

УДК 679.745.33:543.552
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-39-48

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПО КАРТИНЕ ЕГО ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

К. Сатаркулов, А.К. Асанов, Г.Ш. Эралиева

Аннотация. Разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW, обладающий возможностью моделировать переходные процессы в неоднородной цепной схеме, которая представляет собой модель силового кабеля с локальными дефектами в его изоляции. Оценка состояния изоляции силового кабеля основана на изучении картины его вольтамперной характеристики при протекании в нем переходных процессов от воздействия на него испытательного сигнала (напряжения) регулируемой формы. Основой виртуального прибора является компьютерная модель силового кабеля, которую можно получить из его математической модели, разработанной по схеме замещения силового кабеля с локальными дефектами в электрической изоляции. Предполагается, что путем исследования характера изменения картины вольтамперной характеристики можно контролировать наличие локальных дефектов в изоляции силового кабеля. Высказанное предположение обосновано результатами численного эксперимента для силового кабеля с использованием разработанного виртуального прибора.

Ключевые слова: неоднородная цепная схема; переходной процесс; вольтамперная характеристика; компьютерное моделирование; LabVIEW; схема замещения; кабельные линии; контроль состояния изоляции высоковольтных кабелей.

ВОЛЬТАМПЕРДИК МҮНӨЗДӨМӨСҮНҮН СҮРӨТҮ БОЮНЧА ЭЛЕКТР КАБЕЛИНИН ПОЛИЭТИЛЕН ИЗОЛЯЦИЯСЫНЫН АБАЛЫН ДИАГНОСТИКАЛОО

К. Сатаркулов, А.К. Асанов, Г.Ш. Эралиева

Аннотация. Электр кабелинин модели LabVIEW болгон гетерогендүү чынжыр схемасында өткөөл процесстерди моделдөө мүмкүнчүлүгүнө ээ болгон, анын изоляциясында локалдык кемчиликтери бар виртуалдык прибор иштелип чыккан. Электр кабелин изоляциялоонун абалын баалоо, ага жөнгө салынуучу формадагы сыноо сигналынын (чыңалуунун) таасиринен өткөөл процесстер өтүп жатканда, электр кабелинин вольтампердик мүнөздөмөсүнүн сүрөтүн изилдөөгө негизделген. Виртуалдык аспаптын негизи электр кабелинин компьютердик модели болуп саналат, аны электрдик изоляциядагы жергиликтүү кемчиликтер менен электр кабелин алмаштыруу схемасы боюнча иштелип чыккан математикалык моделинен алууга болот. Вольт-ампердин мүнөздөмөсүнүн үлгүсүн өзгөртүү мүнөзүн изилдөө менен, электр кабелин изоляциялоодо жергиликтүү кемчиликтердин болушун көзөмөлдөөгө болот деп болжолдонууда. Сунушталган виртуалдык аспапты колдонуу менен электр кабели үчүн сандык эксперименттин жыйынтыгы менен негизделген.

Түйүндүү сөздөр: гетерогендүү чынжыр схемасы; өткөөл процесс; вольтампердик мүнөздөмө; компьютердик моделдөө; LabVIEW; алмаштыруу схемасы; кабелдик линиялар; жогорку чыңалуудагы кабелдерди изоляция абалы менен көзөмөлдөө.

DIAGNOSTICS OF THE POLYETHYLENE INSULATION OF A POWER CABLE BASED ON ITS VOLTAGE-AMPERE CHARACTERISTICS

K. Satarkulov, A.K. Asanov, G.Sh. Eralieva

Abstract. A virtual instrument has been developed in the LabVIEW environment, which has the ability to simulate transient processes in a heterogeneous chain circuit, which is a model of a power cable with local defects in its

insulation. The assessment of the insulation condition of a power cable is based on the study of the current-voltage characteristic of the power cable during the transient processes caused by the application of a test signal (voltage) of a controlled shape. The virtual instrument is based on a computer model of a power cable, which can be obtained from its mathematical model based on the equivalent circuit of a power cable with local defects in its electrical insulation. It is assumed that by studying the nature of the change in the current-voltage characteristic, it is possible to control the presence of local defects in the insulation of a power cable. This assumption is based on the results of a numerical experiment for a power cable using a developed virtual prototype.

