

УДК 621.311.015.38

ББК 327-017.4

Г.М. МИХЕЕВ, А.Г. ЗИГАНШИН

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЛИЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА РЕЖИМ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Ключевые слова: режим нейтрали электрических сетей, сеть с изолированной нейтралью, сеть с компенсированной нейтралью, сеть с резистивным заземлением нейтрали, однофазное замыкание на землю, компенсация ёмкостных токов, самонесущие изолированные провода, кабели из сшитого полиэтилена.

В статье рассмотрены режимы нейтралей сетей от 0,38 до 750 кВ. В любой сети с разным классом напряжения нейтраль обмотки силового трансформатора может работать как в изолированном, так и в глухозаземлённом режиме. Однако выбор этого режима зависит от экономической целесообразности.

Приведены доводы и достоинства применения системы с изолированной и компенсированной нейтралью сетей с классом напряжения 6–35 кВ. Для сетей этих классов напряжений рассмотрены различные варианты подключения дугогасящих реакторов со ступенчатым и плавным регулированием, а также низкоомных и высокоомных резисторов в нейтраль нейтралеобразующего трансформатора или фильтра нулевой последовательности. На примере работы электрических сетей Республики Чувашия на протяжении многих десятилетий подчёркнуто, что компенсация ёмкостных токов с помощью дугогасящих реакторов является эффективным и надёжным способом не только защиты подстанционного электрооборудования от перенапряжений, но и обеспечения электробезопасности людей и животных, а также гарантии железобетонных опор от разрушения.

Отмечено, что сети 6–35 кВ в будущем могут быть выполнены с глухозаземлённой нейтралью. Однако это станет возможно при условии, что повсеместно на воздушных линиях электропередач вместо неизолированных проводов будут установлены самонесущие изолированные провода, а на кабельных линиях будут эксплуатироваться кабели из сшитого полиэтилена. Подчёркнуто, что внедрение производства работ под напряжением в сетях 6–35 кВ и цифровизация подстанций с повсеместным внедрением микропроцессорной техники будут способствовать ускоренному переходу из системы с изолированной (или с компенсированной) нейтралью к глухозаземлённой. Тем не менее решение перехода от системы с изолированной нейтралью к глухому заземлению останется прерогативой проектной организации исходя из особенностей работы электрооборудования и сферы производственной деятельности.

Режим нейтрали электрических сетей занимает центральное место в вопросах обеспечения эффективного функционирования электрооборудования и надёжной работы потребителя. Мы привыкли, что сеть 0,38 кВ должна работать с глухозаземлённой нейтралью. В этом случае при разных нагрузках на фазах удаётся поддерживать на шинах потребителя качество электроэнергии по напряжению.

Сеть 110 кВ работает с эффективной заземлённой нейтралью. Под этой формулировкой скрывается следующее. В сети 110 кВ на одних подстанциях нейтрали обмоток силовых трансформаторов заземлены через однофазные заземляющие ножи (ЗОН-110), в то время как на других подстанциях они работают в изолированном режиме. Такое решение позволяет при повреждении изоляции одной фазы в данной сети практически исключить большие перенапряжения и большие токи короткого замыкания (КЗ).

В сетях 220 кВ и выше обмотки силовых трансформаторов включены по схеме «звезда», а их нейтрали заземляются наглухо. В этом случае отпадает вероятность возникновения перенапряжения при повреждении изоляции одной из фаз, а токи КЗ здесь не превышают значений в сети 110 кВ вследствие большого номинального напряжения самой сети.

Известно, что сети 6–35 кВ в нашей стране и странах ближнего зарубежья выполняются с изолированной или компенсированной нейтралью. Это означает, что обмотка силового трансформатора в этой сети или соединена в треугольник, или собрана по схеме «звезда», а нейтраль трансформатора либо изолирована от земли, либо заземлена через дугогасящий реактор (ДГР). Такое решение было принято ещё в начале прошлого века с целью увеличения надёжности электроснабжения потребителей [7].

Сети с напряжениями 6–35 кВ в России по протяжённости занимают лидирующее положение. В городской черте они в основном выполняются с помощью кабельных линий (КЛ), а в сельской местности – на воздушных линиях электропередачи (ВЛ). Ввиду того, что практически все КЛ прокладываются в земле, вероятность пробоя одной фазы в такой сети весьма велика. Особенно часто однофазные замыкания на землю возникают весной и осенью, когда происходит смещение грунта с последующим разрушением оболочки кабеля и увлажнением изоляции кабеля. Чаще всего пробой изоляции происходит в соединительных муфтах с переходом на двух- и трёхфазное КЗ [7].

