

**В.М.ЗОЛОТАРЕВ**, канд.техн.наук;  
**В.П.КАРПУШЕНКО**, канд.экон.наук; **А.Ф.КРИВЕНКО**;  
**В.В.ЗОЛОТАРЕВ**; **А.А.НАУМЕНКО**, канд.техн.наук;  
ЗАО «Завод «Южкабель», Харьков

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

Запропоновано вирішення проблеми випробувань новітніх вітчизняних кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією з допомогою економічних резонансних схем.

The solution of the problem of testing novel Ukrainian cables with insulation of sheathed polyethylene using economical resonance circuits.

**Введение.** Освоение массового производства силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 110 КВ включительно потребовало применения новых подходов к их испытаниям для обеспечения необходимого уровня качества и, в первую очередь, для проведения приемосдаточных испытаний на воздействие переменного высокого напряжения (ВН) и определения уровня частичных разрядов (ЧР).

**Решение проблемы.** Проведенные фундаментальные исследования электрофизических и тепловых явлений в полимерных диэлектрических и полупроводящих средах таких кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений на основе математических моделей и численных методов расчета позволили определить факторы, влияющие на надежность конструктивно-технологических элементов этих кабелей. К этим факторам, в первую очередь, необходимо отнести триингостойкость и теплостойкость в широком диапазоне напряжений (6÷330 кВ). Необходимо отметить, что эти исследования позволили разработать усовершенствованные по надежности элементы конструкций разнообразной кабельно-проводниковой продукции, промышленные технологии переработки полученных полимерных соединений, необходимую отечественную нормативную базу системы испытаний и менеджмента качества, включающего входной контроль материалов, активный контроль параметров непосредственно в технологических линиях, а также приемосдаточные, периодические и типовые испытания.

Нормативная база устанавливает ряд требований по конструкции, геометрическим размерам и выдерживаемым испытательным воздействиям различного характера. В этой связи можно выделить следующие три вида испытаний.

1. Испытания каждой строительной длины, включающих измерение со-

противления токопроводящей жилы, воздействие испытательного напряжения в течение установленного времени, его формы и величины, а также определение величины амплитуды импульсов частичных разрядов при нормируемом напряжении;

2. Выборочные испытания, охватывающие 10% строительных длин одной партии одинаковых типов кабелей. Образцы отбираются от обоих концов кабеля. Эти исследования касаются проверки конструкции токопроводящей жилы, ее полупроводящего экрана, изоляции жилы, полупроводящего экрана по изоляции и других конструктивных элементов кабеля. Проводятся также испытания на тепловое расширение изоляции и на усадку полимерной оболочки кабеля;

3. Типовые испытания, которые проводятся на образцах длиной от 10 до 15 м. В этих испытаниях проводят:

- 3.1. измерение амплитуды импульсов частичных разрядов при нормируемом напряжении;
- 3.2. испытание на изгиб (три цикла навивки кабеля на оправку диаметром  $20(D + d) \pm 5\%$  в одну и другую сторону ( $D$  – диаметр кабеля по наружной оболочке,  $d$  – диаметр токопроводящей жилы);
- 3.3. повторный контроль амплитуды импульсов частичных разрядов;
- 3.4. измерение тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры. Этот процесс должен соответствовать нормируемым величинам и включать испытание кабеля напряжением, измерение  $\text{tg } \delta$  при комнатной температуре, нагрев кабеля и выдержку не менее 2 часов и измерение  $\text{tg } \delta$  после нагрева;
- 3.5. испытание переменной нагрузкой -3 цикла длительностью по 8 часов (нагрев до  $95-100^\circ\text{C}$  в течение не более 3 часов, выдержка – не менее 2 часов при этой температуре, охлаждение до комнатной температуры – 3 часа);
- 3.6. контроль амплитуды импульсов частичных разрядов после испытания переменной нагрузкой;
- 3.7. испытание импульсным напряжением (по 10 импульсов каждой полярности);
- 3.8. испытание нормируемым повышенным напряжением в течение 4 часов;
- 3.9. продолжительные испытания, включающие:
  - 3.9.1. определение начального пробивного напряжения ( $U_{\text{пр}} \geq 15 \times U_0$ );
  - 3.9.2. длительное старение при установленном нормируемом напряжении ( $U = 4 \times U_0$  в течение 0,5 года, 1 года и 2 лет. В каждой серии используется по 5 образцов длиной по 10 м);
  - 3.9.3. определение остаточной электрической прочности для каждой серии старения (должно быть  $U_{\text{пр}} \geq 12 \times U_0$ ). Минимальное пробивное напряжение должно быть  $U_{\text{пр.min}} \geq 9 \times U_0$ ;

- 3.9.4. измерение длины водных триингов после испытаний в течение 2 лет (их длина должна быть менее 1 мм);
- 3.9.5. разнообразные неэлектрические измерения изоляции (механических свойств, водопоглощения, усадки и др.).