Keywords: heterogeneous circuit diagram; transient process; current-voltage characteristic; computer simulation; LabVIEW; equivalent circuit; cable lines; monitoring the insulation condition of high-voltage cables.

Введение. По оценкам экспертов [1], отличительной особенностью состояния основных фондов электроэнергетического комплекса стран СНГ является высокая степень износа силового электротехнического оборудования.

Несмотря на принятые меры, доля нового энергооборудования остается сравнительно невысокой. Экономические состояния энергопредприятий вынуждают их к поиску необходимых мероприятий, которые способствовали бы увеличению сроков эксплуатации действующего энергооборудования. Одним из таких эффективных способов надежной работы передающих установок эксперты называют использование методов неразрушающего контроля и диагностирования, которые позволяют мониторить и анализировать состояние, например, проводящих элементов (ПЭ) сети, оперативно выявлять возникающие неисправности и предотвращать возможные сбои [2, 3].

На сегодняшний день разработано множество методов неразрушающего контроля состояния изоляции силовых кабелей (СК), таких как: измерение сопротивления изоляции; диэлектрических потерь; *частичных разрядов*; емкости кабельных линий; коэффициента абсорбции; *тепловизионный метода*; рентгеновский метода; измерения и анализа возвратного напряжения; метода *рефлектометрии* (импульсного, высокочастотного). Метод высокочастотной рефлектометрии является наиболее перспективным при использовании в системах диагностики высоковольтных кабелей (ВК). В то же время в [4] отмечено, что стоимость применяемого оборудования в перспективных направлениях диагностики, на сегодняшний день весьма значительна и рекомендуется применять их в ВК сверхвысокого напряжения и высокоответственных кабельных линиях. Поэтому остается актуальным поиск относительно простых и дешевых способов диагностики изоляции для других ПЭ, которые имеют значительную протяженность.

В данной статье на основе LabVIEW разработан виртуальный прибор, позволяющий изучать картину вольтамперной характеристики СК путем компьютерного моделирования зависимостей $u(t), i(t)$ с целью диагностики изоляции СК. При этом предполагается, что характер переходного процесса коррелирован с локальными дефектами в изоляции СК.

LabVIEW или Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Среда разработки лабораторных виртуальных приборов) широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами и представляет собой мощную и гибкую среду графического программирования [5, 6].

Программы, создаваемые в среде LabVIEW, называются виртуальными приборами (Virtual Instruments, сокращенно – VI или ВП). Компоненты, из которых строятся виртуальные приборы, сами также являются виртуальными приборами. Разработка виртуальных приборов осуществляется на двух панелях: 1) лицевая (передняя) панель; 2) блок-диаграмма (функциональная панель). На лицевой панели разрабатывается внешний вид виртуального прибора, на ней создаются элементы управления и отображения, которые являются интерактивными средствами ввода и вывода данных этого виртуального прибора. Блок-диаграмма предназначена для создания программы работы ВП, причем все команды, операторы циклов и сравнения изображаются графически.

Постановка задачи. Разработать ВП в среде LabVIEW для моделирования переходных процессов зависимостей $u(t), i(t)$ на основе компьютерной модели СК, который позволит оценивать состояние его изоляции на основе анализа картины вольтамперной характеристики (ВАХ) при воздействии на него испытательного сигнала (напряжения) регулируемой формы.

Решение задачи. Основой ВП является компьютерная модель СК, которую можно получить из его математической модели (ММ), разработанной по схеме замещения (СЗ) силового кабеля с локальными дефектами в электрической изоляции. При таком предположении, СЗ представляется неоднородной цепной схемой (НЦС) с распределенными параметрами [7].

На рисунке 1 приведен участок рассматриваемого СК. По длине СК условно разделен на пять равных участков, длина каждого равна Δx . Участок с номером 3 содержит в изоляции локальный дефект, который мог образоваться в процессе эксплуатации СК.

