

УДК: 621.3.015.2:621.311

Сатаркулов Калмурза Сатаркулович, к.т.н., профессор Токмокского филиала им. Х.А. Рахматуллина, Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, КР, г. Токмок, ул. Гагарина, 65, 722200, e-mail: satarkulov46k@mail.ru

Ибраев Таалайбек Омукеевич, соискатель кафедры «Электроэнергетика», Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, КР, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, 720044, e-mail: zhusupov_zhyldyzbek@icloud.com

Бакасова Айна Бакасовна, д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика», Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, КР, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, 720044, e-mail: bakasovaaina@mail.ru

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЕ ОТ ПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КАБЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ИНТЕРГАРМОНИКАМИ

Аннотация. Разработана компьютерная программа (КП) в среде LabVIEW для оценки потери мощности от переходных токов в токопроводящей жиле однофазного силового кабеля (СК) при воздействии на него напряжения с интергармониками (ИГ). КП позволяет исследовать влияние параметров каждой ИГ, входящей в состав приложенного ИГ напряжения. Параметрами ИГ являются заданные частоты, амплитуды и начальные фазы. Основой КП является компьютерная модель СК, которую можно получить из его математической модели (ММ), разработанной по схеме замещения (СЗ) силового кабеля в виде однородной цепочной схемы (ОЦС). КП разработана таким образом, что можно исследовать влияние неоднородностей в изоляции СК на течение переходного процесса тока и напряжения на входе СК, что позволяет проведение диагностики состояния СК. В последнем случае схема замещения СК представляется неоднородной цепочной схемой. В заключительной части работы приведены результаты численного эксперимента (ЧЭ), при этом учтено, что амплитуда интергармоник редко превышает 0,5% амплитуды колебаний основной частоты. ЧЭ показал, что величина потерь мощности в токопроводящей жиле кабеля от переходных токов зависит от состава и начальной фазы интергармонической составляющей приложенного напряжения и как интергармоники могут повлиять на характер переходного процесса в цепях с распределенными параметрами, к которым относится СК.

Ключевые слова: потери мощности от переходных токов; интергармоническое напряжение; однородная и неоднородная цепная схема; переходной процесс; компьютерное моделирование; LabVIEW; схема замещения; диагностика изоляции силового кабеля.

Введение

В последнее десятилетие, по мнению экспертов [1, 2], интенсивное внедрение различного рода нелинейных нагрузок, подключаемых к электрическим сетям различного напряжения, повлияло на ухудшение экономических показателей энергетической эффективности электрических сетей. Это связано с искажением (нормально

синусоидальной) формы напряжения или тока не только у самого потребителя, но и во внешней сети, и в случае превышения нормируемых уровней эти электромагнитные помехи могут: - привести к нарушению помехоустойчивости технических средств в энергосистеме; - повлиять на технологический процесс в системах электроснабжения; - привести к увеличению общего эффективного тока в фазовых и в нейтральных проводах элементов самой сети и в электрооборудовании. За счет них возрастают потери в сети, снижается коэффициент мощности и появляются другие отрицательные воздействия на элементы электрических сетей.

В амплитудном спектре сетевого тока наряду с высшими гармониками присутствует широкий спектр интергармоник (ИГ), вызванных работой резкопеременных и нелинейных нагрузок, получающих питание от преобразователей частоты [3, 4, 5]. При этом, особенно при постоянном функционировании электроприемников с резкопеременной нагрузкой в сети, также постоянно протекают переходные процессы, которые могут отрицательно воздействовать на элементы сети.

В связи с этим представляет интерес разработка инструментария по моделированию и изучению потери мощности в элементах сети, например, в СК, от переходных токов при воздействии на него ИГ напряжений. Также ставится вопрос: одинаковы ли потери мощности по всей длине СК?

1. Постановка задачи

Разработать инструментарий в виде КП в среде LabVIEW для моделирования и изучения потери мощности в СК от переходных токов при воздействии на него ИГ напряжений. Кроме того, КП должна обладать возможностью проведения анализа величины потерь мощности на отдельных участках длины СК, а также исследовать влияние неоднородностей в изоляции СК на характер протекания переходных процессов в нем, что дает возможность диагностировать состояния изоляции кабеля.

