

Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии для повышения надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем

Александр М. Конюхов¹, Александр В. Хлебнов¹, Виталий А. Тиманов^{2*}

¹ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ», Москва, Российская Федерация, ²АО «Силовые машины», Москва, Российская Федерация

*vitaliy@timanov.ru



Александр М.
Конюхов



Александр В.
Хлебнов



Виталий А.
Тиманов

Резюме. Цель статьи – показать, что повышение надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем производится путем применения новых способов проверки релейной защиты и автоматики (РЗА). Возникновение крупных каскадных аварий в электроэнергетических системах является следствием каскадного воздействия, т.е. воздействия, включающего в себя несколько последовательных воздействий различной природы. Каскадное воздействие позволяет расширить функционал при проверке РЗА и учесть временной фактор при воздействиях различной природы. **Метод.** Предложен способ проверки релейной защиты и автоматики, учитывающий каскадное воздействие, который применяется при разработке, калибровке и установке приборов защиты для работы при заранее определенных режимах с целью повышения надежности электроснабжения и сохранения устойчивости электроэнергетической системы. **Результат.** Каскадное воздействие с интервалами времени не позволяет релейной защите и автоматике вывести электроэнергетическую систему из послеаварийного режима, снижая уровень динамической устойчивости до критического. Схема воздействия на релейную защиту и автоматику позволяет учесть воздействие внешней среды при проверке релейной защиты и автоматики. **Вывод.** Предложенный способ каскадного воздействия при проверке релейной защиты и автоматики может быть применен при разработке, калибровке и установке защиты электроэнергетических систем и позволит повысить устойчивость электроэнергетических систем и надежность электроснабжения.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, каскадное воздействие, электроэнергетическая система, устойчивость, надежность, нормальный режим, аварийный режим, послеаварийный режим, аварийный режим с потерей устойчивости.

Для цитирования: Конюхов А.М., Хлебнов А.В., Тиманов В.А. Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии для повышения надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем // Надежность. 2021. №4. С. 47-52. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-47-52>

Поступила 05.07.2021 г. / После доработки 17.11.2021 г. / К печати 14.12.2021

Введение

Системы защиты и противоаварийного управления позволяют достаточно быстро локализовать поврежденный участок и вывести его из работы, сохранив (с минимальными потерями) работоспособность системы. Вместе с тем, имеют место крупные системные (каскадные) аварии, сопровождающиеся отключением большого количества потребителей, нарушением параллельной работы электростанций и энергосистем.

Предпосылками масштабной энергетической катастрофы 14 августа 2003 года в США явилось опережение развития структуры электроэнергетической системы имеющих возможностей системы управления. При крупной каскадной аварии 25 мая 2005 года в Москве – отсутствие отдельных классов защиты и недостаточное внимание к природе системных (каскадных) аварий [1, 2].

Масштаб, социальные и экономические последствия таких аварий зависят от учета их характера на этапах разработки, создания и проверки способов и средств защиты электроэнергетических систем.

Электроэнергетическая система – та часть энергетической системы, в которой теплота и различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию, передаваемую на расстояние, распределяемую по потребителям, где она вновь преобразуется [3].

Надежность электроснабжения – это способность электрической системы снабжать присоединенных к ней потребителей электрической энергией заданного качества в любой интервал времени [4].

Под устойчивостью электроэнергетической системы понимают способность системы восстанавливать исходный режим после его возмущения $Y_{ст}$, $Y_{днн}$ [3, 5, 6].

Релейная защита и автоматика – релейная защита, сетевая автоматика, противоаварийная автоматика, ре-

жимная автоматика, регистраторы аварийных событий и процессов, технологическая автоматика объектов электроэнергетики [7].

Будем рассматривать РЗА как единую систему, представляющую собой совокупность взаимосвязанных подсистем релейной защиты, автоматики и регистраторов аварийных событий и процессов, функционирующих совместно или отдельно для решения на всех уровнях задач сохранения работоспособности оборудования и его защиты, управления и мониторинга режимов с целью надежного электроснабжения и сохранения устойчивости электроэнергетической системы (рис. 1).

Каждое воздействие на электроэнергетическую систему приводит к падению уровня устойчивости (рис. 2). Роль релейной защиты и автоматики в этом случае сводится к восстановлению нормального режима работы системы, связанному именно с повышением устойчивости.