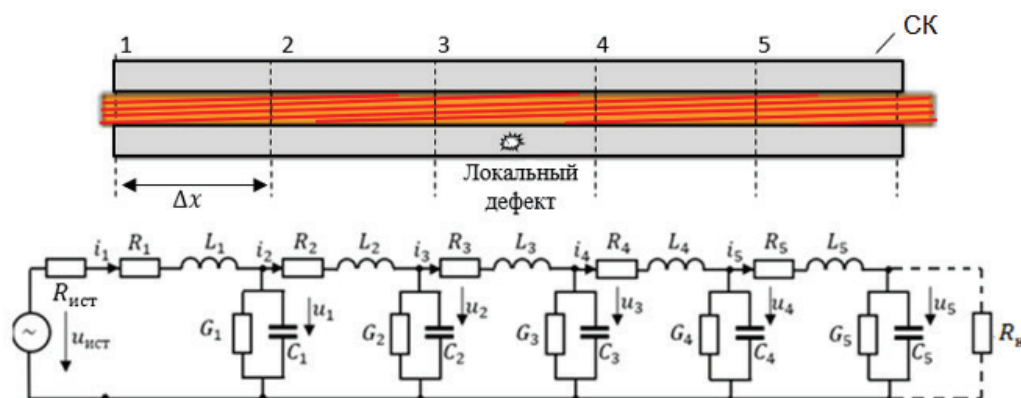


Рисунок 1 – Модель СК в виде неоднородной цепной схемы

На схеме замещения (рисунок 1)

$$R_k = R_0 \cdot \Delta x, L_k = L_0 \cdot \Delta x, G_k = G_0 \cdot \Delta x, C_k = C_0 \cdot \Delta x, (k = 1 \dots 5),$$

где R_0, L_0, G_0, C_0 – погонные параметры СК, (R_0, L_0 относится к токопроводящей жиле; G_0, C_0 – к электрической изоляции СК). В идеализированном предположении значения параметров R_k, L_k каждого участка линии равны, а значения параметров G_k, C_k , за исключением третьего участка, также равны друг другу. При этом значения G_3, C_3 третьего участка кабеля из-за наличия локального дефекта в изоляции отличаются от значений в остальных участках.

Математическую модель рассматриваемого участка ПЭ можно получить на основе адаптации ММ, разработанного в [8, 9], методом переменных состояний для электрической цепи с распределёнными параметрами.

$$\left. \begin{aligned}
\frac{di_1}{dt} &= \frac{1}{L_1} \cdot u_{\text{ист}} - \frac{R_{\text{ист}} + R_1}{L_1} \cdot i_1 - \frac{1}{L_1} \cdot u_1; & \frac{du_1}{dt} &= -\frac{G_1}{C_1} \cdot u_1 + \frac{1}{C_1} \cdot i_1 - \frac{1}{C_1} \cdot i_2; \\
\frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{L_2} \cdot u_1 - \frac{1}{L_2} \cdot u_2 - \frac{R_2}{L_2} \cdot i_2; & \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} \cdot i_2 - \frac{1}{C_2} \cdot i_3 - \frac{G_2}{C_2} \cdot u_2; \\
\frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{L_3} \cdot u_2 - \frac{1}{L_3} \cdot u_3 - \frac{R_3}{L_3} \cdot i_3; & \frac{du_3}{dt} &= \frac{1}{C_3} \cdot i_3 - \frac{1}{C_3} \cdot i_4 - \frac{G_3}{C_3} \cdot u_3; \\
\frac{di_4}{dt} &= \frac{1}{L_4} \cdot u_3 - \frac{1}{L_4} \cdot u_4 - \frac{R_4}{L_4} \cdot i_4; & \frac{du_4}{dt} &= \frac{1}{C_4} \cdot i_4 - \frac{1}{C_4} \cdot i_5 - \frac{G_4}{C_4} \cdot u_4; \\
\frac{di_5}{dt} &= \frac{1}{L_5} \cdot u_4 - \frac{1}{L_5} \cdot u_5 - \frac{R_5}{L_5} \cdot i_5; & \frac{du_5}{dt} &= \frac{1}{C_5} \cdot i_5 - \frac{G_5}{C_5} \cdot u_5 - \frac{1}{R_H C_5} \cdot U_5.
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Технология построения ВП в среде LabVIEW для решения различного рода дифференциальных уравнений рассмотрена в [5, 6].

