

К. С. КУРОЧКА, В. И. ТОКОЧАКОВ, Е. А. КАРАБЧИКОВА, К. А. ПАНАРИН

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
г. Гомель, Беларусь

*В настоящее время при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем особое внимание уделяется прогнозированию возникновения аварийных ситуаций и минимизации потерь в случае их появления. Наиболее распространённым методом исследования перенапряжений являются применение имитационных моделей в специализированных прикладных пакетах, что накладывает дополнительные квалификационные требования на энергетика-проектировщика.*

*Авторами предлагается технологии моделирования и программное средство для моделирования и исследования перенапряжений, возникающих в распределительных сетях 6–10 кВ при однофазных замыканиях на землю, включающее методику визуального проектирования распределительной сети посредством применения информационных технологий и автоматизированную генерацию математической модели для её дальнейшего исследование с целью анализа перенапряжений.*

### Введение

В настоящее время при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем особое внимание уделяется прогнозированию возникновения аварийных ситуаций и минимизации потерь в случае их появления.

В Республике Беларусь протяженность линий электропередач напряжением 6–10 кВ составляет более 123 тыс. км (45% от суммарной протяженности всех линий электропередач). Повреждаемость 5 случаев в год на 100 км. Основные причины износ материалов и атмосферные воздействия – до 80% [1]. Наиболее серьёзные повреждения вызываются однофазными замыканиями на землю, сопровождающиеся горением дуги, и приводят к большим кратностям перенапряжений [2], пробоям изоляции электрооборудования и электрических машин, а само воздействие дуги приводит к разрушению изоляции и других конструкций электрооборудования и сетей.

Значительно снизить финансовые потери и вероятность возникновения повреждений возможно на этапах проектирования новых подстанций или их реконструкции, если воспользоваться информацией о возможных кратностях перенапряжений при однофазных замыканиях на землю.

Наиболее распространённым методом исследования перенапряжений являются применение имитационных моделей, реализованных в специализированных математических программных пакетах или отдельных программных средств [3, 4].

Имитационное моделирование процессов, возникающих в распределительных сетях электроэнергетических систем при однофазных замыканиях на землю, позволяет получить достаточно достоверную картину изменения токов и напряжений на элементах сети [5]. Однако их практическое применение затруднено необходимостью составления имитационной модели в специализированном прикладном пакете, что накладывает дополнительные квалификационные требования на энергетика-проектировщика. От которого требуются знания не только в области электроснабжения, но и быть квалифицированным математиком и серьёзным специалистом в сфере информационных технологий. Как правило, подобные специалисты широкого профиля на рынке труда практически отсутствуют.

Таким образом актуальной является задача разработки технологии моделирования и соответствующих программных средств для исследования перенапряжений в распределительных сетях 6–10 кВ при однофазных

замыканиях на землю доступных широкому спектру инженеров-электриков.

Данная технология должна включать методику визуального проектирования распределительной сети посредством применения информационных технологий, автоматизированную генерацию математической модели и её дальнейшее исследование с целью анализа перенапряжений.

Решение указанной задачи невозможно без применения компьютерного моделирования на основе системного подхода [6].

### Построение математической модели перенапряжений распределительной сети напряжением 6–10 кВ

На практике для описания распределительной сети (рис. 1) используют специальные средства функционального моделирования. К сожалению, задача построения математической модели на основе функциональной схемы является весьма сложной и в настоящее время формализована только для определённого класса систем [7, 8].

То. требуется решить задачу автоматизации построения аналитической или численно-аналитической математической модели сложной системы, представляющей собой распределительную сеть с точки зрения моделирования перенапряжений.

Для этих целей адаптируем подход, предложенный в [7], и в результате чего представим решение задачи в виде реализации следующих этапов:

1. построение функциональной модели распределительной сети 6–10 кВ, включая обоснование некоторых допущений или ограничений для модели;
2. автоматизированное построение численно-аналитической модели распределительной сети 6–10 кВ;
3. численное моделирование и исследование влияния возникающих перенапряжений на функционирование всех элементов сети.

При исследовании системы воспользуемся микроподходом [6]. Выделим элементы системы, представляющие собой взаимодействующее различное электроэнергетическое оборудование (рис. 1).

