

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Кузнецов П.А.* , Степанов О.А.**

*Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьёва,
РГАТУ им. П.А. Соловьёва, ул. Пушкина, 53, Рыбинск, 152934, Россия*

** e-mail: kuznetsovpavel@inbox.ru*

*** e-mail: azratael@gmail.com*

Проведен анализ аварийных режимов электрической сети, составлен алгоритм протекания веерного отключения. Представлена модульная двухуровневая модель защиты потребителей электрической энергии от аварийных режимов работы: веерных отключений, просядок напряжения, наличия большого количества реактивной мощности в сети. Представлены графики напряжений сети после внедрения первой части системы. Показана структура и алгоритм работы контроллера защиты от веерных отключений.

Ключевые слова: веерное отключение, реактивная мощность, система компенсации реактивной мощности, защита электрической сети.

Введение

Развитие современной промышленности и рост численности населения земли приводят к тому, что с каждым днём в мире потребляется все большее количество электроэнергии. Многие сети, которые используются на данный момент для снабжения потребителей различных категорий, уже не справляются с объемом нагрузки, который на них возлагается и требуют ремонта и модернизации. Так, по данным [1] износ основных производственных и технологических активов отечественных электросетей в два раза выше, чем за рубежом. К 2013 г. мировая потребность в электроэнергии выросла на 10%, в сравнении с предыдущим десятилетием [2, 3, 9]. Также ожидается, что в период с 2013 по 2030 г. человечество станет потреблять электроэнергии ещё на 34% больше [3, 4].

Аварийные режимы работы в энергосетях

Анализ аварийных режимов работы показывает, что проблемы можно разделить на четыре группы:

1. Просадка напряжения (Droput). При этом аварийном режиме происходит падение питающего напряжения с его номинального значения до нуля с последующим восстановлением, что может вызвать неожиданные изменения в системах с цифровыми схемами управления (рис. 1,а). Просадки напряжения могут уменьшать управляющие сигнала

лы ниже порога, при котором логические схемы могут достоверно определять, какие состояния сигналов передаются. При восстановлении напряжения до нормального уровня схема управления может переключиться в неправильное состояние. Например, просадка напряжения может привести к смене направления вращения вала двигателя на обратное.

2. Снижение напряжения (Brownout). Это колебания уровня напряжения продолжительностью более одной минуты (рис. 1,б). Предел колебаний обычно находится между 80—90% от номинального значения. Снижение напряжения приводит к нестабильной работе электрических машин, мерцанию ламп освещения.

3. Веерное отключение (Blackout). Это полная потеря мощности на определенном участке цепи или даже в какой-либо области. Является самым тяжелым аварийным режимом. Отключения, которые происходят вследствие аварий на электростанциях, требуют наибольшего времени и ресурсов для восстановления. Веерные отключения могут длиться от нескольких минут до нескольких недель в зависимости от характера аварии и конфигурации электрической сети. График напряжения при веерном отключении представлен на рис. 1,в.

4. Присутствие в сети реактивной мощности (Reactive power arreagance). Данное явление само по себе не является аварийным режимом, потому что

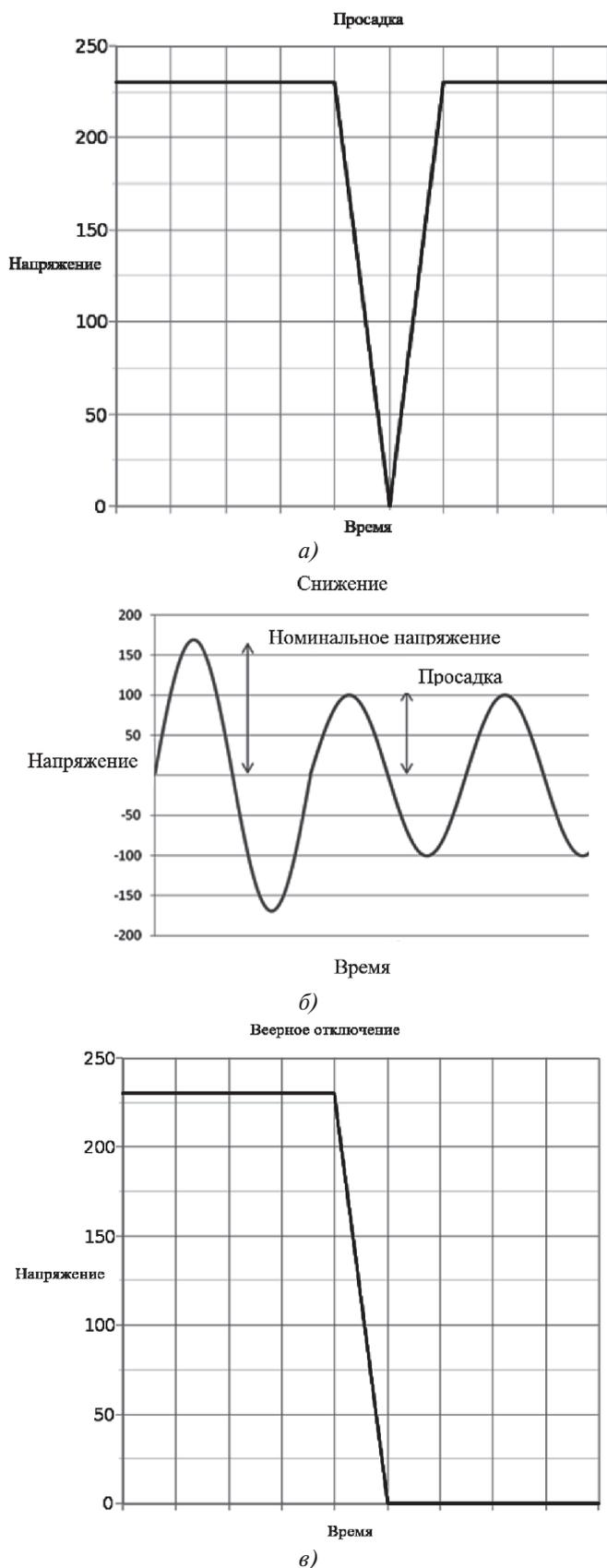


Рис. 1. Графики аварийных режимов работы

определенная доля реактивной мощности генерируется электрическими машинами в сеть. Однако наличие большого её количества может привести к

рассинхронизации генераторов, падению напряжения, просадкам, а потом и к веерному отключению.

