем значение  $H_m = 100$  А/м. Нижний предел нижнего диапазона должен быть не менее 1 А/м (для приборов, предназначенных для измерения напряженности МП в помещениях – не менее 0,1 А/м).

Таким образом, границы изменения  $H_m$  (по верхним пределам нижнего и верхнего диапазонов измерения) примем равными  $10^2 - 10^4$  А/м.

Обозначим:

$$H_m^{max} = 10^4 \text{ А / м} \quad \text{и} \quad H_m^{min} = 100 \text{ А / м}.$$

Рассмотрим элементарный индуктивный датчик, представляющей собой «плоскую» катушку с числом витков  $W$  и внутренним радиусом  $R$ . Выражение для магнитосцепления датчика запишется следующим образом:

$$\psi = \mu_o \frac{H_m}{m} \pi \cdot R^2 W \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Изменяющийся во времени магнитный поток наводит в витках катушки ЭДС «е»:

$$e = -\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\mu_o \frac{H_m}{m} \pi \cdot R^2 W \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Амплитудное значение ЭДС определяется по выражению

$$E_m = \mu_o \frac{H_m}{m} \pi \cdot R^2 W \cdot \omega.$$

Подставляя в последнее выражение значения  $\omega$  (для частоты 50 Гц) и

$\mu_0$ , разрешая его относительно  $E_m/H_m$  и принимая для нижнего диапазона измерения  $E_m^{min} = 5 \times 10^{-3}$  В, а для верхнего –  $E_m^{max} = 0,5$  В, получим:

$$\frac{E_m^{min}}{H_m^{min}} = \frac{E_m^{max}}{H_m^{max}} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \pi^3 \cdot R^2 \cdot W = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (8)$$

После преобразования выражение (8) примет вид:

$$R^2 \cdot W = 0,0403.$$

Для обеспечения заданных пределов измерения ЭДС и  $H_m$  радиус  $R$  катушки связан с числом витков катушки соотношением

$$R = \sqrt{0,0403 / W}.$$

Принимая (рис. 4) для внутренней (№ 1) катушки датчика радиус  $R =$

$R_1 = 1$  см, получим  $W = 403$  витка. Катушка наматывается

проводом, имеющим диаметр 0,12 мм. Коэффициент заполнения катушки  $K_3 = 0,7$ . Определим высоту слоев обмотки, при толщине катушки  $a_1 = 0,5$  см. Площадь поперечного сечения обмотки катушки 1 будет  $S_1 = a_1 \times B_1$ . Площадь сечения провода  $S_{пр} = \pi D_{пр}^2 / 4$ , где  $D_{пр}$  – диаметр провода. Тогда площадь поперечного сечения обмотки катушки № 1 определится по выражению

$$S_1 = \frac{W_1 \times S_{пр}}{K_3} = \frac{W_1 \times \pi \times D^2}{4 \times K_3} = 6,5 \text{ см}^2.$$

При  $a_1 = 5$  мм получим значение  $B_1 = S_1 / a_1 = 1,3$  мм. В таблице приведены все параметры трёхкоординатного датчика.

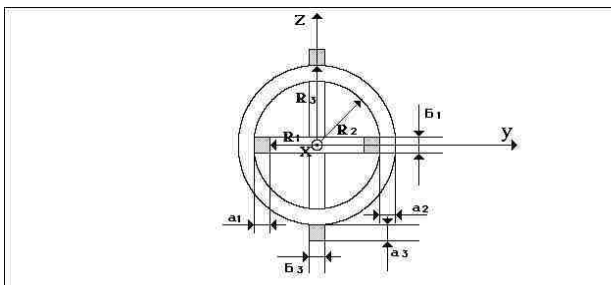


Рис. 4. Трёхкоординатный датчик измерителя напряжённости магнитного поля

**Параметры трехкоординатного индуктивного датчика**

Параметр	Един. измер.	Катушка 1	Катушка 2	Катушка 3
$W$	витки	403	315	265
$S_{\rho j}$	мм <sup>2</sup>	314,16	401,15	476,84
$R_j$	мм	10,00	11,30	12,32
$B_j$	мм	1,300	1,020	0,858
$a_j$	мм	5,0	5,0	5,0

Мгновенные значения ЭДС, наведенных МП в катушках, одновременно измеряются в течение одного периода изменения поля. Если поле носит чисто синусоидальный характер, то величина напряжённости МП для каждого значения измеренного ЭДС определяется по выражению

$$h(t_i) = 2 \times 10^4 \times \sqrt{\left(\frac{e_1}{K_{y1}}\right)^2 + \left(\frac{e_2}{K_{y2}}\right)^2 + \left(\frac{e_3}{K_{y3}}\right)^2}, \text{ А/м}, \quad (9)$$

где  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  – соответственно ЭДС, замеренная первой, второй и третьей катушками в момент времени  $t_i$ ;  $K_{y1}$ ,  $K_{y2}$  и  $K_{y3}$  – соответственно коэффициенты усиления усилителей первой, второй и третьей катушек.

По выражению (8) производится расчёт  $h(t_i)$  для каждого момента времени  $t_i$  измерения по всему циклу измерений. Максимальное из полученных значений  $h(t_i)$  будет  $h^{max}$ , которое является мгновенным значением напряжённости магнитного поля по большей полуоси эллипсоида. Разделив  $h^{max}$  на  $\sqrt{2}$ , получим действующее значение напряжённости МП  $H^{max}$ .

**Алгоритм измерения напряжённости несинусоидального МП.** Определение  $H^{max}$  вышеописанным методом возможно в том случае, если пространственные составляющие напряжённости МП во времени изменяются по чисто синусоидальному закону. На самом деле составляющие напряжённости МП изменяются во времени не по чисто синусоидальному закону [3], что показано на рис. 5.

При изменении во времени составляющих напряжённости МП по искажённым синусоидам необходим другой алгоритм обработки результатов измерения.

Результаты измерения  $e_j(t_i)$  каждой  $j$ -й катушкой за 0,02 с переводятся в мгновенные значения напряжённости МП по выражению

$$h_j \left( t_i \right) = 2 \times 10^4 \times \frac{e_{ij}}{K_{y_j}},$$

затем производится разложение в ряд  $h_j \left( t_i \right)$  Фурье (или интеграл Фурье)

с определением модулей  $H_j$  и фазных углов  $\psi_j$  первых гармоник для каждой  $j$ -й катушки. Для каждой катушки измерительного датчика находится проекция на плоскость катушки напряжённости МП по большей полуоси эллипсоида с помощью выражения (3). По выражениям (1), (2) и (4) находятся и проверяются на достоверность углы  $\alpha$  наклона этих векторов к осям координат, затем по выражениям (5) и (6) определяются проекции этих векторов на оси плоскостей катушек и по выражению (8) определяется результирующий вектор напряжённости МП по большей полуоси эллипсоида.

Эти операции проводятся для всех интересующих гармоник, что позволяет с помощью одного измерения одним прибором получить как качественные, так и количественные данные о магнитном поле в месте измерения.

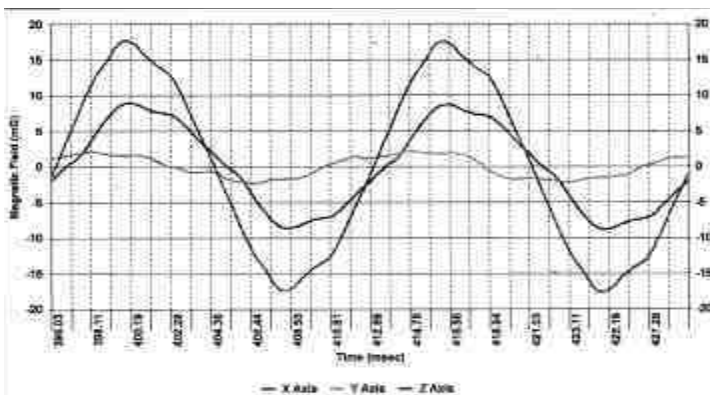


Рис. 5. Результаты измерения составляющих по осям координат напряжённости МП

1. **Кац Р.А., Перельман Л.С.** Расчет электрического поля трехфазной линии электропередачи // Электричество. – 1978. – № 1. – С. 16 – 19.
2. **Ориентировочные** безопасные уровни воздействия переменных магнитных полей частотой 50 Гц при производстве работ под напряжением на воздушных линиях (ВЛ) напряжением 220 – 1150 кВ. – М.: МЗ СССР. – 1989. – 6 с.
3. **Enertech Consultants.** The EMDEX™ WA VECORDER//Elektra, Fevrier/February. – 1999 – № 182. – P.140.



УДК 621.3.01

## Определение фазного угла напряжённости магнитного поля ВЛ

Токарский А.Ю., канд. техн. наук.

Если известны составляющие напряжённости МП по осям ОХ и ОУ, то начальный фазный угол составляющей  $\dot{H}_{\max}$  по большей полуоси эллипса можно определить следующим образом.

На рис. 1 показана схема определения составляющих  $h_{\max}$  по известным составляющим  $h_x$  и  $h_y$  (мгновенная форма записи).

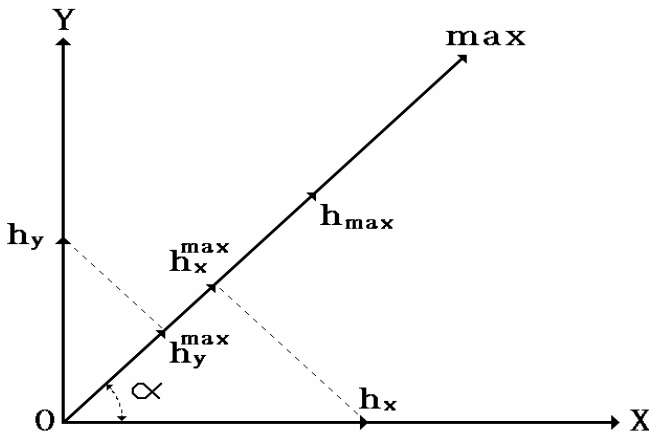


Рис.1. Схема определения составляющих  $h_{\max}$  по известным составляющим  $h_x$  и  $h_y$

$$\text{Зная } h_x = \sqrt{2} \cdot H_x \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_x) \text{ и } h_y = \sqrt{2} \cdot H_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_y),$$

найдем их проекции на большую полуось «тах» эллипса, повернутую относительно оси ОХ на угол  $\alpha$ :

$$h_x^{\max} = h_x \cdot \cos(\alpha), \quad h_y^{\max} = h_y \cdot \sin(\alpha).$$

Модуль полного вектора  $h_{max}$  напряжённости МП по большей полуоси эллипса

$$h_{max} = h_x^{max} + h_y^{max} = h_x \cdot \cos(\alpha) + h_y \cdot \cos(\alpha)$$

или

$$h_{max} = \sqrt{2} \cdot \left[ H_x \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_x) \cos(\alpha) + H_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_y) \cdot \sin(\alpha) \right]. \quad (1)$$

С другой стороны,  $h_{max}$  можно определить следующим образом:

$$h_{max} = \sqrt{2} \cdot H_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{max}). \quad (2)$$

$H_{max}$  найдём по выражению [1]

$$H_{max} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( H_x^2 + H_y^2 \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( H_x^2 + H_y^2 \right)^2 - 4 \cdot H_x^2 \cdot H_y^2 \cdot \sin^2(\psi_x - \psi_y)}}. \quad (3)$$

Приравнявая правые части выражений (1) и (2) и преобразуя полученное выражение относительно  $\varphi_{max}$  для  $t = t_{ЭК}^{max}$ , где  $t_{ЭК}^{max}$  - время прохождения вектором  $\vec{h}$  большой полуоси эллипса, получим:

$$\varphi_{max} = \arcsin \left[ \frac{H_x \cos(\alpha) \cdot \sin\left(\omega t_{ЭК}^{max} + \varphi_x\right) + H_y \sin(\alpha) \cdot \sin\left(\omega t_{ЭК}^{max} + \varphi_y\right)}{H_{max}} \right] - \omega t_{ЭК}^{max}. \quad (4)$$

Значение  $t_{ЭК}^{max}$  определяется по выражению

$$t_{\text{ЭК}} = \frac{1}{2\omega} \arctg \left[ -1 \frac{E_y^2 \sin^2(2\psi_y) + E_x^2 \sin^2(2\psi_x)}{E_y^2 \cos^2(2\psi_y) + E_x^2 \cos^2(2\psi_x)} \right]$$

для условия  $\omega(t_{\text{ЭК}}^{\max}) \geq 100 \times \pi$ . Если последнее условие не соблюдается, то

$t_{\text{ЭК}}^{\max}$  необходимо увеличить на 0,005 с.

В выражении (4) числитель дроби под знаком «arcsin» равен  $H_{\max}$ , тогда вся дробь равна 1, а  $\arcsin(1) = 90^\circ$  и выражение (4) примет вид:

$$\varphi_{\max} = 90^\circ - \omega \cdot t_{\text{ЭК}}^{\max}$$

#### Литература

1. Кац Р.А., Перельман Л.С. Расчет электрического поля трехфазной линии электропередачи // Электричество. – 1978. – № 1. – С. 16 – 19.

УДК 621.315.1

## Элементы теории контурных экранов

*Дикой В.П., Токарский А.Ю., кандидаты техн. наук,  
Рубцова Н.Б., д-р биол. наук, Красин О.В., инж.*

**Введение.** В плане перспективы наличия предельно допустимых уровней (ПДУ) напряжённости магнитного поля (МП) промышленной частоты (ПЧ) для населения необходимость экранирования МП, создаваемого ВЛ, представляет собой актуальную задачу.

Исходя из нормативного значения индукции МП ПЧ для условий производственного воздействия 100 мкТл (СанПиН 2.2.4.723-98) и рекомендаций ICNIRP по дополнительному коэффициенту гигиенического запаса для населения 5, следует добиваться значений индукции МП в местах пребывания населения, не превышающих 20 мкТл.

**Экранирование МП, создаваемого током прямолинейного бесконечно длинного провода.** Рассмотрим возможность экранирования МП, создаваемого прямолинейным бесконечно длинным проводом с током  $\dot{I}$ , с помощью замкнутого прямоугольного контура (рис.1) с числом витков  $w$ , лежащего в одной плоскости с проводом.

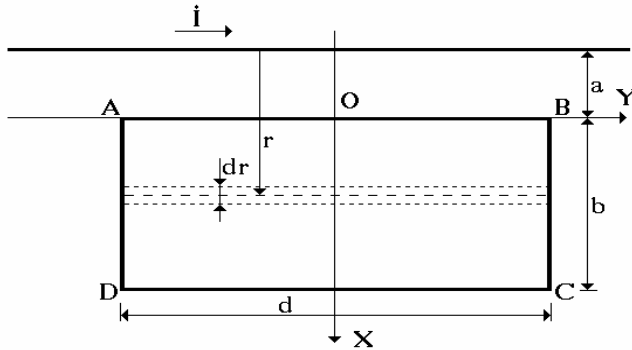


Рис. 1. Расположение прямолинейного провода и прямоугольного контура

Индукцию МП, создаваемую проводом с током  $\dot{I}$ , определим по выражению

$$\dot{B} = \frac{\mu_0 \times \dot{I}}{2 \times \pi \times r},$$

тогда элементарный магнитный поток через поверхность  $d \times dr$

$$d\dot{\Phi} = \dot{B} \times dS = \dot{B} \times d \times dr. \quad (1)$$

Проинтегрировав (1) по  $r$ , определим полный магнитный поток, пронизывающий прямоугольный контур:

$$\dot{\Phi} = \int d\dot{\Phi} = \int_a^{a+b} \dot{B} \times d \times dr = \frac{\mu_0 \times \dot{I} \times d}{2 \times \pi} \int_a^{a+b} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \times \dot{I} \times d}{2 \times \pi} \ln \frac{a+b}{a}.$$

Магнитосцепление системы «провод-контур» определим по выражению

$$\dot{\Psi} = \dot{\Phi} \times w = \frac{\mu_0 \times \dot{I} \times d \times w}{2 \times \pi} \ln \frac{a+b}{a}.$$

Взаимная индуктивность между проводом и контуром

$$M = \frac{\dot{\Psi}}{\dot{I}} = \frac{\mu_0 \times d \times w}{2 \times \pi} \ln \frac{a+b}{a}. \quad (2)$$

Найдём ЭДС, наводимую в контуре магнитным полем провода с током. Мгновенное значение тока в проводе  $i = \sqrt{2} \times I \times \sin(\omega \times t)$ , тогда потоко-сцепление как функцию времени определим по выражению

$$\psi(t) = \sqrt{2} \times I \times \frac{\mu_0 \times d \times w}{2 \times \pi} \times \ln \frac{a+b}{a} \times \sin(\omega \times t),$$

а наведённая в контуре ЭДС будет равна

$$e(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} = \sqrt{2} \times I \times \frac{\mu_0 \times d \times w \times \omega}{2 \times \pi} \times \ln \frac{a+b}{a} \times \sin(\omega \times t - 90^\circ).$$

ЭДС в комплексной форме для действующих значений запишется следующим образом:

$$\dot{E} = \frac{\mu_0 \times d \times w \times \omega \times \dot{I}}{2 \times \pi} \times \ln \frac{a+b}{a} \times e^{-j90^\circ}. \quad (3)$$

Определим собственную индуктивность контура по выражению [1]

$$L = \frac{\mu_0 \times w}{\pi} \left[ b \times \ln \frac{2 \times b \times d}{r_0 \times (b+D)} + d \times \ln \frac{2 \times b \times d}{r_0 \times (d+D)} - 2 \times (b+d-D) + \mu_k \times \left( \frac{b+d}{4} \right) \right], \quad (4)$$

где  $D = \sqrt{b^2 + d^2}$ ,  $r_0$  – радиус провода контура,  $\mu_k$  – относительная магнитная проницаемость материала провода контура.

Зададим размеры контура:  $a = 6$  м,  $b = 3$  м,  $d = 100$  м,  $w = 1$  виток, контур выполнен медным проводом сечением  $389 \text{ мм}^2$  с радиусом  $0,0128$  м и погонным сопротивлением  $R_0 = 0,046 \text{ Ом/км}$  [2], относительная магнитная проницаемость меди –  $0,99999$ , ток в проводе  $\dot{I} = 1000$  А.

Найдём активное сопротивление контура:

$$R_{\kappa} = R_0 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot (b + d) \cdot w = 0,0095 \text{ Ом.}$$

По выражениям (2) и (4) найдём значения взаимной индуктивности между контуром и проводом ( $M$ ) и собственной индуктивности контура ( $L$ ):  $M = 0,811 \times 10^{-5}$  Гн,  $L = 0,234 \times 10^{-3}$  Гн.

Рассмотрим электрическую схему замещения цепи провод-контур (рис. 2). Поскольку протяжённость контура по сравнению с проводом невелика и составляет всего  $100$  м, то можно считать, что ток в проводе не зависит от тока в контуре, поэтому ток в проводе можно считать источником тока в левом контуре рис. 2, где  $L_{\text{пр}}$  – собственная индуктивность провода.