Повторение цикла воздействий приводит к постепенному падению уровня устойчивости электроэнергетической системы до такого, который можно назвать критическим $Y_{кр}$, а сама электроэнергетическая система

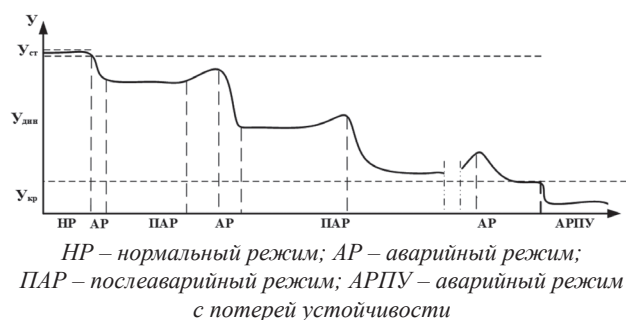


Рис. 2. График падения уровня устойчивости электроэнергетической системы при многократных воздействиях

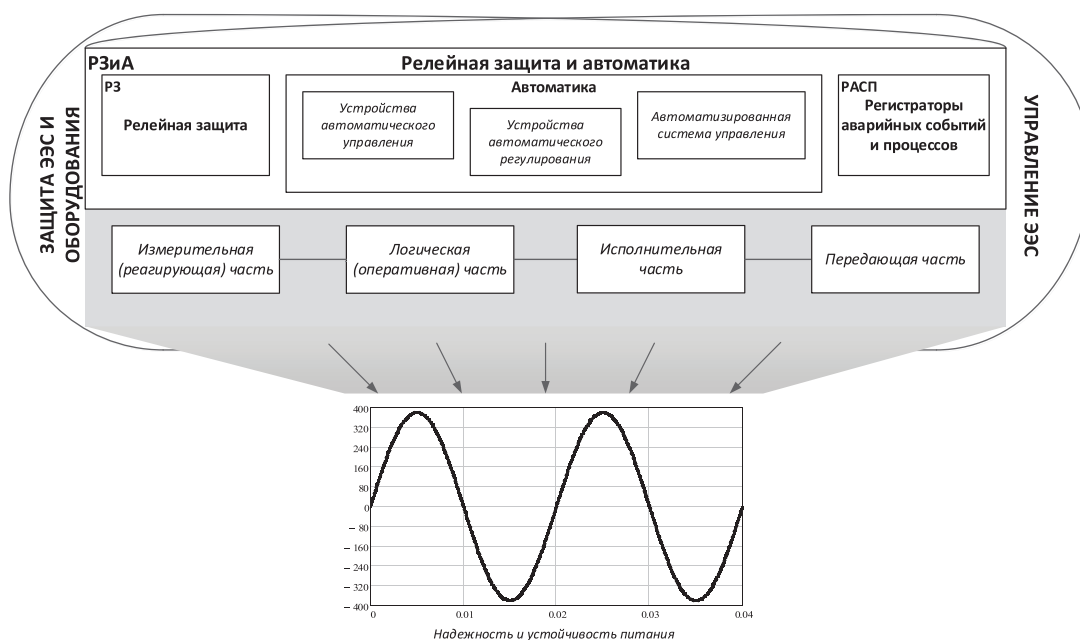


Рис. 1. Релейная защита и автоматика: состав; цели

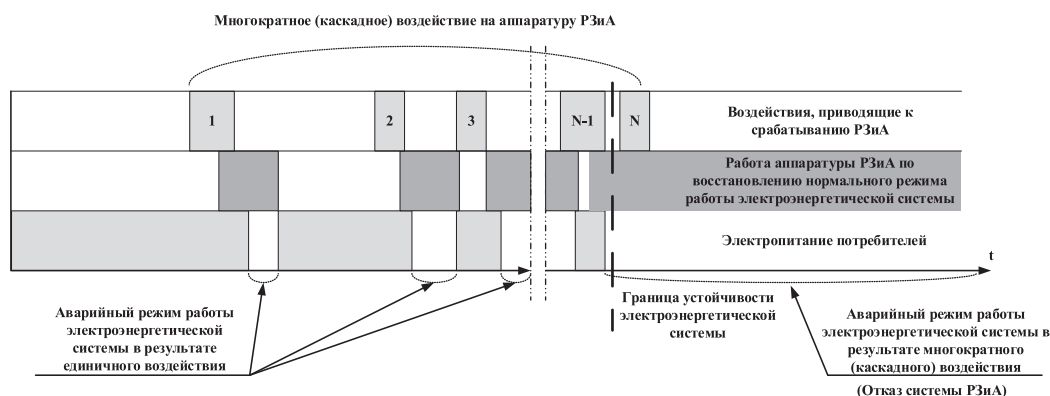


Рис. 3. Диаграмма работы аппаратуры релейной защиты и автоматики при электропитании потребителей при воздействиях, приводящих к ее срабатыванию

переходит в аварийный режим с потерей устойчивости (АРПУ), при котором релейная защита и автоматика не способны восстановить ее нормальную работу.