Причины и модель протекания веерных отключений

Анализ [5—7] показывает, что большинство веерных отключений как локального, так и национального характера были следствием какой-либо единичной поломки. К примеру, веерное отключение 2003 года между США и Канадой, которое вывело из строя практически 11% нагрузки североамериканской сети и оставило без электричества более 50 млн человек, было вызвано изначально небольшой рассинхронизацией генераторов модуля 5 электростанции Eastlake. Она была вызвана наличием большого количества реактивной мощности в сети. Персонал не отреагировал вовремя и должным образом на показания системы автоматики, что и привело к каскадному отключению электроснабжения [8].

Модель веерного отключения можно представить в виде алгоритма, изображенного на рис. 2.

Как видно из диаграммы, в любом веерном отключении есть точка невозврата, после которой сеть будет неконтролируемо затухать, а есть и момент для своевременной реакции и восстановления системы в номинальное состояние.

Структура системы защиты от аварийных режимов

Исходя из алгоритма протекания веерного отключения, различных аварийных режимов работы, авторы статьи предлагают создать защитную систему потребителей. Функционально она состоит из двух независимых модулей, которые могут внедряться как отдельно, так и в комплексе. Это автоматическая установка компенсации реактивной мощности (АУКРМ) и контроллер защиты от веерных отключений. АУКРМ сможет выполнять компенсацию реактивной мощности, не допуская выпадения генераторов из синхронизма, возникновения просадок и колебаний напряжений [9]. Контроллер сможет в случае аварийной пропажи питания, перегрузки анализировать состояние энергосети предприятия и отключать некритичных потребителей для передачи их резервов наиболее важным. Система сможет работать длительное время в аварийном режиме, исключая веерное отключение и, как следствие, полную пропажу питания, результатом чего могут быть катастрофические убытки. Так, статистика по одному из предприятий Ярославской области показывает, что за 2015 год доля бракованной продукции в результате аварийных режимов работы электросети составила 23—25% от общего количества бракованных деталей и эквивалентна

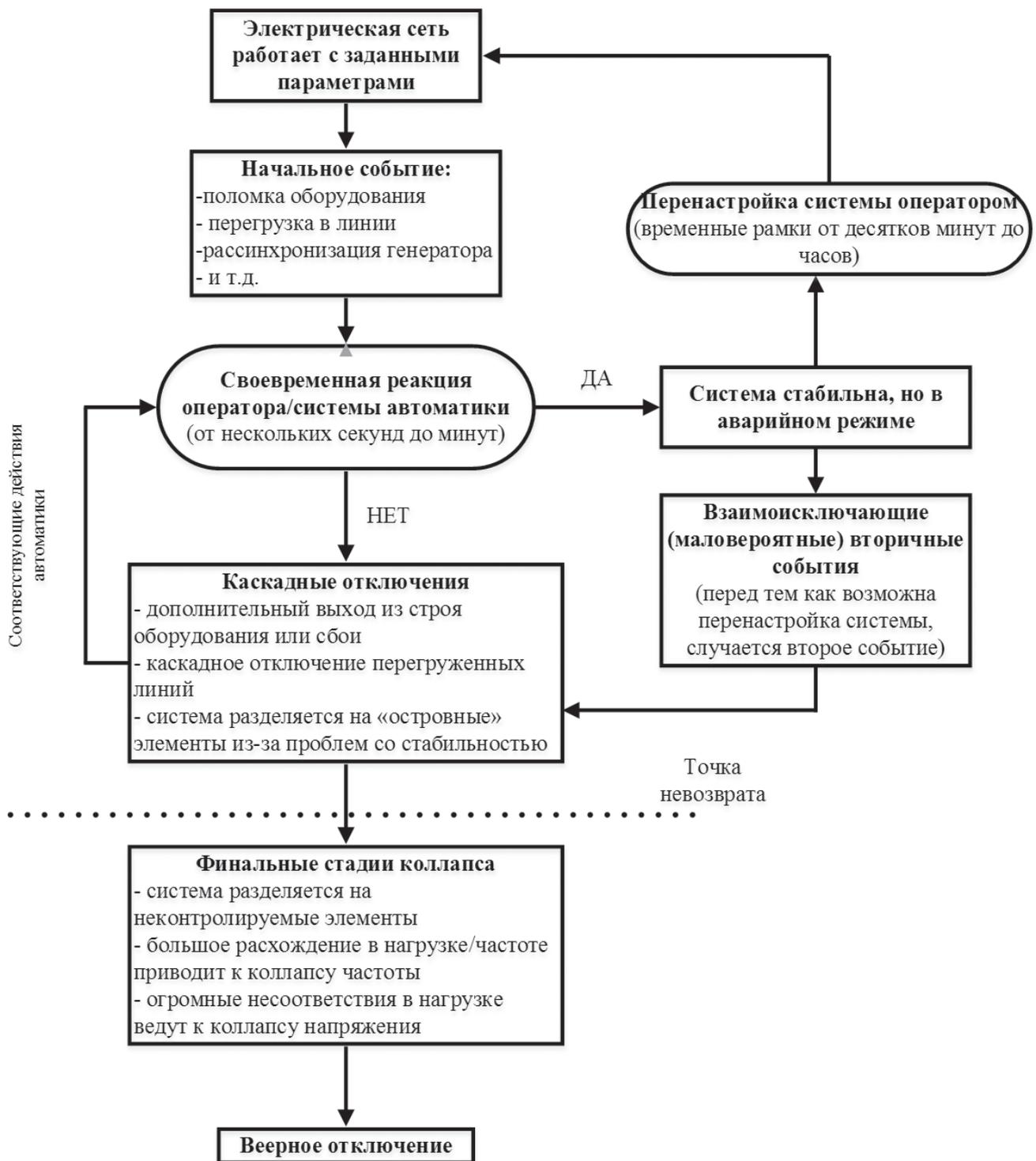


Рис. 2. Алгоритм возникновения и протекания веерного отключения

8,21 млн руб. (рис. 3). Теоретические расчеты показывают, что из-за одного веерного отключения убытки одного только цеха могут достигать 2 млн руб. [10].

