

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ

Сафонов Дмитрий Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»,

Омск, Россия

E-mail: safonovdg@mail.ru

Предмет исследования: система автоматического регулирования дугогасящего реактора.

Цель исследования: разработка системы автоматического регулирования дугогасящего реактора для повышения эффективности работы электрической сети.

Объект исследования: электрические сети 6-35 кВ с компенсированной нейтралью через дугогасящий реактор.

Методы исследования: основные положения теории электрических цепей, математического анализа и моделирования, численного программирования.

Основные результаты исследования: в статье предложена уточненная математическая модель распределительной сети с дугогасящим реактором, позволяющая повысить точность определения параметров сети, в том числе напряжения смещения нейтрали. Алгоритм настройки реактора по экстремальному методу при отсутствии однофазного замыкания на землю в распределительной сети с высокой естественной несимметрией.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, дугогасящий реактор, система управления, настройка реактора, резонанс.

DEVELOPMENT OF AN ARC EXTINGUISHING REACTOR CONTROL SYSTEM

Dmitry G. Safonov

Candidate of Technical Science, Associate Professor

Omsk State Technical University,

Omsk, Russia

E-mail: safonovdg@mail.ru

Subject of research: the system of automatic control of the arc-extinguishing reactor.

Purpose of research: development of an automatic control system of an arc-extinguishing reactor to improve the efficiency of the electrical network.

Object of research: 6-35 kV electric networks with compensated neutral through an arc-extinguishing reactor.

Methods of research: the main provisions of the theory of electrical circuits, mathematical analysis and modeling, numerical programming.

Main results of research: The article proposes the idea of using the wavelet transform to organize software. The article proposes a refined mathematical model of a distribution network with an arc-extinguishing reactor, which allows to increase the accuracy of determining network parameters, including the neutral offset voltage. The algorithm of the reactor settings according to the extreme method in the absence of a single-phase earth fault in a distribution network with a high natural asymmetry.

Keywords: Single-phase earth fault, arc-extinguishing reactor, control system, reactor tuning, resonance.

Введение

Способ заземления нейтрали через дугогасящий реактор является наиболее эффективным, так как включает в себя большое количество достоинств. Но при неправильном использовании его достоинства просто сводятся к нулю. В России всё чаще стали использовать заземление нейтрали через дугогасящий реактор в сетях среднего напряжения. Но из-за недостатка качественного оборудования и недостаточной настройки компенсации многие специалисты считают данный способ заземления не то чтобы неэффективным, а более того, – негативно сказывающимся на работе электрической сети среднего напряжения. Именно из-за этого необходимо более подробно рассматривать данные сети, производить анализ работы электрической сети и математический расчёт режимов работы электрической сети. Посредством данного анализа и математического расчёта будет доступна полная картина работы электрической сети. А из этого можно делать выводы о параметрах настройки компенсации и работы дугогасящего реактора в целом [6].

Существующие различные методы определения ёмкостного тока замыкания на землю, которые возможно классифицировать следующим образом: по модели сети; по реактивным проводимостям; по фазовым характеристикам; по амплитудным (экстремальным) характеристикам; по частотным параметрам; по постоянной времени восстановления напряжения поврежденной фазы; по соотношению величин параметров нулевой последовательности сети [7].

Результаты и обсуждение

На первоначальном этапе исследования разработаем математическую модель для исследования электрической сети с компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю с помощью дугогасительного реактора. Схему замещения представим в трехфазном исполнении с поперечными ветвями, моделирующими ёмкостную и активную проводимости, учитывая при этом магнитосвязанные цепи.

