

DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-142-155

УДК 621.317.421:621.391.82

ББК 31.222

М.Г. ПОПОВ, А.А. ДАУТОВ, П.Н. МАНЬКОВ,
А.А. МЕЛЬНИКОВ, К.С. ГОРЯЧЕВСКИЙ**АВТОМАТИКА РАЗГРУЗКИ
МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
С КОРРЕКЦИЕЙ ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИК СРАБАТЫВАНИЯ**

Ключевые слова: объединенные энергосистемы, установившиеся режимы, нестационарные режимы, автоматика разгрузки по мощности, противоаварийная автоматика, Real Time Digital System, корректировка параметров срабатывания противоаварийной автоматики.

В условиях сложной структуры современных электрических сетей особое внимание уделяется вопросам безотказной работы противоаварийной автоматики. Данная статья посвящена задачам повышения чувствительности и селективности автоматики разгрузки линии электропередачи, корректная работа которой играет важную роль в обеспечении энергобезопасности и живучести энергосистем.

В рамках данной работы рассматривается полный цикл разработки алгоритма противоаварийной автоматики, выполняющей функцию автоматики разгрузки по активной мощности линий электропередачи, который включает задачи предварительной оценки режимов работы электрооборудования, обоснование выбора параметров срабатывания автоматики, проектирования алгоритма и реализации на базе программируемых логических контроллеров, а также проведение лабораторных испытаний с применением программно-аппаратного комплекса реального времени.

Представленные в статье результаты расчетов установившихся и переходных режимов работы силового электрооборудования выполнены в программных комплексах *RastrWin*, *Rustab*. В качестве моделируемых объектов энергосистем рассматривались энергообъекта объединённых энергетических систем Урала, Сибири и Казахстана. На основании полученных результатов были определены параметры срабатывания устройства.

На основании результатов математического моделирования нестационарных режимов работы электрооборудования были определены основные недостатки алгоритма рассматриваемого устройства, выполняющего контроль перетока активной мощности по линии. Также предложены методы, направленные на повышение чувствительности и селективности данной автоматики.

Предложенный алгоритм контролирует переток активной мощности по заданному сечению. Измерения электрических параметров осуществляются на одной из линий в сечении, и на основании эквивалентной схемы происходит расчет суммарного значения перетока активной мощности по сечению. Для повышения чувствительности и селективности автоматики в алгоритме используется корректировка времени срабатывания, которая определяется исходя из предшествующего режима работы. Рассматриваемый в данной статье алгоритм автоматики разгрузки при перегрузке по линии был реализован на базе программируемых логических контроллеров в соответствии со стандартом МЭК 61131. Полученное устройство было успешно протестировано на программно-аппаратном комплексе реального времени. В статье представлены результаты испытания работы устройства, а также параметры используемой математической модели.

Введение и постановка задачи исследований. Объединение энергосистем позволяет обеспечить надежное электроснабжение потребителей за счет резервирования генерирующих мощностей и, как следствие, снижение нагрузки на электростанции и линии связи с центральной энергосистемой.

Пропорционально развитию распределительных сетей усложняется их структура, а также повышаются требования к надежности и безотказности. Задача обеспечения устойчивой параллельной работы в современных условиях решается при грамотном планировании и оперативно-диспетчерском управлении режимами работы энергосистем.

Важную роль в обеспечении энергобезопасности и живучести энергосистем играет правильная и селективная работа устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики. Среди последних можно выделить автоматику разгрузки линий электропередачи, которая одна из первых среди противоаварийных мероприятий вводится в действие вблизи границы области устойчивых режимов, определяя в целом надежность параллельной работы объединенных энергосистем (ОЭС) в противоаварийных условиях.

Вопросам повышения чувствительности и селективности устройств защиты и противоаварийной автоматики посвящено множество научных исследований. В частности, как было показано в [2–7, 10–13], на корректную работу устройства автоматики разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) могут оказать влияние процессы, приводящие к возникновению качаний по линиям сечения. Для отстройки от таких режимов можно осуществить корректировку уставки по времени устройства разгрузки. Также при аварийных возмущениях, обуславливающих изменение мощности в контролируемом сечении, существенное влияние на селективную работу автоматики оказывает контроль режимных параметров в предаварийном режиме работы.

Однако в условиях разветвленной структуры электроэнергетической системы достаточно трудно, а иногда невозможно, корректно определить параметры срабатывания для существующих алгоритмов устройств автоматики разгрузки по активной мощности, чтобы обеспечить требуемую чувствительность и селективность.

Для решения данной проблемы авторами предлагается усовершенствованный высокочувствительный алгоритм данной автоматики.

Целью исследования является разработка эффективного, высокочувствительного и селективного алгоритма функционирования автоматики разгрузки по активной мощности линий электропередачи с коррекцией характеристик срабатывания на базе программируемых логических контроллеров.

В рамках данной работы успешно решаются следующие задачи исследования:

- разработка и анализ математических моделей энергосистем выбранных регионов;
- создание нового алгоритма функционирования устройства АРПМ на PLC-системе по стандарту МЭК 61131;
- апробация модернизированного устройства АРПМ с применением программно-технического комплекса реального времени (ПТК РВ).