Каждому элементу системы поставим в соответствие элемент функциональной модели. Построим математическую модель для  $i$ -го элемента системы в виде

$$\Phi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) = 0, \quad (1)$$

где  $\Phi_i$  – функционал связи элементов математической модели;  $\mathbf{x}$  – вектор входных переменных,  $\mathbf{x} = \{x_1(t), x_2(t) \dots x_n(t)\}$ ;  $\mathbf{y}$  – вектор выходных переменных,  $\mathbf{y} = \{y_1(t), y_2(t) \dots y_m(t)\}$ ;  $\mathbf{z}$  – вектор внешних воздействий,  $\mathbf{z} = \{z_1(t), z_2(t) \dots z_r(t)\}$ ;  $t$  – время. Функционал связи  $\Phi_i$ , как правило, представляет собой решение дифференциального уравнения [9].

Система интегральных и дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с законами Кирхгофа или методом контурных токов [9], может быть сведена путем

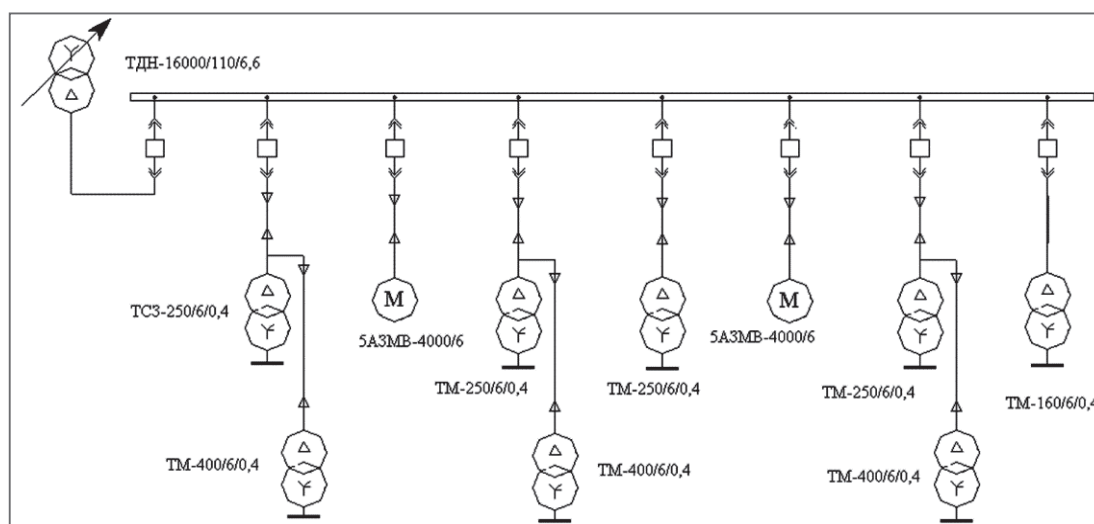


Рисунок 1 – Схема распределительной сети 6–10 кВ предприятия

подстановки к одному дифференциальному уравнению, которое используется для составления характеристического уравнения.

Порядок дифференциального и характеристического уравнения зависит от числа реактивных элементов приведенной схемы. Главная трудность в решении задачи классическим методом для уравнений высоких порядков состоит в отыскании корней характеристического уравнения и постоянных интегрирования. Поэтому для решения уравнений порядка выше второго применяют другие методы, в частности операторный метод [9], основанный на применении преобразования Лапласа и исключающий трудоемкую процедуру отыскания постоянных интегрирования.

Определим иерархические связи между элементами функциональной модели. Введём понятие уровня (слоя) в функциональной модели. Таким образом, элементы могут располагаться на различных уровнях модели. Уровни между собой взаимодействуют последовательно, т.е. пока не выполняются все элементы нижнего уровня, переход к элементам следующего уровня невозможен. Элементы одного уровня функциональной модели могут выполняться совместно (параллельно).

Выделим две основные группы элементов: воздушные и кабельные линии электропередач и трансформаторы двухобмоточные. Внутри каждой группы можно выделить ряд элементов [9], характеризующихся своими физическими характеристиками, алгоритмами функционирования и обозначениями на схеме.

Воздушные и кабельные линии электропередач – описываются соотношениями:

$$\begin{cases} R_{\text{л}} = r_0 L, \\ X_{\text{л}} = x_0 L, \\ B_{\text{л}} = b_0 L, \\ Q_b = U^2 b_0 L = U^2 B_{\text{л}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R_{\text{л}}$  и  $X_{\text{л}}$  – активное и индуктивное сопротивление линии, Ом;  $r_0$  – удельное активное сопротивление, Ом/км;  $x_0$  – удельное индуктивное сопротивление, Ом/км;  $L$  – длина линии, км;  $b_0$  – удельная емкостная проводимость линии, См/км;  $B_{\text{л}}$  – емкостная проводимость линии, См;  $Q_b$  – зарядная мощность линии, Мвар;  $U$  – междуфазное напряжение, кВ.