2. Решение задачи

КП разработана на основе математической модели СК. Математическую модель СК можно получить из его схемы замещения (СЗ), представляющую собой однородную (отсутствуют неоднородности в изоляции) или неоднородную (содержит неоднородности в изоляции) цепочную схему (ЦС) (рис.1) с распределенными параметрами [6].

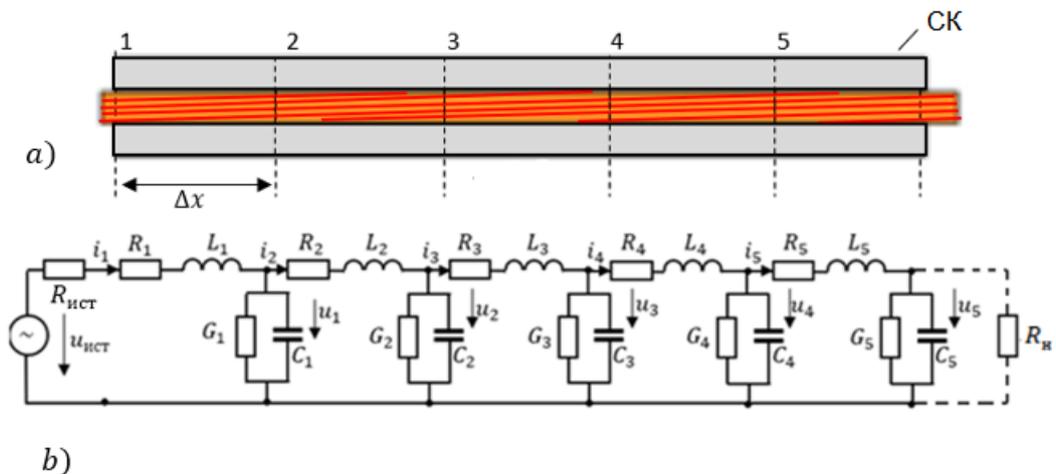


Рисунок 1– Модель СК – а; в виде цепочной схемы – б

На рисунке 1 изображен участок рассматриваемого СК при отсутствии неоднородностей в его изоляции. По длине СК условно разделен на пять равных звеньев длиной Δx . Вопрос о точности моделирования длинной линии (в нашем случае СК) при помощи ЦС рассмотрен автором [7], где установлено, что для большинства случаев

достаточная точность моделирования достигается при $N \leq 10$, где N – число звеньев.

Параметры элементов цепочной последовательности (ЦП) равны: $R_k = R_0 \cdot \Delta x$, $L_k = L_0 \cdot \Delta x$, $G_k = G_0 \cdot \Delta x$, $C_k = C_0 \cdot \Delta x$, ($k = 1 \dots 5$), где R_0, L_0, G_0, C_0 – погонные параметры СК, (R_0, L_0 относятся к токопроводящей жиле; G_0, C_0 к электрической изоляции СК).

Математическая модель СК представляет собой систему дифференциальных уравнений [7, 8]:

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

3. Описание интерфейсной части разработанной КП

Интерфейсная часть (ИЧ) напоминает внешний вид действующего прибора (в терминологии среды LabVIEW эта часть прибора называется лицевой частью виртуального прибора (ВП)), на которой расположены элементы управления и отображения, являющиеся интерактивными средствами ввода и вывода данных (рис.2).

LabVIEW [9, 10] реализует концепцию графического программирования, где исходный код представляет собой **блок-диаграмму** (соединенные друг с другом пиктограммы элементов языка), которая затем компилируется в машинный код. Блок-диаграмма предназначена для создания программы работы ВП, причем все команды, операторы циклов и сравнения изображаются графическими обозначениями. ИЧ и блок-диаграмма разработанного ВП соответственно представлены на рисунке 2 и рисунке 3.