Результаты и решения указанных задач выносятся на обсуждение в рамках настоящей статьи.

Методология исследования и математическое описание энергообъектов. Объектом исследований является эквивалентная энергосистема, содержащая

энергообъединения Урала, Сибири и Казахстана. Параллельная работа этих ОЭС обеспечивается тремя линиями электропередачи 500 кВ, которые входят в контролируемое сечение «Казахстан-Сибирь-1» (рис. 1).

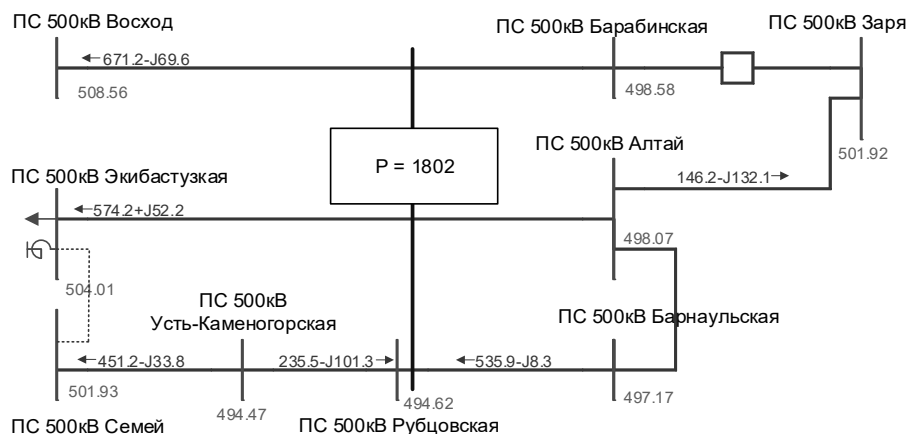


Рис. 1. Аварийно допустимый переток в сечении Казахстан – Сибирь-1

Наиболее мощные электростанции – Рефтинская ГРЭС, Троицкая ГРЭС, Южноуральская ГРЭС-2, Сургутская ГРЭС-1, Сургутская ГРЭС-2, Экибастузская ГРЭС-1, Экибастузская ГРЭС-2, Нижневартовская ГРЭС, Красноярская ГЭС, Назаровская ГРЭС – учитываются как составляющие эквивалентного генератора ОЭС Урала, Сибири и Казахстана.

Нагрузка электропотребителей была распределена между узлами энергорайонов в соответствии с данными сайта «Администратор торговой системы» [1]. Для поддержания напряжения в допустимых границах производились отключение и включение шунтирующих реакторов в узлах схемы.

Исходные данные и электромагнитные параметры моделей силового оборудования электрических сетей были взяты из Схем и программ развития регионов и ЕЭС России¹.

Предметом исследований являются нестационарные режимы работы силового энергооборудования исследуемой эквивалентной энергосистемы и динамические свойства автоматики разгрузки по активной мощности линий электропередачи в этих условиях.

Данные по перетокам активной мощности в сечениях были получены с сайта «Администратор торговой системы» [1], представленные на рис. 2. На основе данных контрольных замеров от 19 июня 2019 г. и 18 декабря 2019 г. активной мощности были определены значения зимнего, летнего максимума и минимума потребления электроэнергии.

¹ Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2017–2023 годы: утв. Приказом Минэнерго России № 143 от 01.03.2017 г. [Электронный ресурс] // Минэнерго России: сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8170>.

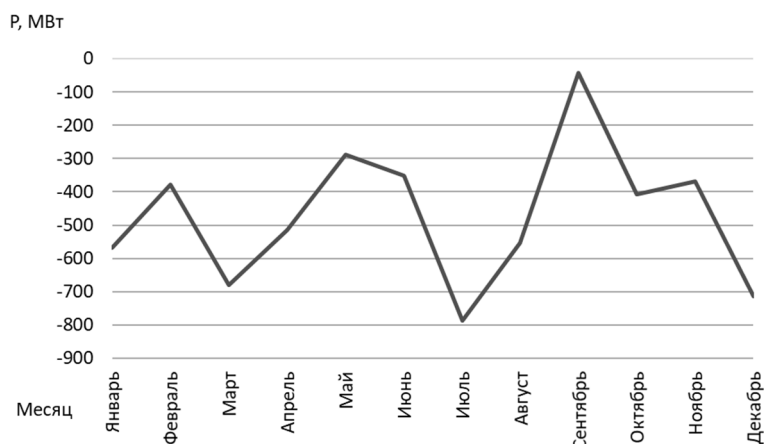


Рис. 2. Переток активной мощности в сечении «Казахстан – Сибирь-1» в течение 2019 г.

Методология исследования заключается в проведении численных экспериментов по исследованию нестационарных режимов работы математических моделей силового оборудования, реализованных в программно-технических комплексах RastrWin, Rustab, RsCad.

Расчетная модель содержит подробное представление близлежащих к сечению «Казахстан – Сибирь-1» районов. Удаленные участки энергосистем представлены в виде эквивалентных узлов.

Для анализа потокораспределения в рассматриваемом сечении и выбора параметров срабатывания устройства была составлена математическая модель для расчетов установившихся режимов в программе RastrWin.