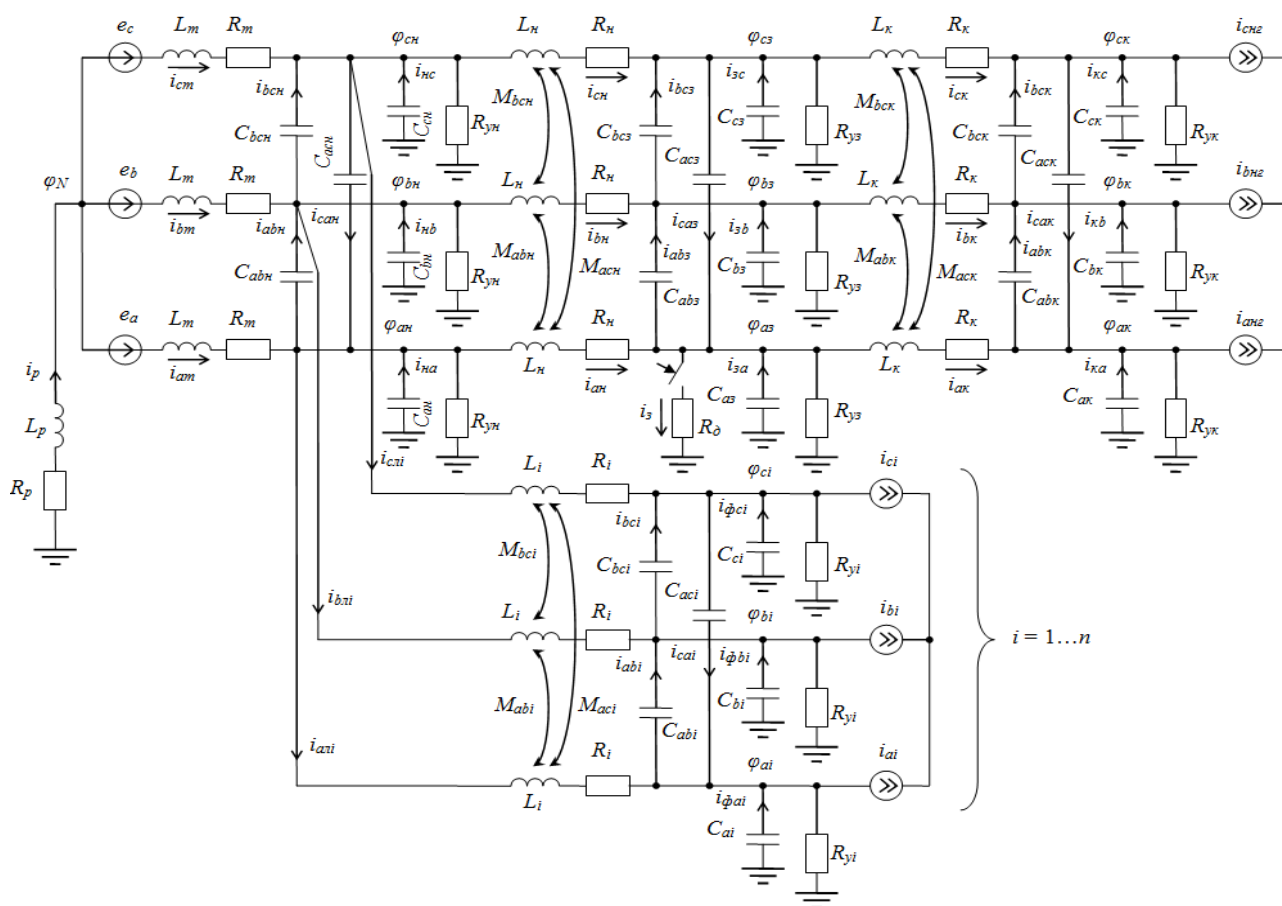


Рисунок 1 – Схема замещения электрической сети 35 кВ с компенсированной нейтралью

Математическая модель источника задается синусоидальными ЭДС.

Уравнение потенциала нейтрали представлена в виде [6]:

$$\varphi_N = (i_{am} + i_{bm} + i_{cm}) \frac{L_p R_m - L_m R_p}{3L_p + L_m} + \frac{\varphi_{an} + \varphi_{bn} + \varphi_{cn} - e_a - e_b - e_c}{3 + L_m/L_p}, \quad (1)$$

где i_{am}, i_{bm}, i_{cm} – фазные токи в обмотке низшего напряжения питающего трансформатора; R_p, L_p – активное сопротивление и индуктивность реактора; R_m, L_m – активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки низшего напряжения питающего трансформатора; $\varphi_{an}, \varphi_{bn}, \varphi_{cn}$ – потенциалы на выводах трансформатора, e_a, e_b, e_c – ЭДС в обмотках низшего напряжения питающего трансформатора [6].