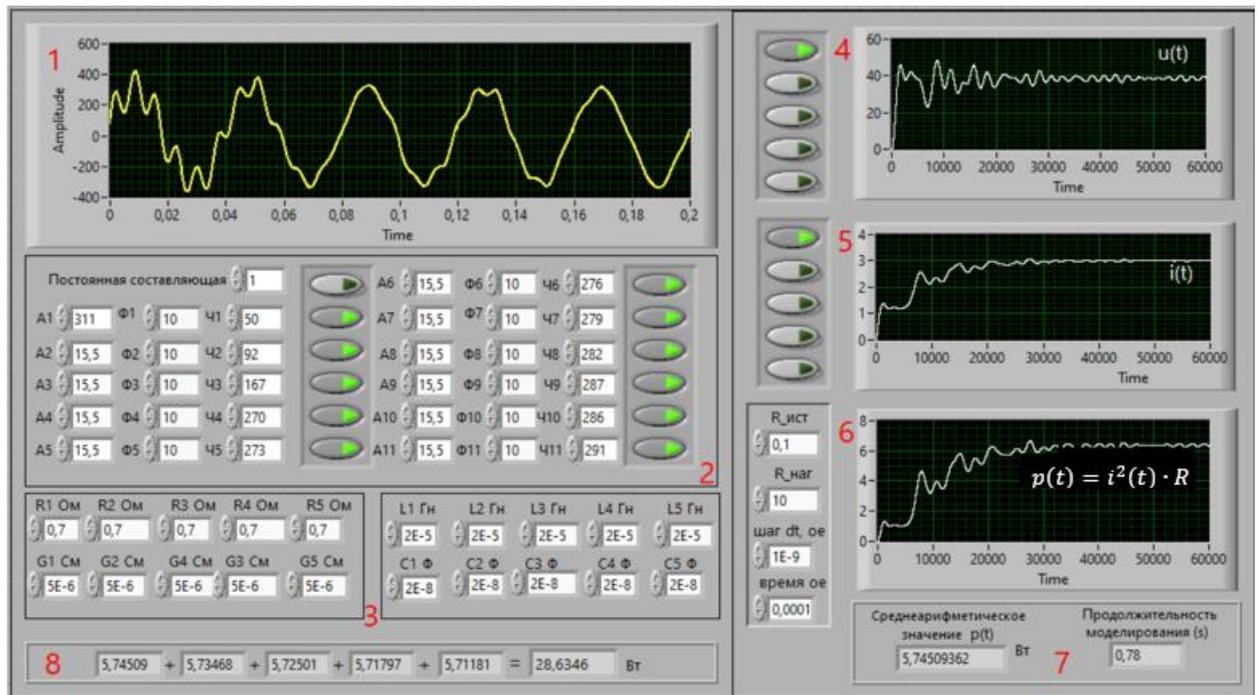


Рисунок 2– Лицевая панель разработанного ВП

На рисунке 2 пронумерованы основные элементы лицевой панели, где: 1 – смоделированная осциллограмма интергармонического напряжения, приложенная к СК, где интергамонический состав определяется количеством активных кнопок, расположенных в области – 2; 4, 5, 6 – соответственно осциллограммы переходных зависимостей напряжения $u(t)$, тока $i(t)$ и потерь мощности $p(t)$, полученные численным решением системы ДУ (1); в области 2 расположены также интерактивные средства ввода исходных данных для моделирования ИГ напряжения; 3 – интерактивные средства ввода исходных данных параметров СК в виде (R_k, G_k, L_k, C_k, k – номер участка кабеля); 7 – элементы вывода результатов статистической обработки потерь мощности $p(t)$ в виде среднего арифметического значения и продолжительности моделирования t . Осциллограммы 4, 5 соответствуют первому участку СК, так как активными являются первые кнопки, находящиеся с левой стороны осциллограмм; 8 – значения потерь мощности каждого звена.