Как видно из требований вышеприведенной нормативной базы к испытаниям для их реализации требуется целый ряд специализированных электрических установок при производстве кабельно-проводниковой продукции:

во-первых, внутрицеховые установки – для испытаний повышенным переменным напряжением  $I_{исп} = 2,5 U_0$ , и контроля амплитуды импульсов частичных разрядов при  $U_{ч.р.} = 2 U_0$ ;

во-вторых, лабораторные установки двух видов (для реализации кратковременных и длительных электрических воздействий на образцах кабелей).

Проведенный нами анализ проблемы создания специализированных комплексов для испытаний кабельно-проводниковой продукции на соответствие требованиям надежности и технико-экологической безопасности указывает на необходимость испытания каждой строительной длины, проведение выборочных испытаний и части типовых испытаний, не связанных с кратковременными длительными электрическими воздействиями высоких уровней испытательных напряжений. Все эти испытания целесообразно проводить в заводских условиях. Остальные же испытания, зачастую по экономическим соображениям, наиболее целесообразно выполнять на договорной основе силами сторонних специализированных организаций.

Для создания специализированных электрических установок в заводских условиях необходимо было учесть целый ряд осложняющих факторов:

- высокая электрическая емкость кабелей высокого класса напряжений затрудняет использование мостовых схем измерений амплитуды импульсов частичных разрядов, так как эти измерения требуют высокой помехозащищенности;
- ограниченность свободного пространства в цехе требует совмещения нескольких видов испытаний на одной установке;
- наличие рядом расположенных потребителей электроэнергии, которые служат мощным источником помех. Отсюда следует необходимость тщательной экранировки измерительной камеры;
- необходимость выполнения заземлителей глубокого залегания для силовых и измерительных цепей;
- необходимость защиты измерительных цепей от мощных импульсных помех внутреннего происхождения, например, в результате развития скользящего разряда по поверхности разделки кабеля или пробоя;
- обеспечение необходимой пропускной способности установки, исходя из производственной программы завода (до 5 тыс. км в год);
- обеспечение норм охраны труда, техники безопасности и экологии

окружающей среды при эксплуатации высоковольтных маслонаполненных установок в условиях полностью экранированных камер.

Для обоснованного выбора требований к созданию специализированных электрических испытательных установок был выполнен аналитический обзор современных способов решения аналогичных задач в отечественной и зарубежной практике и используя, в первую очередь, накопленный научно-практический опыт.

Остановимся на конкретных подходах к решению самой сложной проблемы энергосберегающего испытательного оборудования воздействия переменным повышенным испытательным напряжением и измерения амплитуды импульсов частичных разрядов в изоляции кабельно-проводниковой продукции, так как по большинству других испытаний на заводе обычно имеется ЦЗЛ и цеховые испытательные станции.

Заводские испытания традиционных кабелей всегда проводились на кабельных предприятиях при помощи переменного напряжения. Испытания же кабелей в полевых условиях или на месте монтажа обычно проводились только при помощи постоянного напряжения. Электрический кабель представляет собой, главным образом, емкостную нагрузку, что требует сравнительно высокой мощности для испытания высоким напряжением в соответствии с Международными стандартами.

В качестве альтернативной энергосберегающей технологии испытания кабельно-проводниковой продукции предложены теоретические основы и методы применения резонансных испытательных систем на переменном напряжении. Примерно 30 лет назад традиционные трансформаторные системы начали заменяться параллельными резонансными системами для проведения стандартных заводских испытаний, которые также имеют свои недостатки. Сегодня параллельные резонансные системы заменяются последовательными резонансными системами, как наиболее технически совершенными и более дешевым средством достижения высоких испытательных напряжений. Для испытания кабелей повышенным испытательным напряжением и определения величины амплитуды импульсов частичных разрядов была предложена последовательная резонансная система.

В основу построения высоковольтных испытательных комплексов (ВИК), позволяющих проводить весь спектр испытаний таких кабелей в соответствии с международными нормами и действующими системами менеджмента качества продукции, была положена концепция резонансного возбуждения последовательного индуктивно-емкостного (L-C) контура с переменной индуктивностью на стороне высокого напряжения с использованием явления последовательного резонанса.