На рисунке 1 модель ПЭ представлена в виде неоднородной цепной схемы (НЦС), состоящей из пяти звеньев. Переход от длинной линии, которая является точной моделью СК, к эквивалентной НЦС упрощает анализ электромагнитных процессов в СК. Вопрос же о точности моделирования длинной линии при помощи НЦС рассмотрен автором в [7], где установлено, что для большинства случаев достаточная точность моделирования достигается при $N \leq 10$, где N – число звеньев.

При построении модели СК (рисунок 1), где в качестве изоляции часто используется сшитый полиэтилен (СП), учтены результаты современных исследований, согласно которым в структуре изоляции из СП содержатся микровключения разных размеров, конфигураций и на различных расстояниях друг от друга [10]. Очевидно, что указанные неоднородности, которые в процессе эксплуатации увеличиваются в размерах, влияют на параметры (G_i, C_i) схемы замещения СК в виде НЦС, они, в свою очередь, – на характер протекания электромагнитных переходных процессов $u(t), i(t)$.

Общее представление о локальных дефектах в полиэтиленовой изоляции СК. При исследовании влияния локальных дефектов в изоляции на характер протекания переходных процессов в СК с использованием разработанной ВП, возникает необходимость в осознанном изменении параметров НЦС (рисунок 1), представляющей модель СК. Для этого требуется представление о взаимосвязи значений параметров НЦС с локальным дефектом в изоляции (полиэтилен).

Полиэтиленовые высоковольтные изоляции кабелей в процессе их эксплуатации, вследствие процесса электрического старения могут пробиться. Такие процессы связаны с появлением необратимых изменений – так называемых дендритов или триингов, представляющих собой систему полостей микронного диаметра и миллиметровой длины [11, 12].

Электрические дендриты (ЭД) обычно возникают в местах резко неоднородного поля при подаче напряжения частотой 50 Гц или импульсного напряжения достаточно большой амплитуды, а также ЭД могут прорасти под влиянием частичных разрядов, развивающихся между электродом и образцом, или во внутренних порах в полимере [11, 12].

В научных публикациях [10–14] высказываются различные мнения о значении поверхностного сопротивления каналов дендрита. В [12] отмечено, что величина поверхностного сопротивления каналов дендрита составляет $10^{10} \Omega$. В [14] приводятся следующие данные по поверхностному сопротивлению полостей в полиэтилене: на начальной стадии оно равно $10^{17} \Omega$, а в процессе электрического старения снижается до $10^9 \Omega$, то есть изменяется на восемь порядков.

В данной статье при исследовании влияния локальных дефектов в полимере на характер протекания переходного процесса будем придерживаться отмеченного выше положения.

Описание виртуального прибора. Разработанный ВП (рисунки 2, 3) обладает возможностью проведения численных экспериментов с целью исследования влияния локальных изменений в изоляции СК на характер протекания переходных процессов. Кроме того, он моделирует работу реальной испытательной установки (ИУ), схема которой изображена на передней панели ВП под номером 16. ИУ состоит из: генератора испытательного сигнала 8 с элементом управления для изменения формы генерируемого испытательного сигнала; физической модели СК; измерительного модуля, на вход которого подается сигнал от измерительного шунта и делителя напряжения; управляющей ЭВМ в виде персонального компьютера.

Сигнал, характеризующий переходной процесс участка рассматриваемой электрической цепи, значение которого подается на вход измерительного модуля, можно получить от датчика тока, разработанного в [15].

На передней панели ВП расположены два графических индикатора (виртуальные осциллографы) 9 и 10 с элементами управления в виде кнопок для представления, соответственно, компьютерных осциллограмм переходного процесса тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на соответствующих участках в зависимости от активных кнопок. На передней панели также представлен третий графический индикатор 17, на экране которого высвечивается вольтамперная характеристика СК.

На экранах осциллографа (рисунок 2) высвечены напряжение $u(t)$, ВАХ и ток $i(t)$ третьего звена НЦС, так как в активном положении находятся третьи кнопочки. При этом на входе «испытательной установки» модели СК действует постоянное напряжение значением в 100 В, подаваемое от генератора испытательного сигнала 8.