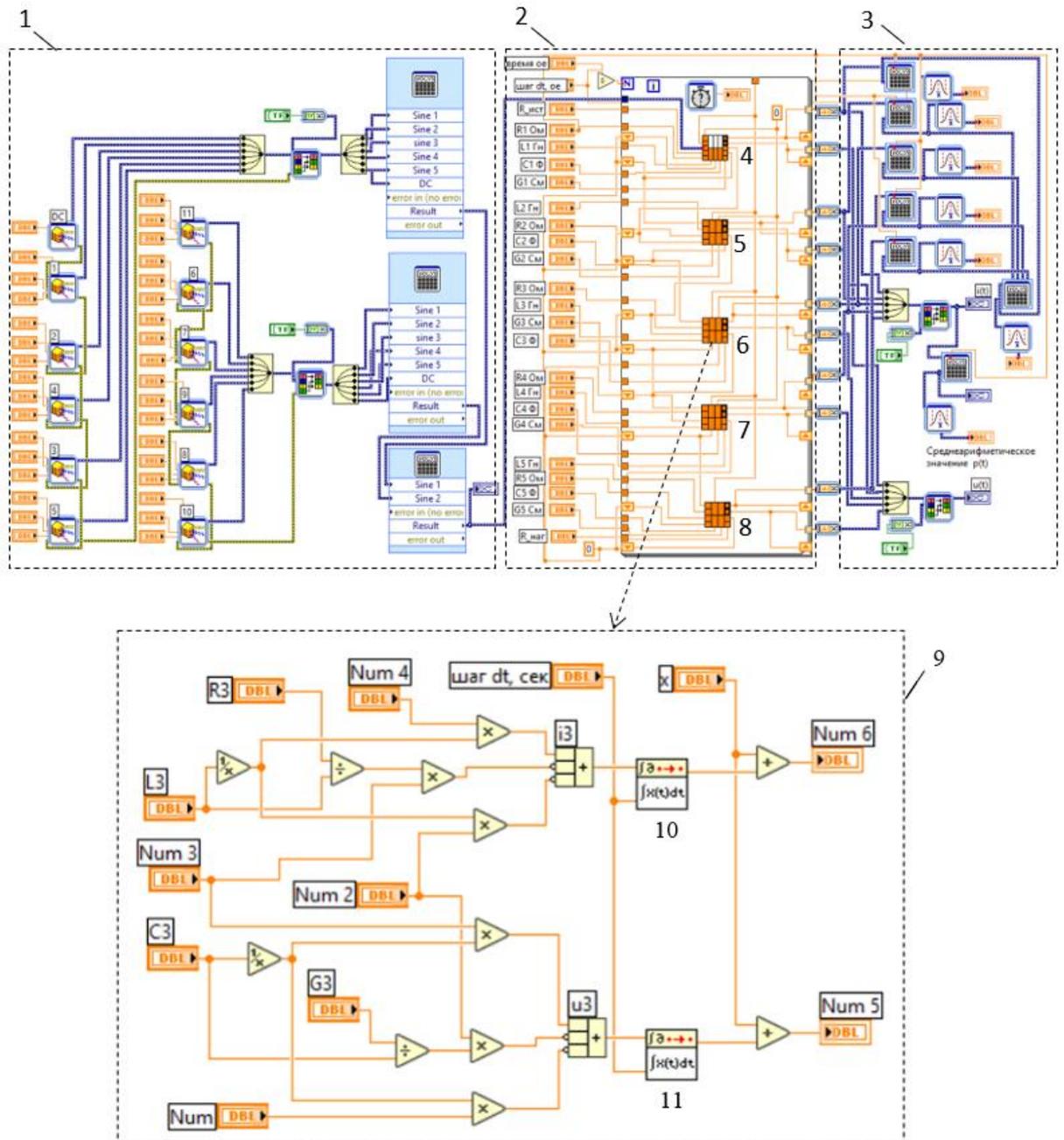


Рисунок 3 – Блок-диаграмма разработанного ВП

На рисунке 3 блок-диаграмма ВП представлена соответствующими пронумерованными подблок-диаграммами, расположенными в заштрихованных областях.