В программе RastrWin такие энергообъекты, как генераторы, нагрузка, шины, распределительные устройства, синхронный компенсатор реактивной мощности и т.д., задаются узлами. Элементы, образующие связь между узлами (ЛЭП, трансформаторы, выключатели и т.п.), задаются ветвями.

Для упрощения процесса моделирования эквивалентная нагрузка задавалась шунтами постоянной мощности с нормативным коэффициентом мощности ($\text{tg } \varphi = 0,5$), аналогично описанию в [8, 9].

Мощные турбогенераторы представлены отдельными узлами с номинальным напряжением генератора, которые через трансформаторные ветви подключены к системам сборных шин высшего напряжения. Для каждого генератора использовалась PV-модель, в которой фиксировались выдаваемая активная мощность, напряжение на выводах генератора, пределы регулирования по реактивной мощности.

Для моделирования электромеханических переходных процессов синхронных генераторов использовалась трехконтурная модель в форме Парка–Горева. Математическое описание генераторов дополнено уравнениями для турбин, а также для статических систем АРВ-СД аналогично [7–9, 11]. Узлы нагрузки при исследовании динамической устойчивости моделировались с использованием динамических характеристик.

Существенное влияние на работу устройства АРПМ оказывают различные переходные процессы в ЭС, в частности, переходные процессы, сопровождающиеся синхронными качаниями. Такое возможно, например, при КЗ, аварийных отключениях оборудования и других внешних возмущениях.

Одним из наиболее тяжелых (с точки зрения динамической устойчивости систем) является режим, вызванный затяжным КЗ с отказом основного выключателя и отключением поврежденного элемента от устройства резервирования при отказе выключателя (УРОВ), поскольку время устранения короткого замыкания больше и составляет около 0,5 с.

Результаты исследований стандартного алгоритма в нестационарных режимах работы энергосистем. Согласно описанным выше подходам к исследованию проблемы повышения чувствительности и селективности автоматики разгрузки контролируемого сечения определим параметры срабатывания, исходя из результатов расчетов статических режимов работы объединенных энергосистем.

При выборе уставок срабатывания производят расчет установившихся режимов для расчета аварийно допустимых перетоков (АДП) активной мощности в контролируемом сечении в различных режимах работы.

Уставки срабатывания устройств АРПМ выбираются такими, что переток мощности по сечению не должен превышать предельный с учетом коэффициента запаса. Аварийно допустимый переток активной мощности вычисляется по формуле

$$P_{\text{АДП}} = K_P \cdot P_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пр}}$ – предельный по аperiodической статической устойчивости переток активной мощности в рассматриваемом сечении; K_P – коэффициент запаса (принимается равным $0,92P_{\text{пр}}$).

Для выбора уставок срабатывания рассмотрим режим предельной загрузки сечения, который представлен на рис. 1. В данном режиме выведена в ремонт ВЛ, соединяющая ПС 500 кВ Экибастузская и ПС 500 кВ Семей.

Данный режим получен путем увеличения перетока мощности по сечению в направлении «на Урал» при загрузке энергоагрегатов ОЭС Сибири и увеличении мощности потребления в приёмной части энергосистемы Урала. Генерация и потребление ОЭС Казахстана остается постоянной. Исходя из полученного режима значение суммарной активной мощности по всем линиям, входящим в состав сечения (рис. 1), составляет 1802 МВт и является предельной передаваемой мощностью для данного режима работы, так как при дальнейшем утяжелении режима нарушается статическая устойчивость системы. Тогда по формуле (1) определим значение аварийно допустимого перетока по сечению с учетом того, что $P_{\text{пр}} = 1802$ МВт:

$$P_{\text{АДП}} = 0,92 \cdot 1802 \approx 1650 \text{ МВт.}$$

Отметим, что для ремонтной схемы предельный по условиям аperiodической устойчивости переток активной мощности меньше, чем аналог в нормальной схеме. С учетом этого уставку срабатывания по активной мощности принимаем равной

$$P_{\text{сраб.}} = P_{\text{АДП}} = 1650 \text{ МВт.}$$

Принимая предельно допустимый переток активной мощности за базисное значение ($P_{пр} = 1802$ МВт), перейдем к относительным единицам. Тогда $P_{сраб.} = 0,92$ о.е.

Следует подчеркнуть, что уставка срабатывания устройства АРПМ отстраивается от режима с минимальным АДП, что, по сути, ограничивает передачу мощности в нормальных условиях работы ЛЭП контролируемого сечения.

Далее перейдем к анализу работы устройства АРПМ с выбранными параметрами срабатывания.

В переходном процессе, изображенном на рис. 3, имитируется аварийное возмущение, обусловленное однофазным коротким замыканием с последующим отказом выключателя и отключением при действии схемы УРОВ. В момент времени $t = 100$ с моделируется однофазное короткое замыкание на шинах подстанции (ПС) 1150 кВ Алтай. Сразу после возникновения КЗ уровни напряжений и значения мощности сильно снижаются. В результате отказа выключателя на сборных шинах ПС 1150 кВ Алтай через время $\Delta t = 0,5$ с происходит отключение от УРОВ ВЛ 500 кВ Экибастузская – Алтай. После устранения возмущения возникают затухающие колебания с периодом качаний $T_{кач} \approx 1,3$ с и декрементом $\alpha \approx -0,17$ с⁻¹. Как видно из графиков, напряжение на линиях сразу после устранения КЗ восстанавливается до номинальных значений ($U = 390\text{--}420$ кВ).