Фазные падения напряжения в поврежденной линии от ее начала до точки замыкания представлены уравнениями:

$$R_n i_{an} + L_n \frac{di_{an}}{dt} + M_{abn} \frac{di_{bn}}{dt} + M_{acn} \frac{di_{cn}}{dt} = \varphi_{an} - \varphi_{a3}, \quad (2)$$

$$R_n i_{bn} + L_n \frac{di_{bn}}{dt} + M_{abn} \frac{di_{an}}{dt} + M_{bcn} \frac{di_{cn}}{dt} = \varphi_{bn} - \varphi_{b3}, \quad (3)$$

$$R_n i_{cn} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + M_{bcn} \frac{di_{bn}}{dt} + M_{acn} \frac{di_{an}}{dt} = \varphi_{cn} - \varphi_{c3}, \quad (4)$$

Для поперечных ветвей дифференциальные уравнения могут быть представлены в следующем виде:

$$(C_{abn} + C_{acn} + C_{an}) \frac{d\varphi_{an}}{dt} - C_{abn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt} - C_{acn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{am} - i_{an} - \sum_{i=1}^n i_{ali} - \frac{\varphi_{an}}{R_{yn}}, \quad (5)$$

$$-C_{abn} \frac{d\varphi_{an}}{dt} + (C_{bcn} + C_{abn} + C_{bn}) \frac{d\varphi_{bn}}{dt} - C_{bcn} \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{bm} - i_{bn} - \sum_{i=1}^n i_{bli} - \frac{\varphi_{bn}}{R_{yn}}, \quad (6)$$

$$-C_{acn} \frac{d\varphi_{an}}{dt} - C_{bcn} \frac{d\varphi_{bn}}{dt} + (C_{acn} + C_{bcn} + C_{cn}) \frac{d\varphi_{cn}}{dt} = i_{cm} - i_{cn} - \sum_{i=1}^n i_{cli} - \frac{\varphi_{cn}}{R_{yn}}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что дугогасящий реактор настраивается на фазную ёмкость некоторым рассогласованием (не более 0,1), то при выделении поврежденной линии уравнение настройки реактора будет иметь следующий вид:

$$L_p = \frac{0,9 \dots 1,1}{\omega^2 \left[(C_{0,a,n} + C_{0,b,n} + C_{0,c,n}) \gamma_n + \sum_{i=1}^n (C_{0,a,i} + C_{0,b,i} + C_{0,c,i}) \gamma_i \right]} \quad (8)$$

Для определения начальных условий необходимо рассчитать предшествующий установившийся режим. Расчет производится согласно схеме замещения (рис. 1) при отсутствии замыкания на землю.

При вычислении токов нагрузки исключается сначала составляющая напряжений нулевой последовательности, а затем составляющая токов нулевой последовательности. Модель нагрузки имеет вид:

$$\dot{U}_{ак12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{ак} - \dot{U}_{бк} - \dot{U}_{ск}) \quad (9)$$

$$\dot{U}_{бк12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{бк} - \dot{U}_{ак} - \dot{U}_{ск}) \quad (10)$$

$$\dot{U}_{ск12} = \frac{1}{3}(2\dot{U}_{ск} - \dot{U}_{ак} - \dot{U}_{бк}) \quad (11)$$

$$\dot{i}_{0нз} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{анз}^*}{U_{ак12}^*} + \frac{S_{бнз}^*}{U_{бк12}^*} + \frac{S_{снз}^*}{U_{ск12}^*} \right) \quad (12)$$

$$\dot{i}_{анз} = \frac{S_{анз}^*}{U_{ак12}^*} - \dot{i}_{0нз} \quad (13)$$

$$\dot{i}_{бнз} = \frac{S_{бнз}^*}{U_{бк12}^*} - \dot{i}_{0нз} \quad (14)$$

$$\dot{i}_{снз} = \frac{S_{снз}^*}{U_{ск12}^*} - \dot{i}_{0нз} \quad (15)$$

Для тока фазы «А» в начале i -той линии по первому закону Кирхгофа можно записать в следующем виде:

$$\dot{i}_{али} = \dot{i}_{ai} + \dot{U}_{ai} \left[\frac{1}{R_{yi}} + j(B_{ai} + B_{abi} + B_{aci}) \right] - j\dot{U}_{bi}B_{abi} - j\dot{U}_{ci}B_{aci}, \quad i = 1 \dots n, \quad (16)$$