Род напряжения на выходе испытательного генератора может быть изменен с помощью элемента управления, расположенного слева в нижней части генератора. При этом каждая форма сигнала (напряжения) имеет номер, например, синусоидальному – 0; треугольному – 1, а постоянному по амплитуде сигналу – 2. Внешний вид этих сигналов с соответствующими номерами показан внизу передней панели ВП на участке с номером 13 (рисунок 2).

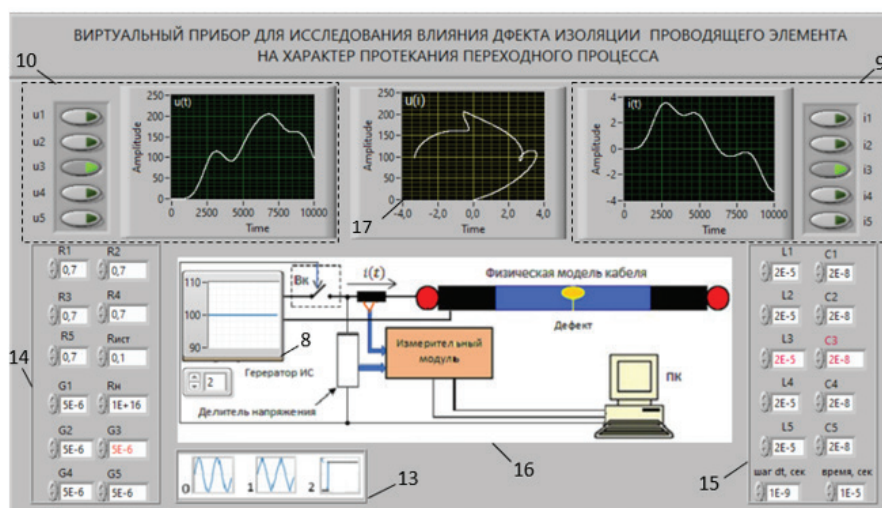


Рисунок 2 – Лицевая панель ВП при активном положении третьих кнопок: на экранах высвечены напряжение и ток третьего звена ЦС при подаче на вход СК испытательного сигнала в виде постоянного напряжения в 100 В (8)