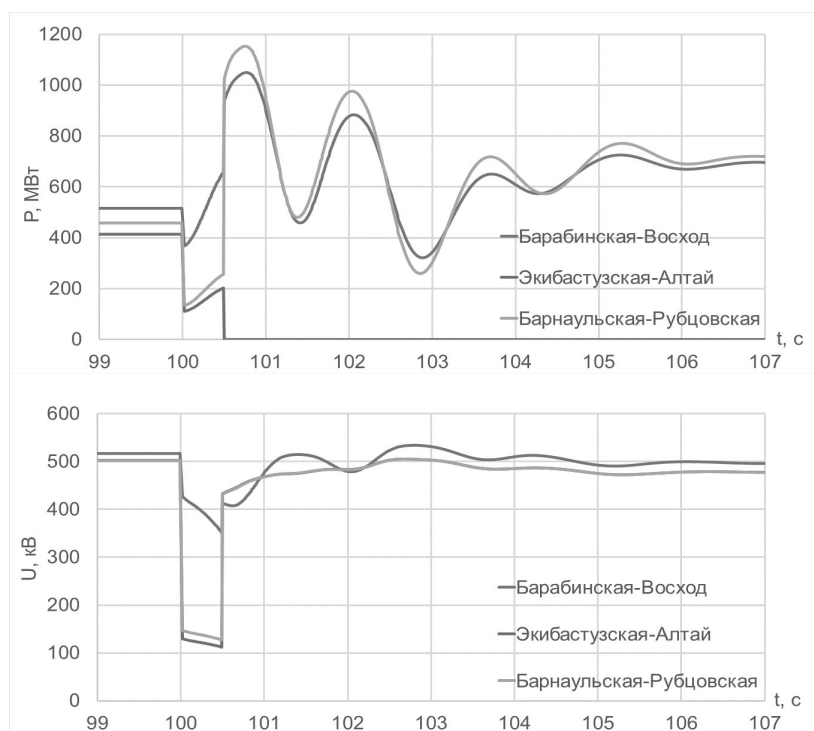


Рис. 3. Характеристики изменения активной мощности и действующих значений напряжений при однофазном КЗ на шинах ПС 1150 кВ Алтай с последующим отказом выключателя и действии УРОВ через 0,5 с

При таком развитии переходного процесса выполняются условия пуска АРПМ (с выбранными параметрами срабатывания). Если при этом период качаний превышает выдержку времени на срабатывание (обычно выбирается равной 0,5 с), то устройство должно сработать. В таком случае срабатывание автоматики не является корректным, так как суммарное установившееся послеаварийное значение активной мощности составляет $P_{\text{сум}} \approx 1350$ МВт (0,75 о.е.) и не превышает значения аварийно допустимой величины ($P_{\text{АДП}} = 1650$ МВт, или 0,72 о.е.).

Следует отметить, что период качаний может достигать нескольких секунд и увеличение выдержки времени срабатывания ступеней устройства является нецелесообразным, поэтому необходимо искать другой подход к решению данной проблемы.

Обобщая вышесказанное, можно сформулировать основные особенности нестационарных режимов работы электрооборудования, оказывающие влияние на рассматриваемый тип противоаварийной автоматики.

На корректную работу устройства АРПМ могут оказать влияние процессы, приводящие к возникновению качаний по линиям сечения. Для отстройки от таких режимов можно осуществить корректировку уставки по времени устройства разгрузки.

В случае аварийных возмущений, приводящих к изменению перетока мощности по сечению, особое влияние оказывают значения электрических параметров в предаварийном режиме работы.

С учетом полученных результатов для решения поставленных задач авторами статьи предлагается новый, усовершенствованный алгоритм устройства АРПМ, описание которого представлено ниже.

Разработка высокочувствительного и селективного функционального алгоритма. Предлагаемый алгоритм функционирования (рис. 4) противоаварийной автоматики разработан в соответствии с требованиями Стандарта [1].

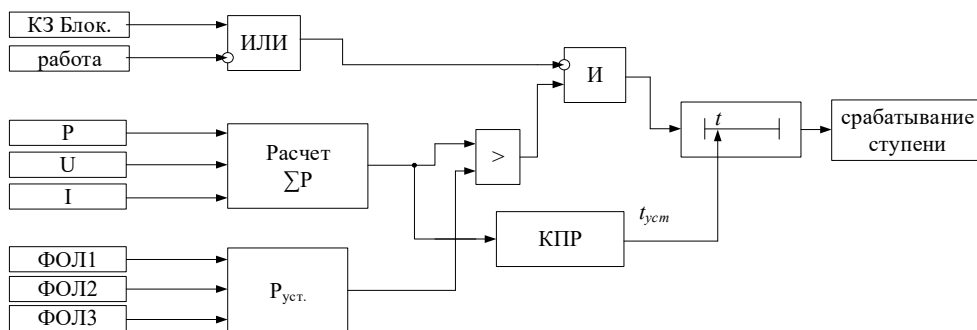


Рис. 4. Схема алгоритма функционирования

Принцип его работы базируется на математическом определении суммарного перетока активной мощности по сечению, при измерении параметров на одной из линий, входящей в состав сечения. Измеренные значения токов, напряжений и мощности в каждой фазе передаются на блок вычисления суммарного перетока активной мощности в контролируемом сечении. Полученное

