

**РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ СО СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

*Представлено результати розробки системи для випробування кабелів надвисоких напруг зі зшитою поліетиленовою ізоляцією. Обґрунтовано застосування резонансних схем для діагностики надійності ізоляції таких кабелів. Проведено аналіз основних та аварійних режимів роботи резонансних випробувальних систем, а також виконано моделювання високочастотних і хвильових процесів у надвисоковольтному кабелі при виникненні часткових розрядів у його ізоляції.*

*Представлены результаты разработки системы для испытания кабелей сверхвысоких напряжений со сшитой полиэтиленовой изоляцией. Обосновано применение резонансных схем для диагностики надежности изоляции таких кабелей. Проведен анализ основных и аварийных режимов работы резонансных испытательных систем, а также выполнено моделирование высокочастотных и волновых процессов в сверхвысоковольтном кабеле при возникновении частичных разрядов в его изоляции.*

**Введение.** Мировой тенденцией повышения надежности и безопасности систем передачи и распределения электроэнергии на энергонасыщенных территориях электростанций и подстанций, промышленных и коммунальных комплексов, шахт, железной дороги, больших городов, метрополитенов, высотных сооружений и других мощных объектов является применение кабелей энергетического назначения со сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией. В Украине уже создана технологическая линия промышленного изготовления сверхвысоковольтных кабелей со СПЭ изоляцией [5], которые позволяют передавать электрическую мощность более 1000 МВА. Но проблема испытания и диагностики изготавливаемых сверхвысоковольтных кабелей длиной более 1 км длительное время оставалась нерешенной.

В мировой практике диагностики кабелей высокого и сверхвысокого напряжения нормируются только максимальные размеры внутренних и поверхностных дефектов в СПЭ изоляции, которые не должны превышать 60 мкм [2]. Исследования, проведенные в Институте электродинамики НАН Украины (г. Киев) и на заводе "Южкабель" (г. Харьков), показали необходимость учета совокупностей близко расположенных микродефектов, размеры которых могут быть во много раз меньшими, чем нормируемые [5]. Учитывая сложность обнаружения дефектов и инородных включений внутри СПЭ изоляции, большое внимание обращают на установление косвенных их признаков. Согласно существующим представлениям степень деградации СПЭ изоляции в электрическом поле во многом характеризуется уровнем частичных разрядов (ЧР), возникающих при рабочих и повышенных напряжениях [1, 6].

Важнейшими характеристиками ЧР являются: напряжение их появления, частота возникновения, значение протекающего заряда. Возникновение ЧР зависит от параметров включений: толщины, площади сечения, их количества, конфигурации и взаимных расстояний. По характеристикам ЧР можно определить параметры включений и наоборот, что может быть положено в основу разрабатываемых методов диагностики полимерной изоляции кабелей. В работе [7] обосновано, что остаточный ресурс высоковольтных устройств на основе измерений частоты возникновения импульсов ЧР определить не просто, но оценить таким образом степень деградации (старения) полиэтиленовой изоляции вполне возможно. Согласно публикациям [8, 9], измерение ЧР является одним из наиболее передовых методов диагностики, поскольку оно позволяет локализовать место расположения дефектов и прогнозировать стадию их развития.

**Обоснование эффективности схем резонансного возбуждения испытательных напряжений.** Для испытательной системы электрический сверхвысоковольтный кабель представляет собой емкостную нагрузку, к которой в соответствии со стандартами Международного электротехнического комитета (МЭК) необходимо прикладывать в 1,5 раза повышенное напряжение по сравнению с эксплуатационным. При этом для испытания таких кабелей необходимо использовать мощности более 1000 кВА. Для уменьшения мощности, потребляемой от питающей сети, было предложено использовать возбуждение резонансных гармонических напряжений в высокодобротном контуре с последовательным соединением реактивных элементов. Для испытания кабелей на эксплуатационные напряжения 330 кВ в качестве испытательных необходимо использовать напряжения до 500 кВ.

На рис. 1 а показана принципиальная электрическая схема резонансной системы для испытания сверхвысоковольтных кабелей, а на рис. 1 б – ее упрощенная схема замещения.

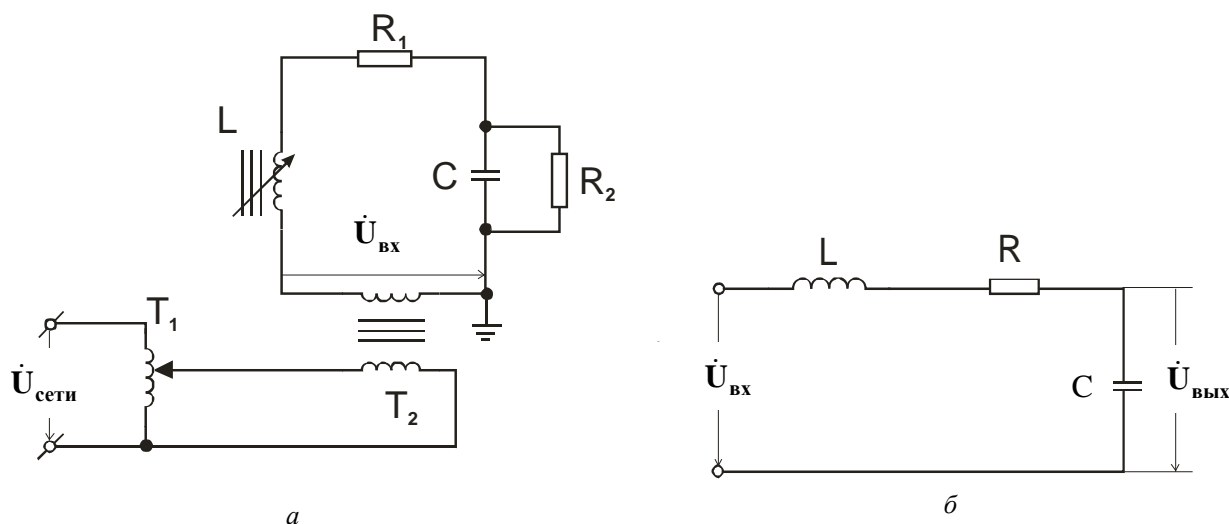


Рис. 1

Сетевой автотрансформатор  $T_1$  предназначен для регулирования напряжения на входе повышающего трансформатора  $T_2$ , который снабжает электроэнергией резонансный контур и изолирует испытуемый кабель от питающей сети. Емкость  $C$ , представленная на рис. 1, включает в себя емкость испытуемого кабеля, а также другие емкости контура (емкостного делителя напряжения и выходного проходного изолятора). Индуктивность  $L$  характеризует индуктивное сопротивление реактора, которое можно изменять таким образом, чтобы в цепи возникал резонанс напряжений, приводящий к повышению напряжения на кабеле.

