

DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-40-53

УДК 621.311.015.38

ББК 327-017

А.Г. ЗИГАНШИН, Г.М. МИХЕЕВ, И.Н. СТЕПАНОВ,
В.Л. ЧЕПАЙКИН, А.А. ДИМИТРИЕВ**РАЗРАБОТКА СПОСОБА НАСТРОЙКИ
ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ
ДЛЯ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННЫМ РЕЖИМОМ НЕЙТРАЛИ**

Ключевые слова: режимы нейтрали, дугогасящий реактор с подмагничиванием, степень расстройки компенсации, ёмкостный ток, смещение нейтрали, опорное напряжение, несимметрия напряжения, замыкание на землю.

В электроэнергетике страны используются разные классы напряжения: от 0,38 кВ до 750 кВ. При этом в зависимости от класса напряжения применяется несколько систем заземления нейтралей обмоток силовых трансформаторов (глухо заземлённая нейтраль, изолированная, с компенсированной нейтралью, эффективно заземлённой). Следует отметить, что эффективная работа электрооборудования в зависимости от класса напряжения напрямую зависит от выбранного режима нейтрали электрической сети. В принципе электрооборудование разного класса напряжения может работать в любом из вышеперечисленных режимов нейтрали обмоток силовых трансформаторов. Однако в зависимости от класса напряжения сети выгодно применять тот режим нейтрали, который даст не только наибольший экономический эффект, но и электробезопасность.

Цель исследования – разработка нового способа для повышения точности настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием, а также устройства на основе предложенного метода.

Материалы и методы. В качестве исходных данных рассмотрены и проанализированы результаты эксплуатации распределительных электрических сетей напряжением 0,4–35 кВ, в том числе и электротехнических комплексов с дугогасящими реакторами АО «Сетевая Компания» Республики Татарстан применительно их настройки для компенсации ёмкостных токов.

Результаты исследования. Рассмотрены вопросы компенсации ёмкостных токов в сетях с изолированной нейтралью 6–35 кВ с приведением различных схем со всеми их достоинствами и недостатками. Особое внимание уделено новому способу и устройству по настройке дугогасящих реакторов с подмагничиванием, которые повышают скорость и точность настройки предложенного устройства за счёт предварительного расчета начального тока подмагничивания на основе вычисления текущей ёмкости сети с применением анализа разности частотных спектров сигналов до и после возбуждения контура нулевой последовательности сети, полученных с помощью быстрого преобразования в Фурье, с последующей подстройкой дугогасящего реактора. Реактор с подмагничиванием, выполненный с использованием нового способа настройки, и устройство для ее осуществления успешно эксплуатируются на подстанции 110 кВ «Буинск» Республики Татарстан.

Выводы. Точность настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием предложено решать путём измерения и сравнения частотных спектров напряжения нейтрали с применением быстрого преобразования Фурье до и после возмущения контура нулевой последовательности опорным током, кратковременно действующим на нейтраль через сигнальную обмотку дугогасящего реактора. С помощью разности полученных частотных спектров определяют собственную частоту контура нулевой последовательности по максимальной амплитуде, соответствующей частоте свободных колебаний. По найденной частоте при известной индуктивности дугогасящего реактора определяют ёмкостное сопротивление сети и необходимый ток подмагничивания реактора для настройки его в резонанс.

Введение. Известно, что сеть 0,4 кВ работает в режиме глухого заземления. В этом случае обмотки силовых трансформаторов на этом классе напряжения соединены по схеме «звезда», а нейтрали обмоток заземлены наглухо. Причины, по которым эта сеть выполнена по такой схеме, тоже однозначны. Если соединить обмотки трансформатора 0,4 кВ по схеме «треугольник», то в случае повреждения изоляции одной фазы, данная сеть продолжала бы также работать и повреждённый участок не отключится от действия релейной защиты. Напротив, если обмотки трансформатора соединить по схеме «звезда», а нейтраль этой звезды изолировать, то при разной нагрузке по фазам, точка нейтрали стала бы «гулять» относительно нулевой точки. В этом случае не удастся поддерживать стабильное напряжение на всех фазах, чтобы удовлетворить качество электрической энергии по отклонению напряжения согласно ГОСТ 32144-2013¹.

Что касается сети 6–35 кВ, то тут картина совсем иная [2, 15]. Ввиду того, что эта сеть более протяжённая (от двух до пятидесяти километров) по сравнению с сетью 0,4 кВ, вероятность повреждения изоляции одной фазы здесь резко возрастает (пробой изолятора, пробой средств защиты от перенапряжений, кабеля, касание веток деревьев голых проводов на одной из фаз и т.д.). Если выполнить эту сеть с глухо заземлённой нейтралью, то любое из этих повреждений приведёт к отключению потребителя, снижая надёжность электроснабжения. По этим причинам ещё на заре советской эпохи было принято решение выполнить эту сеть с изолированной нейтралью, а обмотки силовых трансформаторов соединить по схеме «треугольник» [6].

При выборе режима нейтрали по такой схеме решается одна важная задача потребителя – надёжность электроснабжения. Но она справедлива в том случае, когда значение ёмкостного тока замыкания при повреждении изоляции одной фазы не превышает значений, регламентированных согласно нормативным документам. В противном случае, когда ёмкостные токи замыкания на землю большие, в такой сети возникают дополнительно ещё три проблемы:

- чем больше ёмкостный ток в сети 6–35 кВ, тем больше вероятность возникновения в ней перенапряжений при замыкании на землю;
- при больших значениях ёмкостных токов увеличивается вероятность попадания людей и животных под шаговое напряжение;
- в случаях превышения ёмкостного тока в сети с изолированной нейтралью более 10 А увеличивается вероятность повреждения железобетонных опор [8, 10].