Напряжение смещения и напряжения в начале линии определяются уравнениями:

$$\dot{U}_N = -\dot{i}_p(R_p + jX_p), \quad (17)$$

$$\dot{U}_{ан} = \dot{U}_N + \dot{E}_a - \dot{i}_{ам}(R_m + jX_m), \quad (18)$$

$$\dot{U}_{бн} = \dot{U}_N + \dot{E}_b - \dot{i}_{бм}(R_m + jX_m), \quad (19)$$

$$\dot{U}_{сн} = \dot{U}_N + \dot{E}_c - \dot{i}_{см}(R_m + jX_m), \quad (20)$$

На принципиальной схеме управления плунжерным дугогасящим реактором (рис. 2) в цепи силовой обмотки реактора установлен трансформатор тока. Для обратной связи по напряжению используется обмотка трансформатора напряжения с схемой соединения «разомкнутый треугольник». Блок логики определяет алгоритм взаимодействия измерительных блоков и блока управления приводом плунжера. Генератор импульсов возмущения, подключенный к сигнальной обмотке ДГР, имеет прямую связь с измерительным блоком частоты свободных колебаний в контуре нулевой последовательности и связь через блок логики.

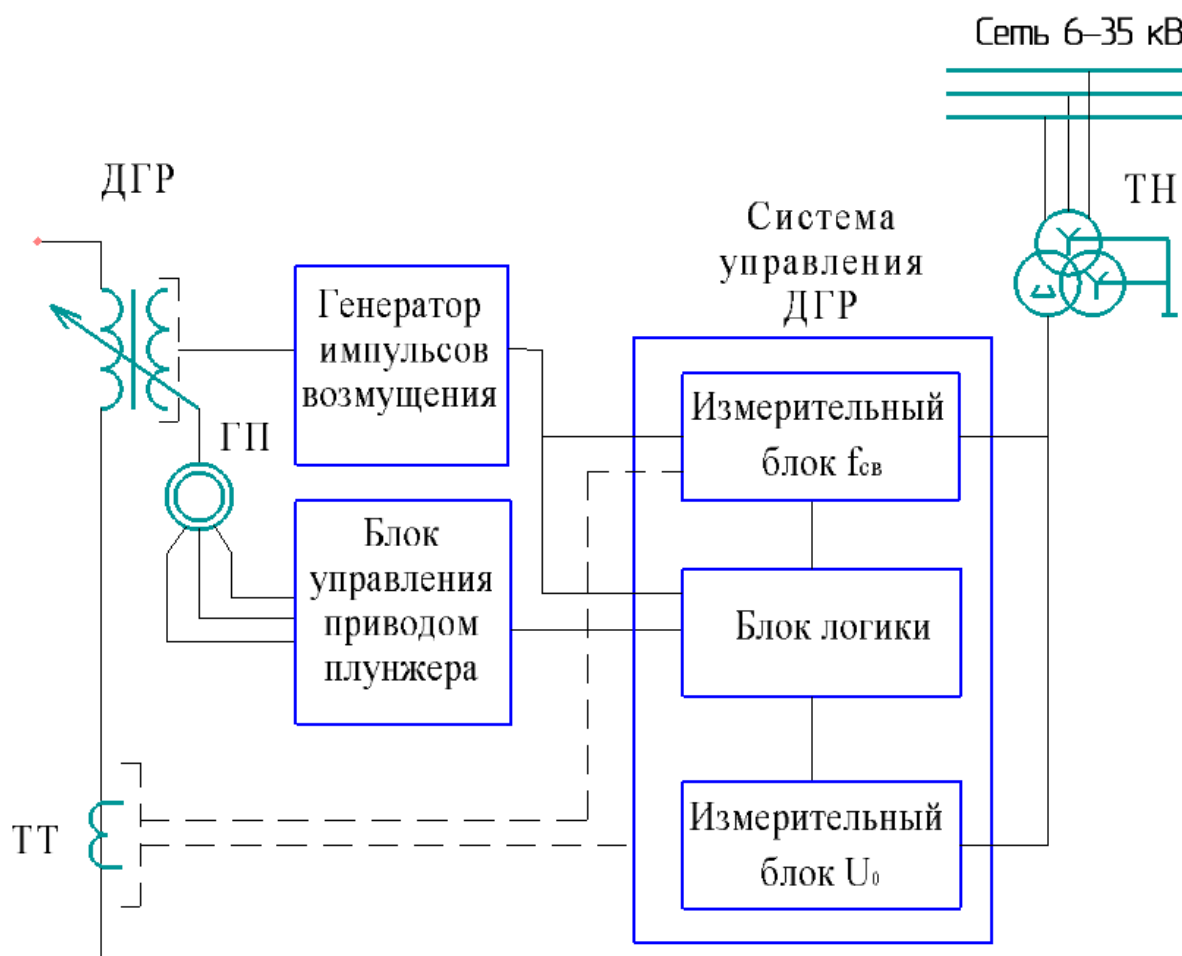


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы управления дугогасящим реактором

В устройствах настройки компенсации по экстремальным характеристикам сети (в нормальном режиме ее работы) определяют экстремум напряжения нейтрали или тока дополнительного источника не промышленной частоты, вводимого в нейтраль сети, а при замыкании на землю – минимум напряжения поврежденной фазы. Известны системы настройки компенсации с использованием экстремальных характеристик контура нулевой последовательности сети и контура «заземляющий трансформатор – сеть» [4].

В работе [5] представлен подход, основанный на теории вейвлет-преобразования, где частота контура нулевой последовательности выделяется с помощью дискретного вейвлет-преобразования. В статье [1] разработан алгоритм интервальной оценки параметра активного сопротивления потерь и индуктивности для решения задачи управления дугогасящего реактора. Основные принципы применения искусственного интеллекта в задаче управления компенсацией емкостного тока представлены в работе [2].

В нормальном режиме работы электрической сети (при отсутствии замыкания на землю) должна быть выполнена предварительная настройка дугогасящего реактора в резонансный режим по условию величины напряжения смещения нейтрали U_0 в соответствии с предлагаемым алгоритмом (рис. 3).