Далее в расчетах предполагается, что повышающий трансформатор не имеет потерь. Индуктивность  $L$  (рис. 1 б) представляет собой общую индуктивность этого трансформатора и реактора. Сопротивление  $R$  включает все активные потери в системе.

Для схемы на рис. 1 б справедливо уравнение, связывающее комплексные значения выходного и входного напряжений:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = -\frac{jX_C \dot{U}_{\text{вх}}}{R + j(X_L - X_C)},$$

где  $X_L = \omega L$ ,  $X_C = 1/\omega C$  – соответственно индуктивное и емкостное реактивные сопротивления схемы на рис.1 б.

В случае последовательного резонанса  $X_L = X_C$ , тогда  $\dot{U}_{\text{вых}} = -jX_C \dot{U}_{\text{вх}}/R = Q \dot{U}_{\text{вх}}$ , где  $Q = 1/\omega_0 RC = \omega_0 L/R$  ( $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – резонансная частота контура).

Параметр  $Q$  является добротностью резонансной контура, изменяемой в пределах от 40 до 60 в зависимости от параметров испытуемого кабеля. При резонансе напряжений в

контуре фаза тока совпадает с фазой напряжения на входе контура  $U_{ex}$ , следовательно, входная мощность при этом является активной (то есть  $\cos \varphi = 1$ ). Отсюда  $S_a = U_{ex} I \cos \varphi = U_{ex} I$  (при резонансе).

Реактивная мощность в емкостной нагрузке при тех же условиях равна  $S_p = U_{вых} I = Q U_{ex} I = Q S_a$ , где  $S_p$  – реактивная мощность в кабеле;  $S_a$  – входная активная мощность.

Следовательно, величина мощности, потребляемой от питающей сети, оказывается в  $Q$  раз меньше, чем мощность, используемая для испытания сверхвысоковольтного кабеля.

Рассмотренная последовательная резонансная система имеет следующие основные преимущества: низкую входную мощность; низкий ток короткого замыкания; низкий уровень нелинейных искажений; отсутствие переходных перенапряжений при отказе испытуемого кабеля; низкий уровень разбалансировки фаз.

На рис. 2 изображена многокомпонентная система для испытания кабелей повышенным напряжением и измерения уровня частичных разрядов и локализации мест повреждений, в которой реализован описанный резонансный метод.

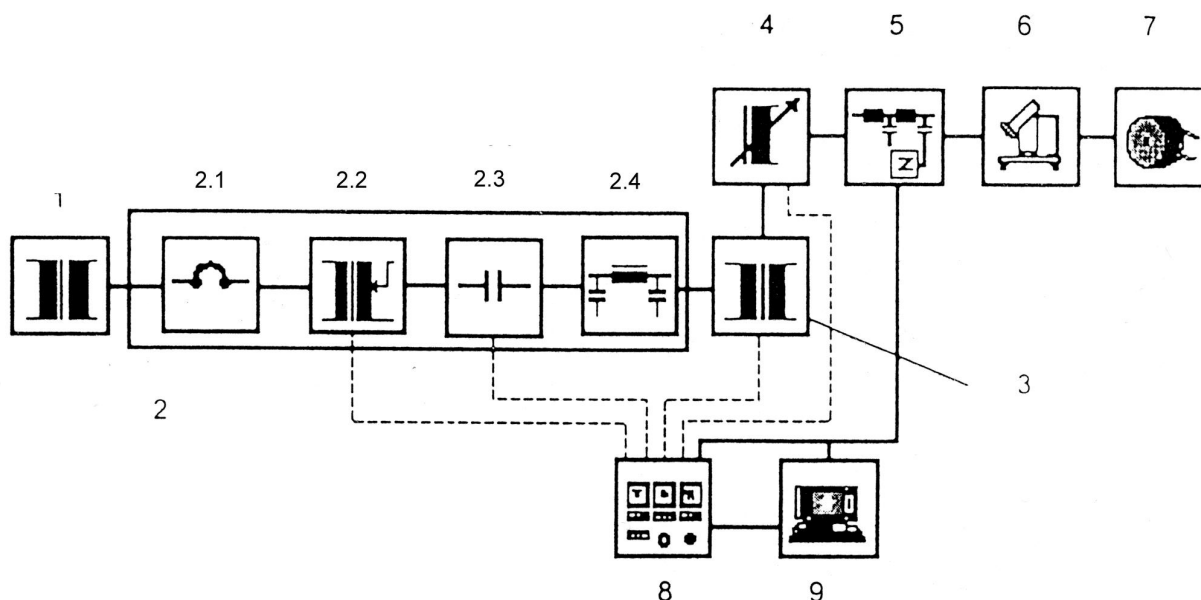


Рис. 2

В состав системы 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. Повышающий 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*, который предназначается для обеспечения двух функций: гальванической развязки испытательной системы от системы

заземления цеха и ослабления высокочастотных шумов, что позволяет достигать максимально возможной чувствительности при измерении ЧР. Первичная и вторичная обмотки трансформатора выполнены экранированными и подсоединены через проходные изоляторы к контуру заземления системы. Катушки трансформатора намотаны проводом с усиленной изоляцией для защиты от бросков напряжения при возникновении переходных процессов. Катушки и сердечник трансформатора размещены в стальной заземленной камере, заполненной изоляционным маслом. Коэффициент трансформации практически равен 1.