значение сравнивается с уставкой, а также передается в блок контроля предшествующего режима. В случае превышения уставки ($P_{\text{сум}} > P_{\text{уст}}$) на вход логического оператора «И» соответствующей ступени поступает «1». В противном случае ($P_{\text{сум}} < P_{\text{уст}}$) – «0».

Выход логического оператора «И» запускает реле времени, и при превышении значения уставки по времени происходит срабатывание соответствующей ступени.

На два входа оператора «ИЛИ» поступают значения переменных, отвечающих за блокировки действия алгоритма. Ключ «работа» определяет состояние «ввод/вывод» алгоритма. Переменная «КЗ Блок.» – сигнал блокировки при возникновении короткого замыкания.

Блок контроля предшествующего режима (КПР) предназначен для определения выдержки времени срабатывания устройства. Данный блок корректирует выдержку времени в зависимости от значения перетока активной мощности в предшествующем режиме. Соответственно, чем больше мощность в исходном режиме, тем меньше выдержка времени на срабатывание АРПМ.

При изменении состояния линий, входящих в сечение, необходимо изменить уставку устройства по суммарной активной мощности. Эта функция возлагается на функциональный блок контроля состояния схемы. Для контроля состояния линий используются сигналы, выдаваемые устройствами фиксации состояния линий (ФОЛ).

Вычисление суммарного перетока, а также коррекция параметров срабатывания в различных режимах позволяет повысить чувствительность и обеспечить селективную работу автоматики в утяжеленных режимах работы энергосистемы, включая нестационарные колебания её системообразующих параметров: мощности, частоты и напряжения.

Данный подход накладывает следующие допущения к рассматриваемому сечению: в составе сечения отсутствуют промежуточные связи, генерация (нагрузка) или же ими можно пренебречь. Также для упрощения расчётов принимаем, что все ВЛ имеют постоянное сопротивление, которое не зависит от режима работы (пренебрегаем изменениями мощности на промежуточных подстанциях). Принимая во внимание эти допущения, рассмотрим принцип работы алгоритма на примере ранее исследуемого сечения «Казахста – Сибирь-1» (рис. 1).

Апробация модернизированной автоматики в результате лабораторных испытаний. Для проведения лабораторных испытаний предложенный алгоритм функционирования был реализован на программируемых логических контроллерах. Испытания полученной системы проводились с использованием ПАК РВ «RTDS» на территории АО «НТЦ ЕЭС».

Математическое моделирование эквивалентной энергосистемы осуществляется в программной среде RsCad. Генераторы оснащены моделями быстродействующих тиристорных систем возбуждения и полупроводниковых регуляторов типа АРВ-СД. Все энергоблоки оснащены моделями систем регулирования мощности и скорости вращения. Линии электропередач моделируются П-образной схемой замещения.

Перечень проводимых опытов, ожидаемый результат, а также корректность работы устройства представлены в таблице.

Перечень испытаний

№	Цель проверки	Исходный режим	Возмущение	Работа устройства
1.1	Проверка отсутствия срабатывания при $P_{\text{сум}} < P_{\text{уст}}$	Нормальный режим	Резкое увеличение перетока ниже значения уставки	Отсутствие срабатывания
1.2			Плавное увеличение перетока ниже значения уставки	
2.1	Проверка срабатывания при $P_{\text{сум}} > P_{\text{уст}}$		Резкое увеличение перетока выше значения уставки	Срабатывание устройства
2.2			Плавное увеличение перетока выше уставки	
3			Резкое изменение перетока выше уставки в обратном направлении	Отсутствие срабатывания
4.1	Проверка изменения выдержки времени в зависимости от предаварийного режима		Суммарный переток по сечению $P = 0$	Резкое увеличение перетока выше значения уставки
4.2		Суммарный переток по сечению $P = 100$ МВт	Срабатывание через выдержку времени t_2	
4.3		Суммарный переток по сечению $P = 280$ МВт	Срабатывание через выдержку времени t_3	
4.4		Переток по сечению в обратном направлении	Срабатывание через выдержку времени t_0	
5	Проверка отсутствия срабатывания при коротком замыкании на ЛП	Нормальный режим	$K^{(3)}$, длительностью 0,1 с, $R_{\text{ш}} = 0,1$ Ом	Отсутствие срабатывания
6	Проверка изменения уставки при получении внешнего сигнала ФОЛП		Подача сигнала ФОЛП	Отсутствие срабатывания до получения сигнала, при изменении уставки срабатывание через заданную выдержку времени

На рис. 5–7 приведены некоторые осциллограммы испытаний устройства.