Рассмотрим краткое описание принципа работы системы, основные особенности конструкции и способов применения.

Согласно определению для поддержания резонанса количество энергии

на входе системы должно быть равно количеству энергии, потерянной в течение полупериода на выходе и внутри самой системы. Практически это означает, что в случае электрической схемы на вход системы должно подаваться количество энергии, равное только омическим потерям. На рис. 1 показана принципиальная практическая схема замещения системы с последовательным резонансным контуром.

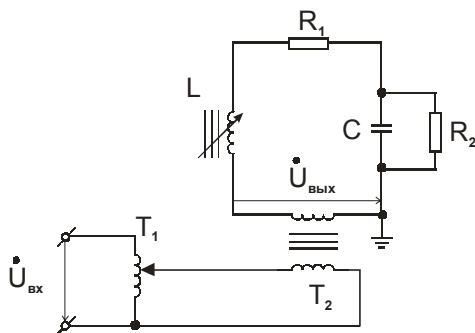


Рисунок 1 – Схема испытаний кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с использованием резонанса напряжений

Переменный автотрансформатор  $T_1$  контролирует возбуждающий трансформатор  $T_2$ , который снабжает электроэнергией резонансный контур и изолирует испытуемый кабель от остальной цепи. Конденсатор  $C$  – это емкость испытуемого кабеля, а также другие емкости контура (емкостного делителя напряжения и емкость выходного проходного изолятора). Индуктивность  $L$  – переменный реактор, где индуктивное сопротивление меняется в соответствии с емкостным сопротивлением  $C$ , таким образом настраивая цепь на резонанс.

Эквивалентная схема замещения показана на рис. 2.

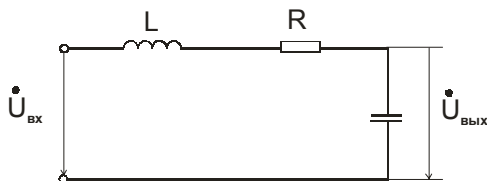


Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема замещения испытательной установки для испытания кабелей с использованием резонанса напряжений

Предполагается, что возбуждающий трансформатор не имеет потерь. Индуктивность ( $L$ ) представляет собой общую индуктивность возбуждающего трансформатора и реактора. Сопротивление  $R$  представляет собой все ак-

тивные потери системы. Эквивалентную схему замещения, изображенную на рисунке, можно описать следующим уравнением в комплексной форме:

$$\dot{U}_{вых} = -\frac{jX_L \dot{U}_{вх}}{R + j(X_L - X_C)}.$$

При резонансе,  $X_L = X_C$ , тогда

$$\dot{U}_{вых} = -jX_L \dot{U}_{вх} / R = Q \dot{U}_{вх},$$

где

$$Q = \omega L / R = 1 / \omega RC.$$

Параметр (Q) является добротностью резонансной системы. Добротность (Q) типичной системы последовательного резонанса колеблется в пределах от 50 до 80 для высококачественных емкостных нагрузок. При резонансе фаза силы тока (I) совпадает с фазой напряжения возбуждающего трансформатора ( $I_{вх}$ ). Следовательно, входная мощность является полностью активной ( $\cos \phi = 1$ ).

$$P = U_{вх} I \cos \phi = U_{вх} I = QP \quad (\text{при резонансе}).$$

Реактивная мощность подается в емкостную нагрузку (C) при тех же условиях:

$$P_p = U_{вх} I = QU_{вх} I = QP,$$

где  $P_p$  – реактивная мощность; P – активная мощность.

Следовательно, сама входная мощность оказывается в (Q) раз меньше, чем кажущаяся (реактивная) выходная мощность. Это приводит к значительному сокращению входной мощности при высоковольтных испытаниях, то есть к экономии электроэнергии.

Типичная векторная диаграмма выглядит следующим образом (рис. 3).

На этой диаграмме ( $U_L$ ) является напряжением на выводах регулируемого реактора, а ( $U_C$ ) является напряжением на кабеле. Соотношение реактивных векторов ( $U_L$ ) или ( $U_C$ ) с результирующей этих векторов ( $U_p$ ) является добротностью (Q) системы.

Предложенная последовательная резонансная система имеет пять основных преимуществ:

- низкая входная мощность;
- низкий ток короткого замыкания;
- низкий уровень нелинейных искажений;
- отсутствие переходных перенапряжений при отказе испытуемого кабеля;
- низкий уровень разбалансировки фаз.