Тем не менее все эти три недостатка можно свести к минимуму, если сеть выполнить с компенсированной нейтралью, т.е. ёмкостный ток в месте замыкания на землю компенсировать с помощью так называемых дугогасящих реакторов (ДГР). Однако претворение в жизнь этой задачи требует немалых материальных затрат, а именно:

- выделения дополнительной ячейки в распределительном устройстве;
- установки нейтралеобразующего силового трансформатора (НТ);
- закупки и монтажа самого ДГР;

¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

- наличия разъединителя для подключения ДГР к нейтрали НТ;
- установки и настройки панели управления ДГР и т.д.

Цель исследования – изучение существующих способов организации режимов нейтрали электрических сетей для разработки нового способа и устройства для повышения точности настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных данных рассмотрены и проанализированы результаты эксплуатации распределительных электрических сетей напряжением 0,4–35 кВ, в том числе и электротехнических комплексов с дугогасящими реакторами АО «Сетевая Компания» Республики Татарстан. Применены следующие методы исследования: основные положения теории электрических цепей и метод резонансной настройки.

Результаты исследования. В настоящее время в качестве устройств по компенсации ёмкостных токов используются реакторы со ступенчатым (рис. 1, *а*) и плавным регулированием тока (рис. 1, *б*).

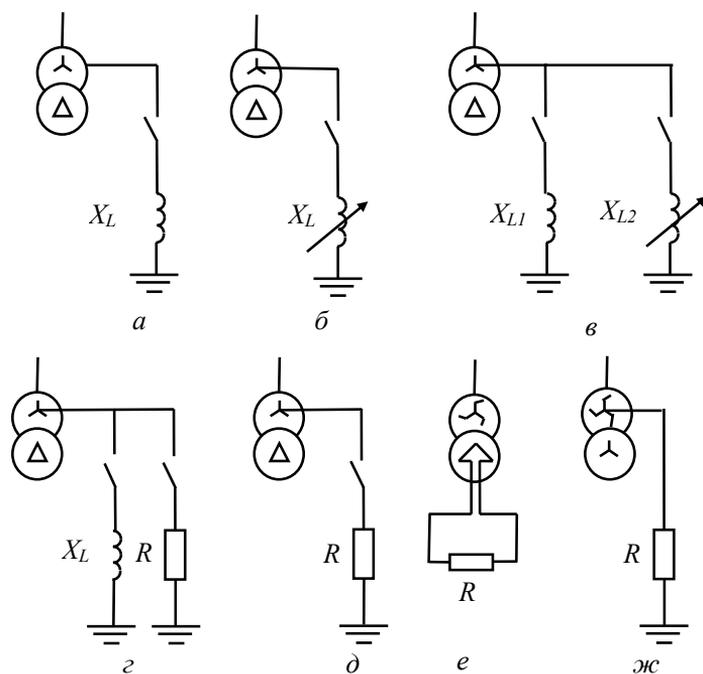


Рис. 1. Схемы выполнения компенсации в сети 6–35 кВ:

- а* – с применением ступенчатого регулирования;
- б* – с помощью ДГР с плавным регулированием;
- в* – с параллельной работой ступенчатого и с автоматическим регулированием реактора;
- г* – с совместной установкой ДГР и резистора; *д* – с установкой резистора;
- е* – с помощью подключения низкоомного резистора в треугольник;
- ж* – с подключением резистора в трансформатор нулевой последовательности

Реакторы со ступенчатым регулированием в основном применялись в 1970–1990-е гг. Конструкция магнитопровода у них двухстержневая и имеет по 6–8 немагнитных зазоров, которые расположены равномерно по магнитопроводу

для линейризации вольт-амперной характеристики реактора. Эти устройства используются до сих пор на некоторых подстанциях в тех случаях, когда требуется компенсировать большие токи замыкания. Здесь ступенчатое регулирование применяется в качестве основного устройства компенсации, а дополнительным элементом является регулируемый реактор (рис. 1, в) [9].

ДГР с плавным регулированием, в свою очередь, подразделяются на плунжерные и с подмагничиванием. Принцип работы плунжерных реакторов основан на изменении магнитного зазора среднего стержня трёхстержневого магнитопровода, на который намотана основная обмотка. Изменение магнитного зазора происходит за счёт плавного движения магнитной системы стержня магнитопровода с помощью двигателя, вмонтированного в систему устройства реактора. В свою очередь, изменением магнитного зазора удаётся плавно регулировать индуктивный ток обмотки реактора [4]. При этом минимальный зазор в стержне определяет величину минимального тока реактора, а максимальный – наибольшую величину тока этого устройства.

Однако и здесь возможны два варианта регулирования индуктивного тока. В первом варианте индуктивность реактора регулируется симметрично, а во втором – несимметрично. В симметричном регулировании зазор изменяется одновременно в обе стороны относительно центральной оси среднего стержня магнитопровода. Во втором случае подвижным является только одна часть этого сердечника (см. рис. 2).

В последние годы режим заземления нейтрали через резистор набирает обороты. На рис. 1, г-е представлены варианты включения резистора в сеть.

Различают низкоомное и высокоомное заземление нейтрали. Низкоомное заземление нейтрали выполняется в сетях с любым значением ёмкостного тока, в то время как при высокоомном заземлении ток однофазного замыкания на землю не должен превышать 5–7 А [5].