На рис. 5 представлена осциллограмма опыта, в котором моделируется плавное увеличение перетока активной мощности по сечению до значения, не превышающего уставку срабатывания устройства. Параметры исходного режима соответствуют нормальной схеме ($P_{\text{сеч.исх.о.е.}} = 0,3$ о.е.).

Как видно из рис. 5, срабатывания ступеней устройства не происходит, что является корректным результатом.

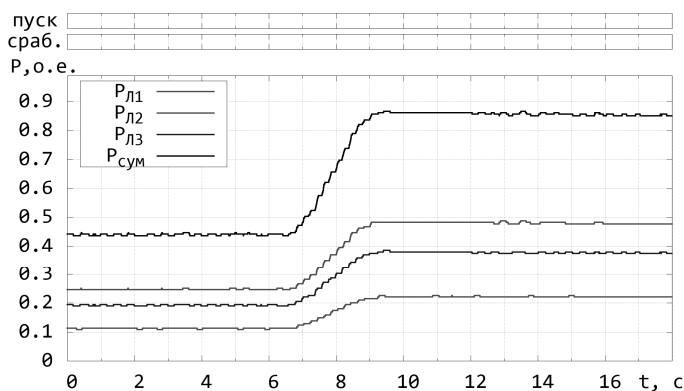


Рис. 5. График переходных процессов при плавном увеличении перетока до значения, не превышающего значения уставки

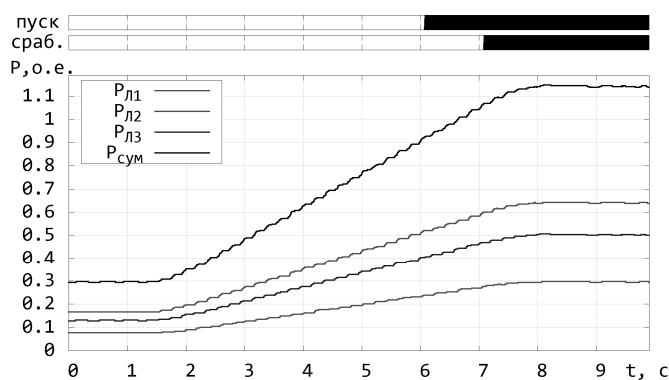


Рис. 6. График переходных процессов при плавном увеличении перетока до значения, превышающего значения уставки

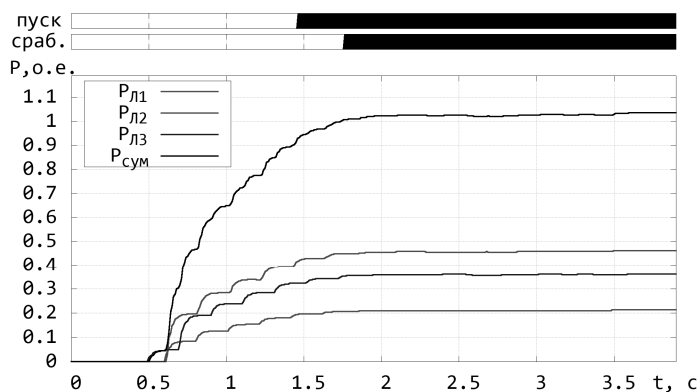


Рис. 7. График переходных процессов при резком увеличении перетока от $P_{исх} = 0$ до $P = 1$ о.е.

В опыте, осциллограмма которого представлена на рис. 6, моделируется скачкообразное увеличение перетока активной мощности до значения $P_{\text{сеч.о.е.}} = 1,15$ о.е. при уставке срабатывания устройства ($P_{\text{уст.о.е.}} = 0,92$ о.е.). Параметры исходного режима соответствуют нормальной схеме. В данном опыте происходит срабатывание устройства через время, равное выдержке времени, которое составляет 1 с.

В опыте, осциллограмма которого приведена на рис. 7, моделируется резкое изменение перетока активной мощности по сечению с $P_{\text{сеч.исх.}} = 0$ до значения $P_{\text{сеч.}} = 1$ о.е. Целью данного опыта является проверка изменения выдержки времени в зависимости от предаварийного режима.

Срабатывание устройства происходит через 0,4 с после достижения суммарной активной мощности сечения до значения уставки ($P_{\text{сеч.о.е.}} = P_{\text{уст.о.е.}} = 0,92$). Работа устройства является верной.

В результате проведенных испытаний установлено, что разработанное устройство АРПМ работает корректно во всех представленных в таблице опытах.

Выводы. В ходе данного исследования получены следующие результаты:

- разработан функциональный алгоритм автоматики разгрузки линий электропередач по активной мощности с коррекцией характеристики срабатывания;

- в программных комплексах RastrWin и Rustab реализованы математические модели силового электрооборудования рассматриваемого эквивалента энергосистемы для проведения расчетов установившихся режимов и переходных процессов;

- получена программно-аппаратная реализация разработанного алгоритма АРПМ на программируемых логических контроллерах с интегрированными модулями ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов;

- проведена апробация модернизированной автоматики с применением программно-технического комплекса реального времени. Разработанная система успешно прошла испытания на ПАК РВ «RTDS».

Литература

1. Администратор торговой системы АТС «ОРЭМ»: офиц. сайт. URL: <https://www.atsepergo.ru> (дата обращения: 06.02.2020).