Трансформаторы двухобмоточные – описываются соотношениями (3).

$$\begin{cases} R_{\text{T}} = \frac{\Delta P_k U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}^2}, \\ Z_{\text{T}} = \frac{10 U_k U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}^2}, \\ X_{\text{T}} = \sqrt{Z_{\text{T}}^2 - R_{\text{T}}^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $R_{\text{T}}$  и  $X_{\text{T}}$  – активное и индуктивное сопротивление трансформатора, Ом;  $Z_{\text{T}}$  – полное сопротивление трансформатора, Ом;  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания трансформатора, кВт;  $U_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;  $S_{\text{н}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВа;  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение трансформатора, кВ.

Рассмотрим процесс однофазного замыкания на землю. Предположим, что в месте замыкания имеется активное (переходное)  $R_3$  и индуктивное сопротивления  $X_3$ . Появление сопротивления  $X_3$  может быть обусловлено повреждением обмоток электрических машин потребителей. Если считать, что ток замыкания на землю в основном определяется емкостной проводимостью, то можно условно трехфазную схему замещения привести к однофазной схеме (рис. 2) [10]. В схеме замещения  $R$  общее активное сопротивление сети относительно земли,  $C$  – суммарная емкость сети относительно земли.

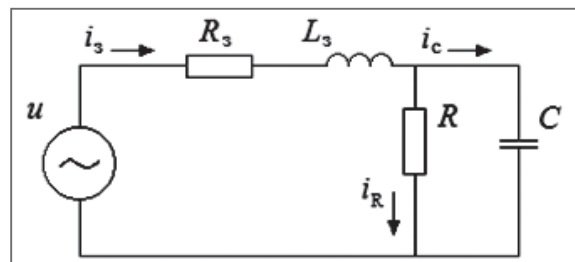


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения

Модель переходного процесса в пространстве состояний будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} = -\frac{R_3}{L_3} i_3 - \frac{1}{L_3} u_c + \frac{1}{L_3} u; \\ \frac{du_c}{dt} = -\frac{1}{C} i_3 - \frac{1}{RC} u_c. \end{cases} \quad (4)$$

Данная модель в векторно-матричной форме можно записать в виде:

$$\frac{dX(t)}{dt} = FX(t) + Gu(t) = \begin{bmatrix} -\frac{R_3}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_3}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_3} \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \quad (5)$$

Данный подход, примененный к упрощенной схеме (4)–(5), возможно использовать к более сложным схемам – записать систему уравнений первого и второго закона Кирхгофа, выделить переменные состояния (токи через индуктивности и напряжения на емкостях). Привести систему уравнений к нормальной форме Коши, задать начальные условия с учетом предыдущего режима – постоянство напряжений на емкостях и постоянство тока в индуктивностях.

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \dots + k_{1n}x_n + g_1(t) \\ \frac{dx_2}{dt} = k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + \dots + k_{2n}x_n + g_2(t) \\ \dots \\ \frac{dx_n}{dt} = k_{n1}x_1 + k_{n2}x_2 + \dots + k_{nn}x_n + g_n(t) \end{cases} \quad (6)$$

Интегрирование дифференциальных уравнений, представленных в форме Коши, выполняется методом Рунге-Кутты [11].

Для практических целей при анализе переходных процессов в любой схеме предлагается следующий алгоритм.

1. Рассчитать установившийся режим при  $t \rightarrow \infty$ . Определить принужденные токи и напряжения.

2. Рассчитать режим до коммутации. Определить токи в ветвях с индуктивностью и напряжения на конденсаторах. Значения этих величин в момент коммутации является независимыми начальными условиями.

3. Составить дифференциальные уравнения для свободного процесса ( $E = 0$ ) в схеме после коммутации по законам Кирхгофа или по методу контурных токов. Алгебраизировать данные уравнения, получить характеристическое уравнение и найти его корни. Существуют приемы, упрощающие операцию отыскания корней характеристического уравнения,

например, приравнивание нулю входного операторного сопротивления цепи, которое получается путем замены в выражении комплексного сопротивления цепи множителя « $j\omega$ » на оператор « $p$ ».