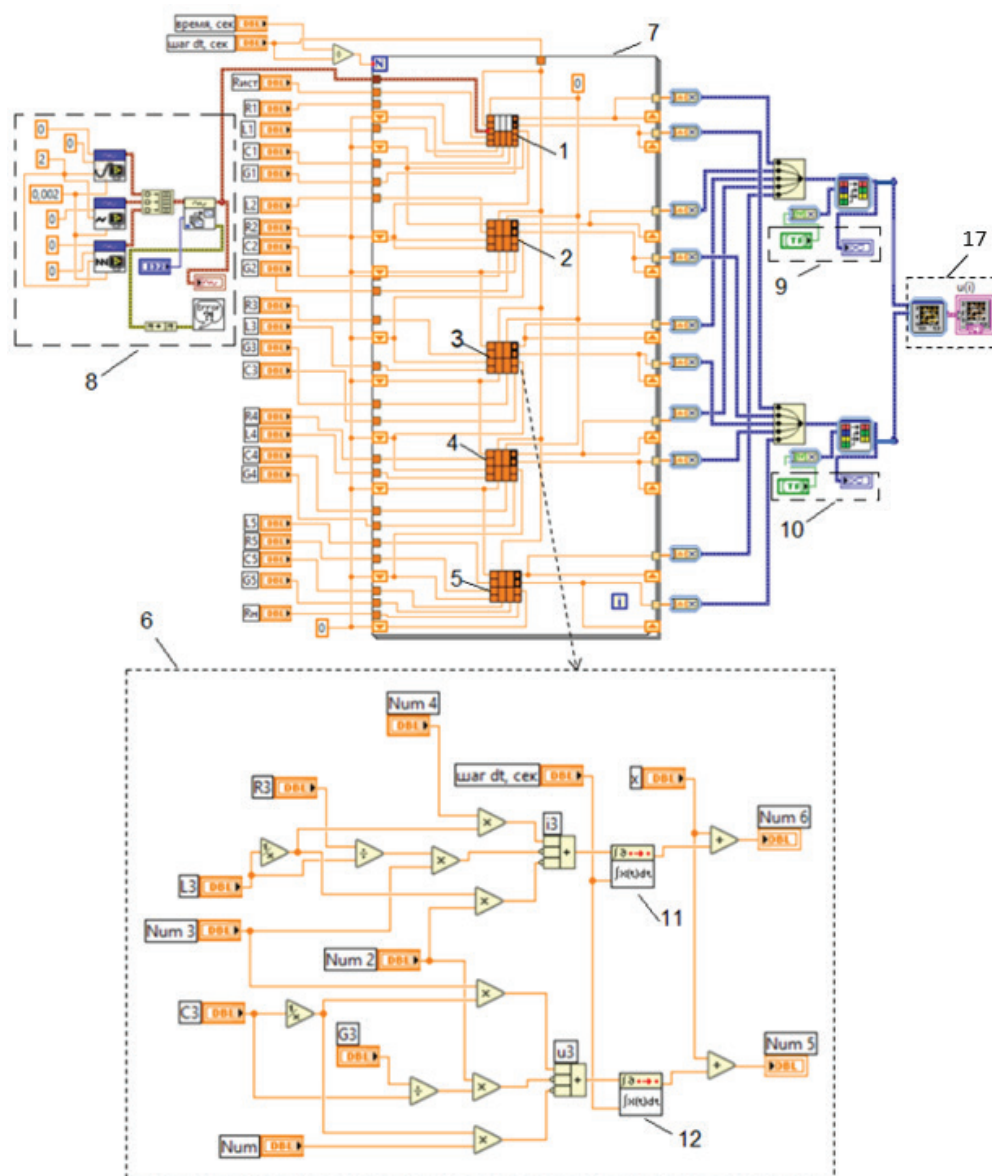


Рисунок 3 – Блок-диаграмма (функциональная панель) ВП

Слева и справа от графических индикаторов с номерами 10 и 9 (рисунок 2) расположены кнопки для управления сигналами, которые направляются на экраны осциллографа. Алгоритм функционирования этих кнопок реализован с помощью соответствующих элементов, блок-диаграммы, которые на рисунке 3 имеют те же номера (10 и 9), что и на передней модели.

На отдельных участках, пронумерованных цифрами 14, 15 передней панели ВП, расположены элементы управления для ввода значений параметров (R_i, L_i, G_i, C_i) ЦС, где i – номер звена. Кроме того, там же расположены элементы управления для ввода параметров моделирования, т. е. значение шага dt в сек и продолжительность моделирования T в сек.

На рисунке 3 приведены программы работы ВП, где его функциональные возможности определяются содержанием блок-диаграмм.

В процессе численного эксперимента ВП интегрирует систему дифференциальных уравнений (1). В результате получаются напряжения и токи, соответствующие каждому из пяти звеньев. При этом на рисунке 4, а подприборы (ПП) пронумерованы цифрами 1, 2, 3, 4, 5, которые соответствуют каждой строке системы дифференциальных уравнений (1).

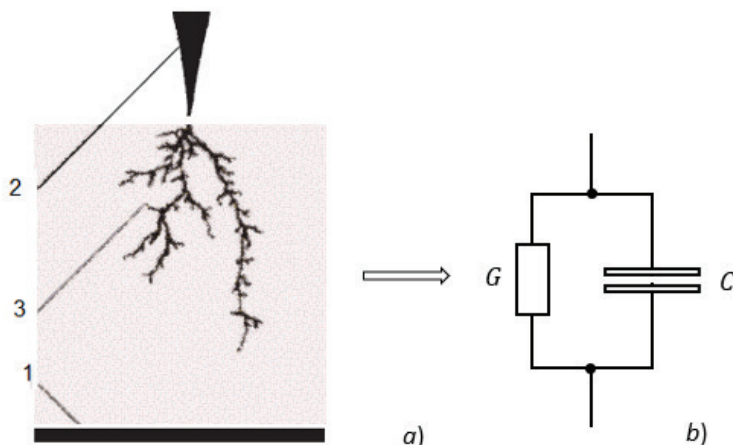


Рисунок 4 – Проращивание дендрита 3 в полимере, находящемся под воздействием электрического поля между электродами: 1 – плоскость, 2 – игла (а); б – схема замещения участка изоляции, представленная G – проводимостью и C – емкостью