Следует отметить, что низкоомное заземление нейтрали выполняется в случаях, когда возможно резервирование потребителя, так как при этом устройства защиты действуют на отключение повреждённого присоединения без выдержки времени [10].

Реакторы с подмагничиванием имеют две обмотки, которые намотаны на стержни магнитопровода. Первая обмотка подключена в нейтраль НТ, а вторая соединена с источником напряжения постоянного тока.

Реакторы с подмагничиванием работают за счёт изменения величины силы постоянного тока обмотки, намотанной на магнитопровод. Эти устройства не имеют подвижных частей, технологичны, обладают высоким быстродействием и надёжны в работе. Основными недостатками реакторов с подмагничиванием

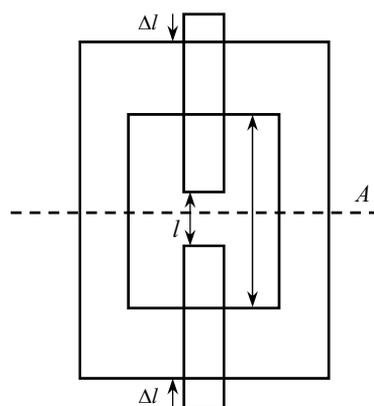


Рис. 2. Схема магнитопровода плунжерного реактора с симметричным регулированием индуктивности

по сравнению с плунжерными реакторами считаются генерации высших гармонических составляющих и значительные активные потери [7, 14].

При всем многообразии устройств компенсации ёмкостных токов проблемы их настройки остаются актуальными практически для каждого из них.

Для всех этих устройств объединяющим признаком является настройка режима компенсации только в предшествующем режиме до появления замыкания на землю в сети. После замыкания настройка компенсации не производится. В этом случае возникает значительная расстройка ДГР по причине неравенства проводимостей фаз на землю, нелинейности вольт-амперной характеристики реактора, переключения абонентских линий, работы противоаварийной автоматики и т.д. Эти действия могут спровоцировать переход однофазного замыкания на землю в междуфазные короткие замыкания с последующим отключением потребителя [9].

На рис. 3 представлены упрощенная схема контура нулевой последовательности сети (КНПС) и её векторная диаграмма напряжения в нормальном режиме. Здесь схема этого контура представляет собой последовательное соединение ёмкости сети, индуктивности и активного сопротивления ДГР. Все эти три сопротивления подключены к напряжению смещения нейтрали НТ.

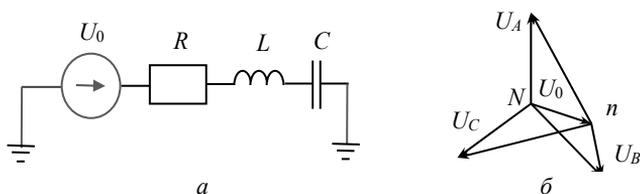


Рис. 3. Упрощенная схема контура нулевой последовательности сети (а) и её векторная диаграмма напряжения (б) в нормальном режиме:
 U_0 – напряжение смещения нейтрали; R – активное сопротивление сети;
 L – индуктивность реактора, C – ёмкость сети

В идеальном случае напряжение в нейтрали НТ в нормальном режиме сети близко к нулю. Это утверждение справедливо в том случае, если ёмкости и проводимости фаз относительно земли равны. Однако, как известно, в реальной жизни такое равенство не встречается. Поэтому в сетях с изолированной нейтралью кабельной сети это напряжение составляет менее $0,75\% \cdot U_{\phi}$. При равенстве ёмкостного сопротивления сети X_C и индуктивного сопротивления X_L возникает резонанс напряжений, который существенно повышает напряжение на реакторе в нормальном режиме.

При замыкании любой одной фазы на землю возникает ёмкостный ток. В этом случае напряжение на здоровых фазах увеличивается до линейного.

Эквивалентная и упрощенная схема компенсированной трёхфазной сети в режиме однофазного замыкания на землю приведена на рис. 4.

Здесь возникает параллельный LC контур, настройка которого в резонанс позволяет компенсировать ёмкостный ток при ОЗЗ. Для обеспечения резонанса тока необходимо, чтобы индуктивное сопротивление реактора X_L было близко к ёмкостному сопротивлению X_C . Поэтому при возникновении ОЗЗ автоматика реактора должна установить близкое к ёмкостному сопротивлению сети (X_C) индуктивное сопротивление реактора (X_L).

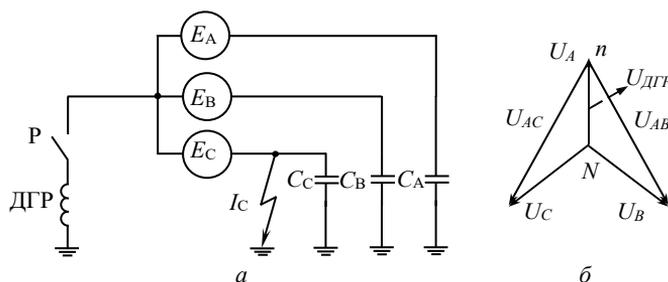


Рис. 4. Упрощенная эквивалентная схема КНПС (а) и векторная диаграмма напряжений сети (б) при однофазном замыкании на землю

Для ДГР с подмагничиванием индуктивное сопротивление реактора (X_L) устанавливается величиной тока подмагничивания (I_L).

На рис. 5 представлена система магнитопровода ДГР с подмагничиванием. Его магнитная система представляет собой двухстержневой магнитопровод с рабочими обмотками на стержнях и обмотками подмагничивания, размещенными в ярмах. С целью исключения электромагнитной связи между рабочей обмоткой и обмоткой подмагничивания их оси расположены перпендикулярно [3].