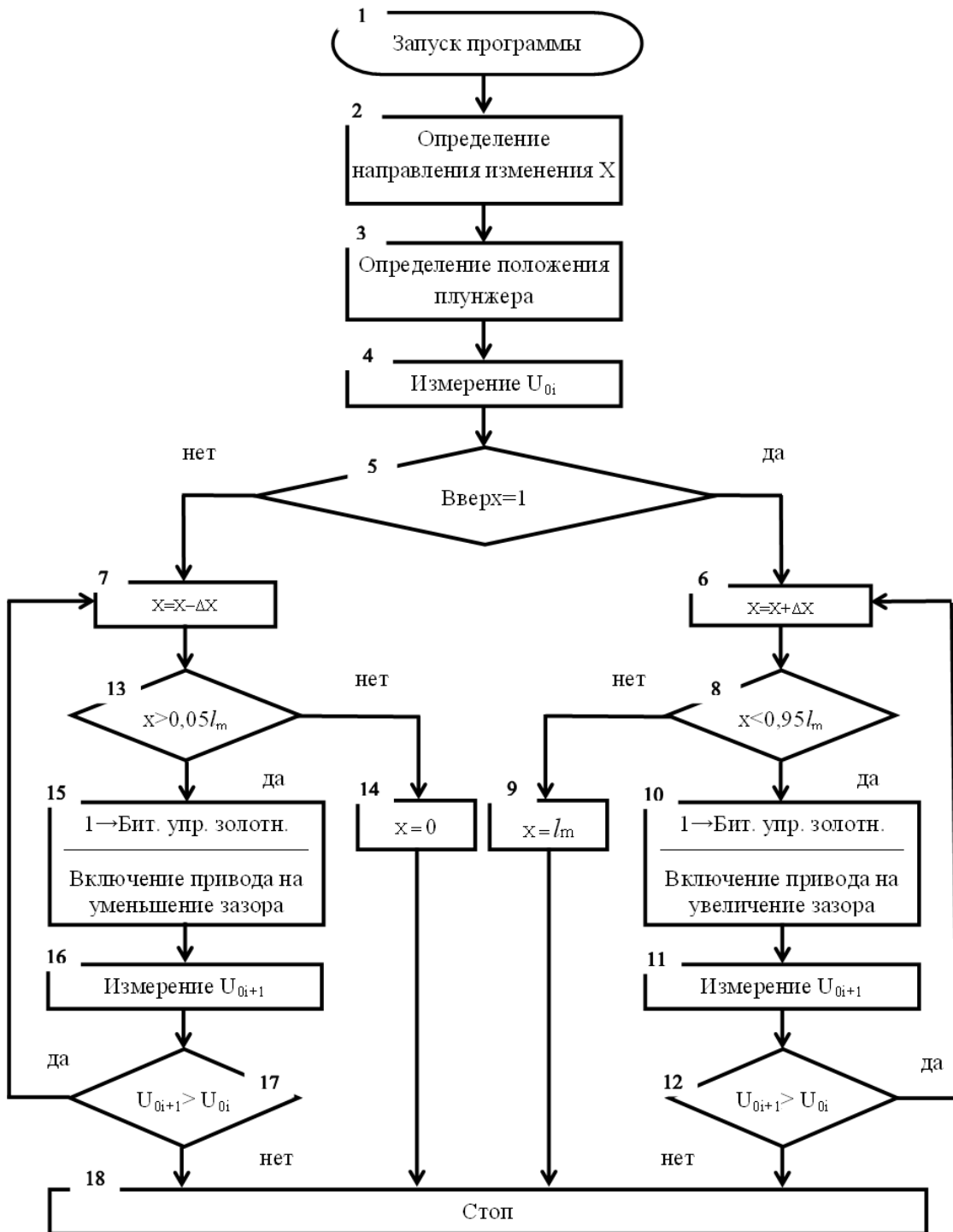


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма системы управления ДГР по экстремальному методу

Разработанная в статье математическая модель и блок управления дугогасящим реактором позволяет повысить эффективность распределительных электрических сетей среднего напряжения при возникновении однофазных замыканий на землю.

Заключение и выводы

1. Для повышения точности расчета режима распределительной сети 35 кВ и напряжения смещения нейтрали необходим учет в схеме замещения взаимных междуфазных индуктивностей воздушных линий, а также междуфазные и фазные ёмкости линий, так как по ве-

личине напряжения смещения нейтрали производится настройка реактора при отсутствии замыкания на землю.

2. Разработана модель для расчета начальных условий, представляющая собой систему уравнений установившегося режима сети до возникновения замыкания. Данная модель, в отличие от представленных ранее, учитывает несимметрию линий и составлена на основе метода фазных координат. Кроме определения начальных условий, эта модель имеет самостоятельное значение: она позволяет определить (или проверить) допустимую расстройку реактора по уровню напряжения смещения нейтрали в нормальном режиме.

Результаты работы могут быть использованы в организациях, эксплуатирующих дугогасящие реакторы в распределительных сетях 6-35 кВ, а также в научных организациях, занимающихся разработкой алгоритмов систем управления реакторами.

Литература