Гораздо хуже дело обстоит в сетях с напряжениями 6–35 кВ на ВЛ. Здесь причин, которые могут вызвать однофазное замыкание на землю, больше: пробой изоляторов, замыкание веток деревьев на голые провода, пробой вентиляционных разрядников, ограничителей перенапряжений (ОПН) и т.д.

В этой системе в случае повреждения изоляции одной фазы в месте замыкания на землю течёт ёмкостный ток. Значение этого тока в основном зависит от длины линии. Чем больше протяжённость ВЛ, которые подключены к распределительному устройству (РУ), тем больше ёмкостный ток. Его значение также зависит от сечения провода, расположения жил на опоре и от высоты, на которой фазные провода находятся относительно земли. В незначительной степени оно зависит от погодных условий.

С выполнением сети с изолированной нейтралью повышается надёжность системы электроснабжения, так как в этом случае линия не отключается. При высоких значениях ёмкостного тока вследствие замыкания одной фазы на землю в сети возникают следующие проблемы: увеличение вероятности возникновения перенапряжения, попадание людей и животных под шаговое напряжение, а также разрушение железобетонных опор.

На практике все эти отрицательные явления можно свести к минимуму, если компенсировать ёмкостные токи. Компенсация ёмкостных токов в России осуществляется с помощью установки ДГР. В случае настройки ДГР в резонанс с сетью в месте повреждения ток практически будет минимальным и тем самым исключаются возможности возникновения феррорезонансных явлений, перехода однофазных замыканий в многофазные [7].

Однако для выполнения компенсации ёмкостных токов с помощью ДГР следует дополнительно выделить отдельную ячейку в РУ, нейтралеобразующий трансформатор (фильтр нулевой последовательности). Дополнительно в нейтраль этого преобразователя напряжения необходимо подключить через разъединитель сам ДГР. Для настройки ДГР в резонанс с ёмкостью сети следует предусмотреть также шкаф управления. Естественно, всё это стоит немалых затрат. Например, только шкаф управления ДГР в некоторых случаях обходится заказчику дороже, чем нейтралеобразующий трансформатор и ДГР вместе взятые.

На рис. 1 приведена схема подключения ДГР в сеть 6–35 кВ. На рис. 2 представлены различные варианты схемы выполнения нейтрали сети 6–35 кВ [7, 13].

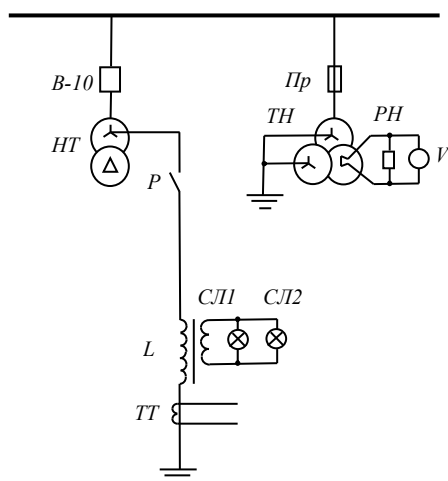


Рис. 1. Схема подключения дугогасящего реактора к шине подстанции:
В – высоковольтный выключатель; *НТ* – нейтралеобразующий трансформатор;
Р – разъединитель; *L* – дугогасящий реактор; *Пр* – предохранитель;
ТН – трансформатор напряжения; *ТТ* – трансформатор тока; *РН* – реле напряжения;
СЛ1, СЛ2 – сигнальные лампы

В мировой практике широкое распространение получили сети с резистивным заземлением нейтрали (рис. 2, *д–ж*) [13]. Использование варианта, представленного на рис. 2, *е*, встречается довольно редко, так как он требует специального трансформатора.

Различают низкоомное и высокоомное заземление нейтрали [2, 3, 6, 13–15].

Резистивное заземление нейтрали исключает возможность возникновения перемежающейся дуги при однофазном замыкании на землю, ограничивает перенапряжения на неповреждённых фазах, уменьшает кратность бросков ёмкостного тока, появляется возможность создания селективной защиты от однофазных замыканий [3].

