

9. Магазин магнитов «Мидора». URL: [https://www.midora.ru/neodimovye\\_magnity/](https://www.midora.ru/neodimovye_magnity/) (дата обращения: 22.10.18 г.).

**ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ). SPIN-код: 5995-1778

AuthorID (РИНЦ): 166166

AuthorID (SCOPUS): 56503744900

ORCID: 0000-0002-8581-7436

**ПЕДДЕР Валерий Викторович**, кандидат технических наук, генеральный директор научно-производственного предприятия «Метромед», г. Омск.

SPIN-код: 4399-4905

AuthorID (РИНЦ): 697514

AuthorID (SCOPUS): 6603605090

УДК 621.315.1

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-98-102

**БУРЯКОВ Никита Дмитриевич**, магистрант гр. ЭЭМ-175 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ.

**ПАСТУШЕНКО Инесса Александровна**, инженер-конструктор научно-производственного предприятия «Метромед», г. Омск.

Адрес для переписки: [ast\\_51@mail.ru](mailto:ast_51@mail.ru)

#### Для цитирования

Татевосян А. С., Педдер В. В., Буряков Н. Д., Пастушенко И. А. Экспериментальная методика идентификации высококоэрцитивных постоянных магнитов // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-94-98.

Статья поступила в редакцию 30.10.2018 г.

© А. С. Татевосян, В. В. Педдер, Н. Д. Буряков,

И. А. Пастушенко

**Д. Г. САФОНОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ

В статье представлена имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью совместно с системой управления дугогасящим реактором. В основе работы системы управления используется принцип создания искусственного смещения нейтрали и последующей настройки реактора по экстремуму кривой напряжения нулевой последовательности.

Помимо параметров сети в модели можно изменять величину и характер нагрузки, что позволит проверить работоспособность системы управления дугогасящим реактором при возникновении однофазного замыкания на землю.

**Ключевые слова:** дугогасящий реактор, компенсированная нейтраль, система управления, распределительная сеть, напряжение нулевой последовательности.

Распределительная сеть с компенсированной нейтралью совместно с системой управления ДГР представляет собой сложную электротехническую систему, которая требует подробного анализа влияющих факторов и особенностей рабочих режимов на этапе проектирования.

Наименее затратным как по времени, так и по капитальным вложениям является создание имитационной модели системы в профильных программных средствах. При этом главная цель разработки подобной модели заключается в подтверждении теоретически описанных процессов, происходящих в рассматриваемой системе и принятых при расчетах допущений.

Имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью с системой управления ДГР реализована в приложении Simulink программного комплекса MATLAB (рис. 1),

который позволяет из имеющихся элементов создавать необходимые блоки и модели для построения электрических сетей требуемой конфигурации [1].

Создание имитационной модели распределительной сети с компенсированной нейтралью совместно с системой управления ДГР решает следующие задачи:

— подтверждение основных теоретических положений при разработке системы управления дугогасящим реактором;

— оценка качества компенсации емкостных токов при различных возмущающих факторах — однофазном замыкании на землю.

Для моделирования трёхфазной распределительной сети в среде MATLAB использовались из базы данных SimPowerSystems следующие блоки:

— блок ACVoltageSource используется для моделирования питающей сети в качестве источника