2. *Силовой электрический шкаф*, конструктивно выполненный в виде стойки, защищенной от электромагнитных полей. Он содержит:

2.1. *Главный силовой автоматический выключатель*, подающий питание к системе и обеспечивающий защиту как системы электропитания, так и испытательного комплекса при авариях;

2.2. *Регулятор напряжения*, используемый для регулирования напряжения на входе повышающего трансформатора и соответственно испытательного напряжения. Регулирование напряжения осуществляется с панели управления при помощи регулируемого электропривода. В качестве регулятора напряжения выбран трансформатор Пашеля, с помощью которого можно осуществлять точность регулирования напряжения с погрешностью не более 1%;

2.3. *Высоковольтный двухпозиционный контактор*, который обеспечивает соединение выхода регулятора напряжения с испытательной системой. Он включается только тогда, когда все внешние блокировки системы замкнуты, и регулятор напряжения находится в нулевом положении. Контактор может размыкаться либо вручную – посредством кнопок на пульте, либо по сигналу схемы дугового разряда;

2.4. *Низковольтный фильтр*, предназначенный 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. *Повышающий трансформатор*, включаемый между силовой сетью и реактором, который предназначен для повышения питающего напряжения и обеспечения активной мощности, требуемой в испытательной системе, гальванической развязки и электростатического экранирования высоковольтной измерительной схемы от питания. На выходе повышающего трансформатора включен разрядник для защиты от перенапряжений. Конструктивно размещен в корпусе реактора.

4. *Высоковольтный реактор*, который является ключевым компонентом резонансной испытательной системы и расположен в стальной заземленной камере, заполненной изоляционным маслом и снабженной выходным проходным изолятором. По этой причине реактор называется камерным. На обоих плечах сердечника имеются воздушные зазоры, величина которых изменяется с помощью специального механизма подъема и опускания сердечника, что в результате изменяет индуктивность реактора. Две высоковольтные катушки, соединенные параллельно, перекрывают зазор даже в полностью открытом положении, что предотвращает отклонение силовых магнитных линий.

5. *Высоковольтный фильтр и делитель напряжения*, предназначенный для измерения частичных разрядов. В фильтре используются высоковольтные конденсаторы и катушки индуктивности. Он представляет собой многоступенчатую конструкцию, выходная ступень которой функционирует как делитель напряжения и силовой разделительный фильтр. В этой ступени установлен четырёхполосник 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.

Для проектирования и выбора параметров основных элементов этой установки было выполнено моделирование электромагнитных процессов.

### ***Анализ динамических режимов работы резонансной испытательной установки***

*Моделирование основного режима работы установки.* Для моделирования различных режимов работы испытательной установки на основе последовательного резонанса в работе использовался пакет программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems [10]. Эквивалентная схема

установки, разработанная средствами этого пакета, показана на рис. 3. Схема содержит однофазный источник питания, подключенный на вход однофазного повышающего трансформатора. Во вторичной цепи трансформатора включены реактор, фильтр низких частот и силовой кабель с параллельно подключенной эталонной емкостью. Также в схеме имеются средства для измерения напряжений, токов и величины импеданса цепи.

На основании предварительных расчетов [3] получены следующие значения параметров схемы на рис. 3.

Источник питания: 3300 В, 50 Гц, однофазный.

Трансформатор: первичные параметры  $U_1=3135$  В,  $I_1=160$  А, вторичные параметры  $U_2=25$  кВ,  $I_2=20$  А.

Реактор: напряжение 500 кВ, реактивная мощность 20000 квар, ток 40 А, максимальное значение индуктивности 40 Гн.

Силовой кабель с эталонной емкостью: напряжение 500 кВ, емкость  $C = 0,25$  мкФ, добротность цепи  $Q = 40$ .

Фильтр низких частот:  $L_f= 0,1$  Гн;  $R_f= 0,1$  Ом;  $C_f= 0,1$  мкФ;  $\text{tg } \delta_f= 0,1$  %.

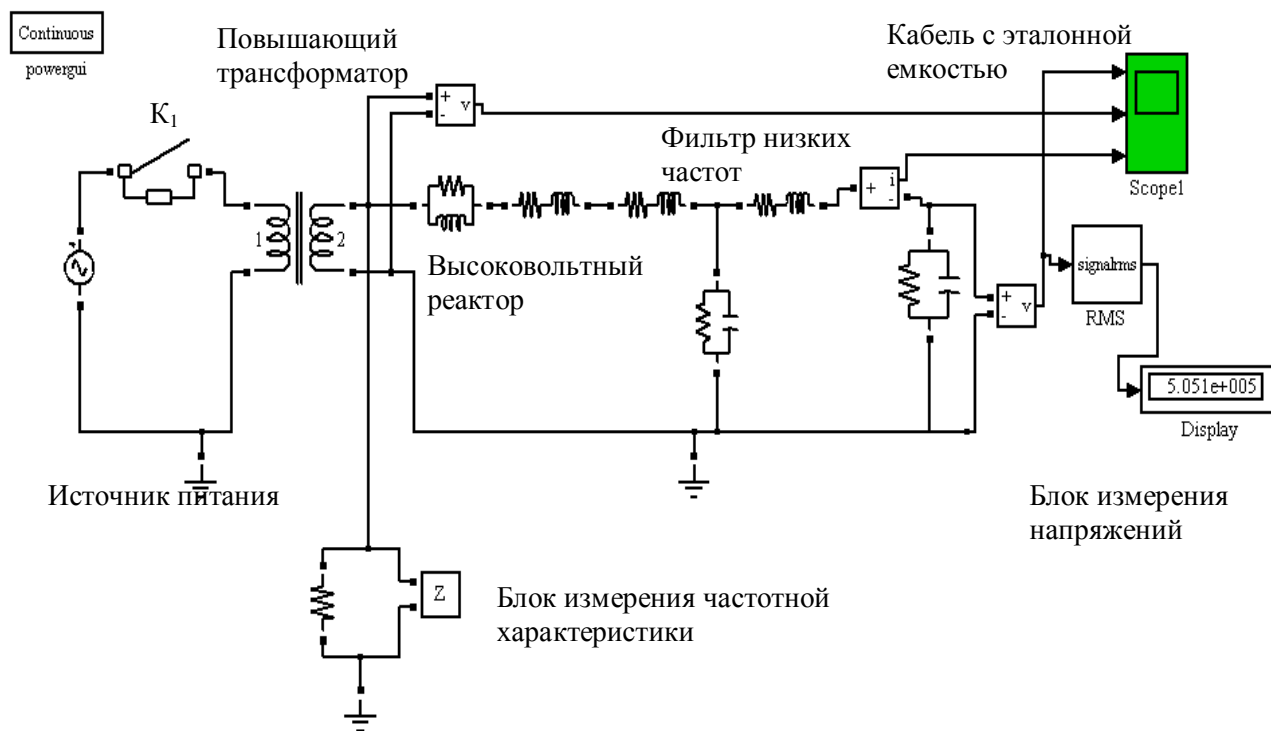


Рис. 3

Результаты моделирования по схеме на рис. 3 электромагнитного переходного процесса при включении установки к источнику питания показаны на рис. 4.