Высокоомные резисторы в основном применяются в сетях с малыми значениями ёмкостных токов (5–10 А) [3]. Применение низкоомных резисторов

наблюдается на станциях в сетях генераторного напряжения с малым значением ёмкостных токов (около 5 А), а величина резистора выбирается исходя из условия обеспечения селективности защиты от однофазных замыканий на землю¹ [6].

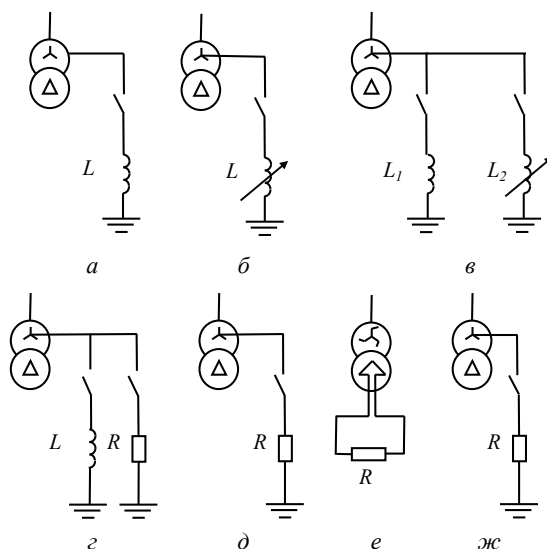


Рис. 2. Схемы выполнения компенсации в сети 6-35 кВ:

- a* – с помощью ступенчатого ДГР; *б* – с помощью ДГР с плавным регулированием;
- в* – с помощью ступенчатого и плавного ДГР; *г* – совместное применение ДГР и резистора;
- д* – с помощью резистора; *е* – с помощью подключения резистора в треугольник;
- ж* – с помощью подключения резистора в трансформатор нулевой последовательности

Низкоомное резистивное заземление нейтрали сети осуществляют с применением специального трансформатора заземления нейтрали со схемой соединения обмоток Y_0/Δ (рис. 2, *д*) либо с помощью фильтра нулевой последовательности (рис. 2, *ж*).

В Чувашской энергосистеме компенсация ёмкостных токов до 2000 г. преимущественно осуществлялась с помощью ДГР со ступенчатым регулированием (рис. 2, *а*). В данное время на многих подстанциях в нейтралях нейтралеобразующих трансформаторов установлены ДГР с плавным регулированием (рис. 2, *б*). Однако в некоторых случаях используется совместное применение ступенчатого (L_1) и плавного (L_2) ДГР (рис. 2, *в*). Резистивное заземление в Чувашской энергосистеме, как во многих других энергосистемах, не применяется.

Несмотря на это, за весь период эксплуатации сетей 6–35 кВ в Чувашской энергосистеме после установки ДГР практически не было случаев выхода электрооборудования из строя при однофазном замыкании на землю.

¹ СТО 18-2013. Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6–35 кВ: стандарт организации ОАО «Ленэнерго» [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293744/4293744502.pdf> (дата обращения: 01.05.2021).

В конце прошлого века был единственный случай с перекрытием изоляции на подстанции 110/6 кВ «Алатырская» и последующим разрушением трёх отходящих ячеек 6 кВ после операции выключателем оперативным персоналом без предварительного отключения разъединителя, питающего реактор. Дело в том, что согласно инструкции по эксплуатации ДГР запрещается операция выключателем при включённом разъединителе для перевода реактора с одного на другое положение.

По мнению авторов статьи, компенсация ёмкостных токов с помощью ДГР является эффективным средством обеспечения устойчивой работы электросетевых и промышленных предприятий энергетики с меньшими издержками, чем таковые при резистивном выполнении сетей 6–35 кВ.

За последние двадцать лет в российской энергетике произошли большие изменения. Если раньше для ВЛ 0,38, 6–35 кВ применялись только неизолированные провода, то сейчас на них всё чаще начали использоваться самонесущие изолированные провода (СИП) [1, 10, 11, 12]. Вместо масляных выключателей устанавливаются вакуумные и элегазовые выключатели, которые имеют большой коммутационный ресурс. Вместо вентильных разрядников стали применяться ОПН, которые защищают электрооборудование не только от грозových волн, набегающих с линий электропередач, но и от коммутационных перенапряжений. Взамен кабелей из резиновой и бумажно-масляной изоляции появились кабели из сшитого полиэтилена, которые имеют в числе прочих достоинств высокую надёжность в эксплуатации и возможность их прокладки при минусовой температуре [12].