Сами воздействия при этом повторении являются многократными и носят различную природу. Такие многократные воздействия являются каскадным воздействием, т.е. воздействием, включающим в себя несколько последовательных воздействий различной природы.

Так как работоспособное состояние – это состояние объекта, при котором он способен выполнять (или выполняет) заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией [4], а при наступлении АРПУ электроэнергетическая система не способна выполнять свою основную функцию по передаче электрической энергии потребителю, следовательно, АРПУ является отказом системы. При этом отказ будет прежде всего связан с работой релейной защиты и автоматики именно как единой системы, представляющей собой совокупность взаимосвязанных подсистем релейной защиты, автоматики и регистраторов аварийных событий и процессов (рис. 3).

Существует большое количество как средств, так и способов построения и проверки РЗА [8, 9]. Однако они функционально ограничены областью применения и не предусматривают многократного воздействия на систему при каскадных авариях.

Повышение надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем достигается путем расширения функционала проверки РЗА на этапах разработки, калибровки и установки приборов защиты.

1. Воздействия на релейную защиту и автоматику

Схема воздействия на релейную защиту и автоматику (рис. 4) включает в себя прямое воздействие внешней среды на релейную защиту и автоматику, воздействие внешней среды через электрооборудование электроэнергетической системы и воздействие со стороны электрооборудования.



Рис. 4. Схема воздействия на релейную защиту и автоматику

К прямым воздействиям со стороны внешней среды на релейную защиту и автоматику можно отнести кибератаки на микропроцессорную технику и электронику терминалов; умышленное невыполнение команд диспетчера оперативным персоналом, физическое повреждение аппаратуры релейной защиты и автоматики.

Воздействия внешней среды через электрооборудование электроэнергетической системы на релейную защиту и автоматику включают преднамеренные воздействия – террористические атаки на объекты электроэнергетической системы; применение специального оружия в виде графитовых боеприпасов в ходе вооруженных конфликтов; вандальные действия, связанные с кражей металлоконструкций высоковольтных линий электропередачи и элементов оборудования подстанций, неоднократные расстрелы гирлянды изоляторов линий электропередачи, и случайные воздействия – стихийные погодные явления (обрыв и замыкания проводов из-за сильного ветра, падения деревьев и различных конструкций, короткие замыкания в результате удара молнии, разрушение опор линий электропередачи из-за землетрясений, наводнений, пожаров, оползней и т. п.); несоблюдение вертикальных габаритов строительной и другой тяжелой техники при прохождении под воздушной линией электропередачи; падение на воздушные линии и открытые распределительные устройства легкомоторных самолетов, бес-

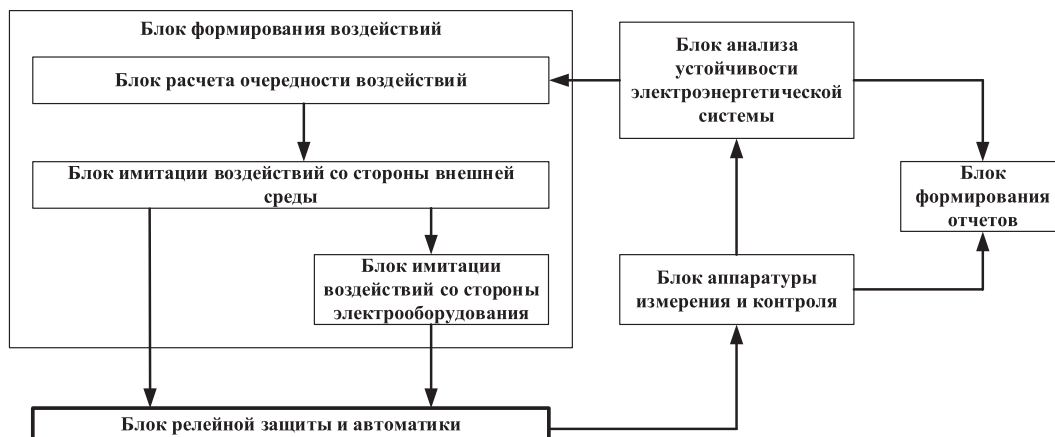


Рис. 5. Блок-схема проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии

пилотных летательных аппаратов и воздушных шаров; ошибки оперативного и диспетчерского персонала при обслуживании, эксплуатации и оперативных переключениях на объектах электроэнергетики.