Рассмотрим последовательно их назначение: 1 – реализует моделирование сигнала (напряжения) интергармонического характера, состоящего из постоянной составляющей, основной первой гармоники (50 Гц) и десяти интергармоник (их количество при необходимости можно расширить в зависимости от поставленной цели), параметры которых (частота, амплитуда, начальная фаза) задаются исследователем; 2 – производит численное интегрирование (ЧИ) системы дифференциальных уравнений (1), при разработке этого раздела использована технология построения ВП в среде LabVIEW, выполняющего решение системы дифференциальных уравнений, изложенная в [9, 10]; 3 – вычисляет мгновенное значение потерь активной мощности $p(t) = i(t)^2 * R$ в токопроводящей жиле СК каждой секции и реализует статистическую обработку этой переходной функции $p(t)$ за время моделирования с целью вычисления его

среднеарифметического значения; 4, 5, 6, 7, 8 – подприборы (ПП), реализующие численное интегрирование системы ДУ (1); 9 – содержание ПП под номером 6; 10, 11 – функция PtByPt, непосредственно выполняющая операции интегрирования в процессе непрерывного анализа данных по точкам после подачи на их входы предварительно вычисляемых параметров.

При этом сам процесс программирования в среде LabVIEW подробно не рассматривается, так как объем этой статьи не позволяет.

4. Результаты численного эксперимента

При моделировании параметрами однородной ЦС [6], представляющей модель СК, приняты следующие значения: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 0.7 \text{ Ом}$; $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$; $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = G_5 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ См}$; $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$.

Значение нагрузки, подаваемой от сети с помощью СК, равно $R_n = 5 \text{ Ом}$.

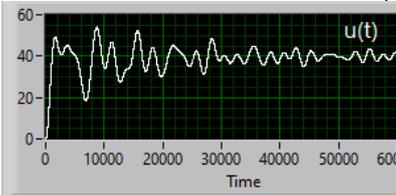
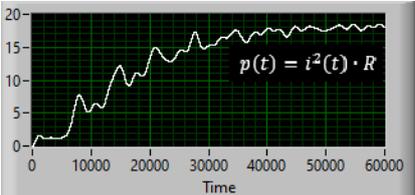
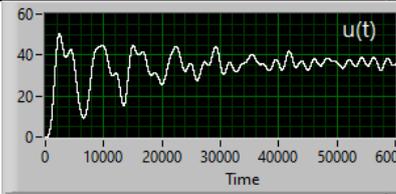
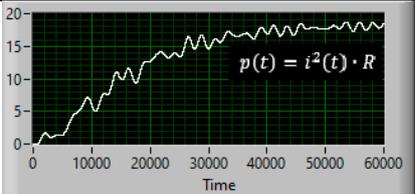
В течение всего численного эксперимента учтено, что амплитуда интергармоник редко превышает 0,5% амплитуды колебаний напряжения основной частоты 50 Гц. Так как амплитуда основной гармоники принята равной $220 \cdot \sqrt{2} = 311 \text{ В}$, то амплитуды всех интергармоник, входящих в состав приложенного к СК напряжения, приняты равными 1,55 В.

Предполагается, что приложенное к СК интергармоническое напряжение состоит из основной гармоники частотой $f_1 = 50 \text{ Гц}$, начальным фазовым углом $\varphi_1 = 10^\circ$ и ряда интергармоник с частотами $f_{иг1} = 92 \text{ Гц}$, $f_{иг2} = 167 \text{ Гц}$, $f_{иг3} = 270 \text{ Гц}$, $f_{иг4} = 273 \text{ Гц}$, $f_{иг5} = 276 \text{ Гц}$, $f_{иг6} = 279 \text{ Гц}$, $f_{иг7} = 282 \text{ Гц}$, $f_{иг8} = 286 \text{ Гц}$, $f_{иг9} = 287 \text{ Гц}$, $f_{иг10} = 291 \text{ Гц}$. Начальные фазовые углы интергармоник при ЧЭ могут составлять 0° или 10° .

Результаты моделирования содержатся в таблицах 1, 2, 3, 4, 5.

В таблице 1 во втором столбце представлены графики зависимостей напряжения в начале каждой секции СК, отражающие переходные процессы напряжения в этих секциях. В третьем столбце – графики зависимостей мгновенных значений потерь активной мощности в токопроводящей жиле СК каждой его секции. Суммирование потерь на каждой секции рассматриваемой модели СК дает общие активные потери в токопроводящей его жиле при воздействии на него интергармонического напряжения.