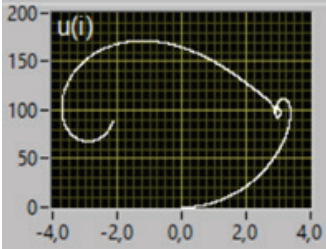
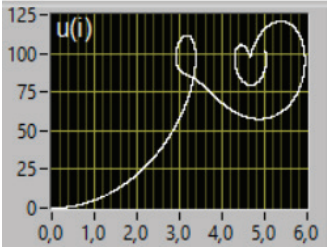
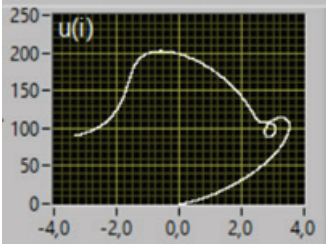
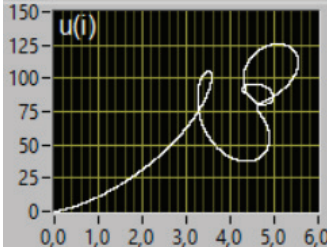
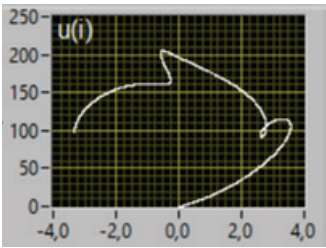
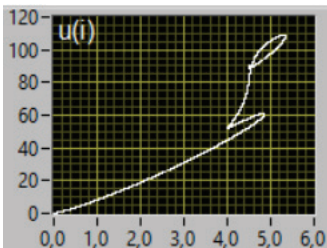
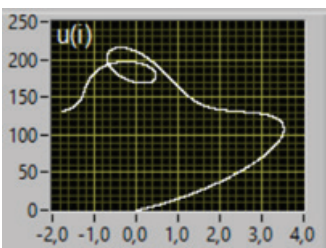
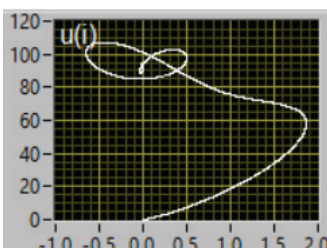
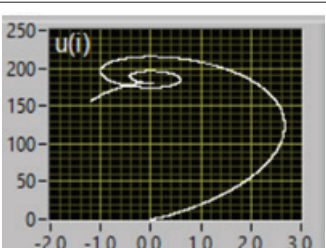
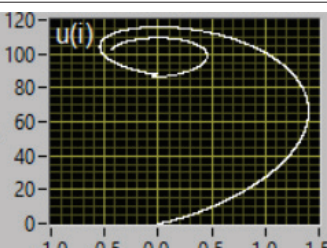
На рисунке 4, б раскрыто содержание третьей ПП, которая выполняет функцию подпрограммы на блок-диаграмме ВП более высокого уровня.

В блок-диаграмме каждой ПП операция интегрирования реализуется после подачи на вход функции PtByPt (11, 12) необходимых вычисленных параметров. При этом функция PtByPt (Point By Point) является поточечными версиями традиционных аналитических виртуальных инструментов (VI) LabVIEW. Суффикс PtByPt в названиях этих VI означает, что они предназначены для непрерывного анализа данных по точкам, а не для блоков данных.

Функционирование испытательного генератора (8 на рисунке 2) реализовано блок-диаграммой (8, на рисунке 3).

Результаты численного эксперимента представлены в виде ВАХ секций СК (таблица 1)

Таблица 1 – ВАХ силового кабеля при отсутствии и возникновении локальных дефектов

№ секции СК	Изображение ВАХ в каждой секции при отсутствии локальных дефектов (ЛД) в изоляции СК	Изображение ВАХ для каждой секции в случае ЛД в изоляции на третьем участке СК
I		
II		
III		
IV		
V		

Заключение. Проанализируем результаты численных экспериментов (таблица 1). Для проведения численного эксперимента с целью изучения степени влияния локальных дефектов в изоляции СК на ход электромагнитных переходных процессов воспользуемся однородной цепной схемой из [7], состоящей из пяти звеньев, представляющей условную модель силового кабеля с параметрами $R = 0.7$, Ом $L = 2 \cdot 10^{-5}$ Гн, $G = 0.5 \cdot 10^{-6}$ См, $C = 2 \cdot 10^{-8}$ Ф.