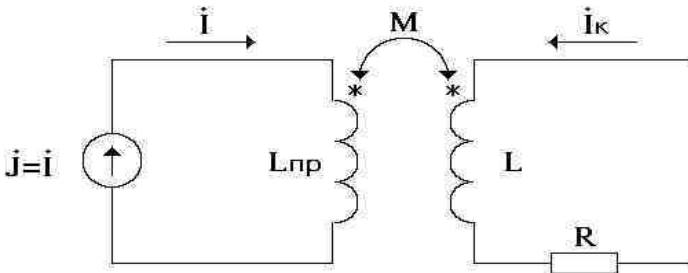


Рис. 2. Схема замещения цепи провод – контур

Для контура с током  $\dot{I}_{\kappa}$  (рис. 2) по второму закону Кирхгофа запишем

$$\dot{I}_{\kappa} \cdot (R + j \cdot \omega \cdot L) + j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I} = 0,$$

тогда

$$\dot{I}_{\kappa} = -\dot{I} \times \frac{j\omega \times M}{R + j\omega \times L} = 34,4 \times e^{-j173^{\circ}} \text{ А.}$$

Значение тока в контуре может быть получено и другим путём. По выражению (3) величина ЭДС, наведенной в контуре магнитным полем тока в проводе, составит  $\dot{E} = 2,548 e^{-j90}$  В. Тогда ток в контуре будет равен

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{E}}{Z_r} = \frac{\dot{E}}{R + j\omega L} = 34,4 e^{-j173^\circ} \text{ A}.$$

Найдём распределение напряжённости МП в центре плоскости провод-контур по оси OX на расстоянии 50 м от начала (конца) контура. Ввиду удалённости вертикальных участков AD и BC, составляющих контур (рис. 1), магнитными полями, создаваемыми протекающими в них токами, можно пренебречь.

На рис. 3 показано распределение напряжённости  $H$  МП вдоль оси OX в плоскости провод-контур и представлена схема расположения провода 1 и проводов контура 2 и 3 с токами  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  соответственно, а также схема сложения напряжённостей  $\dot{H}$ ; магнитных полей, создаваемых токами этих проводов.

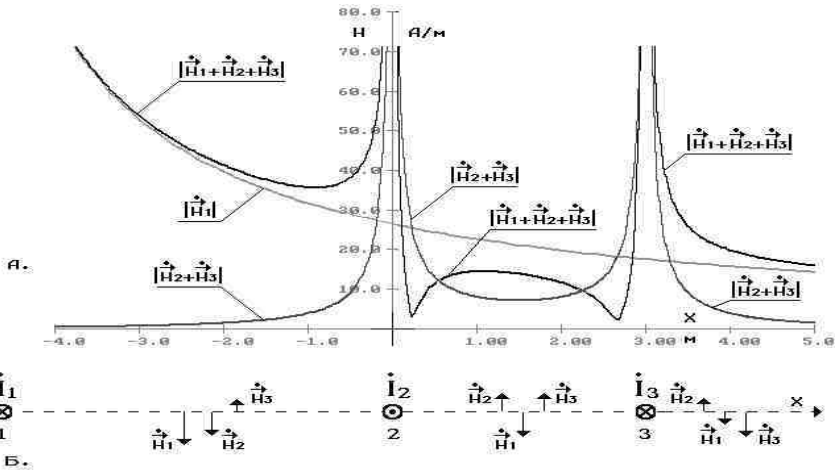


Рис. 3. Распределение напряжённости  $H$  МП по оси OX в плоскости провод – контур (А), схема расположения провода 1 и проводов контура 2 и 3 с токами  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  соответственно и схема сложения напряжённостей  $\dot{H}$  магнитных полей (Б)

В зоне экранирования (внутри контура, между проводами 2 и 3) максимум модуля  $H$  при  $x = 1,1$  м составляет 14,7 А/м.  $\left| \dot{H}_1 \right| < \left| \dot{H}_2 + \dot{H}_3 \right|$

при  $x < 0,3$  м и  $x > 2,7$  м в зоне между проводами 2 и 3. При  $0,3 < x < 2,7$  м  $\left| \dot{H}_1 \right| > \left| \dot{H}_2 + \dot{H}_3 \right|$ , и эффект экранирования невелик.

Рассмотрим распределение напряжённости МП в плоскости контурного экрана (КЭ) вдоль оси ОУ у края КЭ. В этой области на картину распределения МП оказывает влияние магнитное поле, создаваемое вертикальной составляющей витка КЭ (рис. 4).

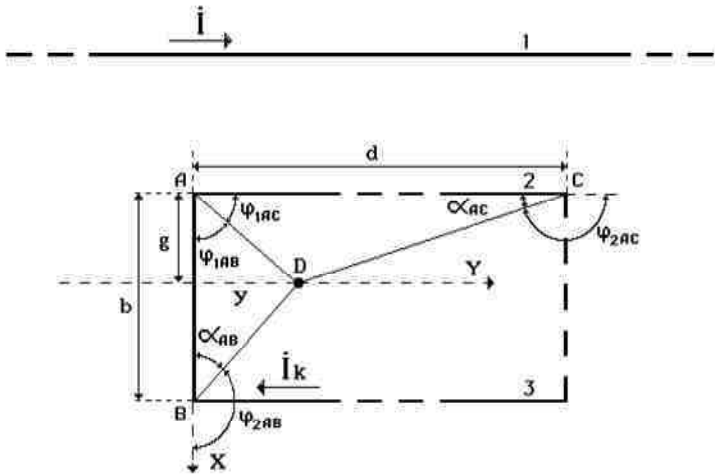


Рис. 4. К определению напряжённости МП у края контурного экрана

Напряжённость МП, создаваемая прямолинейным проводником, например проводником АВ (рис. 4) с током (в данном случае током  $\dot{I}_K$ ), в точке D определяется выражением [3]

$$\dot{H}_{AB} = \frac{\dot{I}_K}{4 \times \pi \times y} \times \left[ \cos \left( \varphi_{1AB} \right) - \cos \left( \varphi_{2AB} \right) \right].$$

Выражая углы  $\varphi$  через элементы КЭ, получим:

$$\varphi_{1AB} = \arctg \frac{y}{g}, \quad \alpha_{AB} = \arctg \frac{y}{b-g},$$



$$\varphi_{2AB} = 180^\circ - \alpha_{AB}, \quad \cos(180^\circ - \alpha_{AB}) = -\cos \alpha_{AB}.$$

Тогда выражение для  $\dot{H}_{AB}$  примет вид:

$$\dot{H}_{AB} = \frac{\dot{I} K}{4 \times \pi \times y} \times \left[ \cos \left( \arctg \frac{y}{g} \right) + \cos \left( \arctg \frac{y}{b-g} \right) \right]. \quad (5, a)$$

Аналогично для проводов 2 и 3

$$\dot{H}_2 = \frac{\dot{I} K}{4 \times \pi \times g} \times \left[ \cos \left( \arctg \frac{g}{y} \right) + \cos \left( \arctg \frac{g}{d-y} \right) \right] \quad (5, б)$$

$$\dot{H}_3 = \frac{\dot{I} K}{4 \times \pi \times (b-g)} \times \left[ \cos \left( \arctg \frac{b-g}{y} \right) + \cos \left( \arctg \frac{b-g}{d-y} \right) \right] \quad (5, в)$$

По оси ОУ на уровнях внутри КЭ напряжённость МП, создаваемого проводом 1 ( $\dot{H}_1$ ), компенсируется напряжённостями МП, создаваемыми всеми тремя проводами 1, 2 и АВ, т.е.

$$\dot{H} = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 - \dot{H}_3 - \dot{H}_{AB}.$$

Для тех же уровней, но в зоне вне КЭ (слева от АВ) величина  $\dot{H}$  определяется выражением

$$\dot{H} = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 - \dot{H}_3 + \dot{H}_{AB}.$$

На рис. 5 показано распределение  $H$  по оси ОУ в плоскости контурного экрана на уровне 1,5 м от его верхнего провода: напряжённость МП, создаваемого проводом 1 с током  $\dot{I} = 1000$  А без КЭ (кривая 0), и результирующая напряжённость МП с током в КЭ  $\dot{I}_K = 34,4 \times e^{-j173}$  (кривая 1).

КЭ перераспределяет МП в той области, где он установлен, вытесняя поле из охватываемой им области вне экрана. Увеличение напряжённости МП выше и ниже КЭ не представляет опасности для населения, однако по краям (справа и слева от КЭ) экран должен огораживаться на расстоянии не менее 5 м по оси ОУ в сторону от экрана (рис. 5).

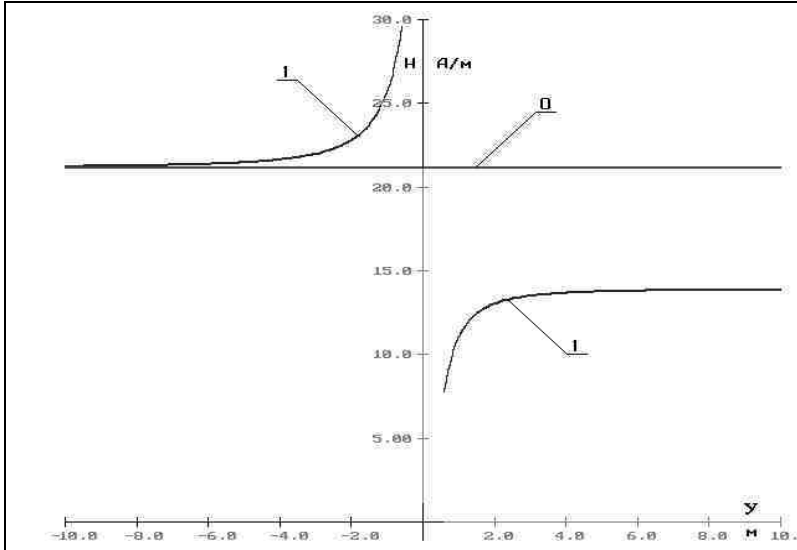


Рис. 5. Распределение  $H$  по оси  $OY$  в плоскости контурного экрана на уровне 1,5 м от его верхнего провода: напряжённость МП, создаваемая проводом 1 с током  $\dot{I} = 1000$  А без КЭ (кривая 0); результирующая напряжённость МП с током в КЭ  $\dot{I}_K = 34,4 \times e^{-j173}$  (кривая 1)

Определим распределение напряжённости МП вдоль оси  $OZ$ . На рис. 6 показаны векторы напряжённости МП, создаваемые проводниками 1, 2 и 3 (с токами соответственно  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$ ) вдоль оси  $OZ$  на уровне 1,5 м от верхнего и нижнего проводов контура (центр контурного экрана). На уровне внутри КЭ составляющая  $H_{1Z}$  компенсируется составляющими как  $H_{2Z}$ , так и  $H_{3Z}$ :

$$H_{\Sigma Z} = H_{1Z} - (H_{2Z} + H_{3Z}),$$

а составляющая  $H_{1X}$  компенсируется составляющей  $H_{2X}$  напряжённостью МП от провода 2 КЭ, составляющая же  $H_{3X}$  от провода 3 суммируется с  $H_{1X}$ :

$$H_{\Sigma X} = H_{1X} - H_{2X} + H_{3X}.$$

Чем ближе расчётный уровень к проводу 2, тем больше составляющая  $H_{2X}$  и меньше составляющая  $H_{3X}$ , что приводит к большей компенсации составляющей  $H_{1X}$ . И наоборот, чем ближе расчётный уровень к проводу 3, тем компенсация составляющей  $H_{1X}$  меньше.

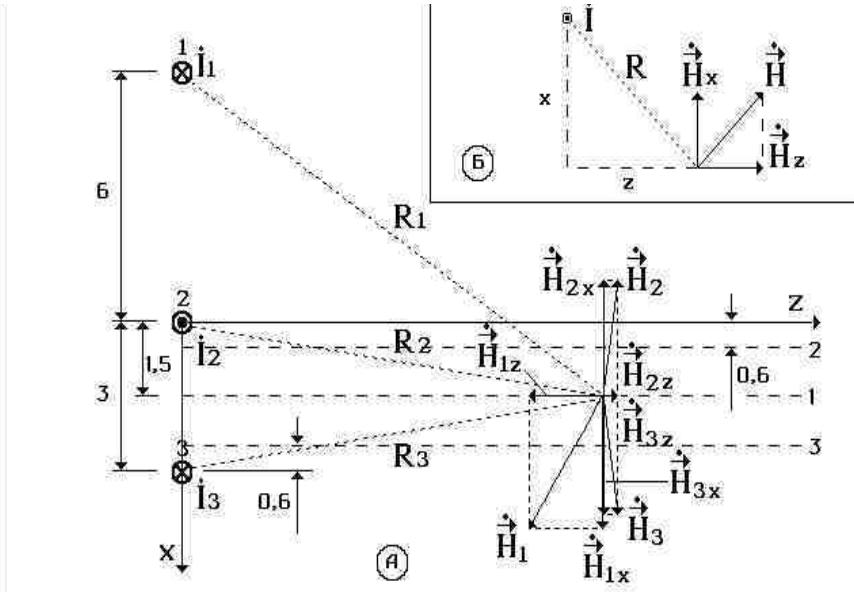


Рис. 6. Составляющие вектора напряжённости МП от трёх проводов с током (А), к определению составляющих вектора напряжённости МП (Б)

Определим составляющие вектора напряжённости МП. Для подобных треугольников  $RXZ$  и  $HH_xH_z$  (рис. 6, Б) можно записать:

$$\frac{H}{H_x} = \frac{R}{Z} \quad \text{и} \quad \frac{H}{H_z} = \frac{R}{X}.$$

Тогда  $H_x = H \cdot \frac{Z}{R}$  и  $H_z = H \cdot \frac{X}{R}$ . Поскольку  $H = I / (2 \cdot \pi \cdot R)$ , а  $R^2 = X^2 + Z^2$ , то для результирующего вектора  $H$  получим (рис. 6, А):

$$H = \frac{1}{2 \times \pi} \times \sqrt{\left( \frac{I_1 X_1}{I_1} \frac{I_2 X_2}{I_2} \frac{I_3 X_3}{I_3} \right)^2 + Z^2} \times \sqrt{\frac{I_1^2}{X_1^2 + Z^2} + \frac{I_2^2}{X_2^2 + Z^2} + \frac{I_3^2}{X_3^2 + Z^2}}, \quad (6)$$

где  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  – расстояния по оси  $OX$  от оси  $i$ -го провода до расчётного уровня.

На рис. 7 показано распределение напряжённостей МП вдоль оси OZ на уровне 1,5 м – центр контурного экрана, создаваемых током 1000 А в проводе 1  $\left| \dot{H}_1 \right|$  (кривая 0) и токами  $I_k = 34,4 \times e^{-j173}$  А в проводах 2 и 3  $\left| \dot{H}_2 + \dot{H}_3 \right|$  контура (кривая 1). Также дана кривая результирующей напряжённости МП –  $\left| \dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 \right|$  (кривая 2).

На рис. 8 дана картина распределения напряжённости МП на уровне центра КЭ (кривая 1), на уровне 0,6 м ниже центра верхнего провода (провод 2) КЭ (кривая 2) и на уровне 0,6 м выше центра нижнего провода (провод 3) КЭ (кривая 3).

Наибольшая компенсация напряжённости МП осуществляется в плоскости контурного экрана. При удалении по уровню центра контурного экрана (кривая 1 на рис.8) от плоскости КЭ значение  $H$  резко увеличивается в результате более быстрого уменьшения напряжённости  $\dot{H}_2 + \dot{H}_3$  и появления у  $\dot{H}_1$  составляющей по оси OX, которая не компенсируется МП КЭ, т.к.  $\dot{H}_2 + \dot{H}_3 = 0$  (рис. 6, А).

Если считать, что нижний провод КЭ зарыт в землю на глубину 0,6 м, то поверхность земли будет уровнем 3, уровень 2 будет соответствовать уровню 1,8 м от поверхности земли (уровень головы вертикально стоящего человека), а уровень 1 – уровню головы человека, сидящего на корточках. Принимая ориентировочный ПДУ МП для населения равным 20 мкТл (что соответствует  $\approx 16$  А/м), можно сказать, что в рассмотренном варианте экранирования КЭ уменьшает напряжённость МП до допустимого значения на уровне головы человека на расстоянии  $\pm 0,5$  м от плоскости экрана, на уровне центра экрана – на расстоянии  $\pm 1,0$  м и на уровне земли – на расстоянии  $\pm 1,3$  м. Зоны превышения ПДУ имеют протяжённость (рис. 8) на уровне головы 6,6 м, на уровне центра КЭ 5,1 м и на уровне земли 3,4 м.

Низкая эффективность экранирования МП с помощью рассмотренной конструкции КЭ объясняется малыми величинами напряжённости поля, создаваемого экраном (рис. 7, кривая 1). Для увеличения интенсивности этого поля необходимо увеличить либо величину тока в КЭ, либо число витков в контуре.

Увеличить ток в КЭ можно, усилив магнитный поток, пронизывающий контур (т.е. увеличить площадь, охватываемую контуром), при наименьшем увеличении активно-индуктивного сопротивления контура. Если мы увеличим

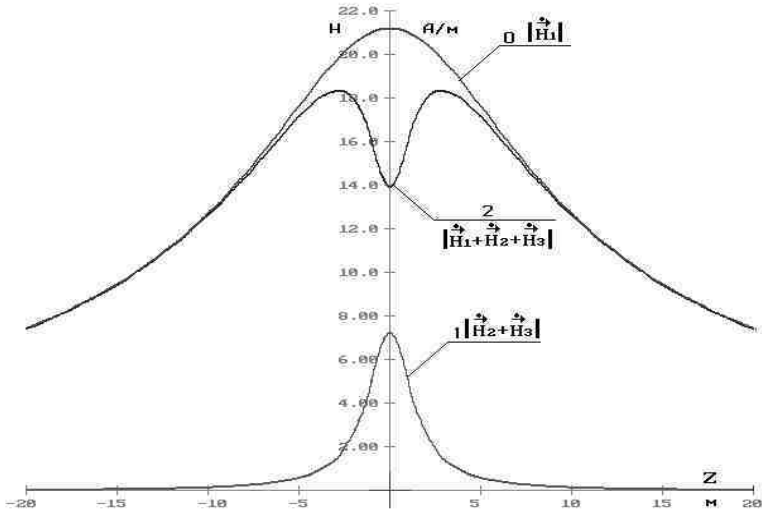


Рис. 7. Распределение напряжённости магнитного поля вдоль оси  $Z$  на уровне центра КЭ, создаваемого проводом 1 (кривая 0), создаваемого КЭ (кривая 1), и результирующая кривая распределения напряжённости МП (кривая 2)

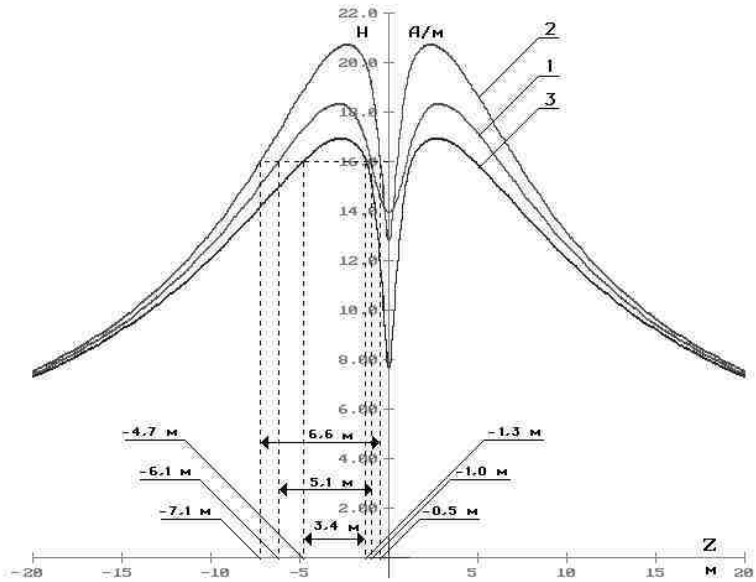


Рис. 8. Распределение напряжённости МП на уровне центра КЭ (кривая 1), на уровне  $0,6\ m$  ниже центра верхнего провода КЭ (кривая 2) и на уровне  $0,6\ m$  выше центра нижнего провода КЭ (кривая 3)

длину  $d$  контура, допустим, в два раза ( $d = 200$  м), то ЭДС ( $\dot{E}$ ), наводимая в контуре, также увеличится в два раза согласно выражению (3). Однако при этом и сопротивление КЭ возрастёт в два раза: при  $d = 100$  м  $Z_k = (9,48 + j73,5) \times 10^{-3}$  Ом, а при  $d = 200$  м  $Z_k = (18,27 + j144,9) \times 10^{-3}$  Ом. Таким образом, увеличение длины КЭ не приводит к увеличению тока в контуре.