Таблица 1

№ секции СК	Графики зависимостей напряжения в начале каждой секции СК	Графики зависимостей потерь мощности в токопроводящей жиле СК на каждой секции
I		
II		

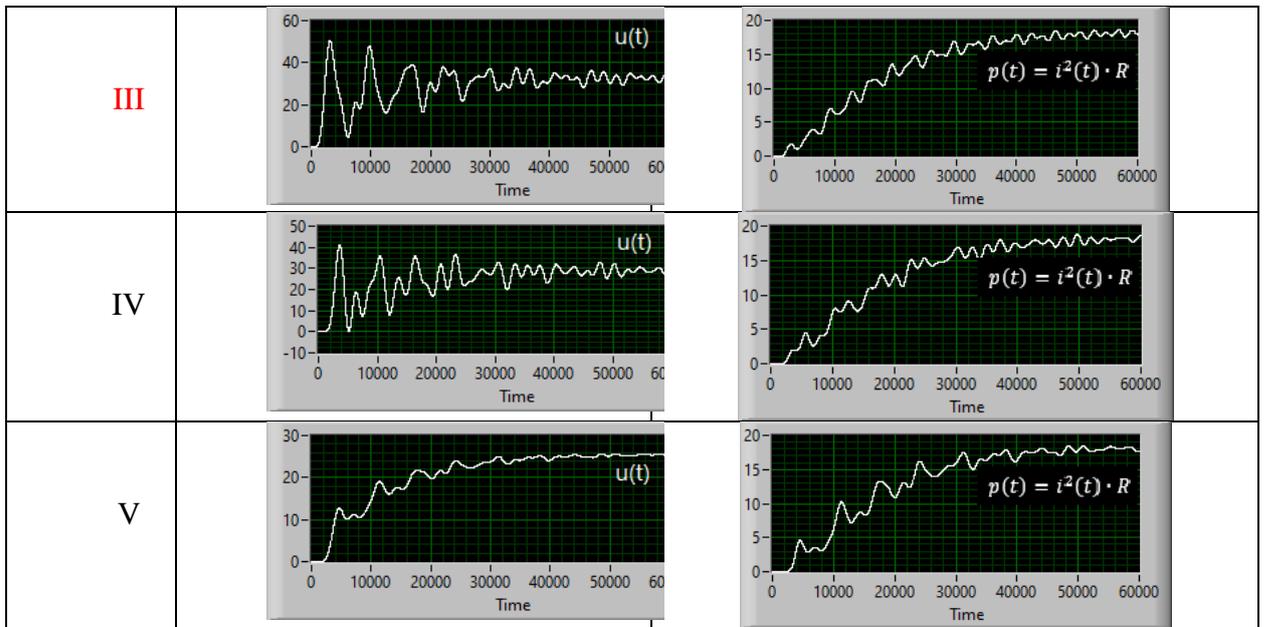
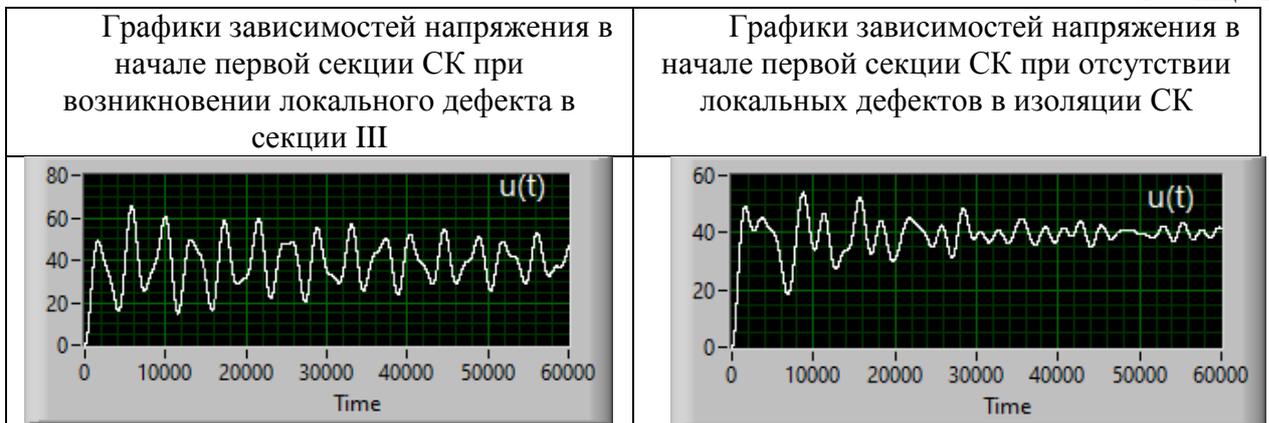