ВЛ с СИП имеют большие преимущества перед линиями с неизолированными проводами. Здесь исключаются междуфазные замыкания, отсутствуют замыкания на землю касанием веток деревьев на неизолированные провода, уменьшаются потери напряжения и электроэнергии в линии за счёт уменьшения индуктивного сопротивления фазных проводов, увеличивается безопасность эксплуатации. На ВЛ с СИП существенно меньше гололёдообразование, низка вероятность поражения электрическим током при обслуживании линии во время случайного прикосновения с проводом, имеется возможность размещать линии связи на этих же опорах и т.д. Сегодня в России широко применяются следующие разновидности СИП: СИП-1, СИП-2, СИП-3 и т.д. [12].

Недостатком СИП является более высокая стоимость линий и необходимость установки средств грозозащиты путём монтажа так называемых длинно-искровых промежутков (РДИП) или ОПН с дополнительными искровыми промежутками.

На деле выходит, что если в будущем мы повсеместно вместо голых проводов в сети 6–35 кВ будем использовать СИП, а вместо обычных кабелей – кабели из сшитого полиэтилена, то надёжность электроснабжения потребителей вырастет в разы. В этом случае сети с этими классами напряжения можно будет выполнить с глухим заземлением нейтрали. Тогда любое повреждение изоляции одной фазы приведёт к однофазному КЗ с последующим отключением потребителя. Такое решение будет оправдано тогда, когда

издержки на установку и эксплуатацию устройств компенсации будет значительно дороже, чем ущерб от возможного недоотпуска электроэнергии [5, 9].

Такие страны, как Австралия, США, Канада, Испания, уже применяют подобные сети с глухозаземлённой нейтралью [13]. Так, например, для уменьшения потерь на ВЛ в США каждый частный дом питается от собственного понижающего трансформатора 13,8/0,12 кВ. Питающий трансформатор включён на фазное напряжение. Здесь ВЛ делится на участки секционируемыми аппаратами – реклоузерами. Трансформаторы каждого отдельного потребителя и ответвления от линии защищаются предохранителями. На отпайках от линии используются отделители, обеспечивающие отключение в бестоковую паузу (см. рис. 3) [13].

Однако этот способ заземления нейтрали в этих странах не используется в сетях, содержащих высоковольтные электродвигатели, так как токи однофазного КЗ в этом случае могут достигать больших величин, что недопустимо с позиций повреждения статора электродвигателя [6].

В последние годы электроэнергетика семимильными шагами движется в направлении цифровизация подстанций [8]. Значит, будут широко использоваться микропроцессорная защита электрооборудования и автоматическая система управления электроснабжения потребителей, в том числе мультисервисная распределительная сеть на основе применения самонесущих изолированных проводов со встроенным оптоволоконном [1, 10]. На рис. 4 показаны основные элементы СИП со встроенным оптоволоконном.

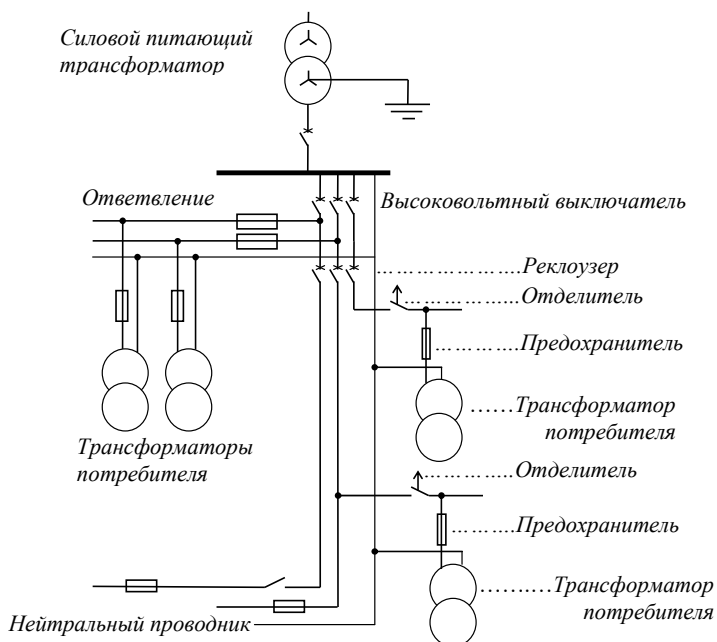


Рис. 3. Сеть с глухозаземлённой нейтралью, используемая в США [13]