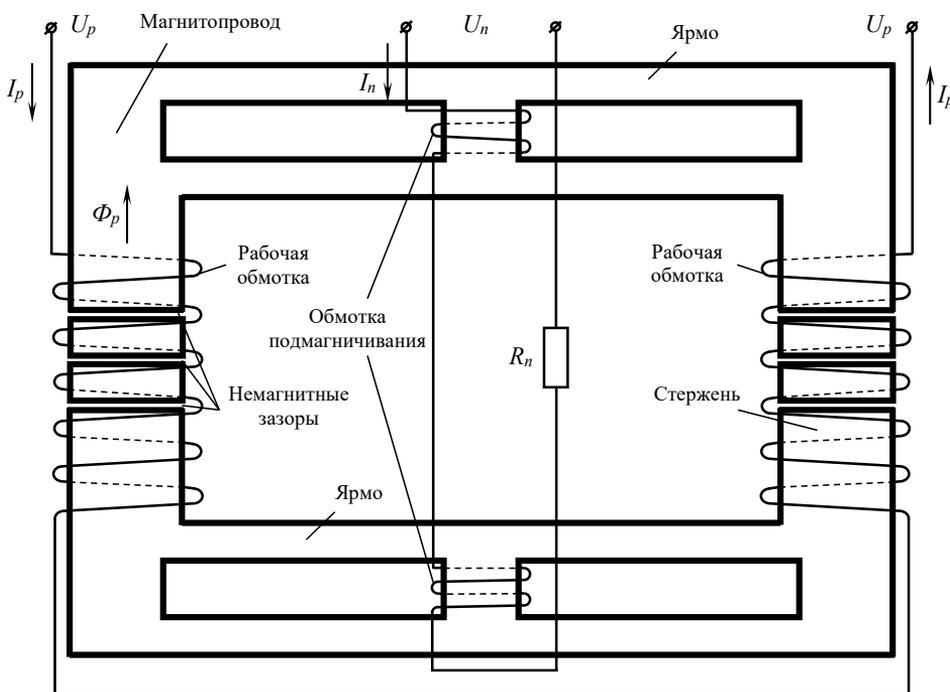


Рис. 5. Магнитная система ДГР с подмагничиванием

При подаче переменного напряжения на рабочую обмотку переменный магнитный поток Φ протекает по стержням и ярмам. Ввиду того, что оси обмоток подмагничивания размещены перпендикулярно направлению протекания

переменного потока в ярмах магнитопровода, при отсутствии подмагничивания наводки в обмотках подмагничивания равны нулю [1]. Такое расположение обмоток дополнительно повышает безопасность эксплуатационного персонала при профилактических работах и способствует увеличению коэффициента регулирования тока до пяти без снижения синусоидальности кривой рабочего тока.

Следует подчеркнуть, что синусоидальность рабочего тока зависит от наличия немагнитных зазоров. Их количество определяется заданными размерами конструкции и предельным значением максимальной индукции в стали [1].

Зависимость индуктивного сопротивления реактора от тока подмагничивания называется регулировочной характеристикой реактора, которая определяется перед сдачей в эксплуатацию реактора. На рис. 6 представлена регулировочная характеристика ДГР.

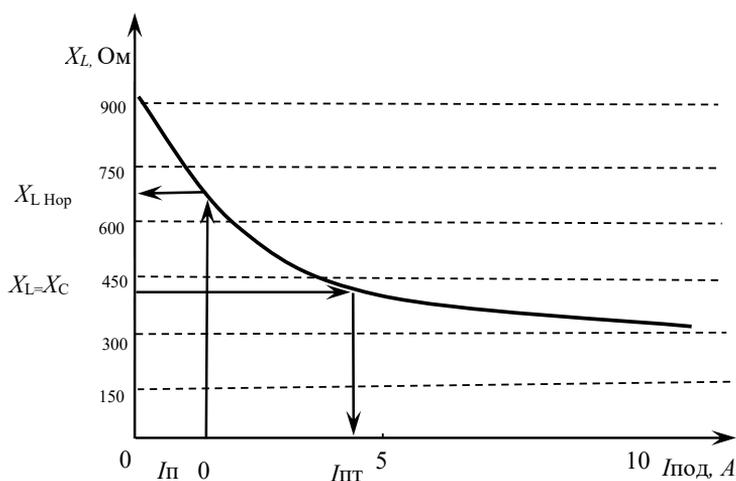


Рис. 6. Регулировочная характеристика реактора с подмагничиванием

Регулировочную характеристику снимают перед вводом в эксплуатацию ДГР во время пусконаладочных работ.

Для снятия регулировочной характеристики была собрана схема, вид которой показана на рис. 7.

Расчёт ёмкостного сопротивления X_C КНПС производится следующим образом. Вначале для выбранного индуктивного сопротивления $X_{L\text{нор}}$ по регулировочной характеристике находят $I_{п0}$. Далее по известным формулам [7, 11] находят ёмкостное сопротивление

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{\omega_0^2 LC} = 1 - \frac{X_C}{X_{L\text{нор}}}; \quad (1)$$

$$\vartheta = 1 - \frac{f_{\text{св}}^2}{f_0^2}; \quad (2)$$

$$X_C = X_{L\text{нор}} \cdot \frac{f_{\text{св}}^2}{f_0^2}, \quad (3)$$

где ϑ – величина расстройки контура, f_0 – частота сети.