2. Попов М.Г. Исследование и выбор методов численного интегрирования жестких уравнений электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. Т. 1, № 5. С. 89 – 93.

3. Попов М.Г., Орсова А.А., Козырев А.В. Исследование асинхронного режима гидрогенераторов Бурейской ГЭС при потере возбуждения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2. С. 30–33.

4. Попов М.Г., Захарова Е.В. Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3(178). С. 110–117.

5. Попов М.Г., Захарова Е.В. Исследование статической устойчивости кольцевых объединенных энергосистем на основе структурных критериев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3. С. 15–21.

6. Попов М.Г., Захарова Е.В. Поисковые исследования структурных критериев статической устойчивости сложных объединенных энергосистем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 1(537). С. 37–44.

7. Попов М.Г., Захарова Е.В., Синянский И.В., Горячевский К.С. Исследование статической устойчивости сложных объединенных энергосистем произвольной структуры // Электрические станции. 2015. № 11. С. 61–69.

8. Попов М.Г., Ванин В.К., Забоин В.Н., Гуревич Э.И. Идентификация параметров силового оборудования в адаптивных средствах защиты и автоматики // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61, № 6. С. 68–76.

9. Попов М.Г., Ванин В.К., Горячевский К.С., Забоин В.Н., Халилов Ф.Х. Идентификация параметров силовых трансформаторов в адаптивных средствах их защиты и автоматики // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 2(79). С. 118–130.

10. Попов М.Г., Васильева О.А., Асаинов Д.Н. Опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ на базе многофункциональных измерительных приборов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 47–58.

11. Попов М.Г., Базлов Д.А., Васильева О.А., Чжиной Л., Латикус А.А., Семенов К.Н. Особенности динамических свойств автономной микросети с источниками распределенной генерации. // Релейная защита и автоматизация. 2020. № 1(38). С. 26–31.

12. Рагозин А.А., Попов М.Г. О влиянии моментов неконсервативных сил на статическую устойчивость электроэнергетических систем // Электричество. 2002. № 10. С. 18–24.

13. Ragozin A.A., Popov M.G. An analysis of effectiveness of using controllable shunting reactors in system-forming networks of power pools. *Power of Russia*, 2002, no. 2, pp. 26–28.

ПОПОВ МАКСИМ ГЕОРГИЕВИЧ – доктор технических наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (Popovmg@eef.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1621-9755>).

ДАУТОВ АЗАМАТ АЙДАРОВИЧ – аспирант Высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (dautov.aa@edu.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6273-3977>).

МАНЬКОВ ПЁТР НИКОЛАЕВИЧ – аспирант Высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (mankov.pn@edu.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9104-664X>).

МЕЛЬНИКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – аспирант Высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (melnikov3.aa@edu.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7042-3277>).

ГОРЯЧЕВСКИЙ КОНСТАНТИН СЕРГЕЕВИЧ – старший преподаватель Высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (goryachevskij_ks@spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0241-224X>).

**Maxim G. POPOV, Azamat A. DAUTOV,
Petr N. MANKOV, Alexey A. MELNIKOV, Konstantin S. GORIACHEVSKI**
**EXPERIMENTAL RESEARCH OF LINE POWER UNLOADING AUTOMATICS
WITH ITS TRIPPING CHARACTERISTICS CORRECTION**

Key words: *Interconnected Power Systems, steady-state modes, transient modes, power unloading automatics, Unloading Automatics by power overload, Emergency Control Automatics, Real Time Digital System, programmable logic controller, Emergency Control Automatics tripping characteristics correction.*

In conditions of complicated structure of modern power grids, a special emphasis is given to the issues of ECA failure-free operation. This article is concerned with the problems of increasing sensitivity and selectivity of line power unloading automatics because its correct operation plays an important role in ensuring energy security and survivability of power systems.

Within the framework of this paper, the full cycle of development of ECA algorithm is considered. ECA is performing the functions of line power unloading automatics. The development cycle includes the tasks of tentative assessment of electrical equipment operating modes, rationale for choosing the automatics tripping characteristics, algorithm design and programmable logic controller (PLC) based implementations. It also includes the laboratory testing with the use of real-time hardware and software complex.

The calculation data of steady-state and transient operating modes of power electrical equipment presented in the article were carried out in software complexes RastrWin, Rustab. The power facilities of the interconnected power systems of Urals, Siberia and Kazakhstan were considered as modeled objects of power systems. In accordance with the obtained results, the tripping characteristics of device being developed were determined.

Based on the results of mathematical simulation of electrical equipment transient operating modes, the major disadvantages of device algorithm, which controls the active-power flow through the line, were determined. Besides, methods focused on increasing the sensitivity and selectivity of such automatics are proposed.

The developed algorithm controls the active-power flow over a given cross section. Measurements of electrical parameters are carried out at one of the lines in cross section. The total value of active-power flow over the cross section is calculated according to the equivalent circuit. To increase the sensitivity and selectivity of automatics, the algorithm uses the action time adjustment. It is determined depending on the previous operating mode of transmission line.