Увеличим высоту КЭ в три раза:  $b = 9$  м. В этом случае мы получим:

$$\dot{E} = 5,75 \times e^{-\beta 0} \text{ В}, L = 0,292 \times 10^{-3} \text{ Гн и ток в контуре } \dot{I}_k = 62,7 \times e^{-j179} \text{ А. Увеличение}$$

высоты контура в три раза позволяет увеличить ток в контуре почти в два раза (при  $b = 3$  м  $\dot{I}_k = 34,4 \times e^{-j173}$  А). На рис. 9, А показана схема расположения провода 1 с током 1000 А и КЭ с  $d = 9$  м (провода 2 и 3) и током

$$\dot{I}_k = 62,7 \times e^{-j179} \text{ А. КЭ со стороны провода 3 заглублён в грунт на 6,6 м.}$$

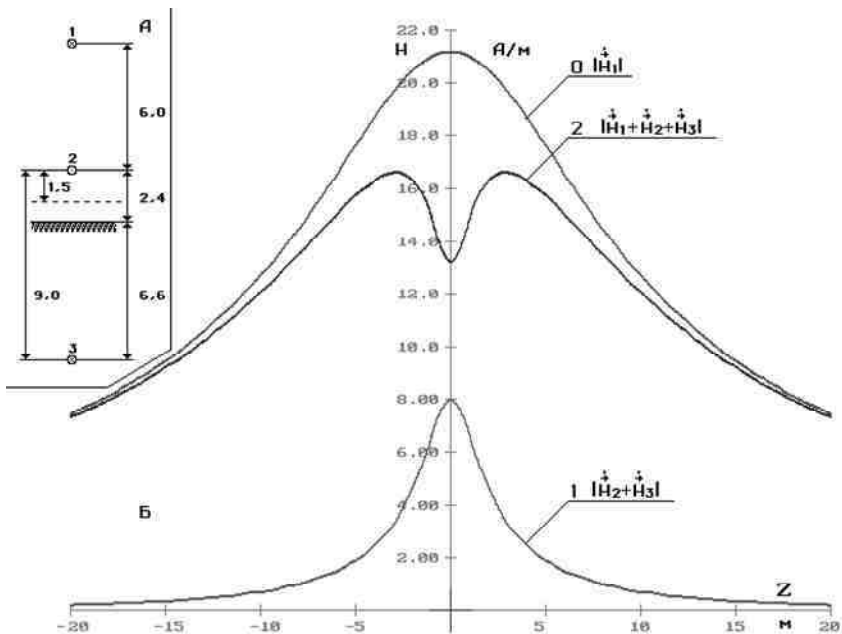


Рис. 9. Распределение напряжённостей МП на уровне 1,5 м от верхнего провода КЭ ( $b = 9$  м), создаваемого током 1000 А в проводе 1 (кривая 0), током  $62,7 \times e^{-j179}$  в проводах 2 и 3 КЭ (кривая 1) и результирующей напряжённости МП (кривая 2)

На рис. 9, Б показаны кривые распределения напряжённостей МП на уровне 1,5 м от верхнего провода 2 КЭ (0,9 м от поверхности земли –

рис. 9, А), создаваемых проводом 1 с током 1000 А – кривая 0 ( $|\dot{H}_1|$ ), КЭ (провода 2 и 3 с током  $62.7 \times e^{-j179}$  А) – кривая 1 ( $|\dot{H}_2 + \dot{H}_3|$ ) и результирующей напряжённости МП – кривая 2 ( $|\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3|$ ).

Увеличение тока в проводах 2 и 3 приводит к увеличению напряжённости МП в плоскости КЭ (кривая 1) почти на 1 А/м по сравнению с напряжённостью  $H$ , создаваемой КЭ с  $b = 3$  м (рис. 7, кривая 1). Также значения результирующей кривой  $H$  уменьшаются в зоне 0Z от 4 до 5 м (от  $-4$  до  $-5$  м) почти на 2 А/м.

На рис. 10 дано распределение  $H$  по уровням: 1,5 м от провода 2 (кривая 1); 0,6 м от провода 2 (кривая 2) и на уровне поверхности земли (кривая 3).

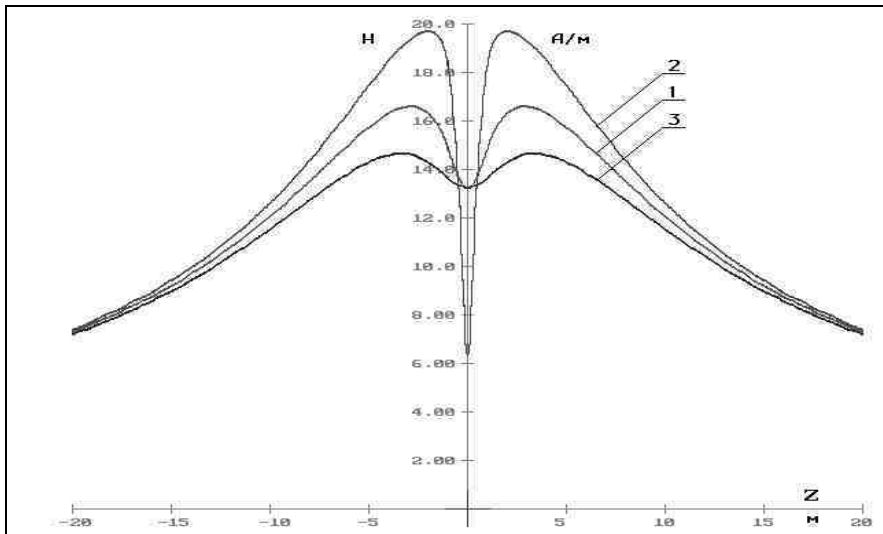


Рис. 10. Распределение напряжённости МП для КЭ с  $b = 9$  м по уровням: 1,5 м от провода 2 (кривая 1); 0,6 м от провода 2 (кривая 2); на уровне поверхности земли (кривая 3)

Сравнивая для одних и тех же уровней полученные распределения напряжённости  $H$  с картиной распределения напряжённости МП для КЭ с  $b = 3$  м, следует отметить уменьшение значений  $H$  в зоне их максимумов почти на 2 А/м. Однако на уровнях 1,5 м от провода 2 (уровень 0,9 м от поверхности земли) и 0,6 м от провода 2 (1,8 м от поверхности земли) значения  $H$  превышают 16 А/м.

Таким образом, для габарита провода с током 1000 А, равного 9 м, увеличение  $b$  с 3 м до 9 м не приводит к увеличению тока в проводе КЭ,

достаточного для уменьшения напряжённости МП до значений, меньших, чем ожидаемые ПДУ. Если увеличить высоту подвеса провода над землёй до 10,5 м и заглубить провод 3 КЭ в землю на 4,5 м (рис.11, А), то картина распределения  $H$  на уровне 2,25 м от поверхности земли (уровень вытянутой вверх руки вертикально стоящего человека) будет такой, как показано на рис. 11, Б.

На рис. 12 даны кривые распределения  $H$  на уровнях от поверхности земли: 2,25 м (кривая 1); 1,8 м (кривая 2); 1,5 м (кривая 3); 0,5 м (кривая 4) и на поверхности земли (кривая 5).

Как видно из рисунка, напряжённость МП на всех расчётных уровнях не превышает 16 А/м, т.е. для такого расположения системы «провод – КЭ» обеспечивается полное экранирование МП до ожидаемых ПДУ для населения по России.

Возможны и другие геометрические размеры КЭ, например при габарите «провод – земля» 10 м и значении  $b = 5,5$  м с заглублением нижнего провода экрана на 1,5 м получим:  $L = 0,264 \times 10^{-3}$  Гн,  $R = 9,71 \times 10^{-3}$  Ом,

$Z_k = (9,71 + j82,62) \times 10^{-3}$  Ом,  $\dot{E} = -j4,09$  В и наведенный в экране ток  $\dot{I}_k = 49,14 \times e^{-j173}$  А.

На рис. 13 показано распределение напряжённости МП на уровне 2,75 м от верхнего и нижнего проводов (центр экрана), создаваемого проводом с током 1000 А (кривая 0), КЭ с током  $49,14 \times e^{-j173}$  А (кривая 1) и результирующая напряжённость  $H$  (кривая 2).

На рис. 14 приведены кривые распределения напряжённости результирующего МП вдоль оси OZ на уровнях: центр экрана – кривая 1; 1,8 м от поверхности земли – кривая 2 и на поверхности земли – кривая 3.

Благодаря большей (на 1,6 м) высоте расположения провода с током 1000 А снижение напряжённости МП в экранируемой зоне до значений, не превышающих 16 А/м, осуществляется при меньшей, чем в предыдущем случае, величине тока, наведенного в КЭ.

Увеличить ток в КЭ (при  $b = 3$  м) возможно путём увеличения радиуса провода. Допустим, что экран выполнен полым алюминиевым проводом марки ПА-640 [4] с погонным сопротивлением  $0,44 \times 10^{-4}$  Ом/м и диаметром 59 мм. Подставляя в выражение (4) радиус полого провода  $r_0 = 0,0295$  м, получим значение индуктивности КЭ  $L = 0,179 \times 10^{-3}$  Гн. Тогда сопротивление КЭ будет  $Z = R + j\omega L = (4,4 + j56,2) \times 10^{-3}$  Ом, а ток в контуре  $\dot{I} = 45,2 \times e^{-j176}$  А. При увеличении радиуса провода КЭ в 2,3 раза ток в экране возрастет в 1,3 раза. Такое незначительное увеличение тока контурного экрана мало повлияет на уровни напряжённостей МП в экранируемой зоне, и ПДУ всё равно будет превышен.

Вернёмся к первоначальному (худшему для возможности экранирования) расположению провода на высоте 8,4 м над поверхностью земли и КЭ с  $b = 3$  м и рассмотрим вариант усиления напряжённости МП контурного экрана за счёт увеличения числа его витков.



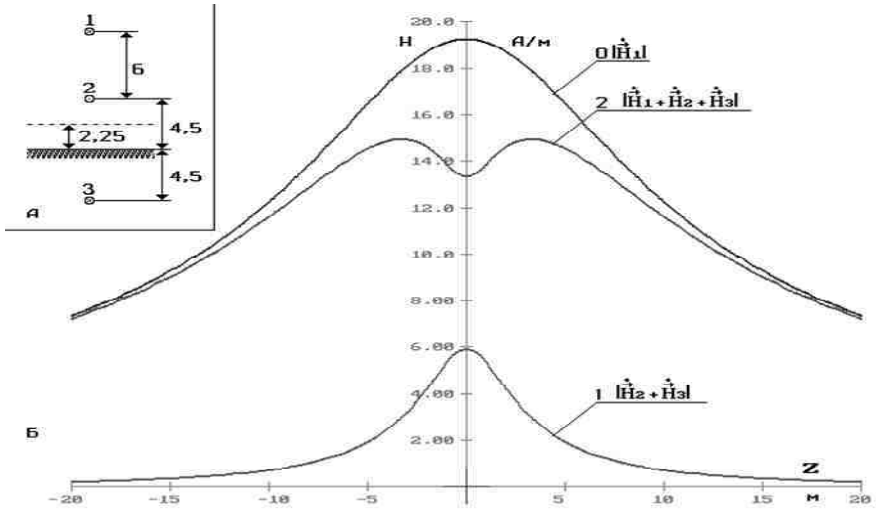


Рис. 11. Распределение напряженностей МП, создаваемых проводом с током 1000 А, и КЭ с  $b = 9$  м и заглублённым в землю на 4,5 м (А, Б)

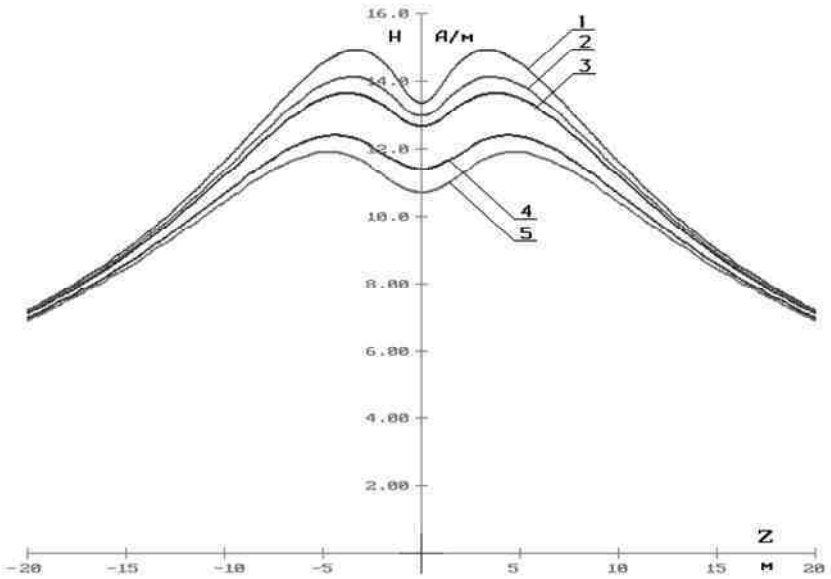


Рис. 12. Распределение  $H$  на уровнях от поверхности земли: 2,25 м (кривая 1); 1,8 м (кривая 2); 1,5 м (кривая 3), 0,5 м (кривая 4) и на поверхности земли (кривая 5)

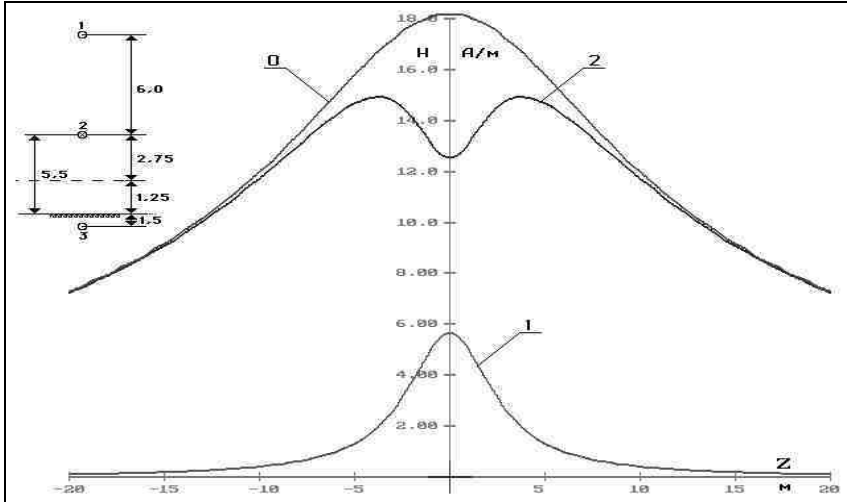


Рис. 13. Распределение напряжённости МП на уровне 2,75 м от верхнего и нижнего провода (центр экрана), создаваемого проводом с током 1000 А (кривая 0), КЭ с током  $49,14 \times e^{-j173}$  А (кривая 1) и результирующая  $H$  (кривая 2)

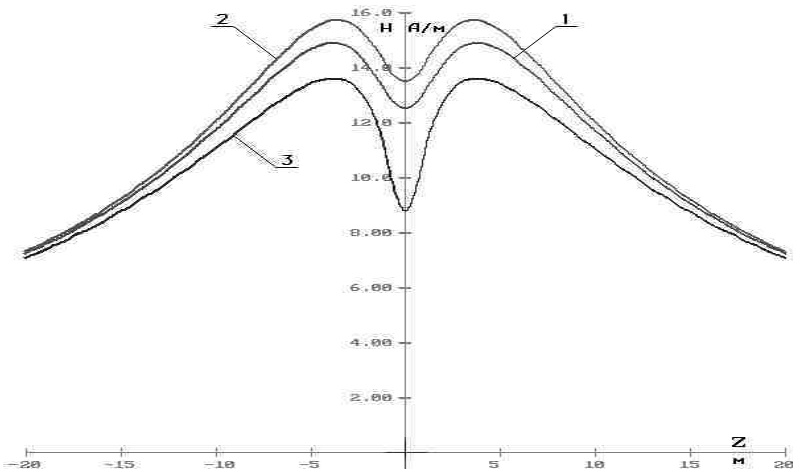


Рис. 14. Распределение напряжённости результирующего МП вдоль оси OZ на уровнях: в центре экрана (кривая 1), на расстоянии 1,8 м от поверхности земли (кривая 2) и на уровне поверхности земли (кривая 3)

Рассмотрим два параллельно расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга (рис. 15) контурных экрана с проводами 2 и 3 у первого и 2' и 3' у второго.

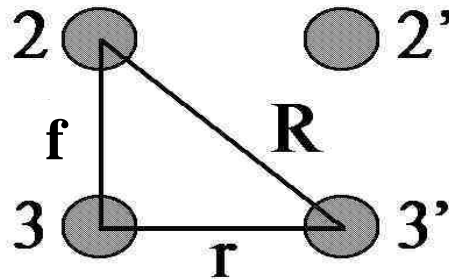


Рис. 15. Схема определения взаимной индуктивности между витками контурного экрана

Взаимную индуктивность между двумя КЭ найдём по выражению [1]

$$M_{1,2} = \frac{\mu_0 \times d}{2 \times \pi} \times \ln \frac{R^2}{f^2}$$

при условии, что  $d$  – протяжённость КЭ, значительно больше  $r$  и  $f$ . Тогда при  $d = 100$  м величина  $M_{1,2}(r)$  будет изменяться по кривой, показанной на рис. 16.