Система компенсации реактивной мощности

В настоящее время некоторые ведущие производители электрооборудования предлагают свои решения для компенсации реактивной мощности

[11, 12]. Однако зарубежные установки дорогие, а отечественные не всегда имеют малые габариты и возможность регулирования ступеней конденсаторных батарей. Спроектированная установка благодаря несимметричной конфигурации может обеспечить как точное регулирование, так и минимальную частоту коммутации ступеней при меньшей стоимости, по сравнению с симметричными установками. Так, например, установка мощностью 100 квар с



Рис. 3. Убытки от брака из-за аварийных режимов работы электросети

конфигурацией батарей $1 \times 10 + 2 \times 15 + 3 \times 20$ квар может обеспечить адекватное регулирование в диапазоне 10—90 квар с шагом 5 квар, а установка с конфигурацией 10×10 квар — то же с шагом 10 квар, при этом она на 15% дороже первой установки [13].

Предпочтительным вариантом в данном случае представляется групповая конденсаторная установка мощностью 50 квар, подключаемая на стороне 0,4 кВ в вводно-распределительное устройство (ВРУ) при помощи специальных конденсаторных контакторов, с несимметричной конфигурацией блоков конденсаторов ($1 \times 10 + 1 \times 10 + 1 \times 10 + 1 \times 20$ квар). Разряд конденсаторов производится с помощью разрядных дросселей, устанавливаемых на каждой батарее конденсаторов. Автоматическое ступенчатое регулирование конденсаторов с минимальным шагом в 10 квар производится по заданному значению коэффициента мощности микроконтроллерным регулятором реактивной мощности [17, 18].

АУКРМ является модульной многокомпонентной системой, состоящей из компенсирующих ус-

тройств (КУ) — четырех блоков, содержащих силовой конденсатор с разрядным дросселем, исполнительных устройств (ИУ) — четырех конденсаторных контакторов, защитного устройства (ЗУ), состоящего из разъединителя нагрузки и предохранителей, вентиляционного устройства (ВУ) — для охлаждения установки, а также системы управления — регулятора реактивной мощности (РРМ). Всё оборудование устанавливается в соответствующей оболочке (шкафу). Структура установки показана на рис. 4.

Принципиальная схема АУКРМ показана на рис. 5. Система подключается к трехфазной сети предприятия с помощью двух магнитных пускателей QF и QS. QS находится непосредственно в корпусе АУКРМ, а QF — на вводе сети. Входными сигналами для регулятора являются напряжение и ток. Напряжение от датчика напряжения (ДН) подается непосредственно из подключенной сети через разъемы, защищенные предохранителями FU1—FU4. На датчик тока (ДТ) подается ток от вторичной обмотки измерительного трансформатора тока (ТТ), включенного в цепь контролируемой сети, со стандартным выходом 5 А. В датчиках сигналы гальванически изолируются и нормализуются для правильного функционирования системы регулирования.

Расчет показывает, что для оптимальной работы установки и компенсации реактивной мощности объемом 41,3 квар необходимо выбрать секции конденсаторов 1—4 ($1 \times 10 + 1 \times 10 + 1 \times 10 + 1 \times 20$ квар). Они подключаются к сети предприятия через контакторы C1—C4 с предохранителями FU5—FU16.