1. Дементий, Ю. А. Интеллектуальный алгоритм интервальной оценки параметров дугогасящего реактора / Ю. А. Дементий, Е. В. Шорников, К. П. Николаев. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашияского университета. – 2021. № 3. С. 64-72.

2. Дементий, Ю. А. Элементы искусственного интеллекта в управлении компенсацией ёмкостного тока однофазного замыкания на землю / Ю. А. Дементий. – Текст : непосредственный // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №3 (44). С. 38-44.

3. Зиганшин, А. Г. Использование быстрого преобразования Фурье для управления дугогасящим реактором с подмагничиванием / А. Г. Зиганшин, И. Ш. Фардиев, И. Н. Степанов, Г. М. Михеев, В. Л. Чепайкин, Н. П. Кадеев. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2023. – № 1 (1098). С. 30–34.

4. Миронов, И. А. Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И. А. Миронов. – Текст : непосредственный // Новости электротехники. – 2007. – № 5 (47). <http://news.elteh.ru/arh/2007/47/06.php> (дата обращения 01.09.2023).

5. Осипов, Д. С. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации ёмкостных токов на основе существующих методов / Д. С. Осипов, С. Ю. Долингер, Д. Г. Сафонов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2016. – №4 (148). С. 58–60.

6. Сафонов, Д. Г. Управление компенсацией емкостных токов в электрических сетях среднего класса напряжения при однофазных замыканиях на землю: 05.14.12 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск. – 2019. – Текст : непосредственный.

7. Сирота, И. М. Режимы нейтрали электрических сетей / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. – Киев : Наукова думка, 1985. – 264 с. – Текст : непосредственный.