

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЕЕРНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ

Кузнецов П.А.*, Степанов О.А.**

*Рыбинский государственный авиационный
технический университет им. 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 краткий анализ веерных отключений. Проанализировано влияние реактивной мощности на возникновение и распространение каскадных аварий в энергосетях. Рассмотрены проблемы эксплуатации систем компенсации реактивной мощности с точки зрения борьбы с веерными отключениями.

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

Введение

Электрические сети — это наиболее значимая инфраструктура в человеческой жизни, благодаря тому факту, что ежедневная жизнь современного общества прямо или косвенно связана с потреблением электрической энергии. И когда с сетями происходит авария вследствие человеческого или природного фактора, то поиск и починка вышедшего из строя элемента может стать причиной новой аварии. Отсюда следует, что моделирование и анализ аварий, а самое главное — поиск их причин могут помочь понять закономерности распространения веерных отключений сетей и предсказать влияние аварийной ситуации на сопряженные с ними системы [1].

Основными причинами аварий в электрических сетях могут быть природные катаклизмы, сильные порывы ветра, человеческие или технические факторы, трудовые конфликты, терроризм, военные действия и т.д [2, 3]. А очень многие аварии могут быть вызваны комбинацией электрических, компьютерных и человеческих ошибок и развиваться далее в лавинообразное веерное отключение [2]. Крупные и мелкие аварии всегда начинаются с единичного события, которое дальше инициирует каскадную, нарастающую ошибку, которая может в дальнейшем привести к большей неисправности системы и потере мощности для потребителя. Технические условия, которые могут стать причиной возникновения аварийных ситуаций, — это перегрузки, превышения крайних пределов уровня напряжений

или частоты, нестабильность системы, отключение подстанций или источников генерации, коммутационные процессы [2]. Именно проблематике возникновения аварий в связи с наличием реактивной мощности и посвящена данная статья.

Влияние реактивной мощности на потребителей и баланс мощностей

Электрический ток, измеряемый в амперах, — это поток электронов. Тогда напряжение, прикладываемое к сети, — это сила, заставляющая двигаться этот поток в нужном направлении. Работа, совершаемая электричеством, — это мощность, измеряемая в ваттах (Вт) или мегаваттах (МВт), — произведение тока на напряжение. Передача энергии происходит по электромагнитным волнам. Реактивная мощность, измеряемая в вольт-амперах реактивных (ВАР), получается тогда, когда ток и напряжение по фазе не совпадают. А точнее, при наличии в сети любого емкостного или индуктивного элемента. Одно из свойств индуктивности есть способность сохранять ток, протекающий через неё, неизменным. Как следствие, при протекании тока нагрузки появляется фазовый сдвиг между током и напряжением. Разные знаки у тока и напряжения на период фазового сдвига приводят к снижению энергии электромагнитных полей индуктивностей. Последняя же восполняется из сети. Для большинства промышленных потребителей это значит, что по сетям между источником электроэнергии и потребителем, кроме совершающей полезную работу активной энергии, также протекает реактивная энергия, не совершающая полезной работы. Активная и реактивная энергии составляют полную энергию, при этом доля активной энергии по отношению к полной определяется косинусом угла сдвига фаз между током и напряжением — $\cos \phi$.

Потребление реактивной мощности дополнительно к активной приводит к ряду отрицательных явлений:

- снижаются уровни напряжения на зажимах электроприемника из-за увеличения потерь напряжения;

$$\Delta U = \frac{P \cdot R_{\text{СЕТИ}} + Q \cdot X_{\text{СЕТИ}}}{U};$$

- увеличиваются потери мощности и энергии в сети при передаче энергии к электроприемникам:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_{\text{СЕТИ}} = \frac{P^2}{U^2} R_{\text{СЕТИ}} + \frac{Q^2}{U^2} R_{\text{СЕТИ}};$$

- снижается пропускная способность линий передачи и трансформаторов, загруженных реактивной мощностью.

Генерация, потребление электрической энергии, процессы преобразования её в механическую не могут происходить без наличия реактивной мощности. Её перетоки являются вынужденным балластом электрической сети. Однако их наличие приводит к таким негативным явлениям, как увеличение нагрузки, перегрузка линий электропередач реактивными токами, что увеличивает активные потери при передаче электроэнергии к потребителям. Все это приводит к колебаниям мощности, что негативно сказывается как на источниках генерации, так и на потребителях. Более подробно эти исследования проведены в [1].