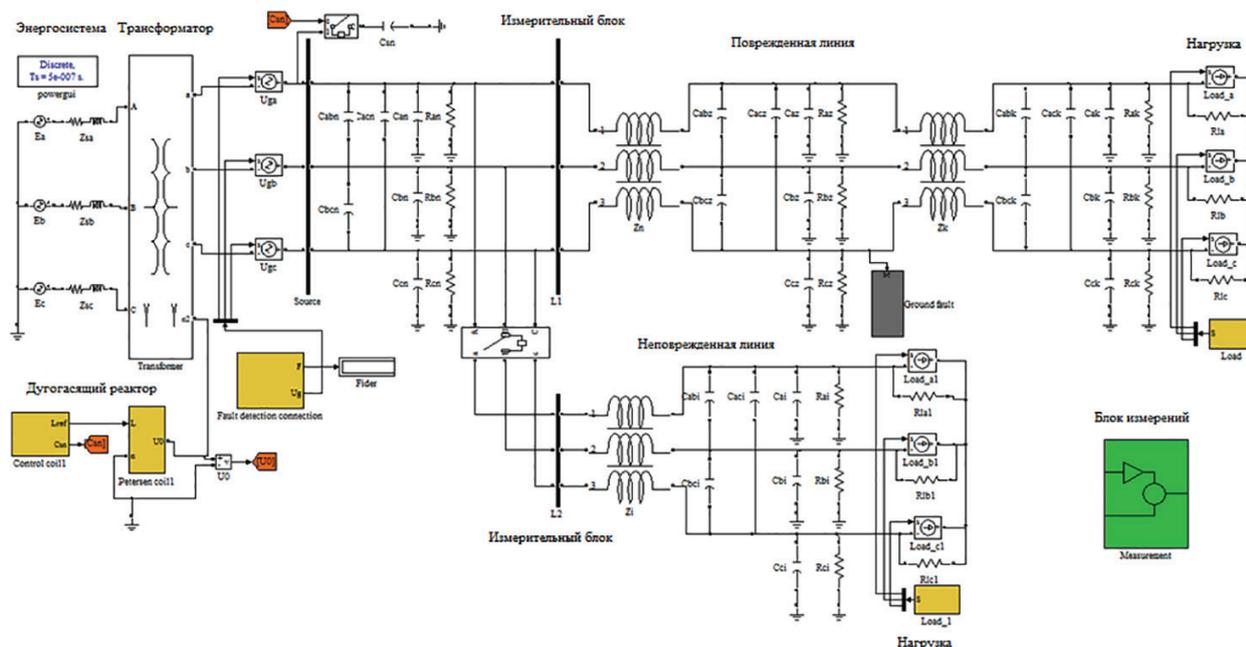


Рис. 1. Модель трёхфазной распределительной сети в среде MATLAB

с действующим значением линейного напряжения, равным 35кВ и частотой равной 50Гц;

— блок `ACCurrentSourceMutualInductance` используется в качестве идеального источника переменного тока;

— блок `SeriesRLCBranch` используется для моделирования параметров сети и нагрузки;

— блок `Three-PhaseTransformer` используется для моделирования параметров трехфазного двухобмоточного трансформатора;

— блок `MutualInductance` используется для реализации взаимоиндукции сети.

С помощью данных блоков (рис. 2) задаются напряжение источника, ток нагрузки и сопротивление распределительной сети.

Параметры элементов распределительной сети определяются в соответствии с формулами, представленными ниже, а также в статьях [2–6].

Активные сопротивления поврежденной линии и неповрежденных линий:

$$R_n = r_{0,n} \cdot I_3, \quad (1)$$

$$R_k = r_{0,n} (I_n - I_3), \quad (2)$$

$$R_i = r_{0,i} \cdot I_i, \quad (3)$$

где  $r_{0,n}$  — погонное активное сопротивление поврежденной линии;  $r_{0,i}$  — погонные активные сопротивления неповрежденных линий;  $I_3$  — длина участка поврежденной линии от источника питания до точки замыкания;  $I_n$  — общая длина поврежденной линии;  $I_i$  — длины неповрежденных линий.

Емкости линий определяются согласно выражениям, представленным в [2]. Однако при расчете режима ОЗЗ вычисление емкости поврежденной фазы в точке замыкания выполняется по выражению

$$C_{as} = \begin{cases} 0,5C_{0,a,n}I_n, & R_g \neq 0, \\ 0, & R_g = 0. \end{cases} \quad (4)$$

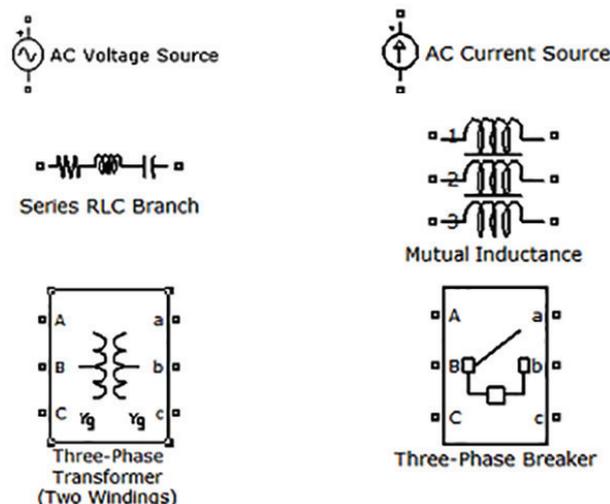


Рис. 2. Блоки, реализующие модель трёхфазной распределительной сети с дугогасящим реактором

Собственная индуктивность воздушной линии от начала до точки замыкания равна [3]

$$L_n = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi} \left( \ln \frac{2I_3}{r_{np,n}} - 1 \right) + \frac{\mu I_3}{8\pi} = 10^{-7} I_3 \left( 2 \ln \frac{2I_3}{r_{np,n}} - 1,5 \right), \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $\mu$  — абсолютная магнитная проницаемость проводникового материала, принятая равной  $\mu_0$ ;  $r_{np,n}$  — радиус провода поврежденной линии.