4. Записать общие выражения для искомым напряжений и токов в соответствии с видом корней характеристического уравнения.

5. Переписать величины, полученные в п. 4, и производные от них при  $t = 0$ .

6. Определить необходимые зависимые начальные условия, используя независимые начальные условия. Время замыкания на землю фазы  $A$  задается равным 0,005 с.

7. Подставив начальные условия в уравнения п. 5, найти постоянные интегрирования.

8. Записать законы изменения искомым токов и напряжений. Кратности перенапряжений в фазах  $B$  и  $C$  рассчитываются по максимальной по модулю величине амплитуды напряжения. Например, амплитудные значения напряжения фазы  $B$  рассчитываются по формуле [2]:

$$u_b(t) = e_b(t) + u_{0\text{уст}}(t) - \Delta U_{0\text{уст}} e^{-t/\tau} \cos \omega' t, \quad (7)$$

где  $e_b(t)$  – вынужденная составляющая напряжения фазы  $B$ ;  $u_{0\text{уст}}(t)$  – установившаяся составляющая напряжения в нейтрали сети;  $\Delta U_{0\text{уст}}$  – начальная амплитуда колебаний переходной составляющей напряжения;  $\tau$  – постоянная времени переходного процесса;  $\omega'$  – частота колебательного контура.

При программной реализации воспользуемся объектно-ориентированным подходом. Создадим иерархию классов, для хранения информации и методов каждого функционального элемента. На вершине иерархии определим абстрактный класс, описывающий общую структуру элемента системы. От него будем наследовать классы, определяющие группы элементов распределительной сети. Внизу иерархии будут находиться «экземплярные» классы, определяющие конкретные элементы системы.

Для реализации графического интерфейса и определения связей между элементами воспользуемся структурным шаблоном «декоратор» [12]. Создадим базовый абстрактный класс, предназначенный для осуществления визуализации произвольного элемента. Физические и функциональные свойства

каждого конкретного элемента схемы определим как «декорации» согласно шаблона проектирования.

Кроме того, определим интерфейс *IConnector*, определяющий собой коннектор элемента, необходимый для создания соединения и интерфейс *IConnection*, описывающий конкретные соединения между элементами.

Таким образом, вся распределительная сеть будет храниться в одной типизированной коллекции, которую для визуализации будут обрабатывать классы, реализующие интерфейс пользователя, а для исследования математической модели – специальный класс-решатель, содержащий набор математических методов и средств.

Построение математической модели перенапряжений распределительной сети 6–10 кВ осуществляется на основании функциональной модели по следующему алгоритму.

1. Выбираются элементы модели первого уровня.

2. Извлекаются математические модели каждого элемента и формируется общая модель уровня:

$$\begin{cases} \Phi_1(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = 0, \\ \Phi_2(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = 0, \\ \dots \\ \Phi_N(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

3. Учитываются известные значения векторов входных переменных и векторов внешних воздействий и решается система (7).

4. Сохраняются результаты решения и осуществляется переход на следующий уровень функциональной модели.

5. Проводится проверка на предмет рассмотрения всех уровней. В случае отрицательного ответа осуществляется переход на шаг 2.

#### **Апробация предлагаемой методики построения математической модели**

Согласно предложенной методике было разработано средствами С# настольное приложение и проведена его апробация на примере исследования перенапряжений распределительной сети напряжением 6–10 кВ.

Проведём верификацию разработанного программного обеспечения. Рассмотрим

возникновение однофазного замыкания на землю в распределительной сети 6–10 кВ небольшого промышленного предприятия (рис. 3), для которой известно численное решение с использованием специального средства функционального моделирования (рис. 4).

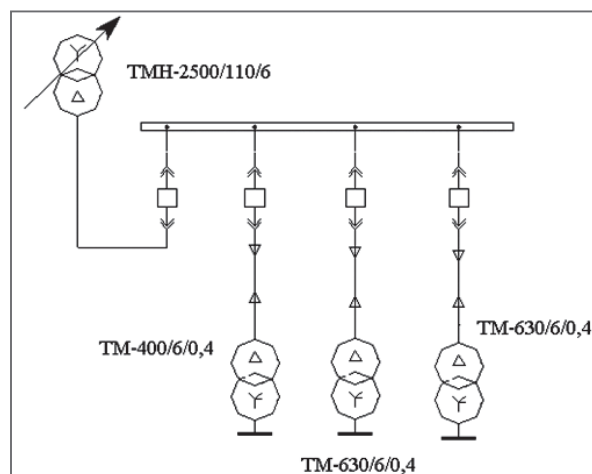


Рис. 3. Распределительная сеть 6–10 кВ промышленного предприятия малой мощности

С помощью разработанного программного обеспечения создадим виртуальную функциональную модель сети (рис. 5) и проведём исследование.