Системы компенсации реактивной мощности

В настоящее время некоторые ведущие производители электрооборудования предлагают свои решения для компенсации реактивной мощности. Однако зарубежные установки отличаются высокой ценой, а отечественные не всегда имеют малые габариты и возможность регулирования ступеней конденсаторных батарей. На кафедре электротехники и промышленной электроники предложен свой вариант компенсационной установки для комплексной системы защиты от веерных отключений [4]. Спроектированная установка имеет несимметричную конфигурацию, поскольку может обеспечить как точное регулирование, так и минимальную частоту коммутации ступеней при меньшей стоимости, по сравнению с симметричными. Однако спроектированная автоматическая установка компенсации реактивной мощности (АУКРМ) имеет некоторые «слабые» места:

- в качестве регулятора реактивной мощности используется импортное устройство, производства Lovato Electric (Италия), что делает проблематичным применение установки на режимных объектах и не соответствует программе импортозамещения;

- скорость получения информации с датчиков тока и напряжения имеет довольно низкое быстродействие и хорошо подходит для цехов, где нет частых скачков напряжения;

- ступенчатая регулировка не обеспечивает идеальной компенсации, оставляя циркулировать в сети определенное количество реактивной мощности, которую можно скомпенсировать, применяя плавные регуляторы.

Универсальный быстродействующий регулятор реактивной мощности

Вопросам регулирования переменного напряжения путем компенсации реактивной мощности тиристорными компенсаторами реактивной мощности (ТКРМ) посвящено большое количество работ

[5—9]. В этих работах приводится классификация компенсаторов и предлагается разделить их по методу регулирования реактивной мощности на прямую и косвенную системы компенсации реактивной мощности.

На основе результатов проведенного анализа методов регулирования напряжения резкопеременных нагрузок путем компенсации реактивной мощности регулирующих параметров для системы автоматического регулирования была разработана структурная схема системы автоматического регулирования (САР) для ТКРМ и основные расчетные параметры для системы управления и силовой части ТКРМ. В общем виде структурная схема САР регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности имеет вид, показанный на рис. 1: 1 — силовой трансформатор городской или цеховой подстанции, питающий распределительную сеть трехфазным напряжением 380 В, 50 Гц; Z_H — комплекс станков предприятия или административно-жилой массив, представляющий собой резкопере-

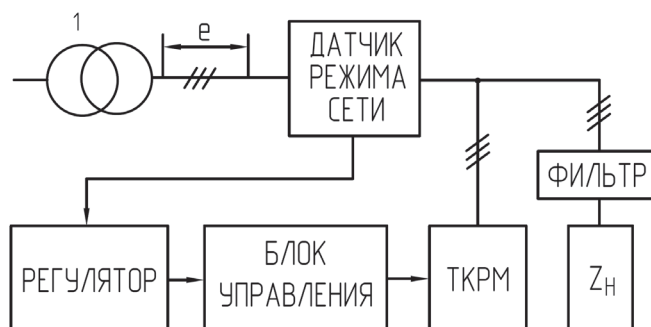


Рис. 1. Структурная схема САР регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности

менную нагрузку с $\cos \varphi = 0,2 \div 0,5$, имеющий скорость сброса-наброса реактивной мощности 300 кВАР/с; датчик режима сети создает регулирующий параметр для системы управления ТКРМ (в нашем случае осуществляется комбинированное регулирование в функциях уровня напряжения и угла между током и напряжением); регулятор обеспечивает соответствующий закон регулирования.

В основе функциональной схемы датчика режима сети лежит датчик уровня напряжения, измеряющий действующее значение напряжения сети через измерительный трансформатор и сравнивающий его с эталонными значениями, соответствующими верхнему и нижнему пределам напряжения. На выходе его формируются импульсы, соответствующие углам отпираания тиристорov (чем меньше действующее значение напряжения, тем меньше должна

быть суммарная реактивная мощность от ТКРМ и нагрузки). Функциональная схема датчика уровня напряжения показана на рис. 2: ТН — измерительный трансформатор напряжения, передает пониженное напряжение сети; В — выпрямительное ус-

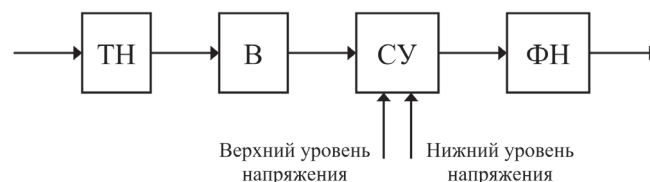


Рис. 2. Функциональная схема датчика уровня напряжения

тройство, на выходе его напряжение пропорционально действующему значению сетевого напряжения; СУ — сравнивающее устройство, на него подаются эталонные напряжения, соответствующие верхнему и нижнему пределам отклонения действующего напряжения от номинального; ФН — формирователь напряжения, преобразует отклонение напряжения от номинального в соответствующий закон управления тиристорами [8].

Если напряжение лежит в заданных пределах, то стабилизатор работает в режиме компенсации реактивной мощности (работа ТКРМ по регулируемому параметру φ — углу между током и напряжением). Наиболее перспективным следует считать преобразователь разности фаз, основанный на измерении скважности. При этом разность фаз между двумя сигналами определяется как отношение промежутка времени Δt_φ между переходами их через нуль к периоду изменения этих сигналов T . Фиксация моментов перехода сигнала через нуль может выполняться с помощью усилителей-ограничителей, преобразующих гармонический сигнал в прямоугольные импульсы, либо другим методом. Схема с усреднением прямоугольных импульсов имеет структуру, показанную на рис. 3.