Таблица 2



В таблице 2 представлены аналогичные, как и в таблице 1, зависимости напряжения только для первой секции СК в предположении, что в изоляции третьего участка возникли локальные неоднородности, что привело, например, к увеличению локальной проводимости изоляции на три порядка, а локальная емкость участка увеличилась, к примеру, на один порядок.

Сопоставление характера зависимостей напряжения на входе СК (первая секция) в двух случаях, когда возникли локальные дефекты в изоляции СК, например, на третьей секции (первый столбец таблицы 2), и при отсутствии локальных дефектов в изоляции (второй столбец таблицы 2), приводит к мысли **о возможности использования этого факта для диагностирования состояния изоляции СК, так как сопоставляемые графики качественно и количественно отличаются.**

В таблице 3 приведены результаты статистической обработки потери активной мощности от переходных токов в жиле СК при подключении его на напряжение без интергармонических составляющих. Приведены потери в жиле СК для каждой его секции и суммарные потери.

Таблица 3

$f_1 = 50$ Гц, фазовый угол $\varphi_1 = 10^\circ$, интергармоники отсутствуют
Среднеарифметические значения потерь активной мощности в токопроводящей

желе СК					
секция №1	секция №2	секция №3	секция №4	секция №5	сумма
15, 4702 Вт	15,452 5 Вт	15,437 7 Вт	15,430 2 Вт	15,425 6 Вт	77,216 3 Вт

Таблица 4

$f_1 = 50$ Гц, фазовый угол $\varphi_1 = 10^\circ$. Интергармоники: $f_{иг1} = 92$ Гц, $\varphi_{иг1} = 10^\circ$; $f_{иг2} = 270$ Гц, $\varphi_{иг2} = 10^\circ$; $f_{иг3} = 282$ Гц, $\varphi_{иг3} = 10^\circ$; $f_{иг4} = 291$ Гц, $\varphi_{иг4} = 10^\circ$					
Среднеарифметические значения потерь активной мощности в токопроводящей желе СК					
секция №1	секция №2	секция №3	секция №4	секция №5	сумма
18, 3109 Вт	18,289 9 Вт	18,272 4 Вт	18,263 5 Вт	18,288 1 Вт	91,390 0 Вт

Таблица 5

$f_1 = 50$ Гц, фазовый угол $\varphi_1 = 10^\circ$. Интергармоники: $f_{иг1} = 167$ Гц, $\varphi_{иг1} = 10^\circ$; $f_{иг2} = 273$ Гц, $\varphi_{иг2} = 0^\circ$; $f_{иг3} = 276$ Гц, $\varphi_{иг3} = 10^\circ$; $f_{иг4} = 279$ Гц, $\varphi_{иг4} = 10^\circ$; $f_{иг5} = 287$ Гц, $\varphi_{иг5} = 10^\circ$; $f_{иг6} = 286$ Гц, $\varphi_{иг6} = 10^\circ$					
Среднеарифметические значения потерь активной мощности в токопроводящей желе СК					
секция №1	секция №2	секция №3	секция №4	секция №5	сумма
12,698 3 Вт	12,683 7 Вт	12,671 6 Вт	12,665 4 Вт	12,661 6 Вт	63,380 6 Вт

Результаты статистической обработки потери активной мощности от переходных токов в желе СК при подключении его на напряжение с интергармоническими составляющими, приведённые в таблицах 4 и 5, отличаются только составом и параметрами интергармонических составляющих приложенного напряжения.