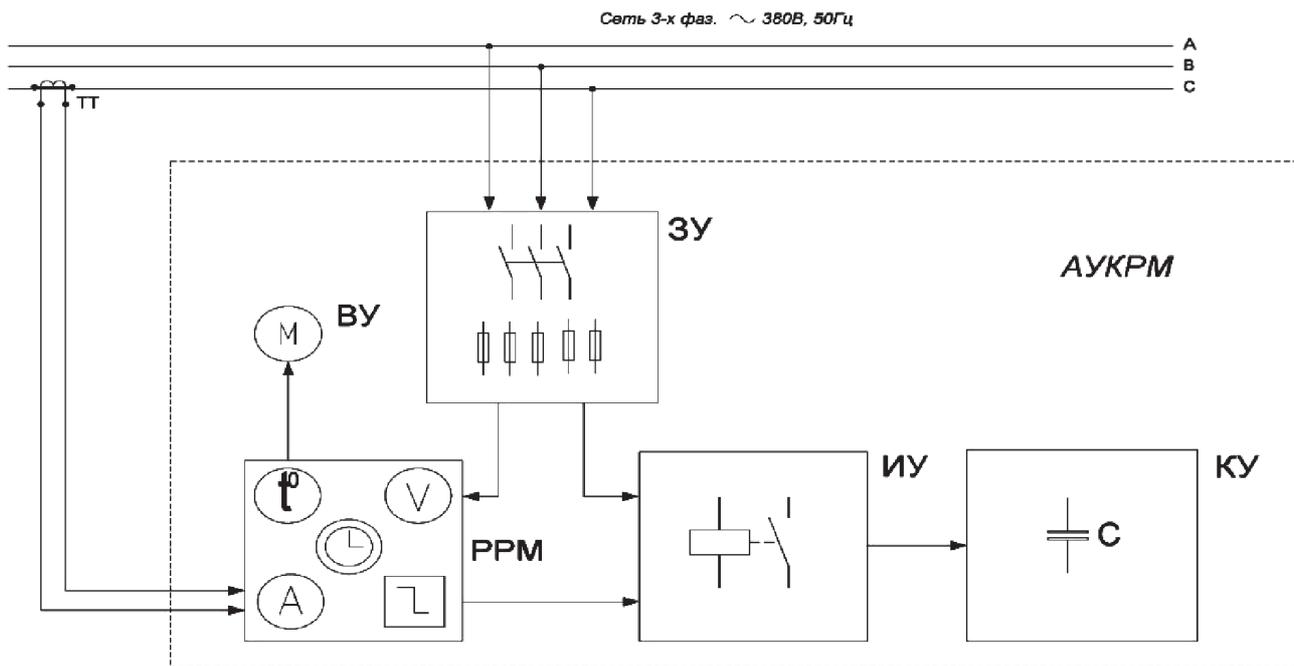


Рис. 4. Структура АУКРМ

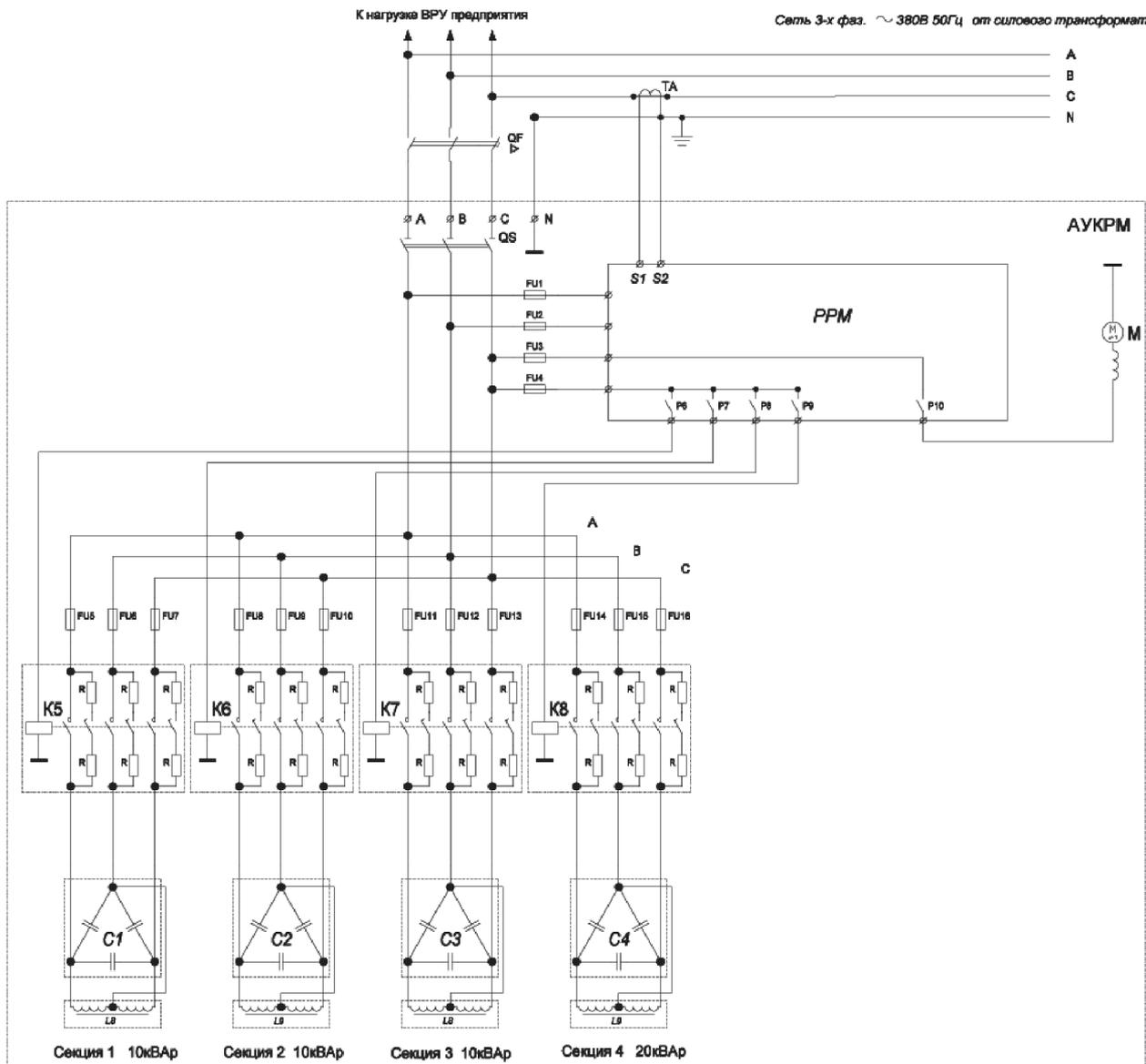


Рис. 5. Принципиальная схема АУКРМ

Сигнал на включение ступеней подается от РРМ через контакты Р6—Р9. Контакт Р10 отвечает за коммутацию системы принудительного охлаждения.

На основе информации о токе и напряжении, поступающей на аналогово-цифровой преобразователь микроконтроллера, вычисляется сигнал, пропорциональный реактивной мощности, со знаком, определяющим характер нагрузки: индуктивный или ёмкостный.

Сигнал сравнивается с шириной зоны чувствительности (регулируется в диапазоне от 5 до 600 с) коэффициента, который указывает скорость переключения контроллера. Высокая чувствительность обеспечивает более быстрое регулирование, но с большим числом переключений, при низкой чувствительности регулирование происходит медленнее и с меньшим количеством переключений.

Значение чувствительности соответствует времени, на которое контроллер задерживает реакцию на изменение реактивной мощности, эквивалентной самому маленькому шагу. Для больших изменений мощности время будет меньше согласно критериям обратной пропорции. Рассмотрим это на примере: установлена чувствительность 60 с, минимальная ступень (шаг) 25 квар, системе требуется 50 квар, чтобы достигнуть требуемого $\cos \varphi$: тогда контроллер будет ждать $60/2=30$ с перед подключением конденсаторов.

При выходе сигнала за верхнюю границу зоны чувствительности формируется команда на отключение секций силовых конденсаторов, а при выходе сигнала за нижнюю границу — команда включения секций конденсаторов.

Распределение команд управления по каналам осуществляется с задержкой времени от 5 до 240 с, необходимой для разряда конденсаторной батареи.

Электронные ключи реализуют преобразование команд управления, поступающих с выходных каналов микроконтроллера, и непосредственно управляют мощными промежуточными реле, контакты которых включены в цепь катушек силовых контакторов, коммутирующих секции конденсаторных батарей. Срабатывание промежуточных реле сопровождается световой индикацией на передней панели регулятора. Более подробный алгоритм работы АУКРМ представлен на рис. 6.

Внедрение системы на участке питания цеха позволило реализовать следующее:

1. Ранее $\cos \varphi$ составлял приблизительно 0,6 для периодов с минимальным потреблением в летние месяцы и 0,5 для периодов с максимальным потреблением в зимние месяцы (рис. 7, а,б). После внедрения АУКРМ он составляет 0,97—0,99 (рис. 7, в,г).