Будем считать, что контурный экран системы «провод с током – КЭ» состоит из трёх витков, плотно намотанных по оси OZ. Диаметр провода 0,025 м [3]. Тогда по последнему выражению взаимная индуктивность между первым и вторым, а также между вторым и третьим витками будет  $M_{12} = M_{23} = 0,19 \times 10^{-3}$  Гн, а между первым и третьим витками  $M_{13} = 0,16 \times 10^{-3}$  Гн. ЭДС, наведенная в КЭ, составит

$$\dot{E}_{КЭ} = 3 \times \dot{E} = -j7,65 \text{ В}.$$

Найдём сопротивление контурного экрана. На рис. 17 показана электрическая схема КЭ. Собственные параметры витков контурного экрана одинаковы:  $R_1 = R_2 = R_3 = R = 9,48 \times 10^{-3}$  Ом,  $L_1 = L_2 = L_3 = L = 0,234 \times 10^{-3}$  Гн. Составим уравнение для контура по второму закону Кирхгофа:

$$3 \times (R + j\omega L) \times \dot{I} + j\omega \times \dot{I} \times (2 \times M_{1,3} + 4 \times M_{1,2}) = \dot{E}_{КЭ}.$$

Решая последнее уравнение относительно тока  $\dot{I}$ , получим:

$$i = \frac{\dot{E}_{KЭ}}{3 \times R + j\omega \times \left( 3 \times L + 2 \times M_{1,3} + 4 \times M_{1,2} \right)} = 4,53 \times e^{-j174,6} \text{ A.}$$

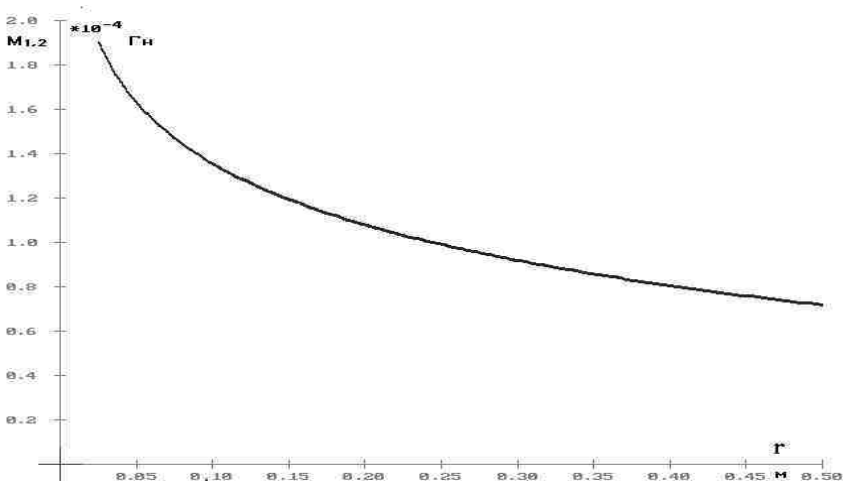


Рис. 16. Изменение взаимной индуктивности между двумя КЭ протяженностью 100 м в зависимости от расстояния  $\Gamma$  между ними

Увеличение числа витков экрана при плотном их расположении приводит к значительному увеличению индуктивной составляющей сопротивления КЭ, что резко уменьшает в нём ток. Если величина ампервитков в одновитковом КЭ составляет по модулю 34,4 А·вит., то для плотного трёхвиткового контурного экрана мы получаем 13,6 А·вит.

Таким образом, рассмотренный трёхвитковый экран будет экранировать МП в 2,5 раза меньше, чем одновитковый.

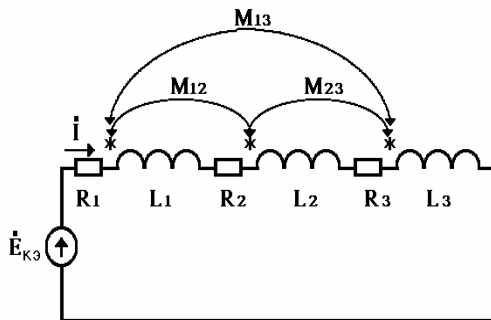


Рис.17. Электрическая схема трёхвиткового КЭ

В целях уменьшения взаимных индуктивностей между токами (рис.16) раздвинем их на 0,5 м друг от друга. Тогда получим:  $M_{12} = M_{23} = 0,72 \times 10^{-4}$  Гн и  $M_{13} = 0,46 \times 10^{-4}$  Гн, а величина тока в витках КЭ составит  $\dot{I} = 22,4 \times e^{-j175}$  А. На рис. 18 показаны кривые распределения напряжённости МП, создаваемого системой «провод - трёхвитковый раздвинутый КЭ», на уровнях: 1,8 м от поверхности земли - кривая 1; 1,5 м от верхних проводов КЭ - кривая 2 и на уровне земли - кривая 3.

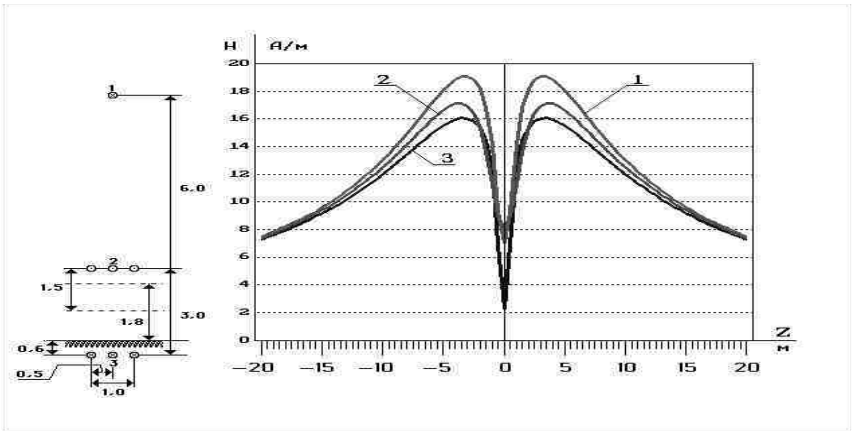


Рис. 18. Распределение напряжённости МП, создаваемого системой «провод – трёхвитковый раздвинутый КЭ», на уровнях: 1,8 м от поверхности земли (кривая 1); 1,5 м от верхних проводов КЭ (кривая 2); на уровне земли (кривая 3)

Сравнивая показанные на рис. 18 кривые распределения  $H$  с кривыми рис. 10 (одновитковый КЭ с  $b = 3$  м), убеждаемся в том, что трёхвитковый раздвинутый КЭ экранирует МП вне зоны плоскости центрального витка хуже, чем одновитковый. Это объясняется не только тем, что у трёхвиткового раздвинутого контурного экрана величина тока в витке меньше, чем у одновиткового, но и тем, что даже уже в плоскости крайних витков трёхвиткового раздвинутого КЭ появляются составляющие  $H_x$ , создаваемые двумя другими витками.

В плоскости центрального витка составляющие  $H_x$  от крайних витков компенсируют друг друга, что приводит к хорошему экранированию МП в этой области. Но даже для одновиткового КЭ в этой зоне  $H$  не превышает предельно допустимых уровней.

Дальнейшее увеличение числа витков КЭ нецелесообразно, т.к. это приведёт к уменьшению тока в витках (для каждого витка добавляются сопротивления взаимных индуктивностей от новых витков при неизменной ве-

личине ЭДС в витке) и появлению нескомпенсированных составляющих  $H_x$  от добавленных витков, что даст увеличение результирующей составляющей  $H$  вне плоскости центрального витка.

Рассмотрим КЭ, состоящий из трёх параллельных, электрически не связанных витков (рис.19).

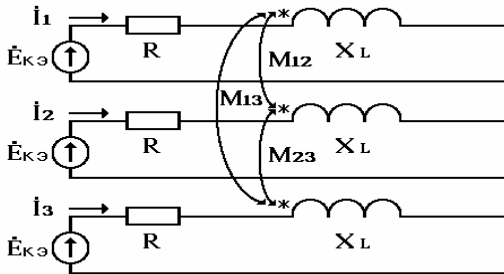


Рис. 19. К определению токов в трёх параллельных, электрически не связанных витках КЭ

По методу контурных токов составим систему уравнений для определения токов в витках контурного экрана:

$$\dot{I}_1 \times (R + j\omega L) + \dot{I}_2 \times (j\omega M_{12}) + \dot{I}_3 \times (j\omega M_{13}) = \dot{E}_{\text{кЭ}} ;$$

$$\dot{I}_1 \times (j\omega M_{12}) + \dot{I}_2 \times (R + j\omega L) + \dot{I}_3 \times (j\omega M_{23}) = \dot{E}_{\text{кЭ}} ;$$

$$\dot{I}_1 \times (j\omega M_{13}) + \dot{I}_2 \times (j\omega M_{23}) + \dot{I}_3 \times (R + j\omega L) = \dot{E}_{\text{кЭ}} .$$

Подставляя в полученную систему уравнений значения активно-индуктивных и взаимноиндуктивных сопротивлений обмоток КЭ:  $R + j\omega L = (9,48 + j73,5) \times 10^{-3}$  Ом,  $j\omega M_{12} = j\omega M_{23} = j59,7 \times 10^{-3}$  Ом и  $j\omega M_{13} = j50,3 \times 10^{-3}$  Ом, а

также  $\dot{E}_{\text{кЭ}} = -j2,55$  В, получим:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_3 = 16,09 \cdot e^{-j169,7^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_2 = 10,05 \cdot e^{j159,7^\circ} \text{ А}.$$

Использование параллельных, электрически не связанных раздвинутых витков КЭ приводит, по сравнению с последовательным соединением раздвинутых витков, к уменьшению активной составляющей сопротивления ка-

ждого витка в 3 раза, но величина индуктивной составляющей уменьшается при этом значительно меньше, что приводит к меньшим значениям токов в витках. На рис. 20 показано распределение  $H$  на уровнях: 1,8 м от поверхности земли (кривая 1; 1,5 м от верхних проводов КЭ (кривая 2) и на уровне земли (кривая 3), параллельного раздвинутого трёхвиткового КЭ

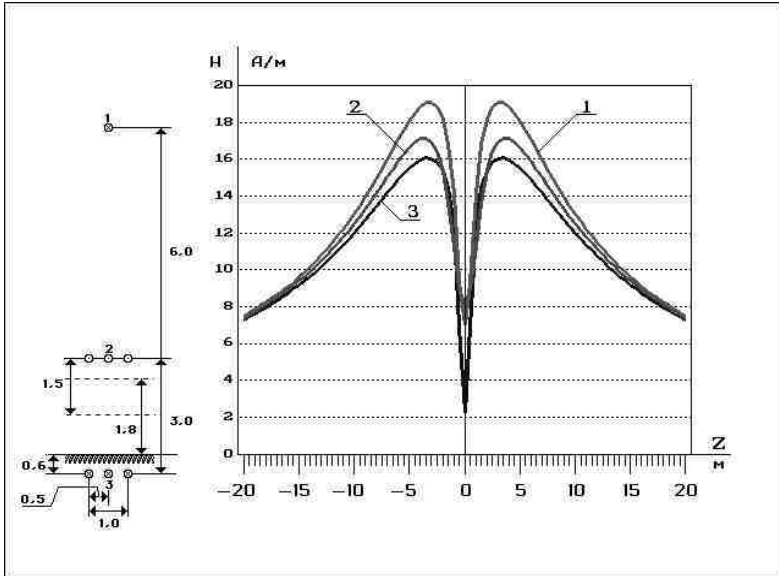


Рис. 20. Распределение  $H$  на уровнях: 1,8 м от поверхности земли (кривая 1); 1,5 м от верхних проводов КЭ (кривая 2) и на уровне земли (кривая 3), параллельного раздвинутого трёхвиткового КЭ

Рассмотренная конструкция КЭ хуже экранирует МП, чем трёхвитковый последовательно соединённый раздвинутый экран (см. рис.18) с током  $\dot{I} = 22,4 \times e^{-j175}$  А, поскольку токи в её витках имеют меньшие значения.

**Активные контурные экраны.** Рассмотренные конструкции КЭ относятся к типу пассивных контурных экранов (ПКЭ). Возможно применение активных КЭ (АКЭ), которые отличаются от пассивных тем, что в цепь витков экрана включается ЭДС или источник тока.

Вернёмся к одновитковому КЭ и включим в его цепь ЭДС ( $\dot{E}'$ ) такой величины, чтобы значение тока в витке экрана было  $110 \times e^{j180}$  А. Тогда сум-

марная ЭДС  $\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E} + \dot{E}'$  (рис. 21) должна иметь значение

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{I}_K \times Z_K = 110 \times e^{j180} \times (9,48 + j73,5) \times 10^{-3} = 8,15 \times e^{-j97,3} \text{ В,}$$

а включаемая ЭДС  $\dot{E}'$  будет равна

$$\dot{E}' = \dot{E}_{\Sigma} - \dot{E} = 5,63 \times e^{-j100},7 \text{ В.}$$

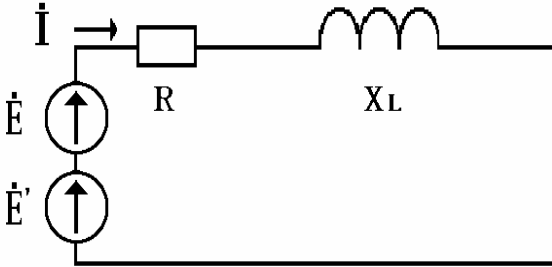


Рис. 21. К определению величины ЭДС, включаемой в цепь витка

На рис. 22 показаны кривые распределения напряжённости МП вдоль оси OZ на уровне 1,5 м от верхнего провода КЭ:  $H$ , создаваемая проводом с током 1000 А (кривая 0);  $H$ , создаваемая КЭ с током  $110 \times e^{j180}$  А (кривая 1) и результирующая  $H$  (кривая 2).

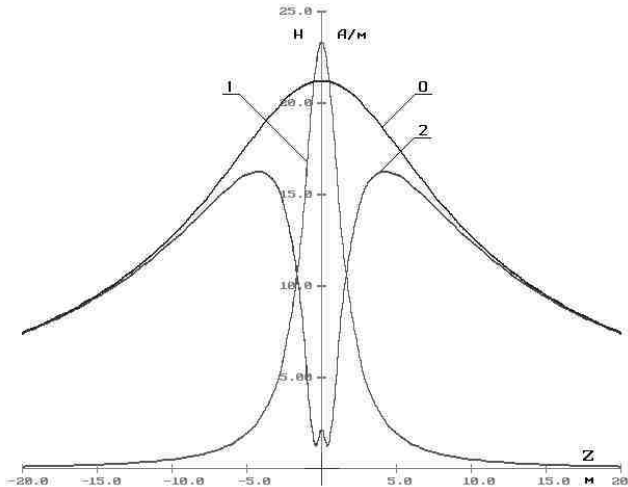


Рис. 22. Распределения напряжённости МП вдоль оси OZ на уровне 1,5 м от верхнего провода АКЭ:  $H$ , создаваемая проводом с током 1000 А (кривая 0);  $H$ , создаваемая



АКЭ с током  $110 \times e^{j180}$  А (кривая 1) и результирующая  $H$  (кривая 2)

В рассматриваемом случае ЭДС принята идеальной, т.е. её внутреннее сопротивление равно нулю. В реальном случае необходимо учитывать внутреннее сопротивление  $Z_{BH}$  источника, тогда величина  $\dot{E}_{\Sigma}$  должна определяться по выражению

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{I}_K \times \left( Z_K + Z_{BH} \right) .$$

Вместо ЭДС в цепь АКЭ можно включить источник тока  $\dot{J}$  величиной  $110 \times e^{j180}$  А, внутреннее сопротивление которого на значении тока не сказывается.

На рис. 23 показано распределение напряжённости МП по оси OZ на уровнях: 1,5 м от верхнего провода АКЭ (центр экрана) – кривая 1; 0,6 м от верхнего провода АКЭ (1,8 м от поверхности земли) – кривая 2 и 0,6 м от нижнего провода АКЭ (поверхность земли) – кривая 3.

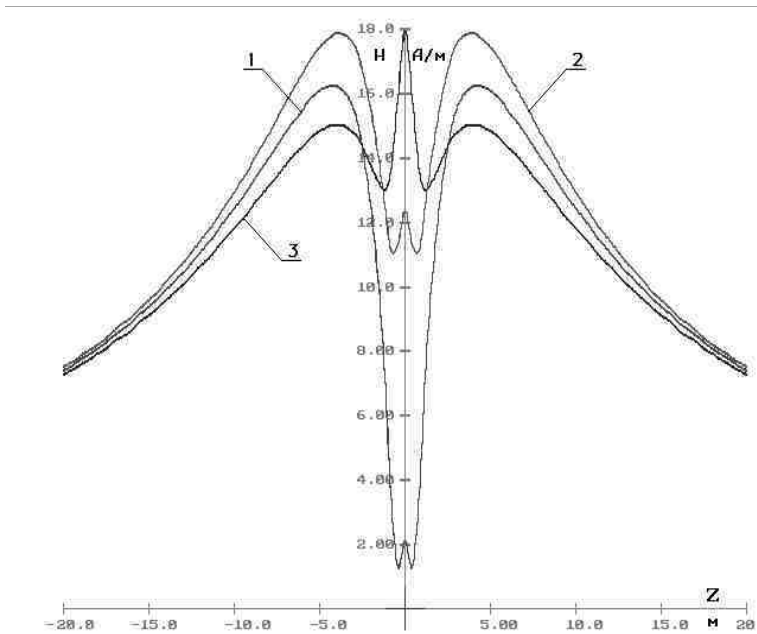


Рис. 23. Распределение напряжённости МП по оси OZ на уровнях: 1,5 м от верхнего провода АКЭ – кривая 1; 0,6 м от верхнего провода АКЭ (1,8 м от поверхности земли) - кривая 2 и 0,6 м от нижнего провода АКЭ (поверхность земли) – кривая 3

Если в центре экрана (кривая 1)  $H$  практически не превышает  $H_{\text{ГДУ}} = 16 \text{ А/м}$ , то на уровне 1,8 м от поверхности земли наблюдается значительное превышение  $H_{\text{ГДУ}}$  с максимумом  $18 \text{ А/м}$  (кривая 2) при  $Z = \pm 4 \text{ м}$ , а на уровне поверхности земли  $H = 18 \text{ А/м}$  (кривая 3) при  $Z = 0 \text{ м}$ .

Такая картина распределения  $H$  означает, что для тока в витке АКЭ (или для ампер-витков АКЭ), равного по модулю  $110 \text{ А}$ , высота экрана  $b = 3 \text{ м}$  мала и для более эффективного экранирования её необходимо увеличить, а также увеличить и высоту расположения провода с током  $1000 \text{ А}$  над поверхностью земли.