Заключение

Сравнения данных таблиц 4 и 5 показали, что активные потери в токопроводящей желе СК от переходных токов при воздействии на него интергармонического напряжения зависят от состава и параметров интергармонических составляющих. Например, при следующем составе интергармонического напряжения: основная гармоника $f_1 = 50$ Гц, фазовый угол $\varphi_1 = 10^\circ$; интергармоники $f_{иг1} = 92$ Гц, $\varphi_{иг1} = 10^\circ$; $f_{иг2} = 270$ Гц, $\varphi_{иг2} = 10^\circ$; $f_{иг3} = 282$ Гц, $\varphi_{иг3} = 10^\circ$; $f_{иг4} = 291$ Гц, $\varphi_{иг4} = 10^\circ$ – потери увеличиваются в случаях присутствия интергармоник.

И в то же время следующий состав интергармоник: основная гармоника $f_1 = 50$ Гц, фазовый угол $\varphi_1 = 10^\circ$; интергармоники $f_{иг1} = 167$ Гц, $\varphi_{иг1} = 10^\circ$; $f_{иг2} = 273$ Гц,

$\varphi_{иг2} = 0^\circ; f_{иг3} = 276 \text{ Гц}, \varphi_{иг3} = 10^\circ; f_{иг4} = 279 \text{ Гц}, \varphi_{иг4} = 10^\circ; f_{иг5} = 287 \text{ Гц}, \varphi_{иг4} = 10^\circ; f_{иг6} = 286 \text{ Гц}, \varphi_{иг4} = 10^\circ$ приводит к тому, что потери уменьшаются в случаях присутствия интергармоник.

По нашему мнению, этот результат можно объяснить тем, что характер переходных процессов в цепях с распределенными параметрами, к которым относятся силовые кабельные линии, зависит от состава и параметров интергармонических составляющих приложенного напряжения.

Сопоставление характера зависимостей напряжения на входе СК в случаях возникновения локальных дефектов в изоляции СК, например, на третьей секции (первый столбец таблицы 2), и отсутствия локальных дефектов в изоляции (второй столбец таблицы 2), приводит к мысли **о возможности использования этого факта для диагностирования состояния изоляции СК, так как сопоставляемые графики качественно и количественно отличаются.**

Литература

1. Воротницкий В. Э., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г. Повышение энергетической эффективности электрических сетей / http://www.rtp3.ru/wpcontent/uploads/2019/03/27-Povyshenie-energetich.-ef-ti-setej_na-sajt.pdf (дата обращения 22.04.2025).
2. Sayenko Y.. Compensation of reactive power in electrical supply systems of large industrial enterprises / Y. Sayenko, T. Baranenko, D. Kalyuzhniy // *Przegląd elektrotechniczny*. – 2015. – N 11. – P. 77 – 80.
3. Жежеленко И. В. Дополнительные потери, обусловленные генерированием интергармоник / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // Сб. докл. IX Российской науч.-техн. конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. – СПб, 2006. – С. 521–524.
4. Гапиров Р.А. Нормирование интергармоник как показателя качества электроэнергии в России и за рубежом / Р.А. Гапиров, Д.С. Осипов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 5.
5. Жежеленко И.В. Интергармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // *Вестник приазовского государственного технического университета*. – 1999. – Вып. №8. – С. 170 – 175.
6. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.: ил.
7. Асанова С.М., Ниязова Г.Н., Сатаркулов К. Моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП на основе метода переменных состояния // *Проблемы автоматизации и управления*. – 2015. – № 1 (28). – С. 231–236.
8. Асанова С.М., Айдарова А.Р., Сатаркулов К.А. Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. – 2012. – № 26. – С. 105–111.
9. Моделирование в среде Labview: учебное пособие (лабораторный практикум) / Авт.-сост.: П.А. Звада, Д.С. Тучина. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 130 с.
10. Магда Ю. С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.