2. Ранее просадки системы питающего напряжения в периоды с максимальной нагрузкой составляли 15—20%, что негативно сказывалось на рабо-

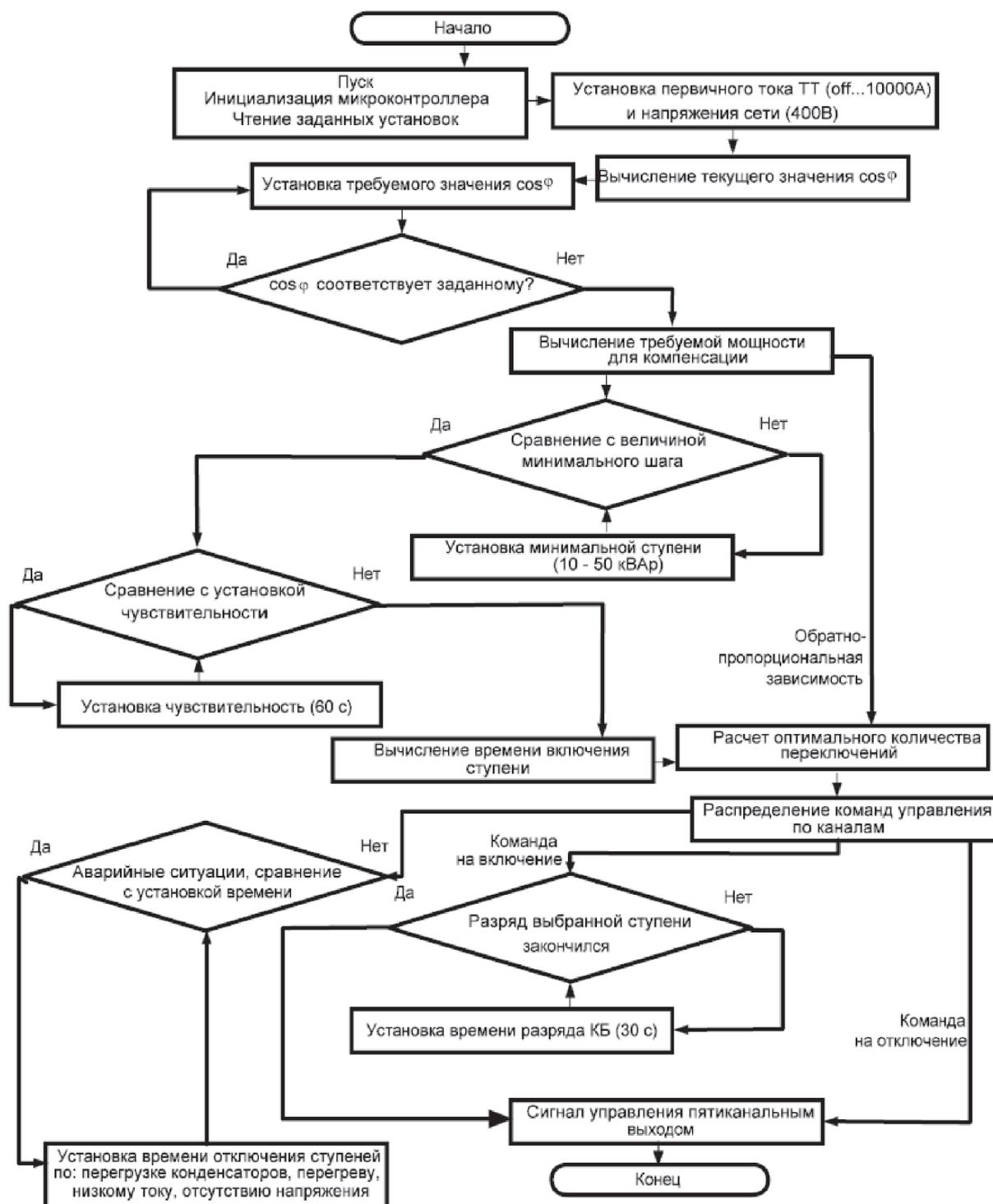


Рис. 6. Алгоритм работы АУКРМ

В период с наибольшим энергопотреблением

В период с наименьшим энергопотреблением

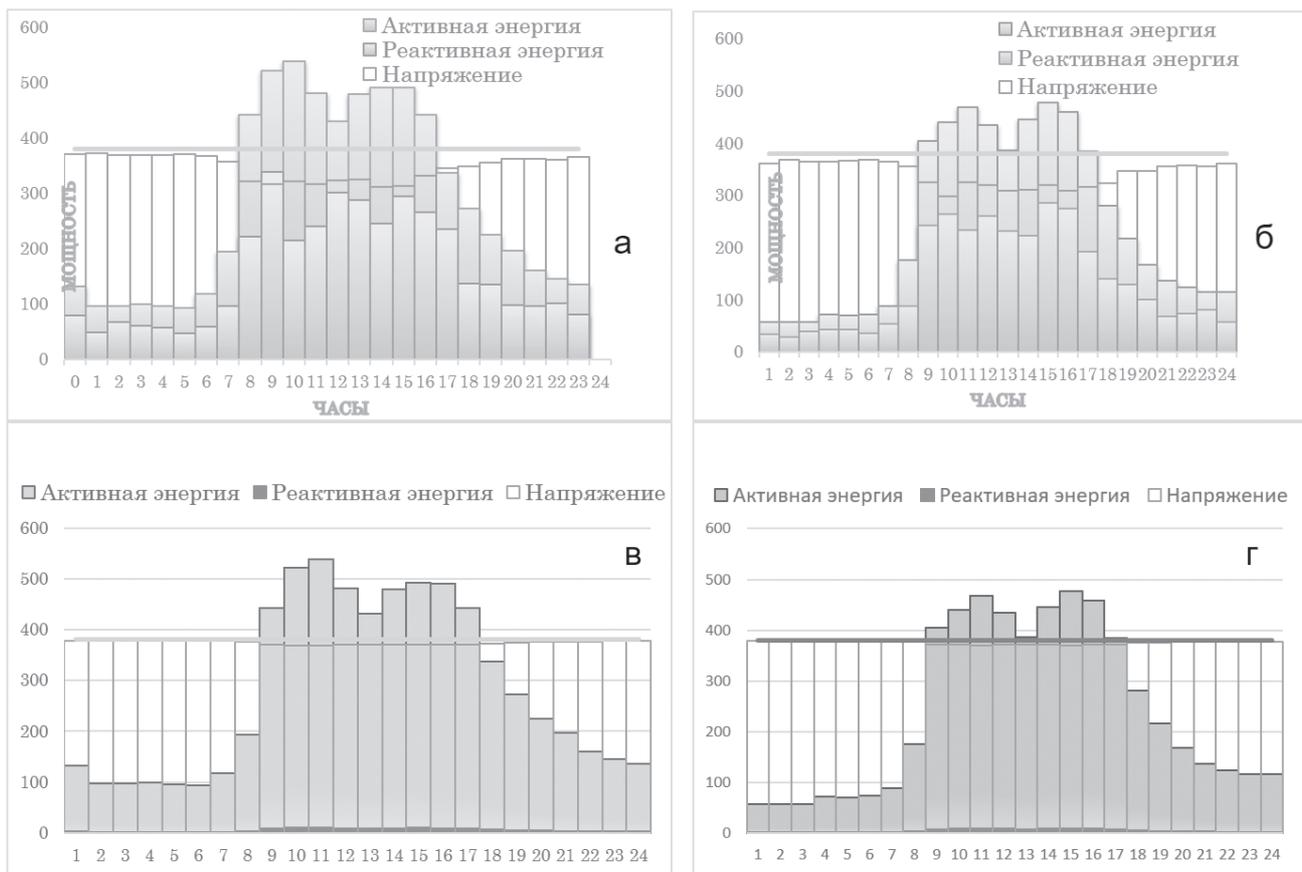


Рис. 7. Графики напряжения и баланса реактивной мощности до и после внедрения АУКРМ

те станков с ЧПУ. После внедрения АУКРМ просадки напряжения составляют менее 2%.

Контроллер защиты сети от веерных отключений

Вторым модулем защитной системы является контроллер защиты от веерных отключений [14–16]. Данное устройство внедряется в сеть потребителя (рис. 8) и отслеживает состояние сети, основываясь на данных, получаемых с сервера автоматической системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) или её аналогов [20]. Основной контроллер устанавливается рядом с сервером. Отдельные исполнительные элементы вместе с периферийными устройствами разделяются на несколько групп и ставятся уже непосредственно на конкретных объектах: зданиях, цехах, подстанциях. При особенно высоком уровне контроля возможно соединение исполнительных механизмов даже с распределительными щитками потребителей. Передача данных происходит по стандартным протоколам Profibus или Modbus.

В процессе работы при возникновении аварийной ситуации: перегрузке сети, пропаже питания на одной из ветвей, перегрузке на другой и т.д. — контроллер проводит анализ текущей нагрузки и ищет

потребителя или узел, являющиеся причиной перегрузки. Далее проверяется их приоритет, на основе ранее запрограммированных данных. В случае наличия потребителя — причины перегрузки с низким приоритетом, система отключает его от сети питания, тем самым восстанавливая баланс мощностей в сети и предотвращая возникновения цепной реакции веерного отключения (см. рис. 2).

Если же потребитель обладает высоким приоритетом или он связан в данный момент с важным технологическим процессом, то контроллер ищет потребителей с более низким приоритетом и отключает их, сохраняя питание на важном объекте. В случае же падения мощности, подводимой от трансформатора, устройство проводит анализ, поиск и отключение низкоприоритетных потребителей в достаточном количестве для компенсации просадки. После её устранения подача питания возобновляется. Алгоритм работы устройства представлен на рис. 9.

Выводы

Представленная система позволяет снизить риск веерных отключений потребителей энергии за счет компенсации реактивной мощности и перераспре-