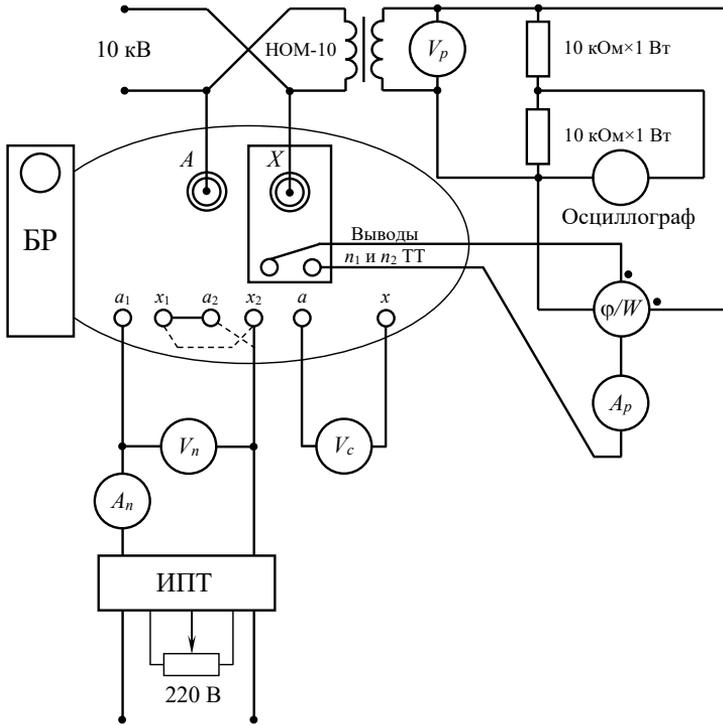


Рис. 7. Расположение клемм подключения на верхнем основании бака реактора (вид сверху): РБ – расширительный бак; ИПТ – источник постоянного тока; ТТ – трансформатор тока 25/5 А; V_p и A_p – вольтметр и амперметр в цепи рабочей обмотки соответственно; V_n и A_n – вольтметр и амперметр в цепи подмагничивания обмотки соответственно; V_c – вольтметр для измерения напряжения сигнальной обмотки; ϕ/W – фазометр/ваттметр

Из формул (1) и (3) следует

$$\frac{1}{\omega_0^2 LC} = \frac{T_{св}^2}{T_0^2} = \frac{X_C}{X_L},$$

так как $X_L = \omega_0 L$, а $X_C = \frac{1}{\omega_0 C}$.

Таким образом, определив период свободных колебаний, можно вычислить ёмкостную проводимость сети

$$X_C = X_L \cdot \frac{T_{св}^2}{T_0^2}.$$

Необходимый для работы ток подмагничивания $I_{пт}$ определяют по регулировочной характеристике реактора $X_L = F(I_{под})$ из условия $X_L = X_C$.

Регулировочная характеристика ДГР должна быть загружена в контроллер либо в виде таблицы, либо в виде коэффициентов аппроксимирующего полинома.

В отличие устройств, представленных в трудах [12, 13], предложено ДРГ настраивать на резонанс в режиме однофазного замыкания на землю по предварительно измеренным параметрам сети, предшествующим замыканию на землю.

На рис. 8 приведена структурная схема, позволяющая реализовать эту идею [13].