Аналогично рассчитываются остальные собственные индуктивности воздушных линий

$$L_k = 10^{-7} (I_n - I_3) \left( 2 \ln \frac{2(I_n - I_3)}{r_{np,n}} - 1,5 \right), \quad (6)$$

$$L_i = 10^{-7} I_i \left( 2 \ln \frac{2l_i}{r_{np,i}} - 1,5 \right), \quad (7)$$

где  $r_{np,i}$  — радиусы проводов неповрежденных линий; длины выражены в [м].

Взаимные индуктивности воздушных линий [4]

$$M_{abn} = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi} \left( \ln \frac{2l_3}{r_{ab,n}} - 1 \right) = 2 \cdot 10^{-7} I_3 \left( \ln \frac{2l_3}{r_{ab,n}} - 1 \right), \quad (8)$$

$$M_{bcn} = 2 \cdot 10^{-7} I_3 \left( \ln \frac{2l_3}{r_{bc,n}} - 1 \right), \quad (9)$$

$$M_{ачн} = 2 \cdot 10^{-7} I_3 \left( \ln \frac{2l_3}{r_{ac,n}} - 1 \right), \quad (10)$$

$$M_{абк} = 2 \cdot 10^{-7} (I_n - I_3) \left( \ln \frac{2(I_n - I_3)}{r_{ab,n}} - 1 \right), \quad (11)$$

$$M_{бск} = 2 \cdot 10^{-7} (I_n - I_3) \left( \ln \frac{2(I_n - I_3)}{r_{bc,n}} - 1 \right), \quad (12)$$

$$M_{аск} = 2 \cdot 10^{-7} (I_n - I_3) \left( \ln \frac{2(I_n - I_3)}{r_{ac,n}} - 1 \right), \quad (13)$$

$$M_{abi} = 2 \cdot 10^{-7} I_i \left( \ln \frac{2l_i}{r_{ab,i}} - 1 \right), \quad (14)$$

$$M_{bci} = 2 \cdot 10^{-7} I_i \left( \ln \frac{2l_i}{r_{bc,i}} - 1 \right), \quad (15)$$

$$M_{aci} = 2 \cdot 10^{-7} I_i \left( \ln \frac{2l_i}{r_{ac,i}} - 1 \right), \quad (16)$$

где  $r_{ab,n}, r_{bc,n}, r_{ac,n}, r_{ab,i}, r_{bc,i}, r_{ac,i}$  — междофазные расстояния для поврежденной и неповрежденных линий.

У кабельных линий индуктивности принимают симметричными и определяются через погонные индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности  $x_{(1)}$  и  $x_{(0)}$ . Эти сопротивления связаны с собственной и взаимной индуктивностью известными выражениями, аналогичными приведенным в [7]:

$$x_{(1)} = \omega(L_0 - M_0), \quad (17)$$

$$x_{(0)} = \omega(L_0 + 2M_0), \quad (18)$$

где  $L_0$  и  $M_0$  — собственная и взаимная погонные индуктивности кабеля.

Из этих соотношений с учетом длины  $l$  получаются формулы для собственной и взаимной индуктивностей кабельной линии:

$$L = l \frac{x_{(0)} + 2x_{(1)}}{3\omega}, \quad (19)$$

$$M_{ab} = M_{bc} = M_{ac} = l \frac{x_{(0)} - x_{(1)}}{3\omega}. \quad (20)$$

Параметры трансформатора приводятся к низшему напряжению и определяются исходя из того, что мощности обмоток высшего и низшего напряжения одинаковы [8]:

$$R_m = \frac{1}{2} \Delta P_{кз} \frac{U_{нн}^2}{S_{ном}^2}, \quad (21)$$

$$L_m = \frac{1}{2\omega} \frac{U_{к\%}}{100} \frac{U_{нн}^2}{S_{ном}} = \frac{1}{200\pi} \frac{U_{к\%}}{100} \frac{U_{нн}^2}{S_{ном}}, \quad (22)$$

где  $\Delta P_{кз}$  — потери короткого замыкания, МВт;  $U_{к\%}$  — напряжение короткого замыкания, %;  $U_{нн}$  — номинальное низшее напряжение, кВ;  $S_{ном}$  — номинальная мощность трансформатора, МВА.