Расположим провод с током  $1000 \text{ А}$  на высоте  $9,5 \text{ м}$  над землёй, а АКЭ с  $b = 4 \text{ м}$  поместим так, чтобы верхний его провод находился на расстоянии  $7 \text{ м}$  от провода с током  $1000 \text{ А}$ , а нижний - на расстоянии  $1,5 \text{ м}$  ниже поверхности земли (рис. 24, А). Электрические характеристики контура в этом случае будут следующие:  $L = 0,247 \times 10^{-3} \text{ Гн}$ ,  $Z_k = R + jX = (9,57 + j77,60) \times 10^{-3} \text{ Ом}$ . ЭДС, наведенная в АКЭ, составит  $\dot{E} = 2,84 \times e^{-j90} \text{ В}$ , а дополнительная ЭДС для достижения тока  $\dot{I}_k = 110 \times e^{j180} \text{ А}$  составит  $\dot{E}' = 5,79 \times e^{-j100,5}$ .

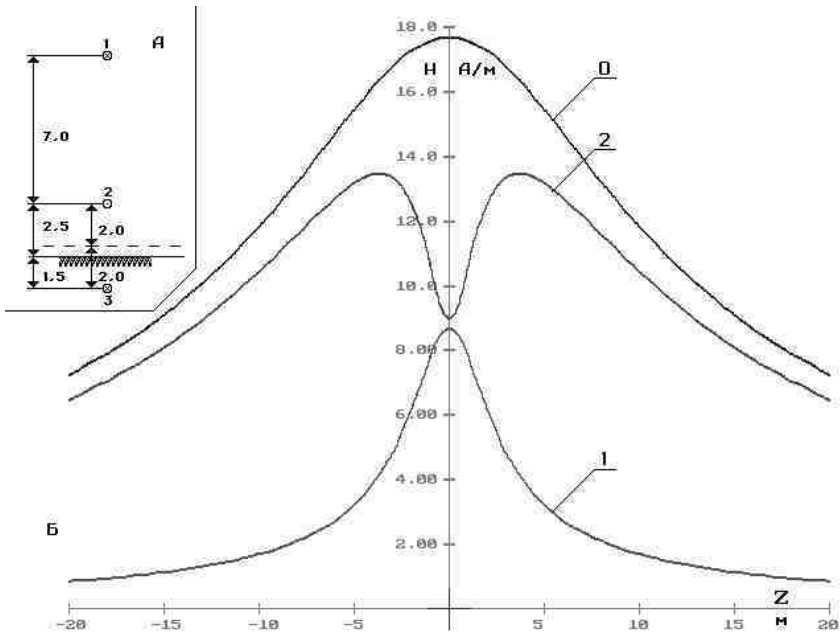


Рис. 24. Распределение напряжённости МП для АКЭ с  $b = 4 \text{ м}$  на уровне 2 м от верхнего (нижнего) провода АКЭ:  $H$ , создаваемая проводом с током  $1000 \text{ А}$  (кривая 0);  $H$ , создаваемая АКЭ с током  $110 \times e^{j180} \text{ А}$  (кривая 1) и результирующая  $H$  (кривая 2)

На рис. 24 показано распределение  $H$  вдоль оси  $OZ$  на уровне 2 м от верхнего (нижнего) провода АКЭ (центр экрана):  $H$ , создаваемая проводом с током 1000 А (кривая 0);  $H$ , создаваемая АКЭ с током  $110 \times e^{j180}$  А (кривая 1) и результирующая  $H$  (кривая 2). Сравнивая полученные кривые распределения  $H$  с аналогичными кривыми для КЭ с  $b = 3$  м (см. рис. 22), следует отметить, что увеличение  $b$  с 3 до 4 м привело к уменьшению максимума  $H$ , создаваемого самим экраном в плоскости АКЭ при  $Z = 0$ , и увеличило значения этой кривой  $H$  в зоне  $Z = \pm 5$  м и дальше от плоскости экрана. Такое перераспределение напряжённости МП, создаваемого АКЭ, позволило уменьшить максимумы  $H$  результирующего поля. На рис. 25 показаны кривые распределения результирующего МП в зоне экранирования при помощи АКЭ с  $b = 4$  м на уровнях: центра экрана (кривая 1), на высоте 1,8 м от поверхности земли (кривая 2) и на уровне поверхности земли (кривая 3). Как видно из рис. 25, увеличение расстояния между горизонтальными проводами АКЭ на 1 м привело к уменьшению максимумов  $H$  результирующего поля до значений, меньших 16 А/м.

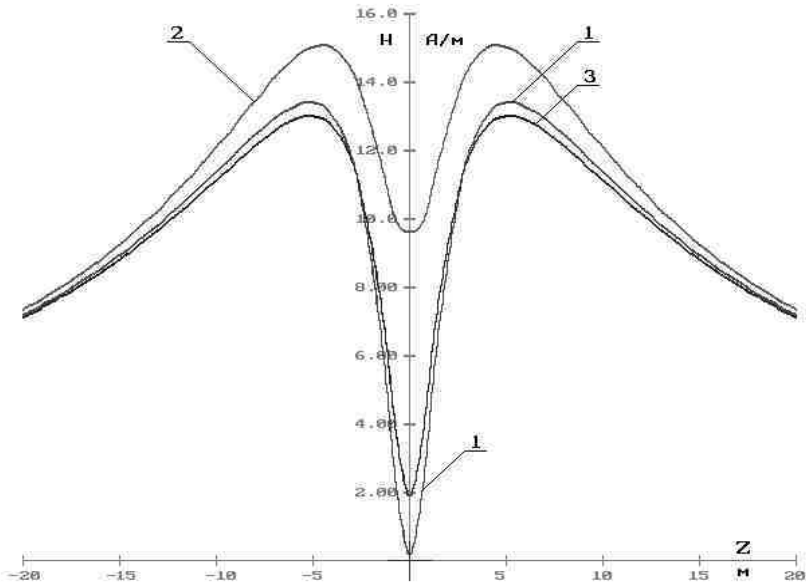


Рис. 25. Распределение результирующего МП в зоне экранирования при помощи АКЭ с  $b = 4$  м на уровнях: центра экрана (кривая 1), на высоте 1,8 м от поверхности земли (кривая 2) и на уровне поверхности земли (кривая 3)

**Резонансные контурные экраны.** По аналогии с тросовыми экранами можно рассмотреть вариант резонансных КЭ (РКЭ). Попробуем в последней рассмотренной конструкции провода с током 1000 А и контурного экрана с током  $110 \cdot e^{j180}$  А произвести такие изменения, чтобы из цепи экрана исключить дополнительную ЭДС  $\dot{E}'$ , но оставить ток величиной  $110 \cdot e^{j180}$  А. Для достижения поставленной цели необходимо уменьшить индуктивную составляющую сопротивления КЭ. Пренебрегая активной составляющей сопротивления КЭ, его индуктивную составляющую, которая обеспечивала бы необходимую величину тока, можно определить по выражению

$$jX' = \frac{\dot{E}}{i_K} = \frac{2,84 \times e^{-j90}}{110 \times e^{j180}} = j25,82 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Найдём величину изменения индуктивного сопротивления КЭ:

$$\Delta jX = jX - jX' = (j77,60 - j25,82) \times 10^{-3} = j51,78 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Для уменьшения индуктивной части сопротивления КЭ в его цепь должна быть включена ёмкость  $C$ . Найдём величину этой ёмкости по выражению

$$C = \frac{1}{\omega \times \Delta X} = \frac{1}{100 \times \pi \times 51,78 \times 10^{-3}} = 0,0615 \text{ Ф.}$$

Таким образом, для уменьшения индуктивной части сопротивления КЭ до величины  $j25,82$  Ом в цепь экрана должна быть включена ёмкость  $C = 61500$  мкФ (рис. 26).

Согласно [2] конденсатор марки КС2-0,22-16-3УЗ\*\* имеет ёмкость 1000 мкФ. Значит, для компенсации  $jX$  экрана необходимо 60 конденсаторов такой марки, которые должны быть

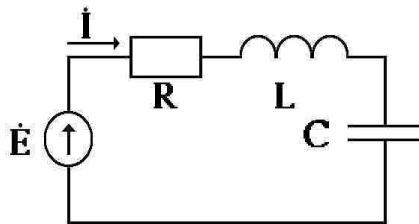


Рис. 26. Схема включения ёмкости в цепь резонансного контурного экрана

\*\* Конденсатор может быть выбран и другой марки с меньшим рабочим напряжением, например 5 В, меньшими габаритами и большей ёмкости. Основное требование к конденсатору – способность постоянно работать под нагрузкой.

соединены параллельно в батарею конденсаторов, общая ёмкость которой составит 60000 мкФ.

Определим величину тока  $\dot{I}_k$  в КЭ при таком значении ёмкости.

Уменьшение значения индуктивного сопротивления

$$\Delta j \underline{X} = j \frac{1}{\omega \times C} = j 53,05 \times 10^{-3} \text{ м}^{\text{Г}},$$

результатирующее индуктивное сопротивление КЭ составит

$$j \underline{X}' = jX - \Delta j \underline{X} = 24,55 \times 10^{-3} \text{ м}^{\text{Г}},$$

полное сопротивление экрана  $\underline{Z} = R + jX' = (9,57 + j24,55) \times 10^{-3}$  Ом, ток в КЭ

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}} = 107,8 \times e^{-j158,7} \text{ А.}$$

Мы получили ток, модуль которого на 2,2 А меньше, чем было намечено, но дальнейшая компенсация индуктивной составляющей нецелесообразна, т.к. с увеличением модуля тока происходит уменьшение значения фазного угла (рис. 27), а нами в его значении потеряно  $21,3^\circ$  от необходимых  $180^\circ$ . Поэтому рассчитывать распределение напряжённости МП нам придётся с учётом его эллипсности, т.е. через  $H_{\text{max}}$  [4].

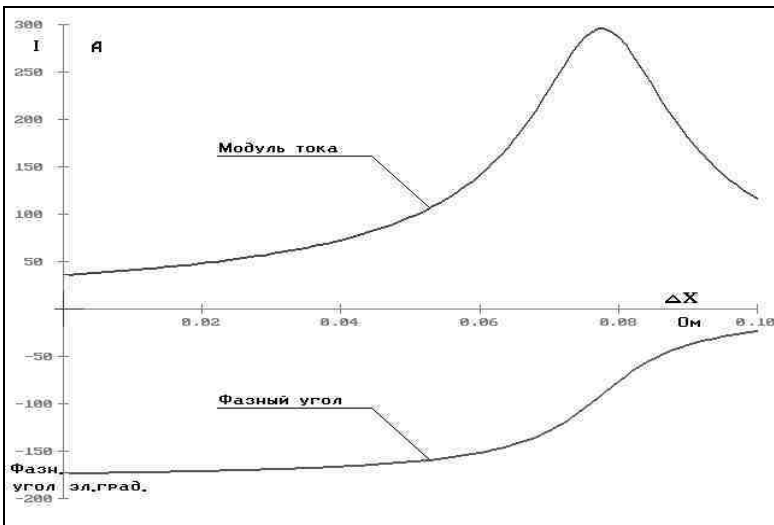


Рис. 27. Изменение модуля и фазного угла тока, наведенного в одновитковом РКЭ, в зависимости от величины скомпенсированной составляющей  $\Delta X$  индуктивного сопротивления  $X$  экрана

На рис. 28 показано распределение напряжённости МП вдоль оси OZ на уровнях от поверхности земли: 0,5 м (кривая 1); 1,8 м (кривая 2) и на уровне поверхности земли (кривая 3).

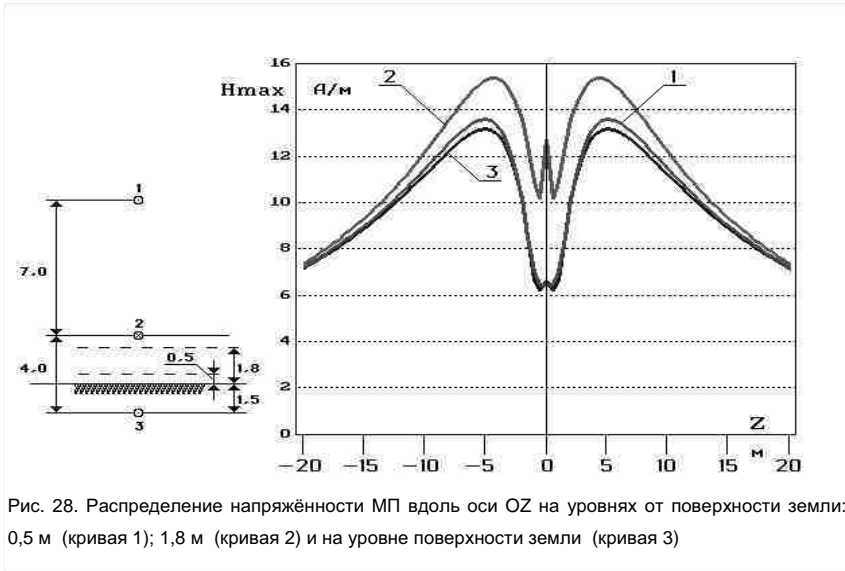


Рис. 28. Распределение напряжённости МП вдоль оси OZ на уровнях от поверхности земли: 0,5 м (кривая 1); 1,8 м (кривая 2) и на уровне поверхности земли (кривая 3)

Как видно из рис. 28, применение РКЭ с включением в его цепь 20 параллельно соединённых конденсаторов марки КС2-0,22-16-3У3 приводит к

наведению в экране тока  $\dot{I}_k = 107,8 \times e^{-j158,7}$  А и снижению в экранируемой зоне напряжённости МП до значений, меньших 16 А/м.

Рассмотрим случай, когда провод с током и КЭ лежат не в одной плоскости (рис. 29, А). ЭДС в экране будет наводиться перпендикулярной к плоскости КЭ составляющей напряжённости МП, создаваемого проводом с током.

Для треугольника ABD и составляющих вектора  $\dot{H}$  можно записать:

$$\frac{H}{H_X} = \frac{r}{y}, \quad H_X = H \times \frac{y}{r}, \quad \text{поскольку } \dot{H} = \frac{\dot{I}}{2 \times \pi \times r}.$$

Учитывая, что  $r^2 = c^2 + y^2$ , получим:

$$\dot{H}_X = \frac{\dot{I} \times y}{2 \times \pi \times \left( c^2 + y^2 \right)}. \quad (7)$$

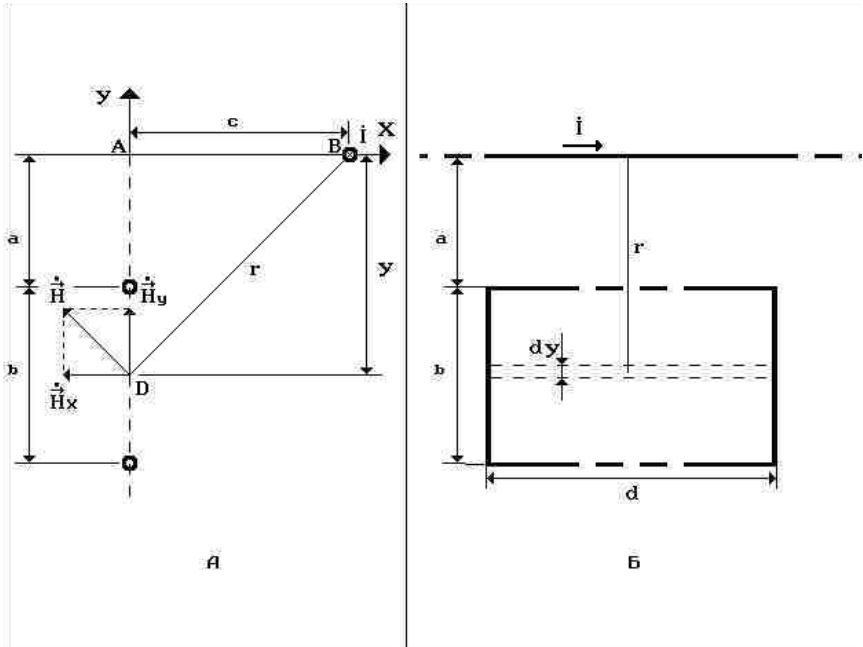


Рис. 29. К определению ЭДС, наводимой в КЭ, при расположении провода с током и экрана не в одной плоскости

Элементарный магнитный поток, пронизывающий КЭ, определим по выражению (см. рис. 29, Б)

$$d\Phi_X = \mu \times \mu_0 \times \dot{H}_X \times d \times dy = \frac{\mu \times \mu_0 \times I \times d \times y}{2 \times \pi \times (c^2 + y^2)} \times dy.$$

Интегрируя по у от  $a$  до  $a + b$ , получим [5]:

$$\Phi_X = \frac{\mu \times \mu_0 \times d \times I}{4 \times \pi} \times \ln \frac{c^2 + (a + b)^2}{c^2 + a^2}.$$

ЭДС, наведенную в КЭ, имеющем  $w$  число витков, найдём по выражению

$$\dot{E}_X = -\frac{d\psi_X}{dt} = -w \frac{d\Phi_X}{dt} = -j \frac{\mu \times \mu_0 \times w \times I \times d \times \omega}{4 \times \pi} \times \ln \frac{c^2 + (a + b)^2}{c^2 + a^2}. \quad (8)$$

Если мы имеем  $N$  проводов с токами  $I_N$  и провода расположены на разной высоте и разных удалениях от КЭ, выражение (7) для определения ЭДС, наведенной этими токами в контурном экране, примет вид:

$$\dot{E} = -j \frac{\mu \times \mu_0 \times w \times d \times \omega}{4 \times \pi} \times \sum_{i=1}^{i=N} \left( I_i \times \ln \frac{c_i^2 + (a_i + b)^2}{c_i^2 + a_i^2} \right) \quad (9)$$

#### Литература

1. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники Т.2. — Л.: Энергия. — 1967.
2. **Электрическая часть электростанций и подстанций/ И.П.Крючков, Н.Н.Кувшинский, Б.Н.Неклепаев** — М.: Энергия. — 1978.
3. **Яворский Б.М., Детлаф А.А.** Справочник по физике. — М.: Наука, 1977.
4. **Кац Р.А., Перельман Л.С.** Расчет электрического поля трехфазной линии электропередачи // Электричество. — 1978. — № 1. - С. 16—19.
5. **Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт.** — М.: Наука. — 1973.

УДК 621.315.1

## Экранирование магнитного поля ВЛ-500 кВ по составляющим декартовой системы координат

*Дикой В.П., Токарский А.Ю., кандидаты техн. наук,  
Красин О.В., инж.*

**Введение.** Рассмотрим возможность применения контурных экранов (КЭ) на трёхфазной ВЛ-500 кВ традиционного исполнения в целях снижения уровней напряжённости  $H$  магнитного поля (МП) под линией (рис. 1).

На рис. 2 показаны кривые распределения на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 8 м, составляющих  $H_x$  и  $H_y$  напряжённости МП в декартовой системе координат.