Рассмотрим эти преимущества:

1. Низкая входная мощность, объясняется тем, что в последовательных резонансных системах мощность теряется только в виде омических потерь,

следовательно, входная мощность таких систем очень небольшая.

Например, допустим, что требуется создать испытательное напряжение ( $U_{\text{вых}}$ ) 500 кВ на емкостной нагрузке 0,0127 мкф при силе тока 2А ( $P_{\text{вых}} = 1000$  кВА). Также допустим, что ( $Q$ ) системы равно 50 (типичная добротность для нагрузок с низкими потерями).

Исходя из этих данных определяем необходимое напряжение возбуждения

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{Q} = \frac{500 \cdot 10^3}{50} = 10 \text{кВ}$$

и мощность входная

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вых}}}{Q} = \frac{1000 \cdot 10^3}{50} = 20 \text{кВА}.$$

Таким образом, мощность возбуждающего трансформатора должна составлять только 20 кВА и такая система может питаться от сети 0,4 кВ.

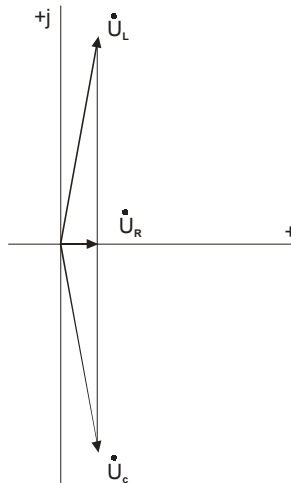


Рисунок 3 – Векторная диаграмма для схемы испытаний кабелей с использованием резонанса напряжений

2. Низкий ток короткого замыкания (для примера выбираем емкостную нагрузку 0,0127 мкф, выходное напряжение – 500 кВ, ток – 2А).

Если во время испытания кабеля происходит дуговое перекрытие или пробой изоляции, система теряет высокое значение добротности  $Q$ , которое она имела до пробоя. Из рисунка видно, что при коротком замыкании ток равен напряжению возбуждения ( $U_{\text{вых}}$ ), разделенному на полное сопротивление реактора ( $L$ ).

$$X_L = \frac{U_{\text{вых}}}{I} = \frac{500 \cdot 10^3}{2} = 250 \text{кОм},$$

а ток короткого замыкания равен

$$I_{кз} = U_{\text{вых}} / X_L = 10 \cdot 10^3 / 250 \cdot 10^3 = 0,04 A .$$

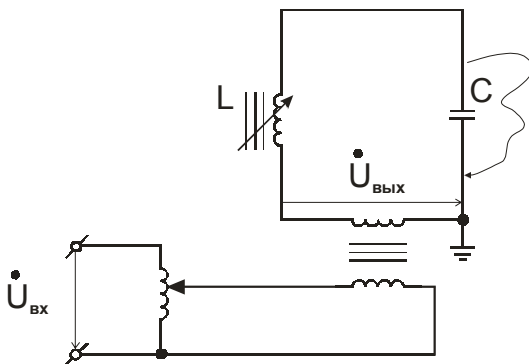


Рисунок 4 – Практическая реализация схемы с испытаний кабелей с использованием резонанса напряжений. (В качестве переменной индуктивности L применен мощный линейный реактор переменного напряжения)

### 3. Низкий уровень нелинейных искажений

Регулируемый реактор последовательного резонансного контура настроен на частоту входного напряжения и, благодаря высокой величине добротности ( $Q$ ) все другие гармоники значительно затухают. Сам регулируемый реактор должен иметь очень низкий уровень нелинейных искажений ввиду низкой плотности магнитного потока, что обеспечивает низкий уровень звукового шума.

Это основано на наличии устойчивого входного напряжения без искажений. Соотношение ( $U_{\text{вых}}$ ) к ( $U_{\text{вх}}$ ) может быть выражено следующим образом:

$$\frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega RC} = Q(\omega) .$$

Эта функция может быть приведена к следующему виду:

$$Q_n = \frac{1}{n^2 - 1}, n > 1,$$

где  $n$  – номер гармоники входного напряжения. Следовательно, в то время, как последовательная резонансная система производит существенное увеличение напряжения при заданной частоте ( $n = 1$ ), этот процесс ослабляет гармоники искажения. Уровень нелинейного искажения намного меньше 0,5 % типично для этой системы, даже если входное напряжение искажено.