За время 0,4 с напряжение на кабеле достигает установившегося напряжения, действующее значение которого составляет 500 В, а ток в цепи достигает действующего значения – 40 А.

Для исследования резонансных свойств установки рассчитывалась амплитудно-частотная характеристика ее схемы замещения. Для этого использовался имеющийся в пакете SimPowerSystems импеданс-метр. Результаты расчета амплитудно-частотной характеристики установки, измеренной со стороны вторичной обмотки трансформатора, приведены на рис. 5. Видно наличие резонанса на частоте около 50 Гц. При этом при частоте  $f < 50$  Гц цепь имеет преимущественно емкостный характер (фаза тока в цепи по отношению к напряжению  $\approx -900$ ), а при частоте  $f > 50$  Гц – индуктивный характер (фаза тока в цепи по отношению к напряжению  $\approx 900$ ).

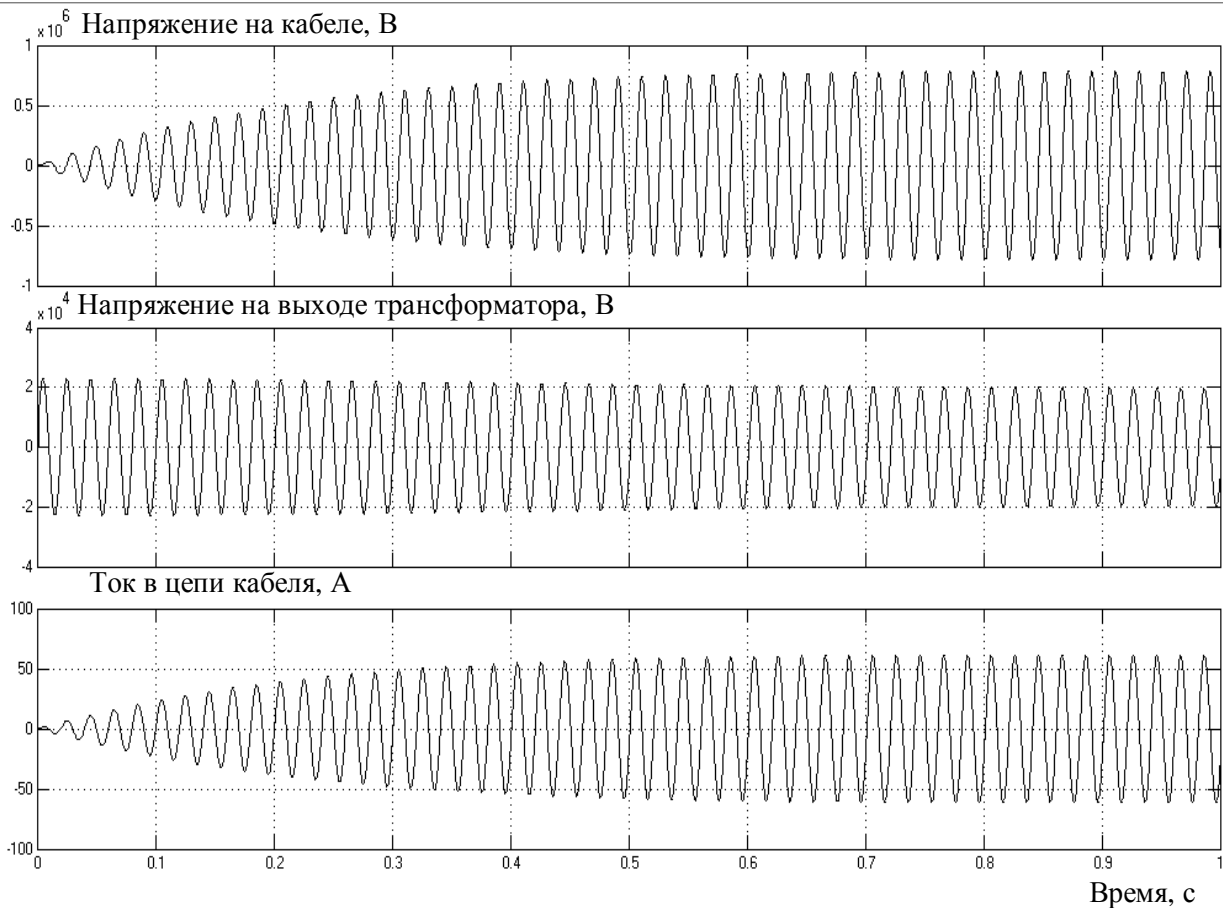


Рис. 4

Разработанная электротехническая модель испытательной установки позволяет анализировать различные режимы ее работы, в том числе и аварийные и прогнозировать возникающие при этом возможные перенапряжения и броски тока на ее элементах. Эти данные позволят осуществить рациональный выбор средств защиты и повысить тем самым надежность ее работы, а также повысить срок службы ее наиболее ответственных элементов – реактора и эталонной емкости. В данной работе моделировались два режима ее работы, отличающиеся от номинального, – переходный процесс при перекрытии изоляции испытуемого силового кабеля и переходный процесс при аварийном отключении источника питания. Рассмотрим далее результаты анализа этих двух режимов.