Активное сопротивление реактора определяется через номинальные потери активной мощности  $\Delta P_p$ , номинальную мощность  $S_{ном,p}$  и номинальное напряжение  $U_{ном,p}$  реактора:

$$R_p = \Delta P_p \frac{U_{ном,p}^2}{S_{ном,p}^2}. \quad (23)$$

Сопротивления токам утечки в изоляторах рассчитываются через погонные потери мощности (на три фазы) в изоляторах поврежденной  $\Delta P_{y,0,n}$  и неповрежденных  $\Delta P_{y,0,i}$  линий при номинальном линейном напряжении  $U_{ном}$  [9]:

$$R_{yn} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,n} l_3 + \sum_{i=1}^n \Delta P_{y,0,i} l_i}, \quad (24)$$

$$R_{yz} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,n} l_n}, \quad (25)$$

$$R_{yx} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,n} (l_n - l_3)}, \quad (26)$$

$$R_{yi} = \frac{2U_{ном}^2}{\Delta P_{y,0,i} l_i}. \quad (27)$$

Для оценки эффективности работы системы автоподстройки дугогасящего реактора необходимо рассмотреть возможность изменения схемы распределительной сети (изменение емкости), а также реализовать различные виды замыкания на землю. В данной модели это реализовано возможностью отключения неповрежденной линии в заданный момент времени с помощью блока трехфазного выключателя (Tree-PhaseBreaker), изменяя конфигурацию сети и ее суммарную емкость.

В модели распределительной сети изменение нагрузки задается с помощью блоков управляемых источников тока (ControlledCurrentSource) и блока генерации формы тока нагрузки (Load) (рис. 3). Данное решение позволяет моделировать несинусоидальную и несимметричную динамически изменяющуюся во времени нагрузку, что позволит проверить работоспособность применяемого алгоритма при любых режимах нагрузки.

Работу дугогасящего реактора (ДГР) моделирует составной блок Petersencoil. Данный блок позволяет плавно изменять индуктивность реактора под управлением внешней системы управления реализованной в блоке Controlcoil (рис. 4).

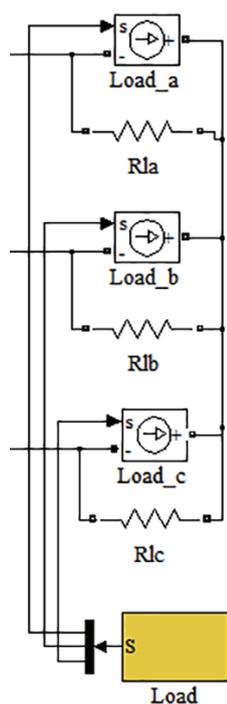


Рис. 3. Составной блок трёхфазной нагрузки

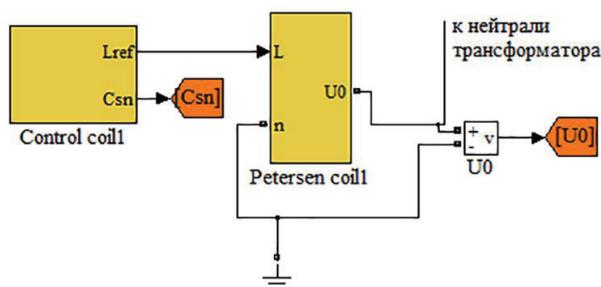


Рис. 4. Модель дугогасящего реактора (Petersencoil) и его системы управления (Controlcoil)

Дугогасящий реактор смоделирован с использованием управляемого источника тока. Система управления реактором выполнена в соответствии с разработанным алгоритмом, который представлен в статье [10]. Принцип ее работы основан на создании искусственного смещения нейтрали с помо-

щью подключения дополнительного конденсатора  $C_{sn}$  и определения оптимальной настройки реактора по экстремуму кривой напряжения в нейтрали. Результаты подстройки реактора при возникновении однофазного замыкания на землю представлены на графике (рис. 5).

Для проверки работоспособности автоподстройки дугогасящего реактора необходимо смоделировать его работу в различных условиях. Для этого на имитационной модели были реализованы следующие режимы работы при автоподстройке дугогасящего реактора:

- при различных параметрах элементов распределительной сети;
- при изменениях конфигурации распределительной сети (в том числе при несимметричном распределении параметров по фазам);
- при изменениях конфигурации сети и динамическом изменении нагрузки;
- при различных уровнях несимметрии и высших гармонических составляющих питающего напряжения;
- при различных уровнях несимметрии и высших гармонических составляющих тока нагрузки.