Содержанием таблицы 1 являются смоделированные картины ВАХ каждой секции СК для двух случаев. В первом случае предполагается отсутствие локальных дефектов в полиэтиленовой изоляции СК (второй столбец таблицы). Во втором случае предполагается, что в результате прорастания дендрита в изоляции третьей секции СК возник локальный дефект, что привело к возрастанию проводимости G_3 на четыре порядка (третий столбец таблицы).

Как видно из данных таблицы, сопоставление ВАХ, расположенных во втором и третьем столбцах, показывает качественное отличие картины ВАХ после возникновения ЛД, например, в третьем участке (секции).

Таким образом, можно сделать вывод, что результаты компьютерного моделирования показали справедливость высказанных в работе предположений о возможном влиянии локальных дефектов на характер протекания электромагнитных переходных процессов, что позволяет диагностировать состояние изоляции СК по картине ВАХ СК.

Поступила: 26.06.2025; рецензирована: 10.07.2025; принята: 11.07.2025.

Литература

1. Воротицкий В.Э. Повышение энергетической эффективности электрических сетей / В.Э. Воротицкий, И.В. Жежеленко, Г.Г. Трофимов. URL: http://www.rtp3.ru/wpcontent/uploads/2019/03/27-Povyshenie-energetich.-ef-ti-setej_na-sajt.pdf (дата обращения: 22.04.2025).
2. Игнатов С. Диагностика и мониторинг высоковольтного оборудования. Современные технические и программные решения / С. Игнатов. URL: <https://marketelectro.ru/node/diagnostika-i-monitoring-vysokovoltного-oborudovaniya> (дата обращения: 30.03.2025).
3. Подлесный В. Диагностика кабельных линий / В. Подлесный, Т. Млынчик. URL: <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1540/> (дата обращения: 30.03.2025).
4. Привалов И.Н. Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно / И.Н. Привалов. СПб.: Петерб. энерг. ин-т повыш. квал. руков. работ. и спец. (ПЭИПК), 2008. 104 с.
5. Моделирование в среде LabVIEW: учеб. пособие (лабораторный практикум) / авт.-сост.: П.А. Звада, Д.С. Тучина. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. 130 с.
6. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С. Магда. М.: ДМК Пресс, 2012. 208 с.
7. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З.Г. Каганов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
8. Асанова С.М. Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами / С.М. Асанова, А.Р. Айдарова, К.А. Сатаркулов // Известия Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. 2012. № 26. С. 105–111.
9. Асанова С.М. Моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП на основе метода переменных состояния / С.М. Асанова, Г.Н. Ниязова, К. Сатаркулов // Проблемы автоматизации и управления. 2015. № 1 (28). С. 231–236.
10. Шувалов М.Ю. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента / М.Ю. Шувалов, А.В. Ромашкин, В.Л. Овсиенко // Электричество. 2000. № 5. С. 49–57.
11. Резинкина М.М. Влияние проводимости ветвей дендритов в полиэтиленовой изоляции на их рост при приложении высокого напряжения // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 6. С. 85–92.
12. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. Л.: Энергия, 1979. 233 с.

13. Электрические свойства полимеров / Б.И. Сажин, А.М. Лобанов, О.С. Романовская и др.; под ред. Б.И. Сажина. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1986. 224 с.
14. *Morshuis P.* Proc. of Intern. Symposium on High Voltage Engineering / P. Morshuis. Graz (Austria), 1995. Vol. 5. P. 5644.1–5644.4.
15. *Сатаркулов К.* Катушка индуктивности с новым способом намотки как устройство диагностики / К. Сатаркулов, Г.Ш. Эралиева, Г.Н. Ниязова, А.К. Асанов, Н.А. Суюнтбекова // Проблемы автоматизации и управления. 2024. № 3 (51). С. 28–36.