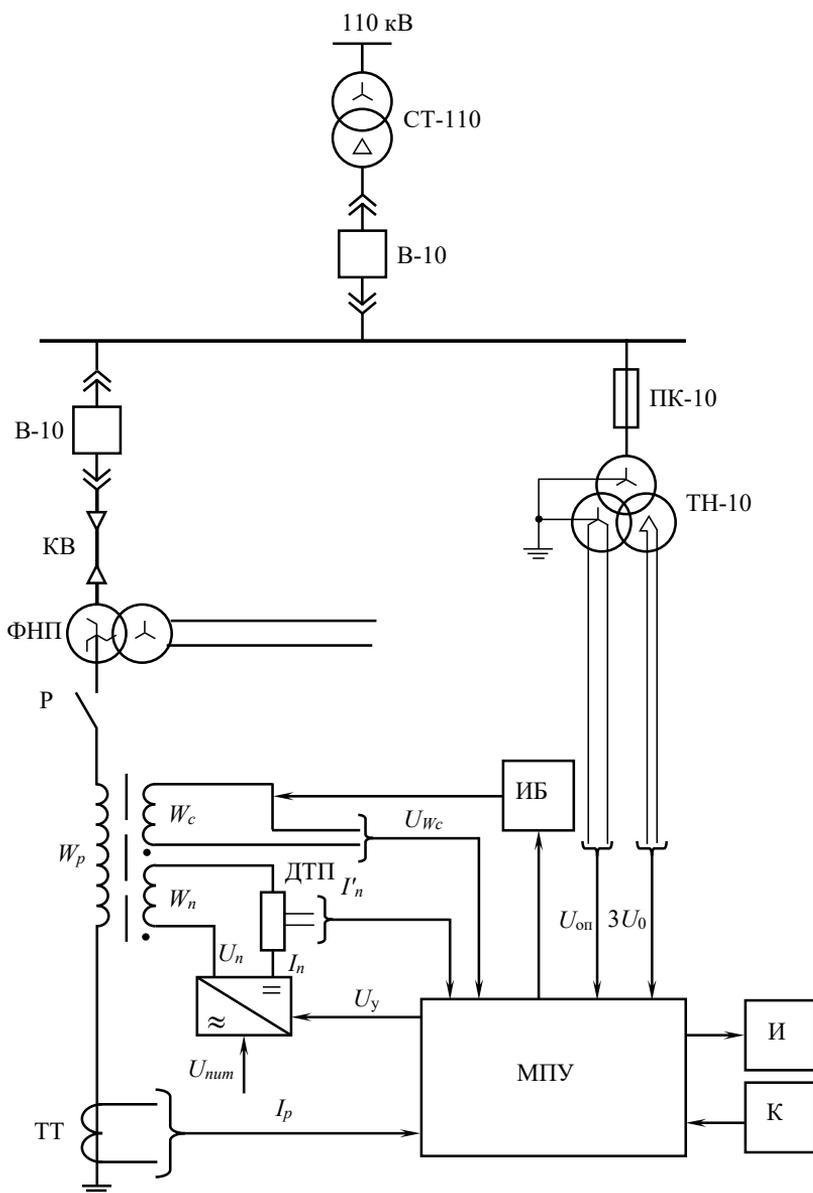


Рис. 8. Структурная схема устройства автоматической компенсации ёмкостных токов дугогасящего реактора с подмагничиванием от регулируемого источника напряжения постоянного тока: СТ-110 – силовой трансформатор на 110 кВ; В-10 – высоковольтный выключатель на 10 кВ; KB – кабельная вставка; P – разъединитель; ФНП – фильтр нулевой последовательности; W_p – рабочая обмотка реактора; W_c – сигнальная обмотка реактора; W_n – обмотка подмагничивания; ДТП – датчик тока подмагничивания; ТТ – трансформатор тока; ПК – предохранитель; ТН-10 – трансформатор напряжения; ИБ – импульсный блок; МПУ – микропроцессорное устройство; И – индикатор; К – клавиатура

Устройство автоматической настройки реактора функционирует следующим образом. В режиме глубокой недокомпенсации микропроцессорное устройство (МПУ) получает частотный спектр тока контура нулевой последовательности сети (КНПС), синхронно с фазой напряжения нулевой последовательности ($3U_0$) через сигнальную обмотку (W_c) импульсным блоком (БИ) формируется тестовый импульс, возбуждающий КНПС, и снимается частотный спектр переходных процессов тока контура.

По разности полученных спектров определяется частота собственных колебаний контура, которая при известном индуктивном сопротивлении (X_L) ДГР позволяет найти ёмкостное сопротивление (X_C) КНПС.

Необходимое значение тока подмагничивания (I_n) для настройки контура в резонанс определяется по обратной регулировочной характеристике ДГР $I_{\text{под}} = f(X_L)$ при условии $X_L = X_C$ [13].

Следует подчеркнуть, что регулировочная характеристика реактора снимается перед пусконаладочными испытаниями [13]. Она, в свою очередь, будет храниться в МПУ и использоваться для компенсации тока замыкания на землю.

Актуализация резонансной настройки реактора производится в нормальном режиме работы сети путем периодического измерения ёмкостного сопротивления сети для отслеживания изменений ее параметров.

Система управления, состоящая из клавиатуры (К) и блока индикации (И), обеспечивает оператору возможность ввода необходимых заданных уставок параметров компенсационной системы и регулировочной характеристики реактора с подмагничиванием ($X_L = f(I_{\text{под}})$).

Это решение дает высокую скорость настройки компенсации при возникновении ОЗЗ в любом диапазоне регулирования реактора и одновременно обеспечивает необходимый режим компенсации в случае однофазных замыканий на землю при сохранении безопасного уровня напряжения смещения нейтрали. В процессе компенсации ОЗЗ выполняется динамическая подстройка индуктивности ДГР малыми изменениями тока подмагничивания при контроле динамики уменьшения тока реактора.

Фрагмент 110 кВ подстанции «Буинск», расположенной на территории Татарстана (рис. 9), демонстрирует устройства, используемые для компенсации ёмкостных токов в сети 10 кВ: ДГР с подмагничиванием, разъединитель и фильтр нулевой последовательности. На этом энергетическом объекте успешно применяется вариант настройки реактора с подмагничиванием, который внедрен в 2022 г.



Рис. 9. Общий вид дугогасящего реактора (слева), разъединителя (середина) и фильтра нулевой последовательности (справа), размещённых на подстанции 110 кВ «Буинск»

Выводы. 1. Описанный способ повышает скорость и точность настройки реактора с подмагничиванием. Это достигается за счёт предварительного расчета начального тока подмагничивания на основе вычисления текущей емкости сети с применением анализа разности частотных спектров сигналов до и после возбуждения КНПС, полученных с помощью быстрого преобразования в Фурье, с последующей подстройкой ДПР. Использование разностного частотного спектра существенно снижает вероятность ошибки определения частоты собственных колебаний контура на фоне имеющихся шумов и гармоник сети.

2. Дугогасящий реактор с подмагничиванием с использованием нового способа настройки и устройства для ее осуществления успешно эксплуатируется на подстанции 110 кВ «Буинск» Республики Татарстан.