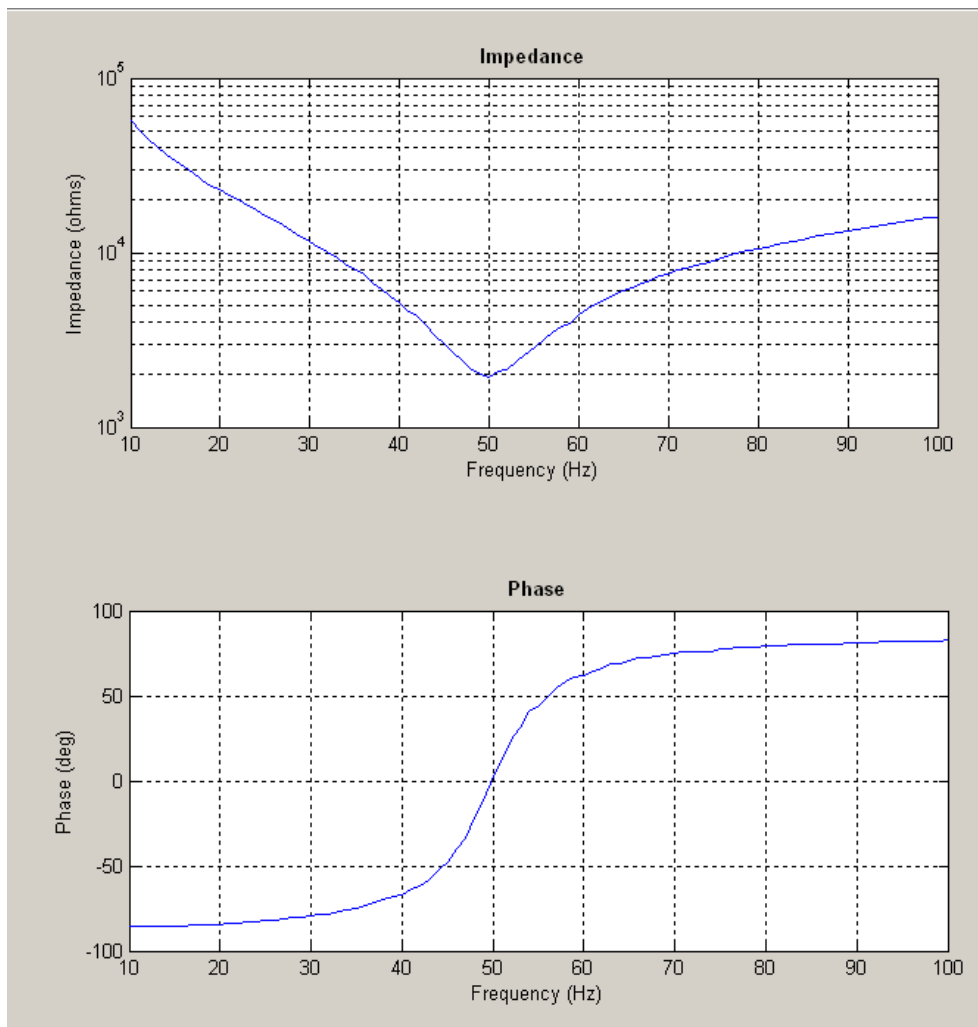
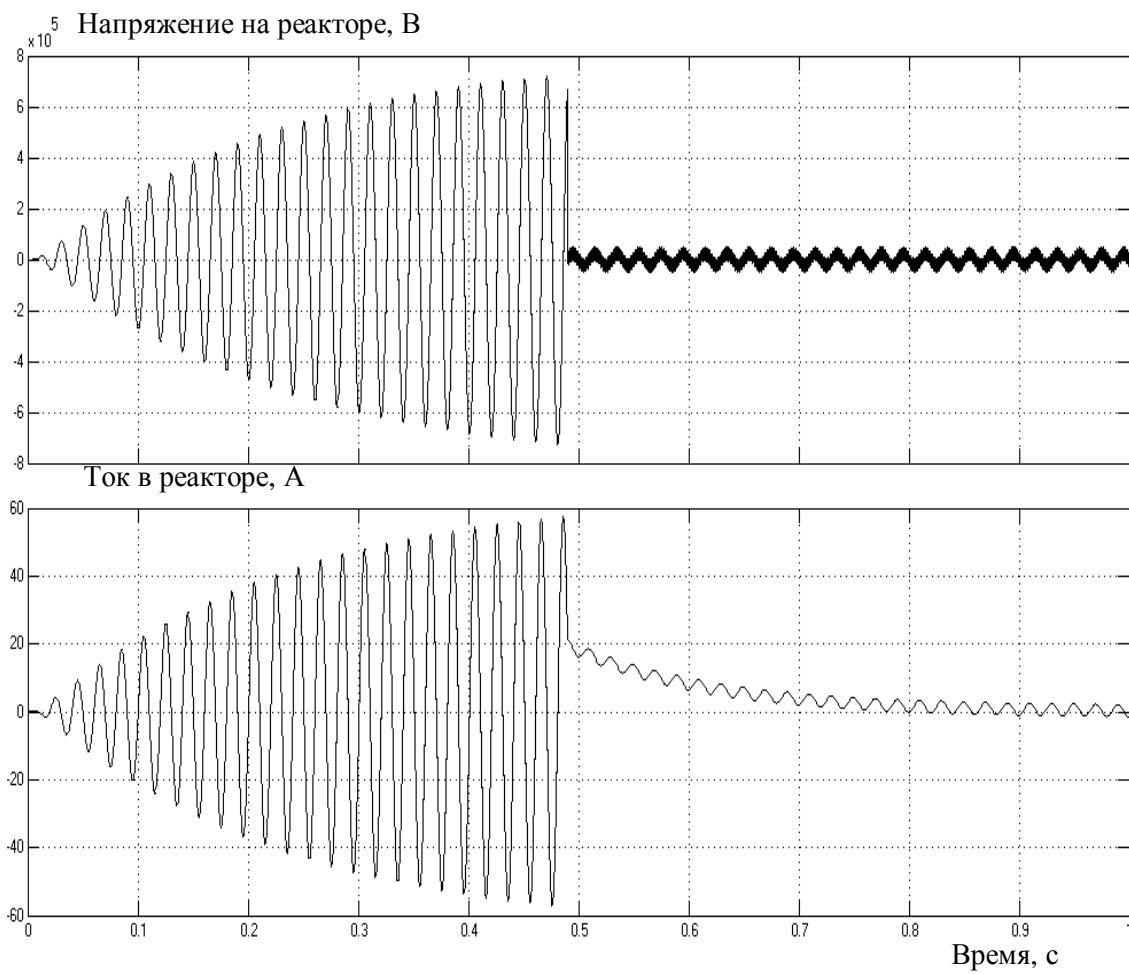
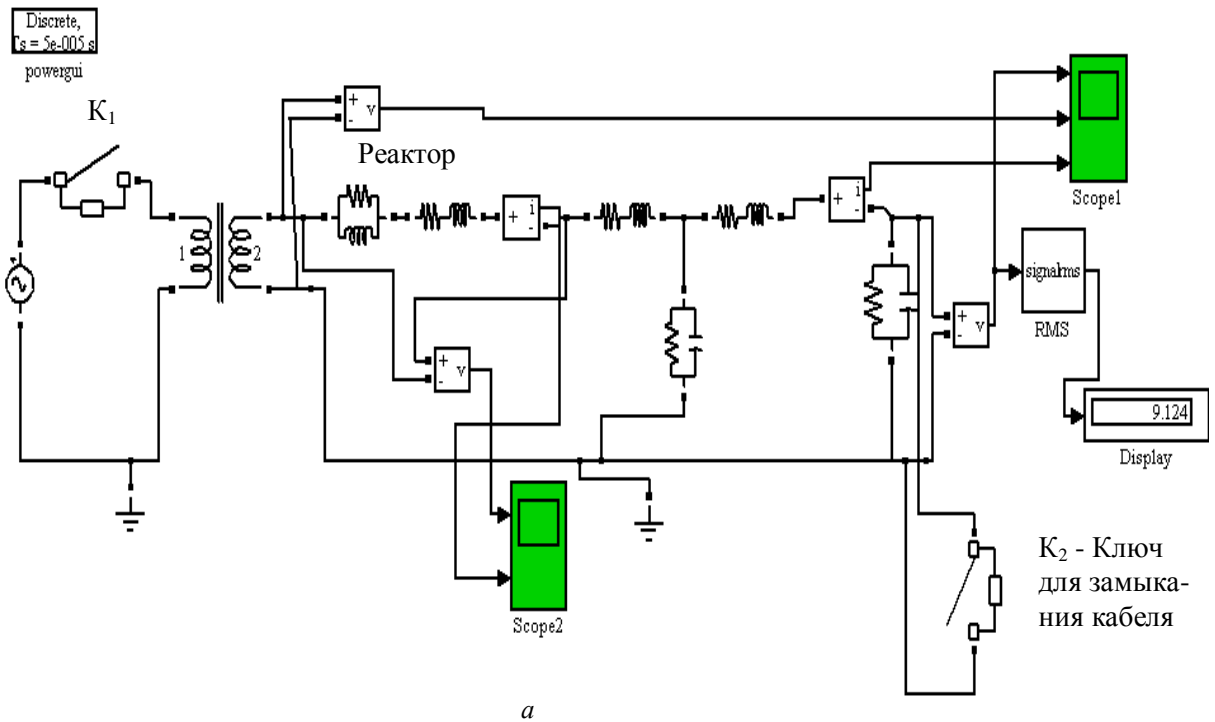