В результате получим графики (рис. 6), отражающие напряжение на фазах в точке замыкания относительно земли.

Как видно из результатов моделирования (рис. 4 и 6) кратности перенапряжений в фазах полученные с помощью разработанного программного комплекса отличаются не более чем на 5%. Кроме этого переходной процесс в среде функционального моделирования проходит в течении 0,005 с, а в разработанной программе – 0,05 с.

#### **Выводы**

1. Предлагаемая методика построения математических моделей может применяться для исследования перенапряжений в распределительной сети напряжением 6–10 кВ.

2. В связи с отличием времени переходного процесса в ходе проверки математической модели, следует провести дополнительные исследования и найти факторы, влияющие на частоту переходного процесса.

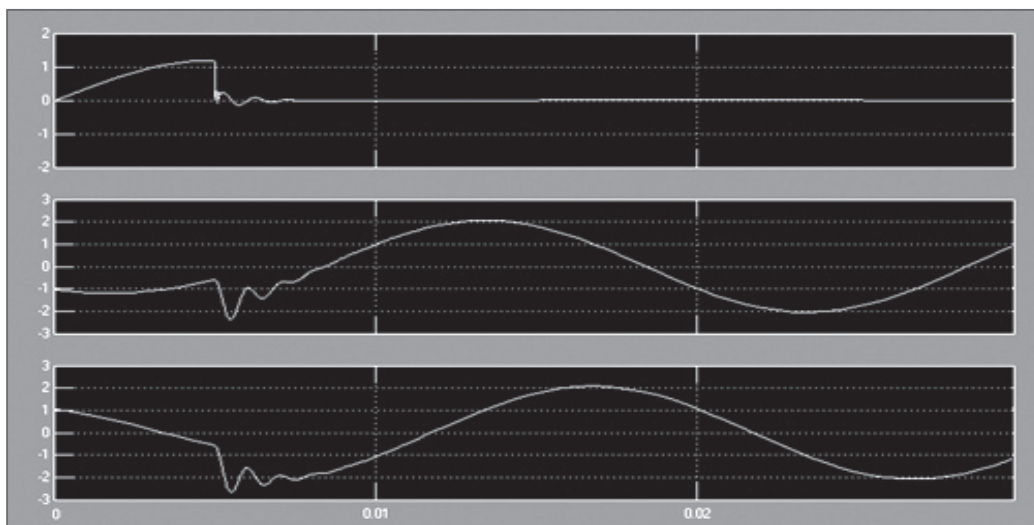


Рис. 4. Кратности перенапряжений в фазах в среде моделирования

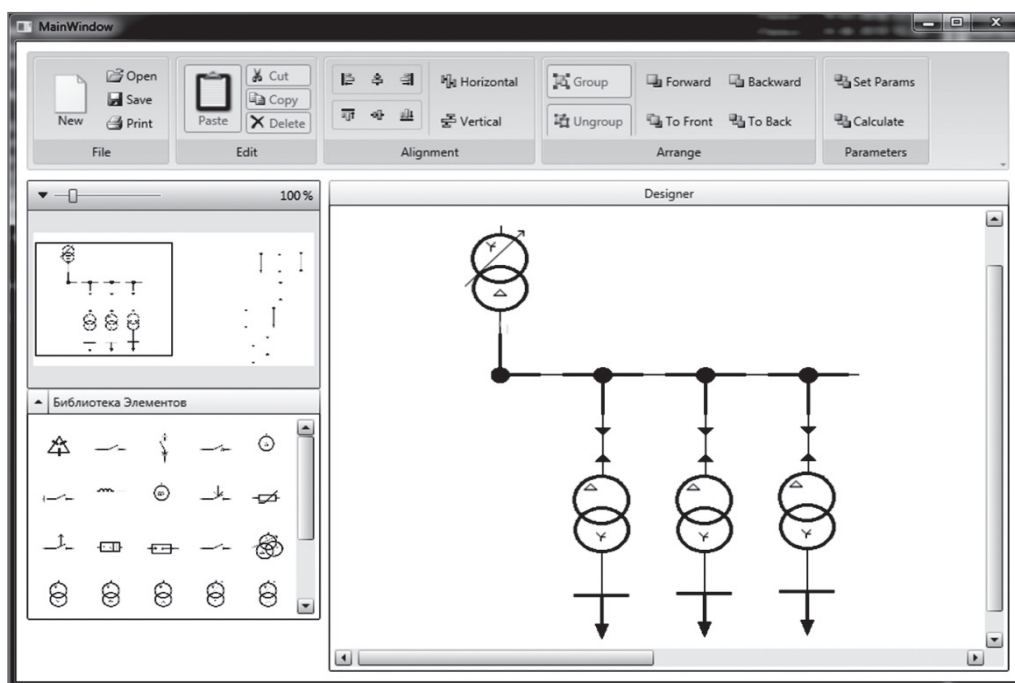


Рис. 5. Построение задачи в разработанной среде моделирования

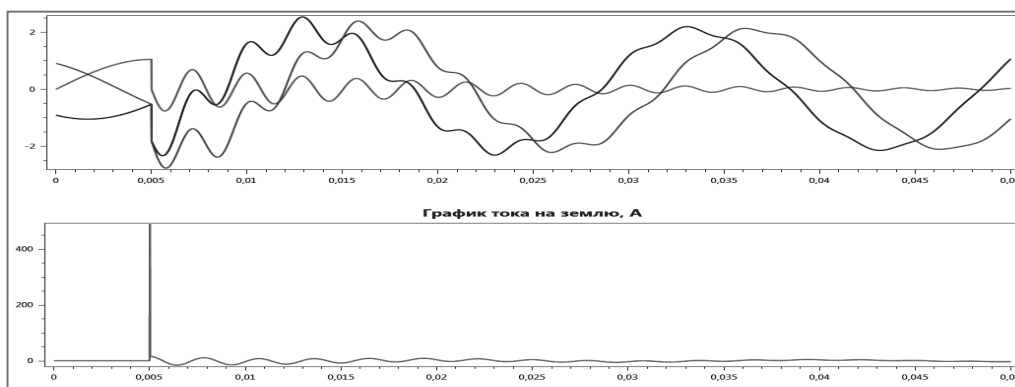


Рис. 6. Напряжения на фазах при переходном процессе

## ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция перспективного развития распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ Белорусской энергосистемы на ближайшую перспективу. – Минск: БелЭСП, 2014.
2. **Халилов, Ф. Х.** Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения. / Ф. Х. Халилов. – Санкт-Петербург: Издание НОУ “Центр подготовки кадров энергетики”, 2012. – 80 с.