Литература

1. А.с. СССР № 898523 А1, МПК H01F 29/14. Электрический реактор с подмагничиванием / Н.Ф. Калинин, М.В. Богданов, А.И. Кузьмичев [и др.]; заявитель Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. № 2144988/24-08; заявл. 19.06.1975; опубл. 15.01.1982, Бюл. № 2. 3 с. EDN JBNIFP.
2. Блинов С.А. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях среднего напряжения // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 7-2(63). С. 41–45. EDN WUGEDN.
3. Исследование характеристик дугогасящих реакторов применяемых для компенсации емкостных токов замыкания на землю / Т.К. Жабборов, Ф.А. Аскарлова, У.Б. Ботиров, А.А. Каримов // Известия Ошского технологического университета. 2021. № 2-1. С. 229–233. EDN NDQTBU.
4. Козлов В.Н., Петров М.И. Дугогасящие реакторы в сетях среднего напряжения // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 1(2). С. 36–42. EDN PBHCWH.
5. Куликова Н.А., Титаренко О.Н., Тяпкина В.А. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работы электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–38. EDN XORVSH.
6. Кустов А.Н., Зацепин Е.П., Зацепина В.И. Анализ переходных режимов при однофазных коротких замыканиях в электрических сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2020. № 3-4(61-62). С. 23–29. DOI: 10.53015/18159958_2020_3_23. EDN JMRKPH.
7. Лухачёв Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
8. Матвеев Д.А., Хренов С.И. Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ: теоретические аспекты // Электричество. 2015. № 1. С. 34–39. EDN TGTHAD.
9. Медведев В.Г., Базаррагчаа А., Баязитов И.Р. Способ настройки дугогасящего реактора и устройство для его реализации // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 11. С. 47–51.
10. Патент № 2222857 РФ С1, МПК H02J 3/18. Способ автоматической настройки дугогасящего реактора / А.Г. Долгополов. № 2002112895/09; заявл. 17.05.2002; опубл. 27.01.2004, Бюл. № 1. 10 с. EDN NIXSPG.
11. Патент № 161784 РФ U1, МПК H02J 3/18. Устройство автоматической настройки дугогасящего реактора / Н.В. Данилов, М.И. Петров, Л.А. Петрова, А.В. Скворцов. № 2015151762/07; заявл. 02.12.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13. 6 с. EDN LVOURZ.
12. Патент № 209170 РФ U1, МПК H02J 3/18, G01R 27/26. Устройство настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием для компенсации емкостных токов замыкания / И.Н. Степанов, Н.П. Кадеев, В.Л. Чепайкин [и др.]; заявитель АО «Сетевая компания». № 2021100469; заявл. 12.01.2021; опубл. 03.02.2022, Бюл. № 4. 6 с. EDN BLLKEY.
13. Петров М.И., Степанов И.Н., Маршутин Е.В. Повышение эффективности применения компенсирующих устройств в режиме замыкания // Релейная защита и автоматизация. 2012. № 3(8). С. 24–28. EDN PCDXFB.

14. Целебровский Ю.В. Режимы нейтрали и пути повышения надежности распределительных электрических сетей 6–35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 4(79). С. 132–135. EDN BIENTW.

15. Ширковец А.И., Валов В.Н., Петров М.И. Задачи автоматического управления режимом компенсации тока замыкания на землю // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 2(19). С. 32–38. EDN UABRGZ.

ЗИГАНШИН АЙРАТ ГАБДУЛХАКОВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru).

МИХЕЕВ ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mikheevg@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2208-9723>).

СТЕПАНОВ ИВАН НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ivnik21@gmail.com).

ЧЕПАЙКИН ВАЛЕРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – кандидат технических наук, ведущий инженер-программист, ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ВНИИР), Россия, Чебоксары (vl.cherpaykin@mail.ru).

ДИМИТРИЕВ АНТОН АНАТОЛЬЕВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (Meterling21@mail.ru).

Airat G. ZIGANSHIN, Georgi M. MIKHEEV,
Ivan N. STEPANOV, Valeriy L. CHERPAYKIN, Anton A. DIMITRIEV

**DEVELOPMENT OF A METHOD
FOR TUNING ARC SUPPRESSION REACTORS WITH SUB-MAGNETIZATION
FOR A NETWORK WITH ISOLATED NEUTRAL MODE**

Key words: neutral modes, arc suppression reactor with sub-magnetization, compensation degree, capacitive current, neutral offset, reference voltage, voltage asymmetry, ground fault.

Our country's power industry uses different voltage classes from 0.38 kV up to 750 kV. At the same time, depending on the voltage class, several systems of neutral grounding of power transformer windings are used (blindly grounded neutral, isolated, compensated neutral, effectively grounded). It should be noted that the effective operation of electrical equipment, depending on the voltage class, depends directly on the selected neutral mode of the electrical network. In fact, electrical equipment of different voltage classes can operate in any of the above-mentioned neutral modes of power transformer windings. However, depending on the voltage class of the network, it is advantageous to apply the neutral mode that will give not only the greatest economic effect, but also electrical safety.

The aim of the research is to develop a new method to improve the tuning accuracy of arc suppression reactors with sub-magnetization, as well as a device based on the proposed method.

Materials and Methods. As initial data, the results of operation of 0,4–35 kV distribution power grids, including electrical complexes with arc-quenching reactors of JSC "Grid Company" of the Republic of Tatarstan in relation to their adjustment for compensation of capacitive currents were considered and analyzed.

Research results. The paper considers the issues of compensation of capacitive currents in 6–35 kV power grids with isolated neutral with schemes with all their advantages and disadvantages. Special attention is paid to the new method and device to tune arc-quenching reactors with sub-magnetization, which increases the accuracy and speed of tuning the

proposed device by pre-calculating the initial magnetization current based on calculating the current capacity of the network using the analysis of the difference in frequency spectra of signals before and after excitation of the zero sequence circuit of the network obtained using fast Fourier transform, with subsequent adjustment of the arc-extinguishing reactor. The reactor with sub-magnetization made using a new tuning method and a device for its implementation, is successfully operated at the 110 kV Buinsk substation of the Republic of Tatarstan.

Conclusions. The problems of the tuning accuracy of arc suppression reactors with sub-magnetization have been proposed to be solved by measuring and comparing frequency spectra of neutral voltage with application of fast Fourier transform before and after perturbation of zero-sequence circuit by reference current acting briefly on neutral through signal winding of arc suppression reactor. Using the difference of the obtained frequency spectra, the natural frequency of the zero-sequence loop is determined by the maximum amplitude corresponding to the frequency of free oscillations. According to the found frequency at known inductance of the arc suppression reactor, the capacitance of the network and the necessary current of the reactor sub-magnetization to adjust it to resonance are determined.