Рис. 5

*Моделирование работы установки при перекрытии изоляции кабеля.* Для моделирования переходного процесса в этом режиме использовалась электрическая схема, показанная на рис. 6 а. В схему дополнительно введен ключ  $K_2$ , замыкающий в момент времени 0,49 мс (выход на установившийся режим) емкостный элемент, моделирующий кабель. Кривые изменения во времени напряжения и тока реактора показаны на рис. 6 б. При замыкании емкостного элемента в резонансном контуре величина импеданса цепи значительно возрастает и определяется индуктивным сопротивлением реактора. Величина тока в цепи при этом резко снижается и за время около 0,4 с достигает установившегося значения, равного около 1 А. Из-за снижения тока в цепи "реактор-кабель" напряжение на реакторе уменьшается. При этом в кривой напряжения содержится высокочастотная составляющая, обусловленная колебательным процессом между индуктивностью реактора и емкостью фильтра.

Изменения во времени тока и напряжения в кабеле показаны на рис. 7. В момент пробоя изоляции напряжение на кабеле падает до малого значения, а величина тока также резко снижается из-за ухода из точки резонанса и увеличения импеданса цепи. При этом возникает бросок тока в цепи кабеля, показанный на вставке снизу и достигающий максимального значения – около 700 А при принятом значении сопротивления дуги – 1 кОм.