Во всех рассмотренных выше режимах работы распределительной сети в системе управления автоподстройки дугогасящего реактора не были выявлены ошибки и неточности в работе.

#### Выводы.

В рассмотренной выше имитационной модели распределительной сети был реализован разработанный алгоритм системы автоподстройки дугогасящего реактора, который показал свою работоспособность в различных режимах работы электрической сети, в том числе при изменении величины и характера нагрузки.

При испытании автоподстройки дугогасящего реактора особое внимание уделялось точности подстройки реактора при различных видах однофазного замыкания на землю. Используемый способ показал достаточную точность автоподстройки, что позволяет считать его одним из самых оптимальных для использования его на плунжерных дугогасящих реакторах.

В дальнейшем планируется провести сравнение полученных результатов с результатами испытания опытных образцов дугогасящего реактора с системой автоподстройки. Это позволит в дальнейшем, используя разработанную модель, проводить опробования новых технических решений без дорогостоящих натурных испытаний, что в целом повысит эффективность последующих усовершенствований разработанного устройства управления.

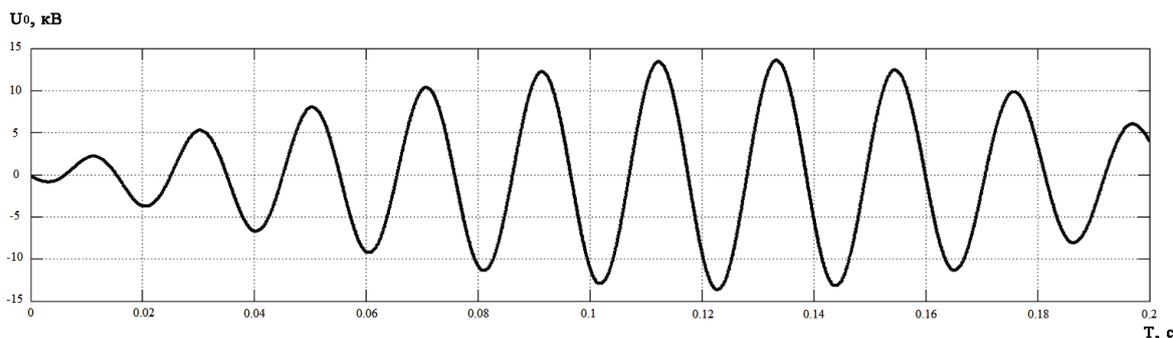


Рис. 5. График изменения напряжения нулевой последовательности при возникновении однофазного замыкания на землю при автоматической настройке дугогасящего реактора

1. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.

2. Сафонов Д. Г., Ощепков В. А., Гиршин С. С. Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи // Омский научный вестник. 2016. № 1 (145). С. 58–60.

3. Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A., Safonov D. G., Petrova E. V. Analysis of Asymmetrical Modes in Medium Voltage Electrical Grids with Compensated Neutral // 2016 the 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies. Istanbul, May 25–27. 2016. Vol. 70. DOI: 10.1051/mateconf/20167010008.

4. Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A., Safonov D. G., Petrova E. V. The Calculation of Steady-State Mode of 35 KW Radial System with Arc Suppression Coils Considering Asymmetry of Power Lines // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Florence, June 07–10. 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555455.

5. Dolinger S. Y., Lyutarevich A. G., Osipov D. S. Selecting Parameters of Power Circuit of Electric Power Quality Assurance Device // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, 21–23 May. 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147042.

6. Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A., Petrova E. V., Osipov D. S. Simulation of electrical loads for the steady-state regime calculation of electric grids with arc extinguish reactor // ELEKTRO 2016 — 11th International Conference. Slovakia, May 16–18. 2016. P. 290–293. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512083.

7. Dolinger S. Y., Lyutarevich A. G., Osipov D. S. Basic Approaches to the Implementation of Petersen Coil Control System // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, May 21–23. 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147041.

8. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.

9. Сирота И. М., Кисленко С. Н., Михайлов А. М. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.

10. Осипов Д. С., Долингер С. Ю., Сафонов Д. Г. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 79–84.

**САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 5090-2754

AuthorID (РИНЦ): 685258

AuthorID (SCOPUS): 57191053855

Адрес для переписки: safonovdg@mail.ru

#### Для цитирования

Сафонов Д. Г. Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 98–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-98-102.

Статья поступила в редакцию 28.10.2018 г.

© Д. Г. Сафонов