Для линии с габаритом 8 м размещение КЭ непосредственно под фазами невозможно из-за электрической прочности воздушного промежутка «провода фаз – провода КЭ». Поэтому экранирование составляющей  $H_y$  напряжённости МП ВЛ-500 кВ с габаритом 8 м не представляется возможным. Целесообразно расположить экраны по краям ВЛ в местах максимумов составляющей  $H_x$ , т.е. на расстоянии  $\pm 15$  м от оси линии.



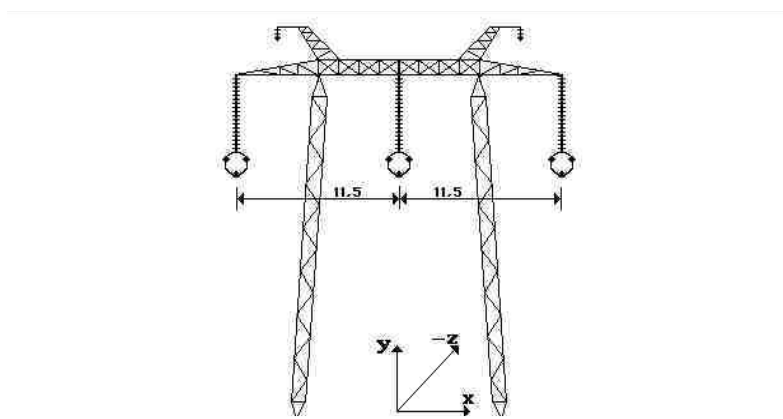


Рис.1. ВЛ-500 кВ на промежуточной металлической опоре

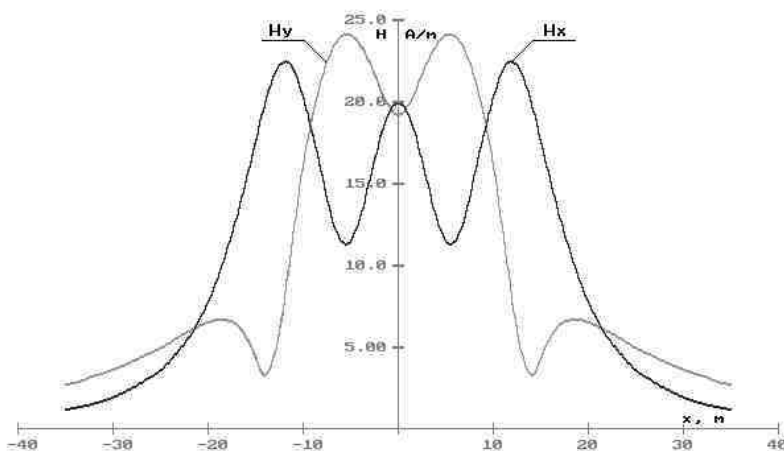


Рис. 2. Распределение на уровне 1,8 м от поверхности земли составляющих  $H_x$  и  $H_y$  в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 8 м

Для рассмотрения механизма и процесса выбора параметров КЭ, пренебрегая пока нарушением изоляционной прочности воздушных промежутков «фаза – КЭ», установим одновитковые КЭ рассмотренной в предыдущей статье конструкции ( $b = 3$  м) на расстоянии  $\pm 15$  м и 0 м от оси ВЛ-500 кВ (рис. 3, А). Рассмотрим распределение  $\dot{H}_x$ , создаваемой только фазными токами линии в плоскостях КЭ<sub>1</sub>, КЭ<sub>2</sub> и КЭ<sub>3</sub> вдоль вертикальных осей в центре экранов.

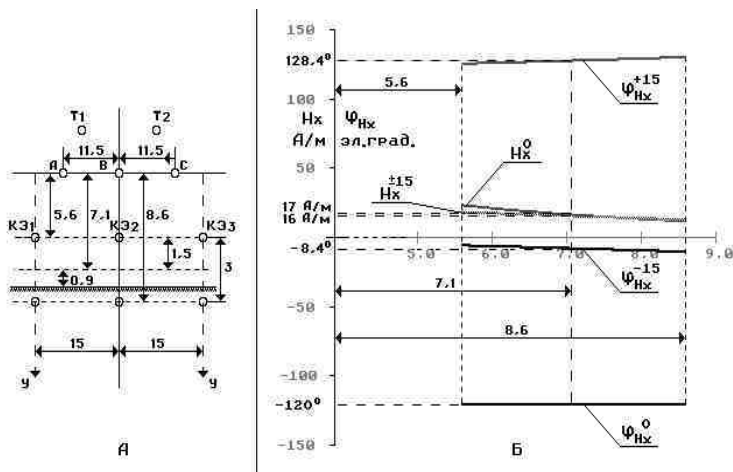


Рис. 3. Расположение контурных экранов под ВЛ-500 кВ (А) и распределение комплекс-вектора составляющей  $\vec{H}_x$  по вертикальным осям (оси ОУ) в плоскостях КЭ<sub>1</sub>, КЭ<sub>2</sub> и КЭ<sub>3</sub> (Б)

На рис. 3, Б показано изменение модуля и фазного угла рассматриваемых напряжённостей МП.

Если кривые изменения модуля  $H_x$  для всех КЭ практически совпадают, то кривые фазных углов не совпадают. Для КЭ<sub>1</sub> фазный угол изменяется от  $-6,2^\circ$  (верхний провод КЭ<sub>1</sub>,  $Y = 5,6$  м) до  $-10,9^\circ$  (нижний провод КЭ<sub>1</sub>,  $Y = 8,6$  м), а для КЭ<sub>3</sub> - от  $126,2^\circ$  (верхний провод,  $Y = 5,6$  м) до  $130,9^\circ$  (нижний провод,  $Y=8,6$  м). В центрах КЭ<sub>1</sub> и КЭ<sub>3</sub> ( $Y = 7,1$  м) значения фазных углов составляют  $-8,4^\circ$  и  $128,4^\circ$  соответственно.

Значение фазного угла  $\vec{H}_x$  по вертикальной оси в плоскости КЭ<sub>2</sub> постоянно и составляет  $120^\circ$ . Для наибольшей компенсации МП в плоскости экрана создаваемый им комплекс-вектор напряжённости МП должен быть направлен встречно на комплексной плоскости комплекс-вектору  $\vec{H}_x$ , создаваемому фазными токами линии. Тогда фазный угол комплекс-вектора  $\vec{H}$ , создаваемого КЭ<sub>1</sub>, должен иметь значение  $171,6^\circ$ , КЭ<sub>2</sub> – значение  $60^\circ$  и КЭ<sub>3</sub> – значение  $-51,6^\circ$ . Поскольку ток в КЭ и создаваемая им напряжённость МП совпадают на комплексной плоскости, то токи в КЭ<sub>1</sub>, КЭ<sub>2</sub> и КЭ<sub>3</sub> должны быть следующими:

$$i_{K1} = I_{K1} \times e^{j171,6^\circ} \text{ A}, \quad i_{K2} = I_{K2} \times e^{j60^\circ} \text{ A} \quad \text{и} \quad i_{K3} = I_{K3} \times e^{-j51,6^\circ} \text{ A},$$

где  $I_{ki}$  – модуль действующего значения тока в проводах  $i$ -го КЭ.

Рассмотрим три пассивных КЭ. По выражению (9) предыдущей статьи [2] найдём величину ЭДС, наводимую в ПКЭ1. При  $a_1 = a_2 = a_3 = 5,6$  м  $c_1 = 3,5$  м,  $c_2 = 15$  м,  $c_3 = 26,5$  м,  $b = 3$  м,  $d = 100$  м и соответствующем нагрузке, равной натуральной мощности линии, модуле фазного тока 1050 А.

Величина ЭДС в ПКЭ<sub>1</sub> составит  $\dot{E}_1 = 1,92 \times e^{-j98,3}$  В. Аналогично в ПКЭ<sub>2</sub>

$\dot{E}_2 = 2,32 \times e^{j150}$  В и в ПКЭ<sub>3</sub>  $\dot{E}_3 = 1,92 \times e^{j38,3}$  В. Тогда токи, наведенные в

экранах, будут равны:  $\dot{I}_{K1} = 26,0 \times e^{j179}$  А в ПКЭ<sub>1</sub>,  $\dot{I}_{K2} = 31,4 \times e^{j67,3}$  А и

$\dot{I}_{K3} = 26,0 \times e^{-j44}$  А в ПКЭ<sub>3</sub>.

На рис. 4 показано распределение напряжённости магнитного поля в сечении ВЛ-500 кВ на уровне 0,9 м от поверхности земли (центр экрана) для случаев: линия не экранирована – кривая 0, линия экранируется с помощью двух ПКЭ – кривая 1, линия экранируется двумя активными КЭ с токами

$\dot{I}_{K1} = 62 \times e^{j171,6}$  А,  $\dot{I}_{K2} = 62 \times e^{j60}$  А и  $\dot{I}_{K3} = 62 \times e^{-j51,6}$  А – кривая 2, а также

с токами  $\dot{I}_{K1} = 120 \times e^{j171,6}$  А,  $\dot{I}_{K2} = 120 \times e^{j60}$  А и  $\dot{I}_{K3} = 120 \times e^{-j51,6}$  А – кривая 3.

Для обеспечения вышеуказанных значений токов в цепи экранов должны быть включены ЭДС:

для первого случая –

$$\dot{E}'_{жЭ1} = 2,7 \times e^{-j111} \text{ В}, \quad \dot{E}'_{жЭ2} = 2,3 \times e^{j135} \text{ В}, \quad \dot{E}'_{жЭ3} = 2,7 \times e^{j26} \text{ В}$$

и для второго случая –

$$\dot{E}'_{жЭ1} = 7,0 \times e^{-j108} \text{ В}, \quad \dot{E}'_{жЭ2} = 6,6 \times e^{j140} \text{ В}, \quad \dot{E}'_{жЭ3} = 7,0 \times e^{j29} \text{ В}.$$

Применение двух пассивных контурных экранов уже позволяет снизить  $H_{max}$  в зоне  $X = \pm 15$  м до значений, меньших 16 А/м (кривая 1). При переходе к АКЭ с модулями токов 62 и 120 А происходит ещё большая компенсация  $H_{max}$  в зонах  $X = \pm 15$  м и сужение зоны, где  $H_{max} > 16$  А/м (кривые 2 и 3). В зонах под и между фазами ВЛ применение КЭ приводит к незначительному уменьшению значений  $H_{max}$ . Установка КЭ под средней фазой не даёт эффекта экранирования, т.к. вертикальные КЭ уменьшают только составляющую  $H_x$ , а при  $X = 0$  м она практически равна составляющей  $H_y$  (см. рис. 2), которая и будет определять величину  $H_{max}$ . Для ВЛ с горизонтальным расположением фаз установка КЭ под средней фазой нецелесообразна.

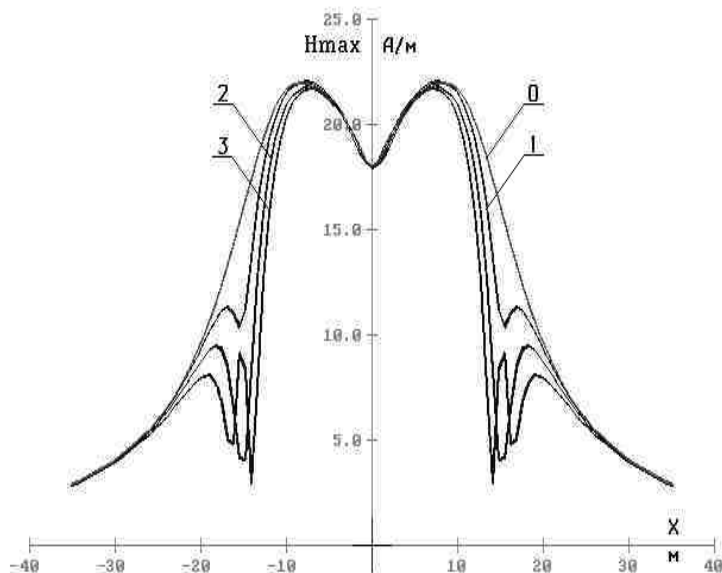


Рис. 4. Распределение  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровне 0,9 м от поверхности земли (центр экрана) для случаев: линия не экранирована (кривая 0), линия экранируется с помощью двух ПКЭ (кривая 1), линия экранируется двумя активными КЭ с токами  $\dot{I}_{K1} = 62 \times e^{j171,6}$  А,  $\dot{I}_{K2} = 62 \times e^{j60}$  А и  $\dot{I}_{K3} = 62 \times e^{-j51,6}$  А (кривая 2), а также с токами  $\dot{I}_{K1} = 120 \times e^{j171,6}$  А,  $\dot{I}_{K2} = 120 \times e^{j60}$  А и  $\dot{I}_{K3} = 120 \times e^{-j51,6}$  А (кривая 3)

На рис. 5 показаны кривые распределения  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровнях от поверхности земли 1,8 м – кривая 1; 0,9 м (центр экрана) – кривая 2 и 0 м (поверхность земли) – кривая 3 при применении трёх АКЭ с модулями токов в них  $I_{ki} = 120$  А.

Применение трёх АКЭ с модулями тока 120 А приводит к увеличению  $H_{max}$  в зонах, близких к горизонтальным проводам экрана (уровни 1,8 м и 0 м). В этом случае необходимо либо увеличивать высоту КЭ (значение  $b$ ), что ограничено прочностью изоляционного промежутка «провода фаз ВЛ – провода КЭ», либо уменьшать ток в экранах.

На рис. 6 показано распределение  $H_{max}$  под ВЛ-500 кВ на тех же уровнях, но с  $I_{ki} = 62$  А (три АКЭ). При габарите «провод фазы – земля», равном 8 м, установка КЭ под ВЛ при  $X = \pm 15$  и 0 м не даёт желаемого снижения  $H_{max}$  до значений, меньших 16 А/м.

Расположим три КЭ на расстоянии  $\pm 12$  м и 0 м от оси ВЛ так, чтобы верхние провода экрана находились на высоте 3 м, а нижние – под поверхностью земли на глубине 1,5 м. Для такой конструкции экранов высота расположения центра средней фазы, а значит, и остальных фаз, должна составлять 11,2 м.

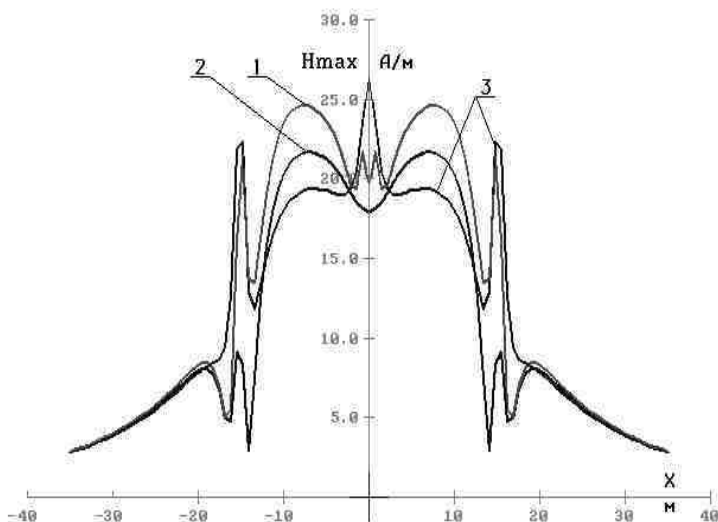


Рис. 5. Распределение  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровнях от поверхности земли 1,8 м – кривая 1; 0,9 м (центр экрана) – кривая 2 и 0 м (поверхность земли) – кривая 3 при применении трёх АКЭ с модулями токов в них  $I_{kl} = 120$  А

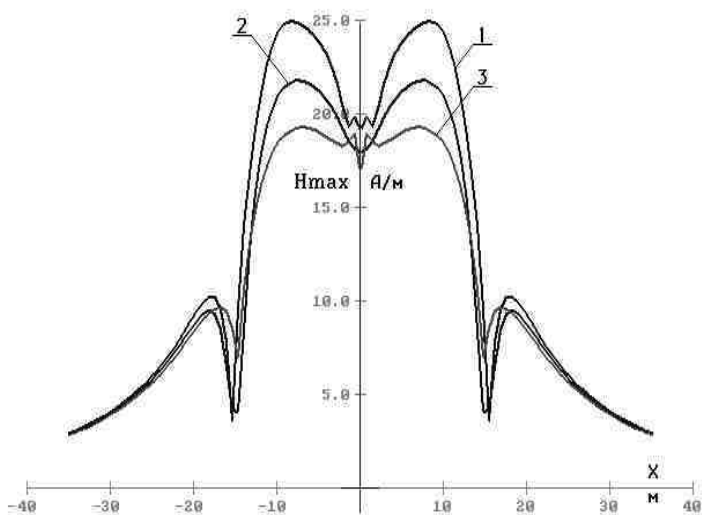


Рис. 6. Распределение  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ на уровнях 1,8 м – кривая 1; 0,9 м – кривая 2 и 0 м – кривая 3 от поверхности земли при использовании трёх АКЭ с  $I_{kl}=62$  А.

На рис. 8, А показано расположение трёх АКЭ в сечении ВЛ-500 кВ при минимальном габарите «провод фазы ВЛ – земля», равном 11 м.

Как и в предыдущем случае, составляющая  $\dot{H}_x$  магнитного поля, создаваемого трёхфазной системой токов в фазах ВЛ, в плоскости крайних экранов изменяется не только по модулю, но и по фазному углу. На рис. 7 показано распределение значений фазных углов составляющих  $\dot{H}_x$  вдоль вертикальных осевых линий АКЭ1 –  $\varphi_{H_x}^{-12}$  и АКЭ3 –  $\varphi_{H_x}^{12}$ , а также величин модулей напряжённостей  $H_x$  МП, создаваемого фазными токами линии.

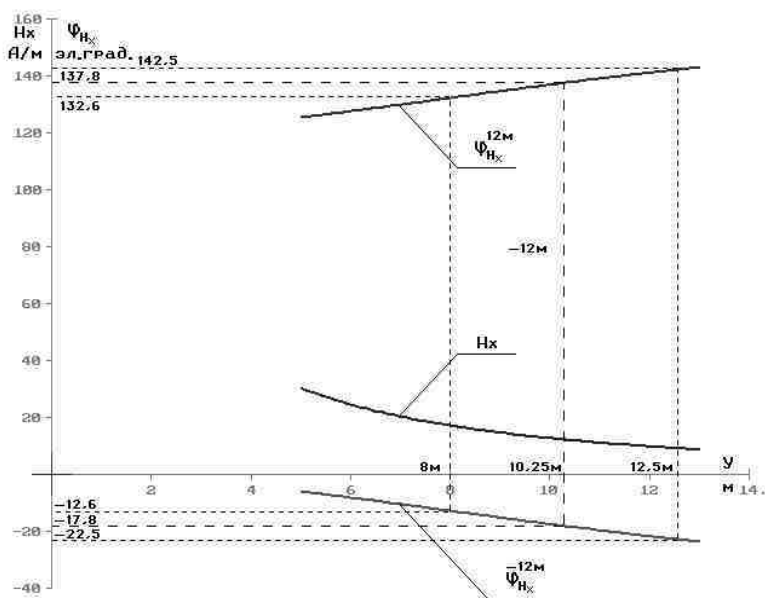


Рис. 7. Распределение значений фазных углов составляющих  $\dot{H}_x$  вдоль вертикальных осевых линий АКЭ1 –  $\varphi_{H_x}^{-12}$  и АКЭ3 –  $\varphi_{H_x}^{12}$ , а также величин модулей напряжённостей  $H_x$

Если кривые изменения  $H_x$  для АКЭ1 и АКЭ3 совпадают, то фазный угол  $\dot{H}_x$  для АКЭ1 изменяется от  $-12,6^\circ$  до  $-22,5^\circ$  со значением в центре экрана  $-17,8^\circ$ , а для АКЭ3 от  $132,6^\circ$  до  $142,5^\circ$  – со значением в центре экрана  $137,8^\circ$ .