### 4. Переходные перенапряжения

При использовании обычных трансформаторов или параллельных резо-



нансных систем дуговое перекрытие изоляции испытуемого устройства может вызвать переходные перенапряжения, которые при определенных условиях могут превысить испытательное напряжение в 2 раза. При использовании последовательных резонансных систем переходные перенапряжения практически отсутствуют, что видно при испытаниях на мониторе (затухающие колебания).

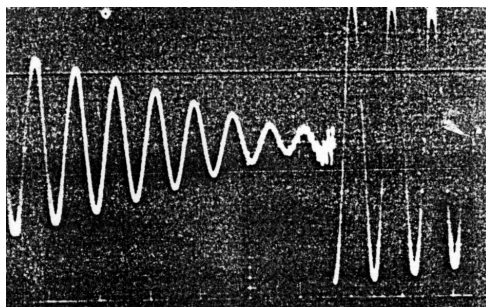


Рисунок 5 – Копия оциллограммы переходного процесса при пробое кабеля. (Переходный процесс характеризуется затухающей кривой напряжения при резонансе напряжений в последовательной цепи, после чего напряжение в схеме быстро восстанавливается.)

#### 5. Низкий уровень разбалансировки фаз

Так как входная мощность резонансных систем значительно ниже выходной мощности, то обор мощности с одной фазы трехфазной сети вызывает очень незначительную разбалансировку фаз. Если используются обычные трансформаторы, то происходит значительная разбалансировка фаз, что влияет на работу других источников потребления энергии, питающихся от сети с трансформатором. Вместе с тем, традиционные системы особенно оказывают разбалансирующее действие, когда подстанции не имеют достаточной мощности для подключения испытательного трансформатора, а строительство новой линии подачи питания может быть недоступно по стоимости или не разрешено местной электроэнергетической компанией.

Итак, вышеперечисленные преимущества дали полное основание для выбора испытательной установки по принципу последовательного резонанса.

На основании вышеизложенного и необходимости испытания кабелей не только повышенным напряжением, но и измерения величины амплитуды частичных разрядов была выбрана многокомпонентная система, изображенная на следующей схеме. Параметры элементов системы не приводятся, так как для испытания энергетических кабелей на рабочее напряжение 220-330 кВ требуют создания последовательной резонансной системы, базирующейся не на реакторе камерного типа, а каскадного.

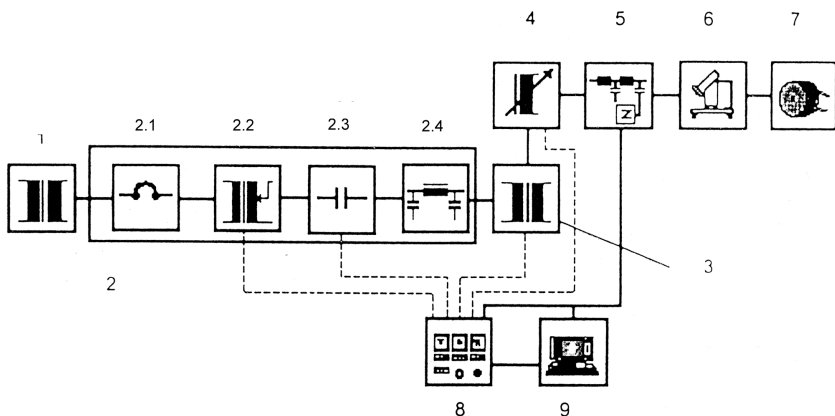


Рисунок 6 – Схема измерения амплитуды частичных разрядов и обнаружения места пробоя с использованием резонанса напряжений

В состав предложенной системы последовательного резонанса с оборудованием для измерения величины амплитуды частичных разрядов и локализации мест повреждений входят:

1. разделительный трансформатор с двойным экраном;
2. силовой электрический шкаф, включающий в себя:
  - 2.1. главный силовой автоматический выключатель;
  - 2.2. регулятор напряжения;
  - 2.3. высоковольтный двухпозиционный контактор;
  - 2.4. низковольтный сетевой фильтр;
3. возбуждающий трансформатор;
4. высоковольтный реактор;
5. высоковольтный фильтр;
6. масляные кабельные вводы или вводы с деионизированной водой;
7. силовой кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена (объект испытания);
8. микропроцессорный блок управления;
9. цифровой детектор частичных разрядов.