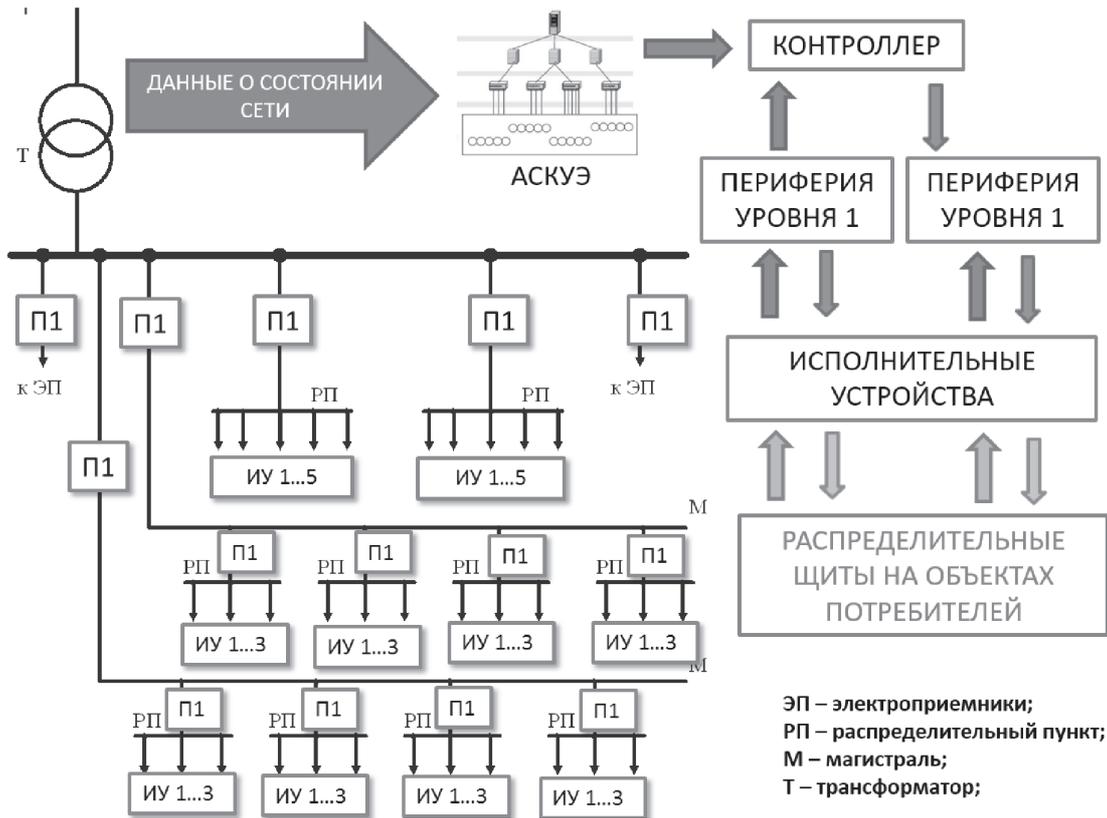


Рис. 8. Схема-пример внедрения устройства в действующую сеть предприятия

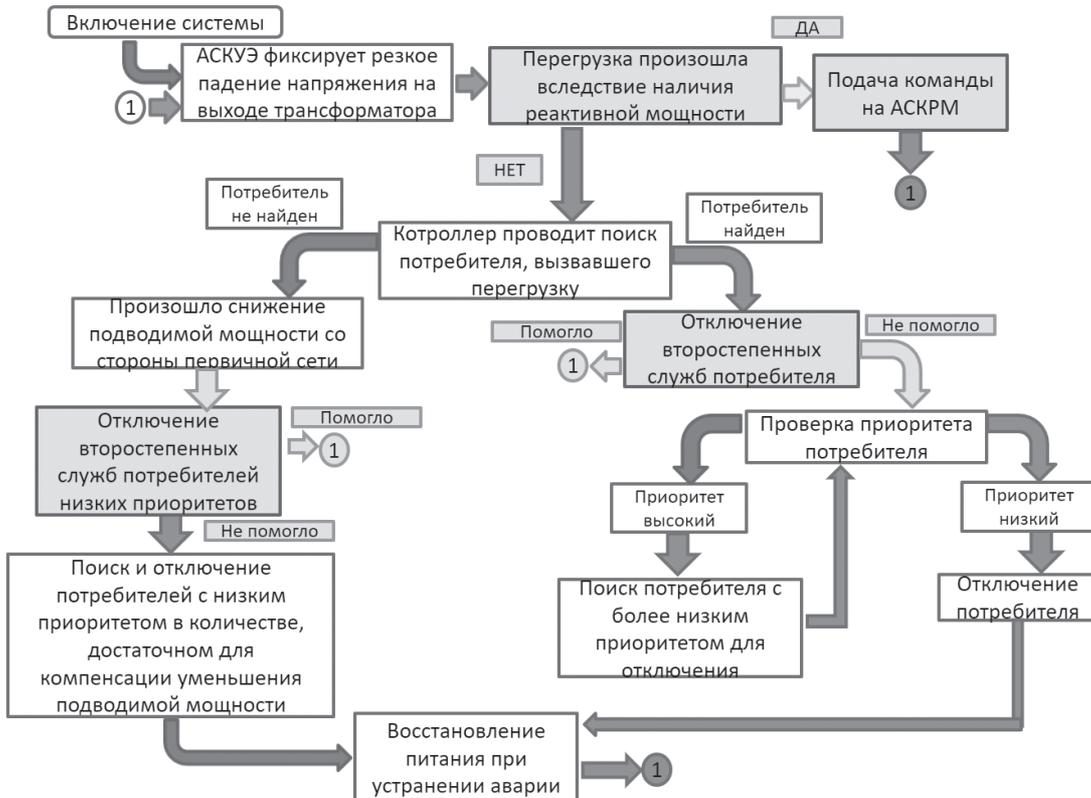


Рис. 9. Алгоритм работы контроллера защиты от веерных отключений

деления баланса мощностей в случае аварийных режимов работы. Выгоды от её внедрения позволяют экономить на счетах по оплате реактивной мощности и снизить количество бракованной продук-

ции, выпускаемой при перебоях с электроснабжением.

Дальнейшие исследования необходимо проводить для анализа остальных аварийных режимов:

снижения и просадок напряжения — и разработки алгоритма по их устранению.

Библиографический список

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
2. Department of Energy USA, <http://www.energy.gov/statistics>
3. World Energy Outlook 2015. International Energy Agency (IEA). — Paris, 2015. — 15 p.
4. BP Energy Outlook. 2016 Edition. British Petroleum. — London, 2016. — 80 p.
5. Pouyan Pourbeik, Prabha Kundur The anatomy of a power grid blackout — Root causes and dynamics of recent major blackouts. Article in IEEE Power and Energy Magazine 4.5, 2006, pp. 22-29.
6. Blumschein J., Yelgin Y., Kereit M. Blackout Prevention by Power Swing Detection and Out-of-Step Protection // Journal of Power and Energy Engineering (JPEE), Irvine CA, 2014, pp. 694-703.
7. Friew Gebremedhin Abraha Statistics of Electric Power Blackouts: Data Analysis and Data Modelling. Norwegian Univicity of Science and Technology, Trondheim, 2013. 71 p.
8. North American Electric Reliability Council Technical Analysis of the August 14, 2003, Blackout: What Happened, Why, and What Did We Learn? — Report to the NERC Board of Trustees by the NERC Steering Group, New Jersey, 2004. 124 p.
9. Кузнецов П.А., Степанов О.А., Юдин А.В. Структура автоматической системы компенсации реактивной мощности промышленных предприятий // Проблемы недропользования: Сборник трудов международного форума-конкурса молодых ученых. Часть II. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. С. 161—163.
10. Кузнецов П.А., Пихно Э.В., Юдин А.В. Экономическое обоснование внедрения контроллера защиты от веерных отключений // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», 2016. Т. 2. М.: МАИ. С. 619.
11. Schneider Electric Interactive Catalog. 2007. URL: <http://www2.schneider-electric.com/documents/electrical-distribution/en/shared/interactive-catalogue/cfied205098en/cfied205098en/index.htm>
12. ABB Product Guide. 2016. <http://www.abb.ru/ProductGuide/>
13. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. — М.: Энергия, 1972. — 248 с.
14. Манин А.В., Юдин А.В., Грошев А.Н., Москалева О.А. Статический компенсатор реактивной мощности на базе магнито-вентильных элементов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. 2011. № 1 (19). С. 117-122.
15. Манин А.В., Юдин В.В., Кривов Ю.Н., Москалёва О.А. Энергетический анализ электрических цепей // Электрика. 2013. № 5. С. 7-13.
16. Кузнецов П.А., Солёный С.В. Борьба с веерными отключениями в системах электроснабжения // Заваляшинские чтения (2016, Санкт-Петербург): молодежная секция: сборник докладов, 18-22 апреля 2016. СПб.: ГУАП, 2016. 210 с.
17. Юдин В.В., Манин А.В., Юдин А.В. Моделирование процессов регулирования мощности в энергетических установках // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. 2010. № 1(16). С. 151—156.
18. Кривов Ю.Н., Манин А.В., Юдин В.В. К вопросу о моделировании процессов регулирования мощности потребителей // Электрика. 2013. № 7. С. 24-27.
19. Фомкина В.И., Москвичёва Н.В. Вопросы применения стоимостного подхода в качестве эффективного инструмента управления авиационным предприятием // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 6. С. 195-199.
20. Судаков В.А. Автоматизация процесса управления разработкой корпоративной информационной системы // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 1. С. 149-153.