Фазные углы токов в экранах должны быть:  $180^\circ - \varphi_{H_x}^{-12} = 162,2^\circ$  для АКЭ1 и

$\varphi_{H_x}^{12} - 180^\circ = -42,2^\circ$  – для АКЭ3. Для АКЭ2 фазный угол  $\dot{H}$  х вдоль верти-

кальной оси экрана не изменяется и равен  $-120^\circ$ , значит, фазный угол тока в проводе этого экрана должен составить  $60^\circ$ . Комплекс сопротивления каждого экрана составляет  $Z = (9,61 + j79,5) \times 10^{-3}$  Ом. ЭДС, наводимые фазными токами, будут:  $2,20 \times e^{j107,2}$  В и  $2,20 \times e^{j47,2}$  В соответственно в АКЭ1 и АКЭ3 и  $1,67 \times e^{j60}$  В в АКЭ2. Чтобы ток в экранах имел ранее выбранные нами значения фазных углов и модуль 100 А, в цепь экранов необходимо включить ЭДС:  $\dot{E}'_1 = 5,8 \times e^{-j117,5}$  В,  $\dot{E}'_2 = 6,4 \times e^{j141,3}$  В и  $\dot{E}'_3 = 5,8 \times e^{j38,5}$  В.

На рис. 8, Б показаны кривые распределения  $H_{max}$ : 0 - неэкранированное МП, создаваемое проводами фаз ВЛ-500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли, 1 - экранированное с помощью трёх АКЭ поле на уровне 1,8 м от поверхности земли, 2 - экранированное поле на уровне 2,25 м от верхнего (нижнего) провода АКЭ (центр экрана) и 3 - экранированное поле на уровне земли.

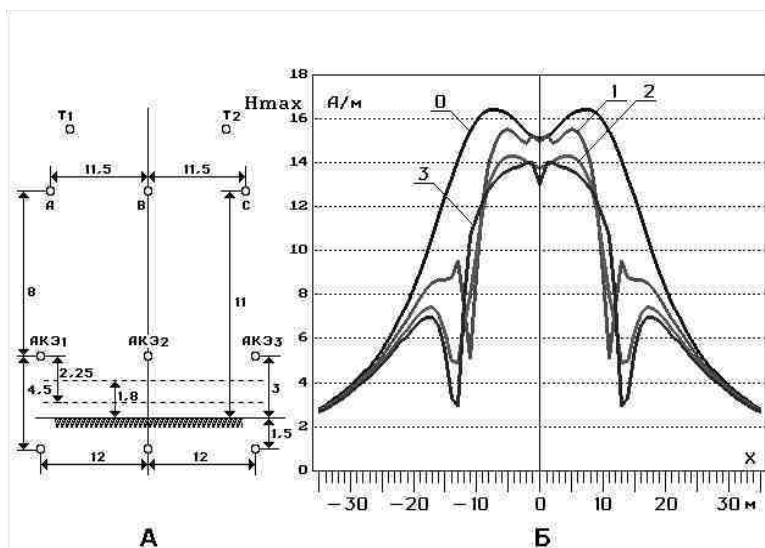


Рис. 8. Распределения  $H_{max}$ : 0 – неэкранированное поле, создаваемое проводами фаз ВЛ-500 кВ на уровне 1,8 м от поверхности земли, 1 – экранированное с помощью трёх АКЭ поле на уровне 1,8 м от поверхности земли, 2 – экранированное поле на уровне 2,25 м от верхнего (нижнего) проводов АКЭ (центр экрана) и 3 – экранированное поле на уровне земли (б)

Установка АКЭ позволила сузить зону интенсивных МП и уменьшить значения  $H_{max}$  до величин, меньших 16 А/м. Однако эффективность работы АКЭ2, установленного по оси линии, невелика, т.к. в этой области  $H_x$  намного меньше  $H_y$  (рис. 9).

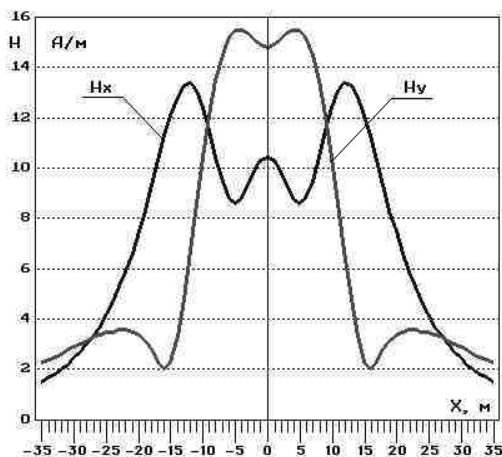


Рис. 9. Распределение на уровне 1,8 м от поверхности земли составляющих  $H_x$  и  $H_y$  напряжённости МП в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 11 м

На рис. 10 показаны кривые распределения  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ (габарит «провод – земля» 11 м) на уровне 1,8 м от поверхности земли в случае установки трёх АКЭ (кривая 1) и при отсутствии АКЭ2 (кривая 2). Очевидна нецелесообразность применения АКЭ2 ввиду его крайне малой эффективности.

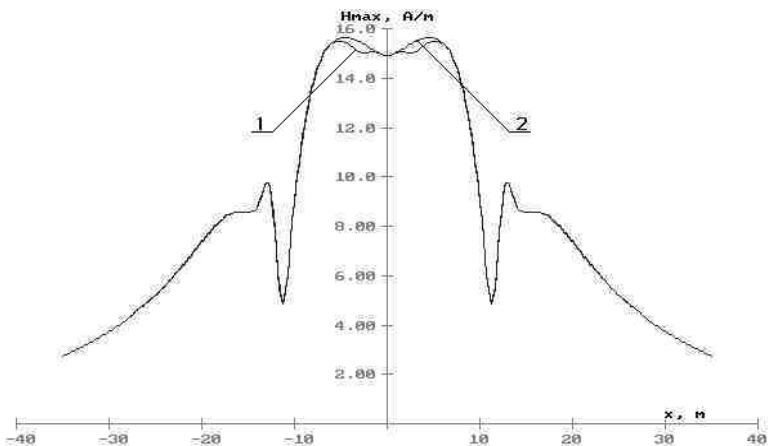


Рис. 10. Распределение  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ (габарит «провод – земля» 11 м) на уровне 1,8 м от поверхности земли в случае установки трёх АКЭ (кривая 1) и при отсутствии АКЭ2 (кривая 2)



Таким образом, установка двух АКЭ (АКЭ1 и АКЭ2) при габарите ВЛ-500 кВ «нижний провод фазы – земля», равном 11 м, позволяет уменьшить  $H_{max}$  до значений, меньших 16 А/м.

Рассмотрим возможность применения резонансных контурных экранов для уменьшения интенсивности МП, создаваемого ВЛ-500 кВ. Геометрические размеры и места установки двух экранов (РКЭ1 и РКЭ3) оставим неизменными из предыдущей задачи. Габарит «нижний провод фазы – земля» у ВЛ оставим равным 11 м. Найдём значение ёмкости, необходимой для включения в цепи РКЭ, чтобы ток в экране РКЭ1

$$\dot{I}_{K1} = 100 \times e^{j162^\circ} \text{ А, а в РКЭ3 } \dot{I}_{K2} = 100 \times e^{-j42^\circ} \text{ А,}$$

т.е. таким же, как в случае активных КЭ. Величину ёмкости определим по выражению

$$C = \left| \frac{1}{j \times \omega \left( \dot{E} / \dot{I}_K - R - j \times \omega \times L \right)} \right|,$$

где  $\dot{E}$  - ЭДС, наведенная в экране,  $\dot{I}_K$  - ток в КЭ,  $R$  и  $L$  - соответственно активное сопротивление и индуктивность экрана.

Подставляя в последнее выражение значения  $\dot{E}$ ,  $\dot{I}_K$ ,  $R$  и  $L$ , получим  $C = 54580$  мкФ. Используя параллельно соединённые 18 конденсаторов марки КС2-0,22-16-ЗУЗ, получим величину ёмкости  $C = 54000$  мкФ. Тогда токи в РКЭ1 и РКЭ3

$$\dot{I}_{K1} = 97 \times e^{-j172} \text{ А, } \dot{I}_{K3} = 97 \times e^{-j18} \text{ А.}$$

Наличие активного сопротивления у РКЭ, а также взятие по модулю значения  $C$  и уменьшение его величины на 580 мкФ приводит к изменению как модулей, так и фазных углов токов в РКЭ. На рис. 11 показано распределение  $H_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ (габарит 11 м) при использовании РКЭ1 и РКЭ3 с полученными токами (кривая 1).

Несимметрия кривой  $H_{max}(x)$  объясняется наличием активного сопротивления  $R$  контура экрана. Если  $R$  не учитывать (теоретически), то токи в РКЭ1 и РКЭ3 будут иметь значения:

$$\dot{I}_{K1} = 107 \times e^{j163} \text{ А, } \dot{I}_{K3} = 107 \times e^{-j43} \text{ А.}$$

Кривая 2 на рис. 11 показывает распределение  $H_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ при величинах токов в РКЭ, полученных без учёта активного сопротивления контура экрана. В этом случае кривая  $H_{max}$  полностью симметрична относительно оси линии. Применение двух РКЭ для ВЛ-500 кВ с габаритом «нижний провод фазы – земля», равным 11 м, позволило снизить  $H_{max}$  до значений, меньших 16 А/м, и сузить зону максимальных уровней напряжённости МП до расстояния  $\pm 10$  м от оси линии.

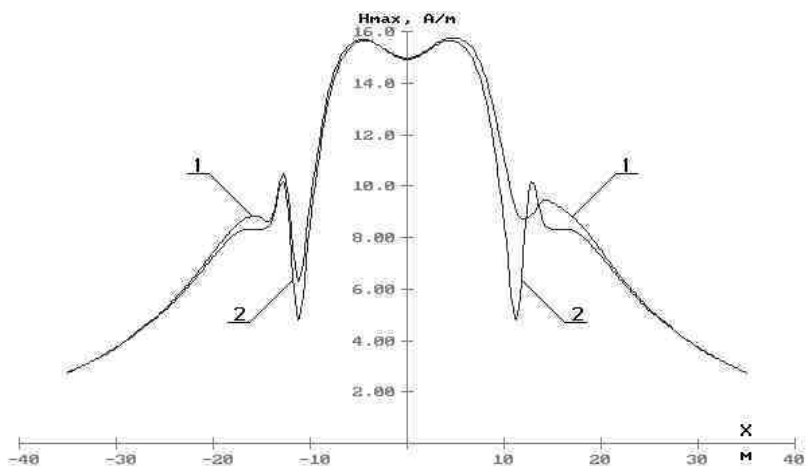


Рис. 11. Распределение  $H_{max}$  на уровне 1,8 м от поверхности земли в сечении ВЛ-500 кВ (габарит 11,2 м) при использовании РКЭ1 и РКЭ3 с токами, полученными с учётом активного сопротивления  $R$  (кривая 1), и при величинах токов в РКЭ, полученных без учёта активного сопротивления контуров экранов (кривая 2)

Величина тока в фазах линии меняется в соответствии с её нагрузкой. Токи, наведенные в пассивных и резонансных контурных экранах прямо пропорциональны напряжённости МП, создаваемого фазными токами линии, а значит, и самим фазным токам. Таким образом, ПКЭ и РКЭ работают в режиме саморегулирования процесса компенсации МП, создаваемого ВЛ, т.е. процентное уменьшение напряжённости поля линии с помощью ПКЭ и РКЭ не зависит от величины фазного тока, АКЭ такой способностью не обладают. При изменении тока в фазах ВЛ меняется величина ЭДС  $\dot{E}$ , наведенная МП линии в контуре экрана, но последовательно включённая в

снизить напряжённость  $H_{max}$  до значений, меньших 16 А/м, на всех нормируемых уровнях под ВЛ-500 кВ с габаритом «провод – земля», равным 10 м.

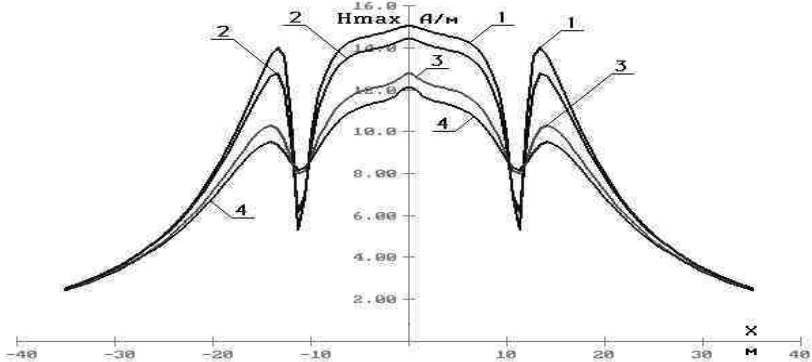


Рис. 20. Распределение  $H_{max}$  в сечении ВЛ-500 кВ с габаритом «провод – земля» 10 м при использовании направленных КЭ с координатами  $y = 3$  м,  $x = \pm 11,5$  м осей верхних и  $y = -5$  м,  $x = \pm 0,1$  м осей нижних проводов на уровнях от поверхности земли: 1,8 м (кривая 1); 1,5 м (кривая 2); 0,5 м (кривая 3) и 0 м (кривая 4)

#### Литература

1. Дикой В.П., Токарский А.Ю., Иостсон Ю.А., Красин О.В. Методы расчёта и измерения эллипсоидных магнитных полей промышленной частоты // Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 4; Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, В.Н. Седунова. / Иван. гос. энерг. ун-т.— Иваново.— 2001. — С. 82 – 89.
2. Токарский А.Ю. Определение фазного угла напряжённости магнитного поля ВЛ.// Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 4; Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. / Иван. гос. энерг. ун-т.— Иваново.—2001.— С. 92 – 94.

УДК 621.315

## Электромагнитное поле кабельной оболочки при однофазном замыкании на землю

Слышалов В.К., д-р техн. наук, Шуин В.А., д-р техн. наук,  
Гречухина И.В., инж.

В кабельных сетях с изолированной нейтралью при замыкании одной из жил кабеля на оболочку ток короткого замыкания протекает по оболочке и частично через фазные емкости стекает на неповрежденные фазы (токи  $I_c$ ) как данного, так и соседних кабелей. На жилы поврежденного кабеля ток  $I_c$  перетекает непосредственно, затем, суммируясь в источнике токи  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$ , под-

текает по жиле А к месту повреждения (рис.1). Таким образом, через трансформатор тока Т1 проходит суммарный ток, равный нулю.

Через фазы соседних кабелей протекают те токи, которые стекают с оболочки поврежденного кабеля на землю. Эти токи, суммируясь в источнике и протекая затем по поврежденной жиле, создадут тот ток небаланса, на который и реагирует трансформатор тока и релейная защита.

В связи с этим можно сформулировать две задачи: задачу расчета емкостных токов  $I_{c2}$  и  $I_{c3}$  и задачу расчета токов, стекающих на землю  $I_{c2}$   $I_{c3}$ . В настоящей работе рассматривается задача о стекании тока с оболочки на землю.

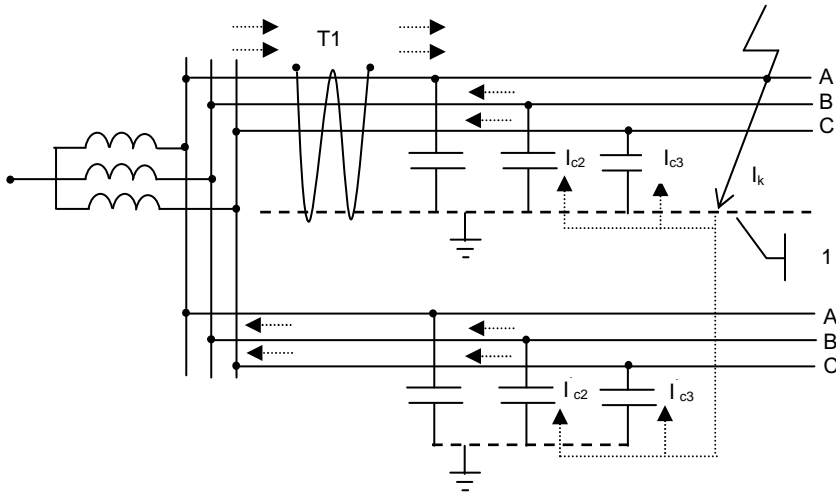


Рис. 1. Схема растекания тока при однофазном коротком замыкании в кабеле (1 – оболочка кабеля)

Процесс протекания тока по проводящей оболочке и его стекания в среду, обладающую проводимостью, описывается уравнениями Максвелла, которые запишем для комплексов напряженности электрического и магнитного полей:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\vec{H}} &= \vec{\delta} + j \cdot \omega \cdot \varepsilon_a \cdot \dot{\vec{E}}, \\ \operatorname{rot} \dot{\vec{E}} &= -j \cdot \omega \cdot \mu_a \cdot \dot{\vec{H}}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  Гц,  $\varepsilon_a$  и  $\mu_a$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости.

В рассматриваемой задаче система уравнений Максвелла для любой составляющей векторов  $\underline{E}$ ,  $\underline{H}$  сводится к уравнению Гельмгольца [1]:

$$\Delta \vec{E}_x + m^2 \cdot \vec{E}_x = 0, \quad (2)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ .

Зависимость от  $x$  принята в форме

$$\vec{E}_x(x) = \vec{E}_x(0) \cdot e^{-\gamma \cdot x}, \quad (3)$$

причем

$$m^2 = \omega^2 \cdot \tilde{\epsilon}_a \cdot \mu_a + \gamma^2, \quad \tilde{\epsilon}_a = \epsilon_a - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot \rho}, \quad (4)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление среды;  $\gamma = \alpha + j\beta$  - коэффициент распространения,  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты затухания и фазы.

Рассмотрим распространение синусоидальной волны тока вдоль кабельной оболочки круглого сечения (рис. 2). Задача о расчете поля должна решаться для двух областей: тела оболочки (область 1) и земли (область 2).