3. **Аверилл М. Лоу** Имитационное моделирование / Аверилл М. Лоу, В. Дэвид Кельтон. – СПб: Питер, 2004. – 848 с.
4. **Ощепков В. А.** Определение уровня перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов. / В. А. Ощепков, А. О. Шепелев, Н. С. Капитонов. // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 89–93.
5. **Кротенок, В. В.** Повышение эффективности ограничения перенапряжений в распределительной сети при дуговых замыканиях на землю: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / В. В. Кротенок. – Минск: БНТУ, 2010. – 25 с.
6. **Максимей И. В.** Математическое моделирование больших систем: Учебное пособие для спец. «Прикл. матем.» / И. В. Максимей. – Мн.: Выш. шк., 1985.
7. **Курочка К. С.** Об одном подходе к построению математической модели сложной системы по ее формальному описанию / К. С. Курочка, Н. А. Курочка // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2008. № 1 (32).
8. **Курочка, К. С.** Исследование математических моделей в GRID-средах / К. С. Курочка // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2008. № 5. Ч. 1. С. 69–73.
9. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров. / Л. А. Бессонов – М.: Юрайт-Издат, 2012. – 701 с.
10. **Голубева, Н. В.** Математическое моделирование систем и процессов: Учебное пособие. / Н. В. Голубева. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 192 с.
11. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
12. **Тепляков, С. В.** Паттерны проектирования на платформе.NET. – СПб.: Издательство «Питер», 2016. – 320 с.