К воздействиям со стороны электрооборудования электроэнергетической системы, которые приводят к срабатыванию релейной защиты и автоматики, относятся отказы оборудования, отражающие недостатки эксплуатации, дефекты ремонта, дефекты изготовления, истощение ресурса (износ), перегрузки сети (потребление электроэнергии превышает расчетные нормы).

2. Проверка релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии

При разработке, калибровке и установке приборов защиты для работы при заранее определенных режимах проверка релейной защиты и автоматики при каскадном

воздействии осуществляется с учетом изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы и воздействия внешней среды [10].

Она заключается в совокупности действий, реализующих отдельные функции, с установленной последовательностью (рис. 5).

Электронергетическая система функционирует в нормальном режиме НР до момента начала первого воздействия. Обеспечивается ее статическая устойчивость $Y_{ст}$ (рис. 6).

В блоке расчета очередности воздействий формируется команда на начало воздействия. При этом в блоке имитации воздействий со стороны внешней среды формируется первая команда выбора воздействия на релейную защиту и автоматику через электрооборудование.

Затем в блоке имитации воздействий со стороны электрооборудования формируется команда на имитацию воздействия на блок релейной защиты и автоматики со стороны электрооборудования. Имитируется

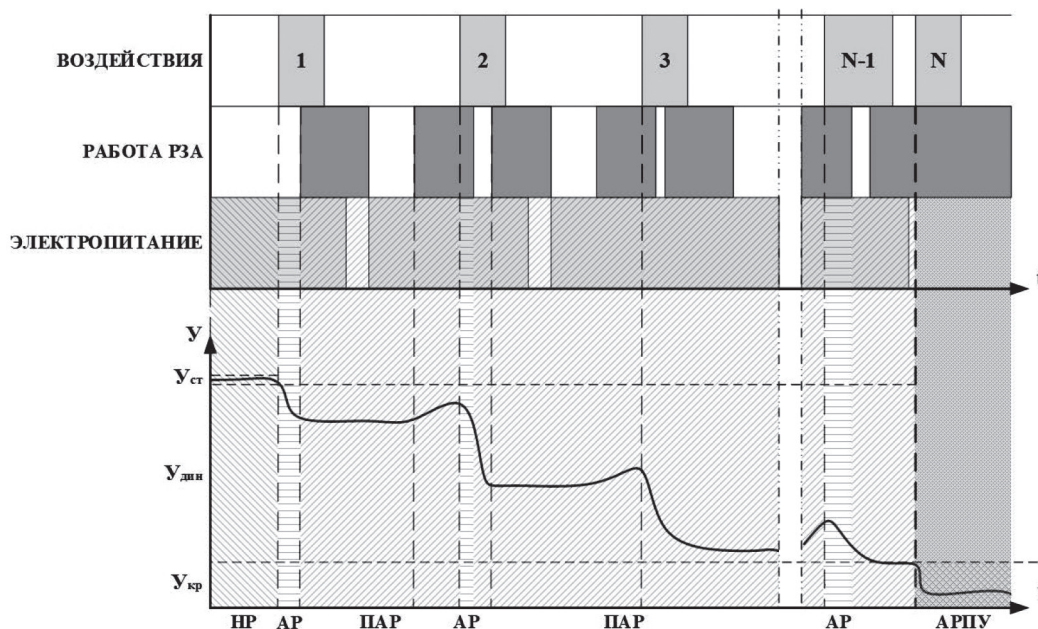


Рис. 6. Совмещенный график падения уровня устойчивости электроэнергетической системы при каскадных воздействиях и диаграмма проверки аппаратуры релейной защиты и автоматики при электропитании потребителей при каскадных воздействиях

функционирование электроэнергетической системы в аварийном режиме АР.

В блоке релейной защиты и автоматики производится отработка алгоритма защиты, соответствующего характеру воздействия. Срабатывая по своему функциональному назначению, релейная защита и автоматика ликвидируют аварийный режим АР и начинают выполнять последовательность действий по восстановлению нормального режима НР в электроэнергетической системе и поднятию уровня устойчивости. При этом электроэнергетическая система находится в послеаварийном режиме ПАР. Информация о состоянии элементов релейной защиты и автоматики, а также информация, отражающая состояние электроэнергетической системы, исходя из оценки выходных параметров релейной защиты и автоматики, поступает в блок аппаратуры измерения и контроля.