б

Рис. 6



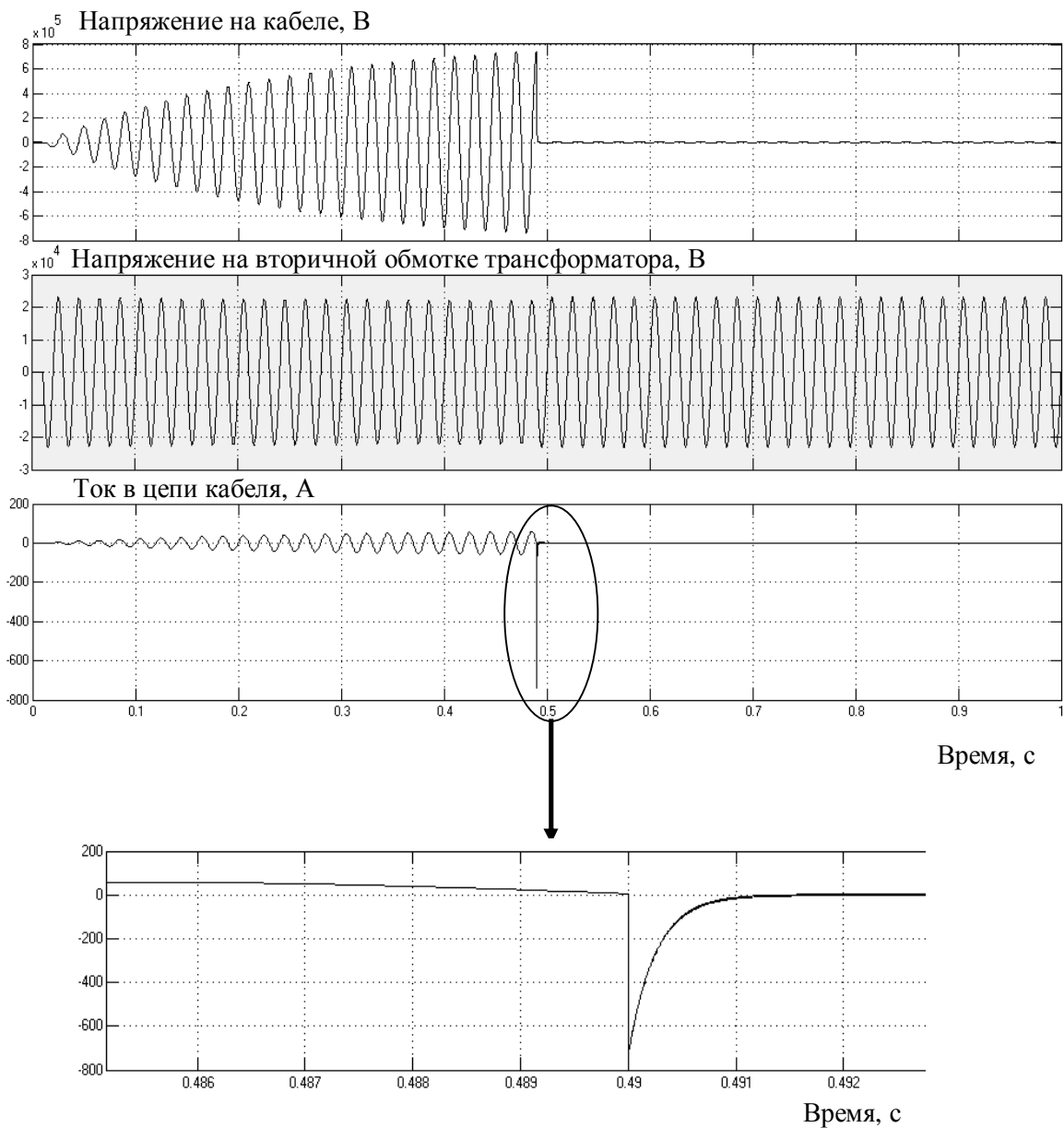


Рис. 7

*Моделирование работы установки при отключении внешнего источника питания.* Следующий внештатный режим, который моделировался в работе, это отключение источника питания. Для моделирования этого режима в схеме на рис. 3 использовался ключ  $K_1$ , отключающийся в момент времени 0,5 мс – после выхода на установившийся режим. Переходный процесс при отключении источника питания показан на рис. 8 и 9.

Видно, что напряжение и ток кабеля затухают за время около 0,5 с. При этом наблюдается бросок напряжения на вторичной обмотке трансформатора из-за большой индуктивности намагничивания трансформатора, близкой по величине с индуктивностью реактора. Для предотвращения такого перенапряжения можно рекомендовать установить на вторичной обмотке трансформатора ограничитель перенапряжения (разрядник или варистор).

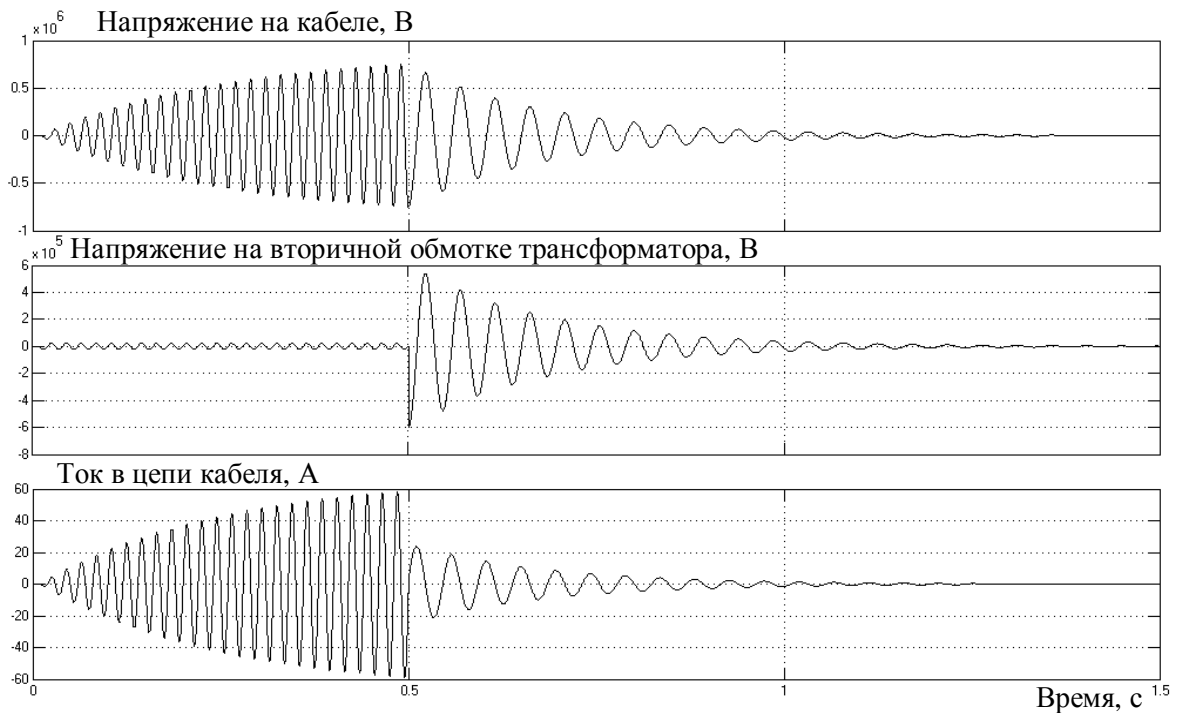


Рис. 8

Из графиков на рис. 9 видно, что при отключении источника питания напряжение и ток в реакторе монотонно снижаются до нуля. Таким образом, из проведенных расчетных исследований следует, что при отключении напряжения на этой установке в рабочем режиме необходимо плавно снижать входное напряжение, например, с помощью автотрансформатора. В случае же аварийного отключения необходимо предусмотреть установку ограничителя перенапряжения на вторичной обмотке трансформатора.