Поскольку в задаче необходимо определить кроме  $E_{x1}$ ,  $E_{x2}$  составляющие  $E_{r1}$ ,  $E_{r2}$  и компоненты магнитного поля  $H_{\vartheta1}$ ,  $H_{\vartheta2}$ , покажем, как это сделать по известной функции  $E_{x1}(r)$ . Из уравнений (1) получаем выражения для электрического и магнитного полей:

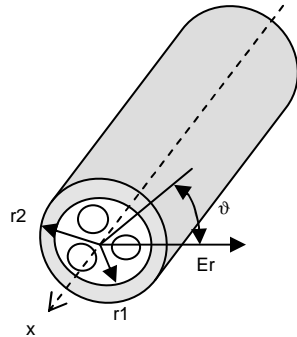


Рис. 2. Вектор напряженности в поле кабеля, где  $r_1$ ,  $r_2$  - внутренний и внешний радиусы оболочки кабеля

$$E_r = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{\partial E_x}{\partial r} \right), \quad (5)$$

$$H_{\vartheta} = -j \cdot \frac{\omega \cdot \tilde{\epsilon}_a}{m^2} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial r}. \quad (6)$$

Решение уравнения (2) представляется в форме

$$E_{x1} = A_1 J_0(m_1 r) + B_1 N_0(m_1 r), \quad (7)$$

при  $r_1 \leq r \leq r_2$ ,

$$E_{x2} = C_2 H_0(m_2 r), \quad (8)$$

при  $r_2 \leq r$ . В (7), (8)  $m_1 \approx k_1 = \sqrt{-j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_a}{\rho}}$ ,  $J_0$  и  $H_0$  - функции Бесселя и Ханкеля первого рода, нулевого порядка;  $J_1$  - функция Бесселя первого рода, первого порядка;  $N_0$  - функция Неймана;  $A_1, B_1, C_2$  - постоянные интегрирования.

Выполняя дифференцирование согласно выражениям (5), (6), получаем для оболочки кабеля:

$$E_{r1} = -\frac{1}{k_1} \frac{dA_1}{dx} J_1(k_1 r) + \frac{1}{k_1} \frac{dB_1}{dx} N_0(k_1 r), \quad (9)$$

$$H_{\vartheta 1} = \frac{1}{k_1 \cdot \rho_1} [A_1 J_1(k_1 r) - B_1 N_0(k_1 r)]. \quad (10)$$

Для земли имеем:

$$E_{r2} = \frac{1}{m_2} \frac{dC_2}{dx} H_0(m_2 r); \quad (11)$$

$$H_{\vartheta 2} = -\frac{1}{m_2 \cdot \rho_3} C_2 H_0(m_2 r). \quad (12)$$

Для определения постоянных интегрирования  $A_1, B_1, C_2$  и константы  $m_2$ , в уравнениях (7) ÷ (12) используем граничные условия:  $H_{\vartheta 1}(r_2) = H_{\vartheta 2}(r_2)$ ;  $E_{x1}(r_2) = E_{x2}(r_2)$ ;  $H_{\vartheta 1}(r_2) \cdot 2\pi r_2 - H_{\vartheta 1}(r_1) \cdot 2\pi r_1 = I$  и закон полного тока  $H_{\vartheta 1}(r_1) = I_{\text{каб}}$ .

Постоянную  $m_2$  определяем в ходе итерационного расчета по соотношению

$$\frac{\dot{E}_{x1}(r_2)}{\dot{H}_{\vartheta 1}(r_2)} = \frac{\dot{E}_{x2}(r_2)}{\dot{H}_{\vartheta 2}(r_2)}. \quad (13)$$

Расчет  $m_2$  проводился для частоты  $f = 50$  Гц и следующих значений параметров [2]: диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2 = 10$ , удельного сопротивления железа  $\rho_1 = 10^{-7}$  Ом м, земли  $\rho_2 = 10^2$  Ом м и магнитной проницаемости  $\mu_1 = 1000$ ,  $\varepsilon_{a1} \ll \frac{1}{\omega \cdot \rho_1}$ .

Получено значение  $m_2 = 2,819 \cdot 10^{-3} + j8,616 \cdot 10^{-4} = 2,948 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j16,9^\circ}$ , ему соответствует  $\gamma = \alpha + j\beta = 2,819 \cdot 10^{-3} + j8,616 \cdot 10^{-4} = 2,948 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j16,9^\circ}$ , подчерк-

нем, что коэффициент распространения относится и к первой и ко второй областям.

Согласно расчетному допущению (3) получили, что закон изменения тока по величине  $|\dot{I}(x)| = |\dot{I}(0)| \cdot e^{-\alpha x}$ , т.е. на длине в 1 км ток в оболочке уменьшается в  $e^{2.819} = 16.76$  раз.

Плотность тока утечки  $\dot{\delta}_r(x) = \dot{E}_r(x) \cdot \frac{1}{\rho_2}$ , изменения напряжения по длине кабельной оболочки определяются по формуле

$$\dot{U}(x) = \dot{U}(0) - \int_0^x E_x(x) dx. \quad (14)$$

Установленные закономерности растекания тока короткого замыкания и изменения напряжения по оболочке относительно поврежденной жилы по длине кабеля позволяют выполнить расчет распределения емкостных токов по длине кабеля и как итог вычислить ток небаланса.

На основе предлагаемой модели растекания тока замыкания на землю с кабельной оболочки может быть выполнен расчет всех параметров, необходимых для разработки цепной модели в форме длинной линии.

#### Литература

1. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. — М.: Энергия.— 1973. - 272 с.
2. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. — М.: Энергия.— 1978. - 224 с.

УДК 621.311.21:621.318.5:013.001.5

## **Эффективность экранирования контрольно-измерительной аппаратуры в условиях электрических станций**

*Голговских А.В., канд. техн. наук, Мисриханов М.Ш., д-р техн. наук*

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на мощных действующих ГЭС, показали наличие в машинном зале магнитного поля промышленной частоты [1,2,3], основными источниками которого являются главные и нулевые выводы статорных обмоток генератора, токопроводы и коммутационные аппараты. Напряженность поля в местах размещения кон-

трольно-измерительной аппаратуры в нормальном режиме работы электрооборудования достигает 1000 А/м, а при коротком замыкании - 3000-4000 А/м. Такие поля могут вносить существенную погрешность в работу контрольно-измерительной аппаратуры, вплоть до полной неработоспособности [4].

Для повышения надежности работы контрольно-измерительной аппаратуры на проектируемых ГЭС целесообразно размещать ее в областях машинного зала, где влияние магнитного поля будет наименьшим [3]. На действующих станциях такой способ не приемлем, так как требует дополнительных капитальных затрат, связанных с прокладкой контрольных кабелей и т.д. В этом случае для снижения влияния магнитных полей на контрольно-измерительную аппаратуру можно использовать экраны. Причем экранироваться могут как источники поля, так и отдельные устройства или комплексы контрольно-измерительной аппаратуры.

Настоящая статья посвящена оценке эффективности экранирования отдельных устройств контрольно-измерительной аппаратуры электрических станций. Рассматриваются экраны, выполненные из магнитных материалов, поскольку их использование наиболее целесообразно при частотах магнитного поля от 0 до 500 Гц [5,6].

Экраны указанных устройств будут иметь ряд конструктивных особенностей. Форма и размеры экранов должны соответствовать форме и размерам защищаемых устройств. Последние чаще всего имеют форму прямоугольного параллелепипеда. Нормальное функционирование контрольно-измерительной аппаратуры требует энергетического питания, ввода и вывода информации, осуществления контроля за режимами работы, профилактических мероприятий, и т.д. Все это приводит к наличию в стенках экранов отверстий, щелей, крышек, разъемных и неразъемных соединений отдельных частей.

Воздействующее магнитное поле также будет иметь ряд особенностей. Обычно размеры контрольно-измерительных устройств, а значит, и размеры их экранов, во много раз меньше расстояния до источников магнитного поля. Поэтому поле в местах установки отдельных устройств можно считать однородным. Но направление вектора напряженности поля может быть практически любым. К тому же при различных режимах работы электрооборудования амплитуда напряженности магнитного поля в местах установки устройств будет иметь различные значения, что будет приводить к изменению магнитной проницаемости материалов магнитных экранов, а, значит, и к изменению его экранирующего действия.

Экраны могут одновременно служить корпусом устройства, как это было у ранее выпускавшихся электромеханических устройств. Позднее в целях экономии металла стальные корпуса были заменены пластмассовыми, что снизило помехозащищенность устройств. В настоящее время может быть целесообразен выпуск устройств в корпусах, выполненных из конструкционной или электротехнической стали.

Для оценки экранирующего действия описанных выше реальных экранов целесообразно пойти по пути идеализации их конструкции. Поскольку



размеры реальных экранов по осям координат примерно одинаковы, то их можно заменить эквивалентными сферическими. Радиусы эквивалентных экранов определяются из условия равенства площадей поверхности реального и эквивалентного экранов:

$$R_1 = \sqrt{\frac{ab + ac + bc}{2\pi}},$$

где  $a, b, c$  – размеры реального экрана.

Анализ экранирующего действия идеальных экранов, проведенный в [5,6], показывает, что при частоте магнитного поля 50 Гц магнитные экраны действуют в основном как магнитоэлектрические, по принципу замыкания магнитного поля. Поэтому важнейшими характеристиками таких экранов являются магнитная проницаемость материала ( $\mu$ ) и толщина стенки экрана ( $d$ ).

Толщина стенки сферического экрана, заменяющего реальный, определяется из равенства объемов металла. Считается, что объем металла, содержащийся в реальном экране, равномерно распределен по всей его поверхности. В результате получим:

$$d = V_M / (4\pi R_1^2),$$

где  $V_M$  - объем металла в реальном экране.

Для определения действительного значения магнитной проницаемости были сняты кривые намагничивания во внешнем магнитном поле нескольких экранов, изготовленных из холоднокатаных и горячекатаных электротехнических и конструкционных сталей. Экраны помещались в специальную установку, в которой создавалось переменное магнитное поле частотой 50 Гц [7]. Измерялась амплитуда магнитного потока, проходящего через поперечное сечение стенки экрана, по которой определялась амплитуда магнитной индукции. Кроме того, была определена напряженность магнитного поля в боковой стенке экрана, посредством измерения касательной составляющей напряженности на внутренней стороне экрана. Результаты экспериментов показывают, что магнитная проницаемость материалов экранов в реальных условиях весьма значительно отличается от той, что приводится в справочной литературе.

Оценка эффективности экранирования производилась по выражению для тонкостенного сферического экрана [6] с использованием расчетных значений  $R_1$  и  $d$ , а также экспериментально полученного значения относительной магнитной проницаемости материала экрана  $\mu_1$ :

$$\mathcal{E}^c = ch(\alpha d) + (K + 2/K) sh(\alpha d),$$

где  $\alpha = (k^2 + R_1^{-2})^{0,5}$ ;  $K = \alpha R_1 / \nu$ ;  $k^2 = i\omega\mu_1\gamma_1$ ;  $\nu = \mu_1 / \mu_0$ ;  $k$  - волновое число.

Анализ результатов показал, что ферромагнитные экраны особенно эффективны при малых радиусах экранов ( $R < 0,2$  м) (рис. 1). Толщины стенки экрана из электротехнической стали  $d=1$  мм достаточно, чтобы ослабить внешнее поле напряженностью  $H=1000$  А/м в 20-179 раз. При больших значениях напряженности магнитного поля материал экрана начинает насыщаться и эффективность экранирования уменьшается с 40 ( $H=500$  А/м,  $R=0,2$  м) до 3,7 ( $H=4000$  А/м).

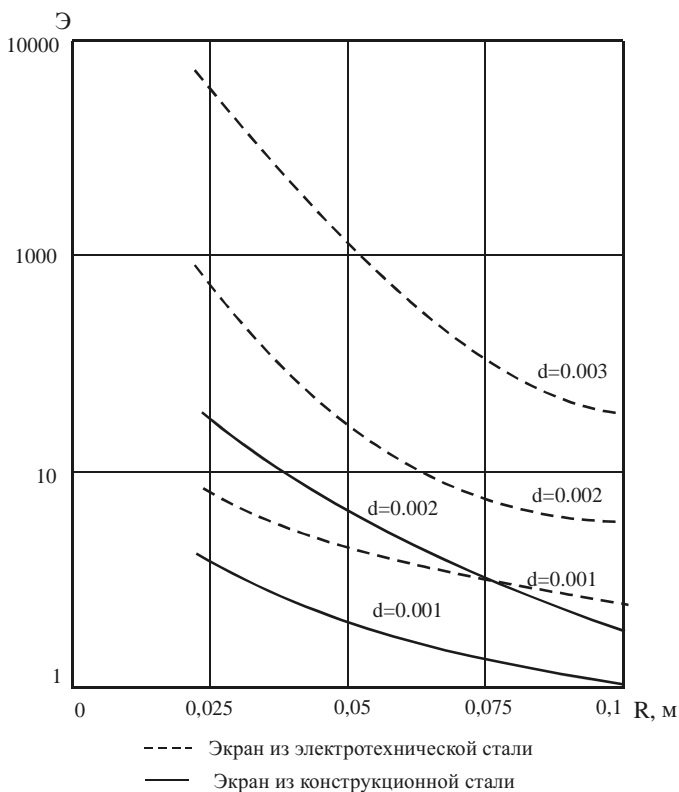


Рис. 1. Эффективность экранирования экранами различного радиуса и толщины

Эффективность экранирования экранов, выполненных из конструкционной стали, в 2-5 раз ниже, чем у электротехнической (рис. 1). Коэффициенты экранирования этих сталей становятся близкими лишь при большом радиусе экрана и насыщении материала экрана.

Степень ослабления магнитного поля можно повысить, увеличив толщину стенки экрана (рис. 1). Увеличением толщины в три раза (с 1 до 3 мм)

можно достичь роста эффективности экранирования в 10-20 раз. Но увеличение толщины экрана неизбежно ведет к увеличению массы всего устройства в целом.

Для проверки расчетов были экспериментально определены коэффициенты экранирования тех же экранов. Сравнение результатов экспериментов и расчетов показали, что во всех случаях расчетный коэффициент меньше экспериментального. Результаты расчета и эксперимента наиболее близки друг к другу при совпадении направления напряженности поля с направлением прокатки. Максимальная разница в этом случае составляет для различных типов экранов 15-20 %. При других направлениях вектора напряженности магнитного поля расхождение результатов расчета и эксперимента значительно больше - примерно 30 %.

Все экраны в своем внутреннем объеме в той или иной мере заполнены элементами контрольно-измерительной аппаратуры, которые оказывают влияние на их защитные свойства. Поэтому реальная эффективность экранирования оказывается меньше. Чтобы учесть это изменение защитных свойств экрана, проводился сравнительный расчет эффективности экранирования с учетом функции обратного действия сплошного включения.

При расчете эффективности экранирования сферической оболочки металлическое включение заменяется концентрическим сферическим с магнитной проницаемостью  $\mu_e$  и эквивалентным радиусом

$$R_e = \sqrt[3]{0,75V_e / \pi},$$

где  $V_e$  - объем включения. Эффективность экранирования сферической оболочки с учетом функции обратного действия экранируемого тела равна

$$\mathcal{E}_e^c = ch(\alpha d) + 0,5 \left[ K(1 - p_{e,1}^2 W) + K^{-1}(1 + p_{e,1}^2 W) \right] sh(\alpha d),$$

где  $p_{e,1} = R_e / R_1$ ;  $v = \mu_1 / \mu_0$ ;  $R_e$  - эквивалентный радиус ферромагнитного включения;  $W = -(\mu_e - \mu_0) / (\mu_e + 2\mu_0)$  - функция обратного действия сплошного включения.

Эффективность экранирования ферромагнитных экранов из электротехнической и конструкционной стали с учетом функции обратного действия сплошного включения приведена на рис. 2. Особенно сильно эффективность экранирования начинает снижаться при соотношении  $p_{e,1} \geq 0,75$ . Защитные свойства экрана уменьшаются почти в 2 раза. С учетом того, что соотношение  $p_{e,1}$  для полупроводниковых устройств близко к 0,75-0,9, неучет функции обратного действия сплошного включения может привести к погрешности расчета в 100-700 %.

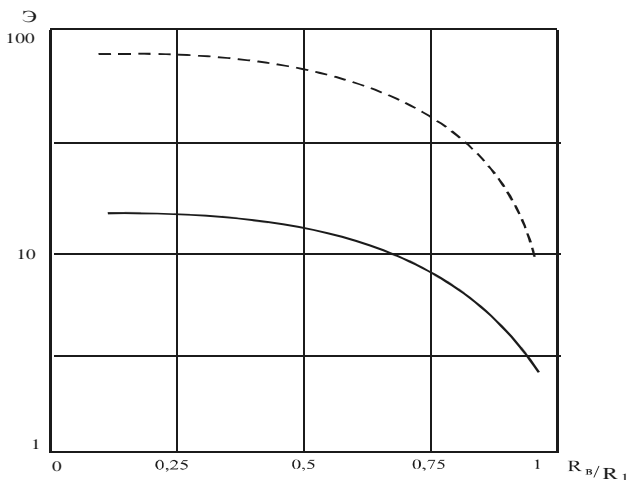


Рис 2. Эффективность экранирования сферическим экраном радиусом 5 см

## Выводы

1. Эффективным средством защиты устройств контрольно-измерительной аппаратуры электрических станций от влияния помехонесущих магнитных полей являются экраны, выполненные из холоднокатаной электротехнической стали.
2. Предложена методика оценки экранирующего действия, незамкнутых экранов, основанная на их замене эквивалентными сферическими.
3. Установлено, что неучет функции обратного действия сплошного включения может привести к погрешности расчета в 100 – 700 %.

## Литература

1. Хагемейстер Е.А., Вихарев А.П., Голговских А.В. Магнитные поля в машинном зале Нурекской ГЭС при установившихся коротких замыканиях // Электротехника.– 1988. – № 11.
2. Хагемейстер Е.А., Вихарев А.П., Мисриханов М.Ш. Экспериментальное исследование внешних магнитных полей в машинном зале Чиркейской ГЭС // Проблемы строительства и эксплуатации крупных ГЭС, ВЭС и каскадов ГЭС: Сб. науч. трудов ЭБВ, Вып. 3. - М.: Энергоатомиздат. 1986.
3. Хагемейстер Е.А., Вихарев А.П., Голговских А.В. Мешающее влияние магнитных полей на работу аппаратуры релейной защиты и автоматики крупных ГЭС // Электрические станции.– 1988.– N 11.
4. Вихарев А.П., Голговских А.В. Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на статические реле // Электротехника.– 1998.– № 1.
5. Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. - Л.: Энергоатомиздат. - 1988.
6. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.: Госэнергоиздат, 1957.
7. Хагемейстер Е.А., Гиновкер А.М., Жолобова Л.А. Установка для испытания аппаратуры в магнитном поле до 6000 А/м // Электротехника.– 1984.– № 6.