В блоке анализа устойчивости электроэнергетической системы входящая информация обрабатывается, и на ее основе происходит оценка изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

Энергетическая система функционирует в послеаварийном режиме ПАР. Обеспечивается ее динамическая устойчивость $Y_{дин}$.

Далее в блоке расчета очередности воздействий формируется команда на начало второго воздействия с учетом времени, при котором релейная защита и автоматика не успевают выполнить полностью последовательность действий по восстановлению нормального режима НР электроэнергетической системы. В блоке имитации воздействий со стороны внешней среды формируется вторая команда выбора воздействия на релейную защиту и автоматику через электрооборудование и в блоке имитации воздействий со стороны электрооборудования формируется команда на имитацию воздействия на блок релейной защиты и автоматики со стороны электрооборудования.

Имитируется функционирование электроэнергетической системы в аварийном режиме АР.

В блоке релейной защиты и автоматики производится отработка алгоритма защиты, соответствующего характеру воздействия. Релейная защита и автоматика ликвидируют аварийный режим АР и начинают выполнять последовательность действий по восстановлению режима в электроэнергетической системе и поднятию уровня устойчивости. При этом электроэнергетическая система находится в послеаварийном режиме ПАР. Информация о состоянии элементов релейной защиты и автоматики, а также информация, отражающая состояние электроэнергетической системы, исходя из оценки выходных параметров релейной защиты и автоматики, поступает на вход блока аппаратуры измерения и контроля.

В блоке анализа устойчивости электроэнергетической системы входящая информация обрабатывается, и на ее основе происходит оценка изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

Энергетическая система продолжает функционировать в послеаварийном режиме ПАР. Обеспечивается ее динамическая устойчивость $Y_{дин}$.

В блоке расчета очередности воздействий формируется команда на начало следующего воздействия с учетом времени, при котором релейная защита и автоматика не успевают выполнить полностью последовательность действий по восстановлению нормального режима электроэнергетической системы. А в блоке имитации воздействий со стороны внешней среды формируется следующая команда выбора воздействия на релейную защиту и автоматику со стороны внешней среды, а также команда на имитацию воздействия на блок релейной защиты и автоматики со стороны внешней среды.

Имитируется сбой в работе релейной защиты и автоматики, возникающий в результате воздействия на нее из внешней среды. При этом происходит сбой в процессе восстановления режима и падение уровня устойчивости электроэнергетической системы, которая продолжает находиться в послеаварийном режиме ПАР.

В блоке анализа устойчивости электроэнергетической системы входящая информация обрабатывается, и на ее основе происходит оценка изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

В блоке формирования отчетов формируется отчет о текущем состоянии релейной защиты и автоматики и об оценке уровня устойчивости электроэнергетической системы.

В блоке аппаратуры измерения и контроля выполняется измерение параметров РЗА, оценка полноты выполнения требований по необходимому количеству воздействий и их последовательности, а также сравнение достигнутых и заданных параметров, для принятия решения по дальнейшему воздействию.

В блоке расчета очередности воздействия последовательность воздействий определяется из совокупности условий по времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{НВ}^1 > 0, \\ t_{НЗ}^1 < t_{ОВ}^1 < t_{НКНЭ}^1, \\ t_{НЗ}^2 < t_{НВ}^2 < t_{ОЗ}^2, \\ t_{НЗ}^3 < t_{ОВ}^2 < t_{НКНЭ}^2, \\ t_{НЗ}^3 < t_{НВ}^3 < t_{ОВ}^3, \\ t_{НЗ}^4 < t_{ОВ}^3 < t_{ОЗ}^3, \\ \dots, \\ t_{НЗ}^{N-1} < t_{ОВ}^{N-1} < t_{НКНЭ}^{N-1}, \\ t_{НЗ}^N < t_{ОВ}^{N-1}, \\ t_{НАРПУ} \leq t_{НВ}^N. \end{array} \right. \quad (1)$$

где $t_{НВ}^1, t_{НВ}^2, \dots, t_{НВ}^N$ – время начала воздействия, $t_{ОВ}^1, t_{ОВ}^2, \dots, t_{ОВ}^N$ – время окончания воздействия, $t_{НЗ}^1, t_{НЗ}^2, \dots, t_{НЗ}^N$ – время начала работы защиты (релейной защиты и автоматики), $t_{ОЗ}^1, t_{ОЗ}^2, \dots, t_{ОЗ}^N$ – время окончания работы защиты (релейной защиты и автоматики), $t_{НКНЭ}^1, t_{НКНЭ}^2, \dots, t_{НКНЭ}^N$ – время начала кратковременного нарушения электроснабжения после воздействия и срабатывания защиты (релейной

защиты и автоматики), $t_{\text{НАРПУ}}$ – время начала аварийного режима с потерей устойчивости.