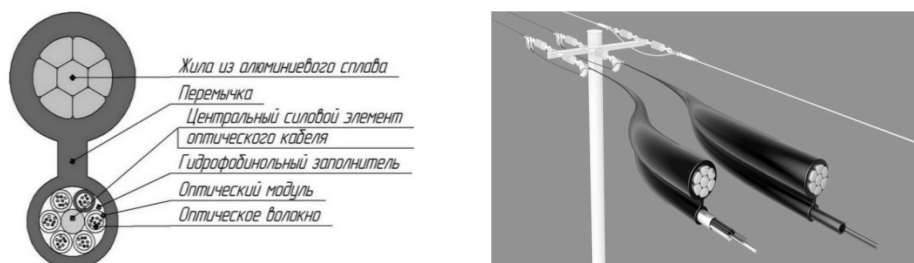


Рис. 4. Поперечный разрез СИП-3/ВОК 24-П 1×70-20 со встроенным оптоволоком

Все эти мероприятия могут подтолкнуть к изменению системы нейтрали электрических сетей.

В дополнение к сказанному следует отметить, что некоторые электросетевые предприятия России переходят на производство работ под напряжением (ПРПН) [4]. Такой метод ремонтных работ на ВЛ позволяет осуществлять бесперебойное энергоснабжение потребителей и подключать к сети новых абонентов. В этом случае потребители не ограничены в энергоснабжении, а электроснабжающая организация не терпит убытков из-за недоотпуска электроэнергии. Данное обстоятельство может свидетельствовать об ускорении процесса перехода сети 6–35кВ от системы изолированной работы нейтралей обмоток силовых трансформаторов к глухому заземлению.

Выводы. 1. Переход режима работы сетей 6–35 кВ с изолированной нейтрали к глухому заземлению возможен при условии повсеместной замены неизолированных проводов на самонесущие изолированные провода, а кабели из резиновой и бумажно-масляной изоляции – на кабели из сшитого полиэтилена.

2. Внедрение микропроцессорной защиты электрооборудования, автоматической системы управления электроснабжения потребителей, а также производство работ под напряжением в сетях 6–35 кВ может способствовать ускорению процесса перехода работы этих сетей к глухому заземлению нейтрали.

3. Решение перехода от системы с изолированной нейтралью к глухому заземлению должна принимать проектная организация исходя из особенностей работы электрооборудования и сферы производственной деятельности.

Литература

1. Атаманов М.Н., Зиганишин А.Г., Михеев Г.М. Развитие мультисервисной распределительной сети 0,38–10 кВ на основе применения самонесущих изолированных проводов со встроенным оптоволоком // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 340–344.

2. Бакиров А.Р., Васильева А.Ю., Ширковец А.И., Телегин А.В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 54. С. 328–334.

3. Бурчевский В.А., Владимиров Л.В., Ощепков В.А., Суриков В.А. Обзор режимов заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Омский научный вестник. 2009. № 1(77). С. 122–126.

4. Галимов А.И., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М., Фардиев И.Ш. Работы под напряжением в электрических сетях // Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт. 2021. № 2 С. 52–59.
5. Ефремов Л.Г., Иванов Д.Е., Михеев Г.М. О структуре потерь при выработке и передаче электроэнергии // Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 71–75.
6. Куликова Н.А., Титаренко О.Н., Тяпкина В.А. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надёжности работы электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–38.
7. Лихачёв Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
8. Михеев Г.М., Зиганшин А.Г. Цифровизация подстанций путём создания системы управления коммутационными аппаратами 6–35 кВ с автоматизированного рабочего места диспетчера // Вестник Чувашского университета. 2021. № 1. С. 78–85. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-78-85.
9. Михеев Г.М., Иванова Т.Г., Зиганшин А.Г. Один из путей уменьшения технологических потерь или к вопросу компенсации емкостного тока // Инновации в образовательном процессе: сб. тр. науч.-практ. конф. / ЧИ МГПУ. Чебоксары, 2019. Вып. 17. С. 16–19.
10. Михеев Г.М., Свешников А.Г., Зиганшин А.Г. Совместное применение самонесущих изолированных проводов и оптоволоконной линии связи в сельской населённой местности // Молодежь и инновации: материалы XVII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Чебоксары, 11-12 марта 2021 года): в 2 ч. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. Ч. 2. С. 62–69.
11. Провод самонесущий изолированный со встроенным волокном, марки СИП-3 А/О [Электронный ресурс]. URL: <http://n-er.ru/provod-sip> (дата обращения: 02.05.2020).
12. Справочная книга электрика / под ред. В.И. Григорьева. М.: Колос, 2004. 746 с.
13. Титенков С. 4 режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона [Электронный ресурс] // Новости электротехники. 2003. № 5(23). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/05.php> (дата обращения: 04.05.2021).
14. Телегин А.В., Ширковец А.И. Проблематика замыканий на землю и режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы и Америки // Релейная защита и автоматизация. 2012. № 3(8). С. 40–50.
15. Ширковец А.И., Хадыев И.Г., Кудряшов Д.С. О переводе сетей 6–10 кВ горных и металлургических предприятий на режим эксплуатации с резистивно-заземлённой нейтралью // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 1. С. 18–25.