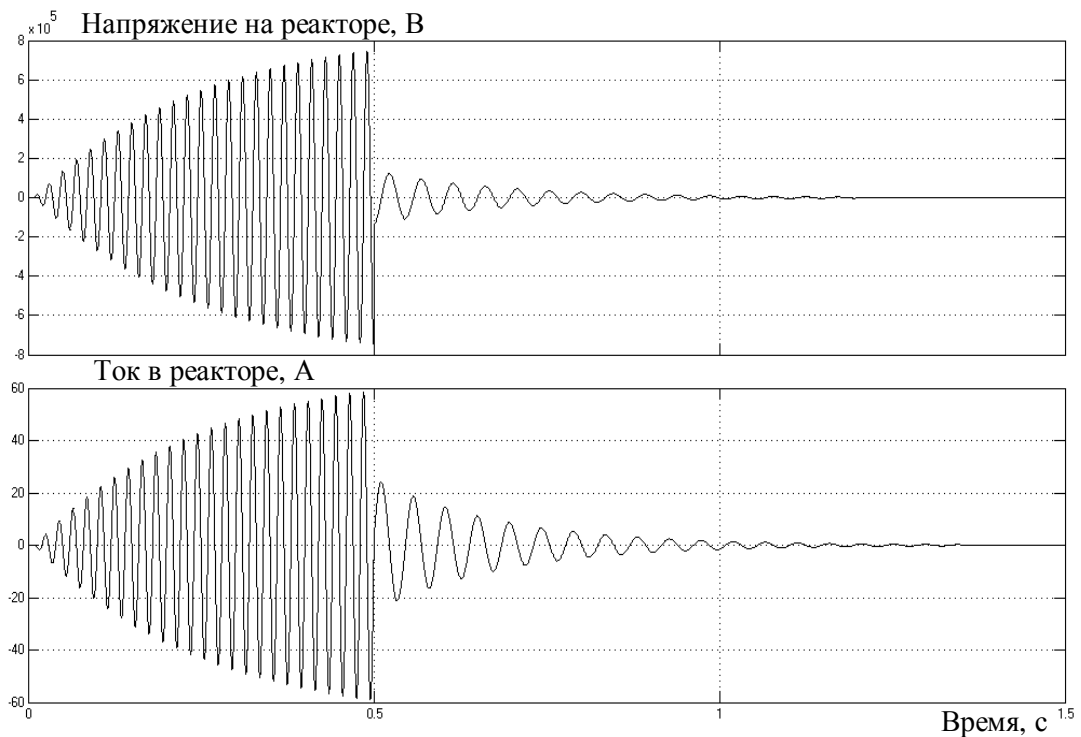


Рис. 9

## Выводы

1. В работе обоснована целесообразность применения резонансных систем с последовательным СL контуром для диагностики сверхвысоковольтных кабелей со СПЭ изоляцией по уровню ЧР. Показано, что такая система по сравнению с другими имеет следующие преимущества: низкую входную мощность, небольшой ток короткого замыкания, низкий уровень нелинейных искажений выходного напряжения, низкий уровень перенапряжений при пробое изоляции кабеля и низкий уровень разбалансировки фаз.

2. Разработана методика расчета и определены значения параметров испытательной системы: напряжение питающей сети – 380 В, 50 Гц, входное напряжение резонансного контура  $U_{ex} = 25$  кВ,  $I = 20$  А; максимальная индуктивность реактора 40 Гн, максимальное напряжение на кабеле до 500 кВ, реактивная мощность – 20000 квар, добротность контура от 40 до 60, потребляемая от сети мощность 40 кВА.

3. Показано, что при включении установки наблюдается плавный выход на установившийся режим в течение 0,5 с. В случае пробоя изоляции импеданс цепи "реактор-кабель" возрастает, что приводит к снижению тока в этой цепи и, как следствие, снижению напряжения на реакторе. При этом в кривой напряжения возникает высокочастотная составляющая, обусловленная колебательным процессом между индуктивностью реактора и емкостью фильтра. В случае аварийного отключения установки появляется бросок напряжения на вторичной обмотке трансформатора из-за большой индуктивности намагничивания трансформатора, соизмеримой с индуктивностью реактора. Для предотвращения такого перенапряжения на вторичной обмотке трансформатора рекомендуется применять ограничители перенапряжений (варистор или разрядник).

4. Полученные в работе результаты использованы при создании и наладке резонансной системы для испытания сверхвысоковольтных кабелей на заводе "Южкабель" (г. Харьков).

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, Ленингр. отд., 1979. – 224 с.
2. Мецанов Г.И., Образцов Ю.В., Пешков И.Б., Шувалов М.Ю. Силовые кабели на напряжение 10÷500 кВ: история развития и перспективы // Кабели и провода. – 2006. – № 3. – С. 18–24.
3. Набока Б.Г., Гурин А.Г., Лактионов С.В., Золотарев В.М., Нечаус А.А. Обоснование допустимых режимов эксплуатации резонансных установок для диагностики кабелей // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2005. – № 42. – С. 86–93.
4. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Перетятко Ю.В. Анализ микронеоднородностей электрического поля, как фактора повышения интенсивности пороговых электрофизических процессов в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и самонесущих изолированных проводов // Техн. электродинамика. – 2008. – №4. – С. 3–14.
5. Щерба А.А., Золотарев В.М. Научные основы разработки электротехнических комплексов для производства кабелей сверхвысокого напряжения с твердой полимерной изоляцией // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах. – Мат. Междунар. науч. конф. (17–21 августа 2009 г.). – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня". – 2009. – С. 192–197.
6. Юртин И.И. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий // Электрик. – 2009. – № 11–12. – С. 22–26.
7. Beyer M., Borsi H., Kamm W., etc. A new method for detection and location of distributed partial discharges (cable faults) in high voltage cables under external interference // IEEE Transactions of Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. Pas-101, № 9. – P. 3431–3438.
8. Borsi H. New method of Partial Discharge (PD) location in high Voltage Cables under noisy condition // Proc. of 7-th Intern. Symp. on High Voltage Engineering. - Dresden (Germany). – 1991. – V.7. – P. 173–176.
9. Morshuis P. Evaluation of Solid Dielectrics by Time-Resolved Analysis and Statistical Analysis // Proc. of 9-th International Sympos. on High Voltage Engineering.-Graz (Austria).– 1995. – V.5. – P. 5644.
10. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).