Содержание блоков представляет собой любую последовательность действий или любой метод, относящийся к функциональному содержанию блока.

Заключение

Как было сказано выше, повторение цикла воздействий приводит к постепенному падению уровня устойчивости электроэнергетической системы, что в конечном итоге приводит тому, что после N -го воздействия уровень устойчивости падает до критического $Y_{\text{кр}}$, а сама электроэнергетическая система переходит в аварийный режим с потерей устойчивости АРПУ, при котором релейная защита и автоматика не способны восстановить ее нормальную работу.

Таким образом, каскадное воздействие с интервалами времени, не позволяющими релейной защите и автоматике вывести электроэнергетическую систему из послеаварийного режима, позволяет снизить уровень динамической устойчивости до критического, а применение схемы воздействия на релейную защиту и автоматику позволяет учесть воздействие внешней среды при проверке релейной защиты и автоматики. Кроме того, способ каскадного воздействия при проверке релейной защиты и автоматики является важной составляющей в разработке, калибровке и установке защиты электроэнергетических систем, которые позволят повысить устойчивость электроэнергетической системы и надежность электроснабжения.

Библиографический список

1. Kundur P. Power System Security in the New Industry Environment: Challenges and Solutions // IEEE Toronto Centennial Forum on Reliable Power Grids in Canada, October 3, 2003.
2. Отчет по расследованию аварии в ЕЭС России, произошедшей 25 мая 2005 года // Комиссия ОАО РАО «ЕЭС России», назначенная приказом № 331. Москва, 18 июня 2005 г.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
4. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. Ростов-на Дону: «Терра Принт», 2007. 128 с.
5. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
6. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
7. ГОСТ Р 55438-2013. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

8. Патент 2355090. Российская Федерация, МПК H02N 3/08. Способ быстросрабатывающей максимальной токовой защиты электрических цепей: № 2007134556/09: заявл. 17.09.2007; опубл. 10.05.2009 Бюл. № 13 / Г.Н. Гапоненко, А.С. Кобозев, В.В. Омельченко.

9. А.с. 1675964. СССР, МПК G01R 31/08. Способ проверки уставки срабатывания релейной защиты высоковольтных присоединений: № 4679319/21: заявл. 14.04.1989; опубл. 15.09.1991 Бюл. № 34 / А.П. Кузнецов, В.Г. Гловацкий, А.К. Белотелов.

10. Заявка на изобретение №2020126824 от 11.08.2020. Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии. / Д.Н. Удинцев, А.В. Хлебнов, С.А. Смоголев, А.М. Конюхов.

Сведения об авторах

Александр Викторович Хлебнов – кандидат технических наук, доцент, докторант ВУНЦ СВ «ОБА ВС РФ», Москва, Российская Федерация, e-mail: xlebnovav@mail.ru.

Александр Михайлович Конюхов – кандидат технических наук, научный сотрудник ВУНЦ СВ «ОБА ВС РФ», Москва, Российская Федерация, e-mail: kam90@mail.ru.

Виталий Анатольевич Тиманов – ведущий инженер по электротехническому оборудованию Дивизион ЕРС Управление инженерного сопровождения АО «Силовые машины», Москва, Российская Федерация, e-mail: vitaliy@timanov.ru.

Вклад авторов в статью

Конюхов А.М. Проведен анализ изменения устойчивости электроэнергетической системы и ее влияния на надежность электроснабжения при воздействиях на релейную защиту и автоматику, а также совмещение процессов при каскадном воздействии, работы аппаратуры релейной защиты и автоматики при электропитании потребителей при воздействиях, приводящих к ее срабатыванию и изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

Хлебнов А.В. Проведен анализ крупных каскадных аварий в электроэнергетических системах, а также, анализ и структуризация воздействий на релейную защиту. Составлена схема воздействий на релейную защиту и автоматику.

Тиманов В.А. Построена последовательность проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии с учетом изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы и воздействия внешней среды на релейную защиту и автоматику. Составлена блок-схема проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.