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

ЗИГАНШИН АЙРАТ ГАБДУЛХАКОВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1974-1020>).

Georgi M. MIKHEEV, Ayrat G. ZIGANSHIN

THE ABILITY OF MODERN TECHNOLOGIES TO INFLUENCE
THE NEUTRAL MODE OF ELECTRIC GRIDS

Key words: neutral mode of electric networks, isolated neutral network, compensated neutral network, resistive neutral grounding network, single-phase earth fault, compensation of capacitive currents, self-supporting insulated wires, cross-linked polyethylene cables.

In this article, we consider the modes of neutrals of 0,38 to 750 kV networks. In any network with different voltage classes, the neutral point of a power transformer winding can

operate both in isolated and deaf earthed mode. However, the choice of this mode depends on economic feasibility.

The paper presents arguments and advantages of application of system with isolated and compensated neutral of networks with voltage classes 6–35 kV. For networks of these voltage classes various options of connecting arc suppression reactors with step and smooth regulation, as well as low and high impedance resistors in the neutral point of neutralizing transformer or zero sequence filter are considered. On the example of operation of electric networks of the Republic of Chuvashia for many decades it is emphasized that compensation of capacitive currents with arc suppression reactors is an effective and reliable way to protect not only substation electrical equipment from overvoltage, but also to ensure electrical safety of people and animals, as well as reinforced concrete towers from destruction.

It is noted that the 6–35 kV networks in the future can be made with deaf earthed neutral. However, this will be possible under the condition that self-supporting insulated wires will be installed on overhead transmission lines instead of bare wires, and cross-linked polyethylene cables will be used on cable lines. It is emphasized that the introduction of work under voltage in 6–35 kV networks and digitalization of substations with the widespread introduction of microprocessor technology will accelerate the transition from a system with insulated (or compensated) neutral to a deaf earthed system. Nevertheless, the decision to switch from the insulated neutral system to a deaf earthed system will remain the prerogative of the design organization based on the specifics of the electrical equipment and the sphere of industrial activity.

References

1. Atamanov M.N., Ziganshin A.G., Mikheev G.M. *Razvitie mul'tiservisnoi raspreditel'noi seti 0,38–10kV na osnove primeneniya samonesushhikh izolirovannykh provodov so vstroennym optovoloknom* [Development of multiservice 0,38–10 kV distribution network based on the application of self-supporting insulated wires with integrated optical fiber]. In: *Informacionnye tehnologii v jelektrotehnike i jelektrojenergetike: materialy XII Vseros. nauch.-tehn. konf.* [Proc. of 12th Russ. Sci. Conf. «Information technologies in electrical engineering and power engineering»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2020, pp. 340–344.
2. Bakirov A.R., Vasil'eva A.Yu., Shirkovec A.I., Telegin A.V. *Opyt primeneniya rezistivnogo zazemleniya neitrali v setyakh 6–10 kV gornorudnoi promyshlennosti.* [Experience in using resistive neutral grounding in 6–10 kV networks of mining industry]. *Gornyi informacionno-analiticheskii byulleten'*, 2011, no. 54, pp. 328–334.
3. Burchevskii V.A., Vladimirov L.V., Oshhepkov V.A., Surikov V.A. *Obzor rezhimov zazemleniya neitrali v elektricheskikh setyakh 6–35 kV* [Review of the neutral grounding modes in 6–35 kV networks]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2009, no. 1(77), pp. 122–126.
4. Galimov A.I., Ziganshin A.G., Mikheev G.M., Fardiev I.Sh. *Raboty pod napryazheniem v elektricheskikh setyakh* [Work under voltage in electrical networks]. *Elektrooborudovanie: Ekspluatatsiya i remont*, 2021, no. 2, pp. 52–59.
5. Efremov L.G., Ivanov D.E., Mikheev G.M. *O strukture poter' pri vyrabotke i peredache elektroenergii* [About the loss structure during the electrical energy generation and transmission]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2011, no 3, pp. 71–75.
6. Kulikova N.A., Titarenko O.N., Tyapkina V.A. *Rezistivnoe zazemlenie neitrali – sposob povysheniya nadezhnosti raboty elektricheskikh setei 6–35 kV* [Resistive neutral grounding – a way to improve the reliability of electrical networks 6–35 kV]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 32–38.
7. Likhachov F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neitral'yu i s kompensaciei emkostnykh tokov* [Ground faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents]. Moscow, Energiya Publ., 1971, 152 p.
8. Mikheev G.M., Ziganshin A.G. *Cifrovizatsiya podstancii putem sozdaniya sistemy upravleniya kommutatsionnymi apparatami 6–35 kV s avtomatizirovannogo rabocheho mesta dispetchera* [Digitalization of substations by creation of control system of switching devices 6–35 kV from the automated work-