References

1. Kalin N.F., Bogdanov M.V., Kuz'michev A.I. *Elektricheskii reaktor s podmagnichivaniem* [Electric reactor with sub-magnetization]. Patent RF, no. 898523, 1975.
2. Blinov S.A. *Rezhimy zazemleniya neutrali v elektricheskikh setyakh srednego napryazheniya* [Modes of neutral grounding in the electric networks of medium voltage]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Current research in today's world], 2020, no. 7-2(63), pp. 41–45.
3. Zhabborov T.K., Askarova F.A., Botirov U.B., Karimov A.A. *Issledovanie kharakteristik dugogasyashchikh reaktorov primenyaemykh dlya kompensatsii emkostnykh tokov zamykaniya na zemlyu* [Investigation of characteristics of arc suppression reactors used for compensation of capacitive earth fault currents]. *Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2021, no. 2-1, pp. 229–233.
4. Kozlov V.N., Petrov M. I. *Dugogasyashchie reaktory v setyakh srednego napryazheniya* [Arc-quenching reactors in medium-voltage networks]. *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2011, no. 1(2), pp. 36–42.
5. Kulikova N.A., Titarenko O.N., Tyapkina V.A. *Rezistivnoe zazemlenie neutrali – sposob povyshe-niya nadezhnosti raboty elektricheskikh setei 6–35 kV* [Resistive neutral grounding – a way to improve the reliability of 6–35 kV electrical networks]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, 2018, no. 2, pp. 32–38.
6. Kustov A.N., Zacepin E.P., Zacepina V.I. *Analiz perehodnykh rezhimov pri odnofaznykh korotkikh zamykaniyakh v elektricheskikh setyakh s izolirovannoi i kompensirovannoi neutral'yu* [Analysis of transient modes at single-phase short circuits in electric networks with isolated and compensated neutral]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*, 2020, no. 3-4(61-62), pp. 23–29. DOI: 10.53015/18159958_2020_3_23.
7. Likhachev F.A. *Zamykanie na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu i s kompensatsiei emkostnykh tokov* [Ground fault in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents]. Moscow, Energiya Publ., 1971, 152 p.
8. Matveev D.A., Khrenov S.I. *Effektivnost' upravlyaemykh dugogasyashchikh reaktorov v elektricheskikh setyakh 6–35 kV: teoreticheskie aspekty* [Efficiency of the controlled arc suppression reactors in the electric networks 6–35 kV: theoretical aspects]. *Elektrichestvo*, 2015, no 1, pp. 34–39.
9. Medvedev V.G., Bazarragchaa A., Bayazitov I.R. *Sposob nastroiки dugogasyashchego reaktora i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of arc suppression reactor tuning and device for its realisation]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2021, no. 11, pp. 47–51.
10. Dolgoplov G. *Sposob avtomaticheskoi nastroiки dugogasyashchego reaktora* [Method of automatic adjustment of the arc-quenching reactor]. Patent RF, no. 2222857, 2004.
11. Danilov N.V., Petrov M.I., Petrova L.A., Skvortsov A.V. *Ustroystvo avtomaticheskoi nastroiки dugogasyashchego reaktora* [Device for automatic tuning of arc-quenching reactor]. Patent RF, no. 2015151762/07, 2015.
12. Danilov N.V., Petrov M.I., Petrova L.A., Skvortsov A.V. *Ustroystvo avtomaticheskoi nastroiки dugogasyashchego reaktora* [Device for automatic tuning of arc-quenching reactor]. Patent RF, no. 2015151762/07, 2015.

13. Petrov M.I., Stepanov I.N., Marshutin E.V. *Povyshenie effektivnosti primeneniya kompensiruyushchikh ustroystv v rezhime zamykaniya* [Increasing the efficiency of compensating devices application in the short-circuit mode]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2012, no. 3(8), pp. 24–28.

14. Tselebrovskii Yu.V. *Rezhimy neutrali i puti povysheniya nadezhnosti raspredeli-tel'nykh elektricheskikh setei 6–35 kV* [Neutral modes and ways to improve the reliability of 6–35 kV distribution networks]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleni*, 2023, no. 4(79), pp. 132–135.

15. Shirkovets A.I. Valov V. N., Petrov M.I. *Zadachi avtomaticheskogo upravleniya rezhimom kompensatsii toka zamykaniya na zemlyu* [Problems of automatic control of the earth fault current compensation mode]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2015, no. 2(19), pp. 32–38.

AYRAT G. ZIGANSHIN – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ziganshinAG@gridcom-rt.ru).

GEORGI M. MIKHEEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mikheevg@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2208-9723>).

IVAN N. STEPANOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ivnik21@gmail.com).

VALERY L. CHEPAIKIN – Candidate of Technical Sciences, Leading Software Engineer, JSC All-Russian Research, Design, Engineering and Technological Institute of Relay Building with Pilot Production (VNIIR), Russia, Cheboksary (vl.chepaykin@mail.ru).

ANTON A. DIMITRIEV – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (Meterling21@mail.ru).

Формат цитирования: Зиганшин А.Г., Михеев Г.М., Степанов И.Н., Чепайкин В.Л., Димитриев А.А. Разработка способа настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием для сети с изолированным режимом нейтрали // Вестник Чувашского университета. – 2024. – № 2. – С. 40–53. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-40-53.