#### 1. Разделительный трансформатор с двойным экраном

Предназначен для обеспечения двух функций: гальванической развязки испытательной системы от системы заземления цеха и ослабления высокочастотных шумов которые могут появляться в системе питания. Это позволяет достигать максимально возможной чувствительности при измерении частичных разрядов. Первичная и вторичная обмотки экранированы с подсоединением через проходные изоляторы с контуром заземления системы.

Катушки намотаны проводом с усиленной изоляцией для защиты от бросков напряжения и переходных процессов. Катушки и сердечник размещаются в стальной, заземленной камере, заполненной изоляционным маслом. Коэффициент трансформации равен 1.

2. Силовой электрический шкаф, конструктивно выполненный в виде стойки, защищенной от электромагнитных полей и включающий:

2.1. главный силовой автоматический выключатель подает питание к системе и обеспечивает защиту, как системы электропитания, так и испытательный комплекс при авариях;

2.2. регулятор напряжения используется для регулирования напряжения на входе возбуждающего трансформатора и соответственно выходного напряжения всей системы. Имеет электропривод и управляется с панели управления. В качестве регулятора напряжения рекомендуется использовать регулируемый трансформатор Пашеля, у которого разрешение регулирования меньше 1 %;

2.3. высоковольтный двухпозиционный контактор обеспечивает соединение выхода регулятора напряжения с испытательной системой. Включается только тогда, когда все внешние блокировки системы замкнуты и регулятор напряжения находится в нулевом положении. Контактор может быть разомкнут либо вручную посредством кнопок на пульте, либо по сигналу схемы дугового разряда;

2.4. низковольтный фильтр предназначен для ослабления помех в диапазоне измерения частичных разрядов. Диапазон рабочей частоты 50-60 Гц. Ослабление более чем 40 дБ в диапазоне 30 кГц – 1 МГц.

3. Возбуждающий трансформатор. Включается между силовой сетью и реактором.

Предназначен для повышения питающего напряжения и обеспечения активной мощности, требуемой системе, гальванической развязки и электростатического экранирования высоковольтной измерительной схемы от питания. На выходе возбуждающего трансформатора включен разрядник для защиты от перенапряжений. Конструктивно размещен в корпусе реактора.

#### 4. Высоковольтный реактор

Это ключевой компонент резонансной испытательной системы. Расположен в стальной заземленной камере, заполненной изоляционным маслом, и снабженной выходным проходным изолятором. По этой причине реактор называется камерным. На обоих плечах сердечника выполнены воздушные зазоры. Имеется механизм подъема и опускания сердечника. При этом изменяется величина воздушного зазора сердечника, а в результате и индуктивность реактора. Две высоковольтные катушки, соединенные параллельно перекры-

вают зазор, даже в полностью открытом положении, что предотвращает отклонение силовых магнитных линий.

#### 5. Высоковольтный фильтр и делитель напряжения

Предназначен для системы измерения частичных разрядов. В фильтре используются высоковольтные конденсаторы и катушки индуктивности. Фильтр представляет собой многоступенчатую конструкцию. Выходная ступень также функционирует как делитель напряжения и силовой разделительный фильтр. В этой ступени установлен четырехполюсник для обеспечения сигналов киловольтметра, детектора дугового разряда, фазовых синхронизатора и детектора ЧР, что обеспечивает ослабление помех более 40 дБ в диапазоне частот 15-500 кГц.

**Выводы.** Разработанные на основе предложенных схем установки позволяют осуществить испытания новейших образцов разработанных отечественных кабелей в соответствии с международными требованиями при экономически приемлемых показателях.

**Список литературы:** 1. Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Золотарев В.В. Отечественные разработки кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 20. – 2007. – С. 87

*Поступила в редколлегию 21.05.2008*

УДК 621.316.9

**С.В.КИПРИЧ; А.А.ПЕТКОВ**, канд. техн. наук;

**Д.Г.КОЛИУШКО**, канд. техн. наук; НТУ «ХПИ»;

**В.М. КУПРИЕНКО**, канд. техн. наук; Научно-исследовательский центр  
26 ЦНИИ МО РФ

### **МЕТОДИКА АНАЛИЗА МОЛНИЕЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ СЛОЖНОМ РЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ**

У роботі запропонована методика розрахунку блискавковідводів, зони захисту яких утворюють складну поверхню. Показана ефективність розробленої методики на прикладі зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу.

In work the design procedure of lightning-rods which zones of protection form a difficult surface is offered. Efficiency of the developed method on an example of a protection zone of the double lightning-rods is shown.