place of the dispatcher]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 78–85. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-78-85.

9. Mikheev G.M., Ivanova T.G., Ziganshin A.G. *Odin iz putei umen'sheniya tekhnologicheskikh poter' ili k voprosu kompensacii emkostnogo toka* [One of the ways to reduce technological losses or to the issue of capacitive current compensation]. In: *Innovacii v obrazovatel'nom processe: sbornik trudov nauch.-prakt. konf.* [Proc. of Sci. and Pract. Conf. «Innovations in the educational process»]. Cheboksary, 2019, iss. 17, pp. 16–19.

10. Mikheev G.M., Sveshnikov A.G., Ziganshin A.G. *Sovmestnoe primenenie samonesushkikh izolirovannykh provodov i optovolonnoi linii svyazi v sel'skoi naselelnoi mestnosti* [Joint application of self-supporting insulated wires and fiber-optic communication line in rural area]. In: *Molodezh' i innovacii: materialy XVII Vseros. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (g. Cheboksary, 11-12 marta 2021 goda) : v 2 ch. Ch.2.* [Proc. Of 17th Russ. Sci. Conf. «Youth and innovation». 2 parts. Part 2]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2021, pp. 62–69.

11. *Provod samonesushchii izolirovannyi so vstroennym voloknom, marki SIP-3 A/O* [Self-supporting insulated wire with built-in fiber, brand SIP-3 A/O]. Available at: <http://n-er.ru/provod-sip>.

12. Grigorev V.I., ed. *Spravochnaya kniga elektrika* [Electrician's Reference Book]. Moscow, Kolos Publ., 2004, 746 p.

13. Titenkov S. *4 rezhima zazemleniya neutrali v setyakh 6–35 kV. Izolirovannuyu neutral' ob'yavim vne zakona* [4 modes of neutral grounding in 6–35 kV networks. Isolated neutral is outlawed]. *Novosti elektrotehniki*, 2003, no. 5(23). Available at: <https://www.news.eltekh.ru/arh/2003/23/05.php>.

14. Telegin A.V., Shirkovec A.I. *Problematika замыкания на землю и режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы и Америки* [Problematics of the earth fault and a neutral grounding regime in the medium-voltage networks of European and American countries]. *Releynaya zashhita i avtomatizatsiya*, 2012, no. 3(8), pp. 40–50.

15. Shirkovec A.I., Hadyev I.G., Kudrjashov D.S. *O peregode setei 6–10 kV gornykh i metallurgicheskikh predpriyatii na rezhim ekspluatacii s rezistivno-zazemlennoi neutral'yu* [On the transfer of 6–10 kV networks of mining and metallurgical enterprises to the operation mode with resistive-earthed neutral point]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2016, no. 1, pp. 18–25.

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

AYRAT G. ZIGANSHIN – Post-Graduate Student of Electric Power Industry Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1974-1020>).

Формат цитирования: Михеев Г.М., Зиганшин А.Г. Возможность влияния современных технологий на режим нейтрали электрических сетей // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 103–112. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-103-112.