COMBINED SYSTEM FOR ELECTRIC POWER CONSUMERS PROTECTION AGAINST EMERGENCY STATES

Kuznetsov P.A.* , Stepanov O.A.**

*Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Soloviev,
RSATU, 53, Pushkin str., Rybinsk, 152934, Russia*

**e-mail: kuznetsovpavel@inbox.ru*

***e-mail: azratael@gmail.com*

Abstract

The main issue of this article consists in analyzing the main electric network emergency states and to designing a protective system model, which is able to minimize or fully avoid their aftermath.

The results of failures analysis at various power plants and installations allowed separate out the basic types of emergency operating modes. They include sudden voltage dropouts, voltage waveform fluctuations (flickering), rolling blackouts and presence of significant

reactive power abundance in a power grid. The rolling blackout presents the greatest danger due to its aftermath. The analysis of emergency modes occurrence revealed that most commonly they arise due to insignificant event, leading to avalanche-type emergency growth. This fact is reflected in the presented algorithm. Moreover, most commonly, these emergencies can be eliminated with the timely reaction of the personnel. However, as the practice indicates, these specified nonsignificant factors were ignored by maintenance staff.

Two-level of consumers' complex protection model for emergency elimination and its aftermath mitigation is suggested. Both parts are autonomous and can be set separately, or in conjunction. The first part of the system is responsible for the reactive power compensation in the power grid. It differs from the existing prototypes by smaller size, cost and asymmetric structure for reactive power compensation in wide range. The paper presents voltage and power balance graphs at the object before and after compensation. The presented data proves that implementation of such installations allows reduce rolling blackout occurrence probability.

The second part of the system represents from rolling blackout protection controller, which, in case of any power grid section overload, or voltage dropout, analyses the states of consumers and turns off those of lower priority. This helps avoiding entire system cascaded failure occurrence.

The presented system both as a whole and in separate parts presents interest for industrial electric energy consumers from the viewpoint of spoilage minimization occurring due to power grid failures.

Keywords: rolling blackout, reactive power, reactive power compensation system, power grid protection.

References

1. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* (Innovative development of power engineering based on Smart Grid conception), Moscow, IATs Energiya, 2010, 208 p.
2. *Department of Energy USA*, 2013, available at: <http://www.energy.gov/statistics>
3. *World Energy Outlook 2015*. International Energy Agency (IEA), Paris, 2015, 15 p.
4. *BP Energy Outlook, 2016 Edition*. British Petroleum, London, 2016, 80 p., available at: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook-2035.html>
5. Pouyan Pourbeik, Kundur Prabha S. and Taylor Carson W. The anatomy of a power grid blackout. *IEEE Power and Energy Magazine* 4.5, 2006, pp. 22-29.
6. Blumschein J., Yelgin Y., Kereit M. Blackout Prevention by Power Swing Detection and Out-of-Step Protection. *Journal of Power and Energy Engineering (JPPE)*, Irvine CA, 2014, pp. 694-703.
7. Friew Gebremedhin Abraha *Statistics of Electric Power Blackouts: Data Analysis and Data Modelling*. Norwegian, Univecity of Science and Technology, Trondheim, 2013, 71 p.
8. *North American Electric Reliability Council (NERC). Technical Analysis of the August 14, 2003, Blackout: What Happened, Why, and What Did We Learn?* Report to the NERC Board of Trusteeth by the NERC Steering Group, New Jersey, 2004, 124 p.
9. Kuznetsov P.A., Stepanov O.A., Yudin A.V. *Materialy mezhdunarodnogo foruma-konkursa molodykh uchenykh "Problemy nedropol"zovaniya*. St. Peterburg, 2016, chast' II, pp. 161–163 (247 p.).
10. Kuznetsov P.A., Pikhno E.V., Yudin A.V. *Materialy XLII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Gagarinskije chteniya"*, 2016, vol. 2, pp. 619.
11. *Schneider Electric Interactive Catalog*, 2007, available at: <http://www2.schneider-electric.com/documents/electrical-distribution/en/shared/interactive-catalogue/cfied205098en/cfied205098en/index.htm>
12. *ABB Product Guide*, 2016, available at: <http://www.abb.ru/ProductGuide/>
13. Il'yashov V.P. *Kondensatornye ustanovki promyshlennykh predpriyatii* (Capacitor installations for industrial enterprises), Moscow, Energiya, 1972, 248 p.
14. Manin A.V., Yudin A.V., Groshev A.N., Moskaleva O.A. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii imeni P.A. Solov'eva*, 2011, no. 1 (19), pp. 117-122.
15. Manin A.V., Yudin V.V., Krivov Yu.N., Moskaleva O.A. *Elektrika*, 2013, no. 5, pp. 7-13.
16. Kuznetsov P.A., Solenyi S.V. *Zavalishinskije chteniya: molodezhnaya sektsiya. Sbornik dokladov*. St. Petersburg, GUAP, 2016, 210 p.
17. Yudin V.V., Manin A.V., Yudin A.V. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii imeni P.A. Solov'eva*, 2010, no. 1(16), pp. 151–156.
18. Krivov Yu.N., Manin A.V., Yudin V.V. *Elektrika*, 2013, no. 7, pp. 24-27.
19. Fomkina V.I., Moskvicheva N.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 195-199.
20. Sudakov V.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 149-153.