The algorithm for line power unloading automatics described in this article was implemented on a PLC system in accordance with the IEC 61131 standard. The obtained device was successfully tested on the real-time hardware and software complex. This paper presents the results of the carried out device performance tests, and the characteristics of the used mathematical simulation.

References

1. Administrator of the trading system (2020). Available at: <https://www.atsenergo.ru> (Accessed Date 2020, Feb. 6).
2. Popov M.G. *Issledovanie i vybor metodov chislennogo integrirovaniya zhestkikh uravnenii elektromekhanicheskikh perekhodnykh protsessov elektroenergeticheskikh sistem* [Research and selection of methods for numerical integration of rigid electromechanical transient systems of electric power systems]. *Nauchno tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2006, no. 5, p. 89 – 93.
3. Popov M.G., Orsoeva A.A., Kozyrev A.V. *Issledovanie asinkhronnogo rezhima gidrogeneratorov Bureiskoi GES pri potere vzbuzhdeniya* [Investigation of hydrogenerators asynchronous mode of the Bureyskaya HPP with a loss of excitation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2010, no. 2, p. 30 – 33.
4. Popov M.G., Zakharova E.V. *Issledovanie ustoichivosti ob"edinennykh energosistem na osnove strukturnogo podkhoda* [Investigation of interconnected power systems stability based on a structural approach]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2013, no. 3 (178), p. 110 – 117.
5. Popov M.G., Zakharova E.V. *Issledovanie staticheskoi ustoichivosti kol'tsevykh ob"edinennykh energosistem na osnove strukturnykh kriteriev* [Investigation of a steady-state stability of ringed interconnected power systems based on structural criteria]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2014, no. 3, pp. 15–21.
6. Popov M.G., Zakharova E.V. *Poiskovye issledovaniya strukturnykh kriteriev staticheskoi ustoichivosti slozhnykh ob"edinennykh energosistem* [Exploratory studies of structural criteria for steady-state stability of complex interconnected power systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2015, no. 1(537), pp. 37–44.
7. Popov M.G., Zakharova E.V., I.V. Sinyanskii, K.S. Goryachevskii *Issledovanie staticheskoi ustoichivosti slozhnykh ob"edinennykh energosistem proizvol'noi struktury* [Study of steady-state stability of complex free structure interconnected power systems]. *Elektricheskie stantsii*, 2015, no. 11, pp. 61–69.
8. Popov M.G., Vanin V.K., Zaboin V.N., Gurevich E.I. *Identifikatsiya parametrov silovykh transformatorov v adaptivnykh sredstvakh ikh zashchity i avtomatiki* [Identification of parameters of

power transformers in adaptive elements of their protection and automatics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2018, no. 6, pp. 68–76.

9. Popov M.G., Vanin V.K., Goryachevskii K.S., Zaboyn V.N., Khalilov F.Kh. *Identifikatsiya parametrov silovykh transformatorov v adaptivnykh sredstvakh ikh zashchity i avtomatiki* [Identification of parameters of power transformers in adaptive elements of their protection and automatics]. *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2018, no. 2(79), pp. 118–130.

10. Popov M.G., Vasil'eva O.A., Asainov D.N. *Opyt vnedreniya tsifrovyykh tekhnologii na TETs na baze mnogofunktional'nykh izmeritel'nykh priborov* [Experience in the implementation of digital technologies at TPP based on multifunctional measuring devices]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2019, no. 3, pp. 47–58.

11. Popov M.G., Bazlov D.A., Vasil'eva O.A., Chzhiyui L., Lapidus A.A., Semenov K.N. *Osobennosti dinamicheskikh svoystv avtonomnoi mikroseti s istochnikami raspredelennoi generatsii* [Features of dynamic properties of an autonomous microgrid with distributed generation sources]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2020, no. 1(38), pp. 26–31.

12. Ragozin A.A., Popov M.G. *O vliyani momentov nekonservativnykh sil na staticheskuyu ustoychivost' elektroenergeticheskikh sistem* [The moments influence of non-conservative forces on a steady-state stability of electric power systems]. *Elektrichestvo*, 2002, no. 10, pp. 18–24.

13. Ragozin A.A., Popov M.G. An analysis of effectiveness of using controllable shunting reactors in system-forming networks of power pools. *Power of Russia*, 2002, no. 2, pp. 26–28.

MAXIM G. POPOV – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Higher School of High-Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (Popovmg@eef.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1621-9755>).

AZAMAT A. DAUTOV – Post-Graduate Student of the Higher School of High-Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (dautov.aa@edu.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6273-3977>).

PETR N. MANKOV – Post-Graduate Student of the Higher School of High-Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (mankov.pn@edu.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9104-664X>).

ALEXEY A. MELNIKOV – Post-Graduate Student of the Higher School of High-Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (melnikov3.aa@edu.spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7042-3277>).

KONSTANTIN G. GORIACHEVSKII – Senior Teacher of the Higher School of High-Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (goryachevskij_ks@spbstu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0241-224X>).

Формат цитирования: Попов М.Г., Даутов А.А., Маньков П.Н., Мельников А.А., Горьчевский К.С. Автоматика разгрузки межсистемных линий электропередачи с коррекцией её характеристик срабатывания // Вестник Чувацкого университета. – 2022. – № 1. – С. 142–155. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-142-155.