## REFERENCES

1. The concept of prospective development of 0.4–10 kV electrical distribution networks of the Belarusian energy system in the near future. – Minsk: BelESP, 2014.
2. **Halilov, F. H.** Overvoltage classification. Internal overvoltage. / F. H. Halilov. – Sankt-Peterburg: Izdanie NOU “Centr podgotovki kadrov jenergetiki”, 2012. – 80 p.
3. **Averill M. Lou** Simulation modeling / Аверилл М. Лоу, В. Дэвид Кельтон. Averill M. Lou, V. Djevid Kel'ton. – SPb: Piter, 2004. – 848 p.
4. **Oshhepkov V. A.** Determination of overvoltage level in networks with compensation of capacitive currents. / V. A. Oshhepkov, A. O. Shepelev, N. S. Kapitonov. // Omskij nauchnyj vestnik. 2016. № 5 (149). pp. 89–93.
5. **Krotенок, V. V.** Increasing the efficiency of overvoltage limiting in the distribution network with arc earth faults: Avtoref. Ph.D. thesis: 05.14.02 / V. V. Krotенок. – Minsk: BNTU, 2010. – 25 p.
6. **Maksimej I. V.** Mathematical Modeling of Large Systems: A Textbook for Specialists. «App. Math.» / I. V. Maksimej. – Mн.: Vysh. shk., 1985.
7. **Kurochka K. S.** On one approach to the construction of a mathematical model of a complex system according to its formal description / K. S. Kurochka, N. A. Kurochka // Vestnik GGTU im. P. O. Suhogo. 2008. № 1 (32).
8. **Kurochka K. S.** Study of mathematical models in GRID environments / K. S. Kurochka // Izvestija Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. 2008. № 5. Ch. 1. pp. 69–73.
9. **Bessonov, L. A.** Theoretical basics of electrical engineering. Electrical circuits: Textbook for Bachelors. / L. A. Bessonov – M.: Jurajt-Izdat, 2012. – 701 p.
10. **Golubeva, N. V.** Mathematical modeling of systems and processes: A training manual. / N. V. Golubeva. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2016. – 192 p.
11. **Bronshtejn, I. N.** Mathematics handbook for engineers and university students. / I. N. Bronshtejn, K. A. Semendjaev. – M.: Nauka, 1986. – 544 p.
12. **Tepljakov, S. V.** Design Patterns on the.NET Platform. / S. V. Tepljakov, – SPb.: Izdatel'stvo «Piter», 2016. – 320 p.

Поступила  
01.08.2020

После доработки  
10.08.2020

Принята к печати  
01.09.2020

*KUROCHKA K. S., TOKOCHAKOV V. I., KARABCHIKOVA E. A., PANARYN K. A.*

## COMPUTER SIMULATION OF OVERVOLTAGES IN 6–10 kV DISTRIBUTION NETWORKS FOR SINGLE-PHASE GROUND FAULTS

*Nowadays, when designing and operating electric power systems, special attention is paid to predicting emergency situations and minimizing losses in case they occur. The most common method of overvoltage investigations is the use of simulation models in specialized application packages, which imposes additional qualification requirements on the electrical engineer.*

*The authors propose modeling technologies and a software tool for modeling and research of overvoltages that occur in 6–10 kV distribution networks at single-phase ground faults, including the method of visual design of the distribution network through the use of information technology and automated generation of mathematical model for its further study to analyze overvoltages.*



**Курочка Константин Сергеевич**, к.т.н, доцент, зав. кафедрой информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: мат. моделирование, нейронные сети, программирование.

Kurochka Konstantin Sergeevich. Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: mat. modeling, neural networks, programming.

E-mail: kurochka@gstu.by.



**Токочаков Владимир Иванович**, к.т.н, доцент кафедры информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: мат. моделирование физических систем.

Tokochakov Vladimir Ivanovich. Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: mat. modeling of physical systems.

E-mail: tokochakov@gstu.by.



**Карабчикова Екатерина Анатольевна**. Ассистент кафедры информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: нейронные сети, программирование.

Karabchikova Ekaterina Anatolievna. Assistant of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: neural networks, programming.

E-mail: catharine-diva@gstu.by.



**Панарин Константин Александрович**. Аспирант, инженер-программист кафедры информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: мат. моделирование, нейронные сети, программирование.

Panaryn Konstantin Aleksandrovich. Postgraduate, Software Engineer of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: mat. modeling, neural networks, programming.

E-mail: Logran2@gmail.com.