БРИ представляет собой схему совпадения, а БУ — пассивный или активный фильтр нижних частот. В установившемся режиме напряжение на

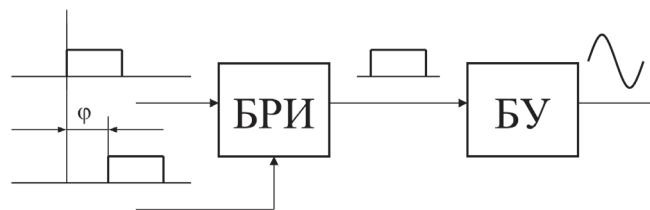


Рис. 3. Схема измерителя фаз с усреднением прямоугольных импульсов: БРИ — блок выделения разностного импульса; БУ — блок усреднения

выходе БУ прямо пропорционально длительности импульса на входе к периоду T . В неустановившемся режиме БУ будет аппроксимировать решетчатую функцию. Интервал усреднения определяется параметрами фильтра.

Функциональная схема датчика режима сети (для регулирования по углу) для одной фазы, построенная по изложенному принципу, представлена на рис. 4 и состоит из следующих узлов: ТН — трансформатор напряжения; ТТ — трансформатор тока; ФИ1, ФИ2 — формирователи импульсов; Т — асинхронный RS-триггер; К — ключ; А1 — фазоинвертор; ФНЧ — фильтр нижних частот.

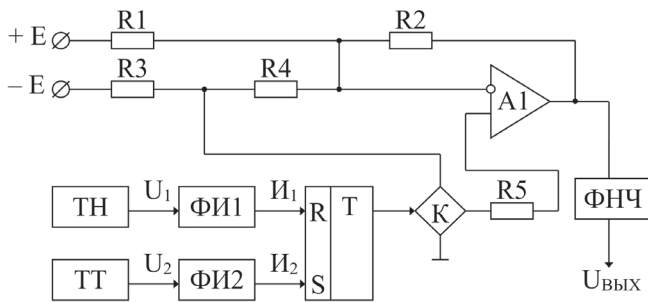


Рис. 4. Функциональная схема датчика режима сети (регулирование по углу φ)

Процесс преобразования разности фаз в напряжение в описанной схеме поясняется диаграммой (рис. 5). В момент перехода через ноль сигналов U_1 и U_2 , соответствующих напряжению и току сети потребителя, ФИ1 и ФИ2 формируют положитель-

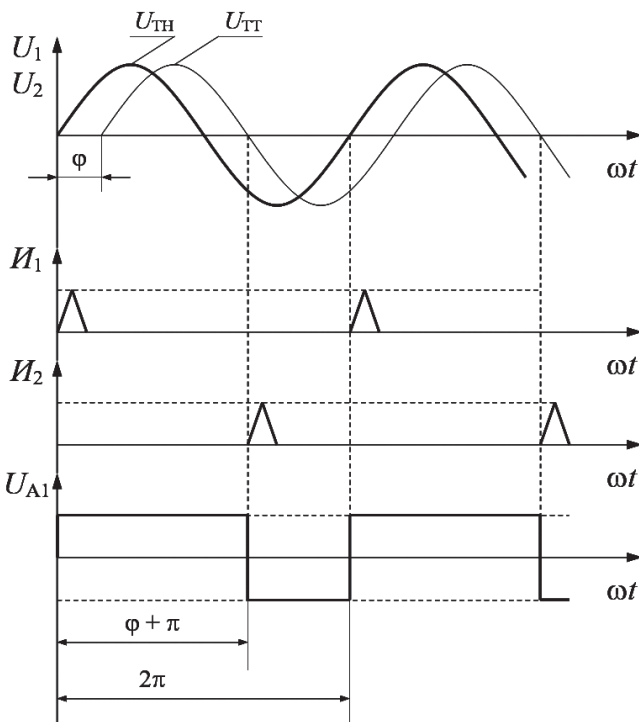


Рис. 5. Диаграмма сигналов датчиков режима сети

ные импульсы длительностью около 5 мкс, которые осуществляют поочередное переключение триггера из одного устойчивого состояния в другое.

Выходной сигнал триггера управляет ключом К, открывая его от импульса U_1 и закрывая от импульса U_2 . Когда ключ К открыт, напряжение на выходе фазоинвертора равно $+E$, а при закрытом ключе оно равно $-E$. Таким образом, на выходе А1 имеет место последовательность разнополярных прямоугольных импульсов.

Среднее значение выходного напряжения фазоинвертора определяется как

$$U_{A1} = \frac{E(\pi + \varphi) - E(\pi - \varphi)}{2\pi} = E \frac{\varphi}{\pi}$$

При замкнутом ключе $U_{A1} = E_{K1}$, где K_1 — коэффициент передачи от источника $-E$, $K_1 = R_2/R_4$. Коэффициент K_2 от источника $+E$ при разомкнутом ключе $K_2 = R_2/R_1$ и должен в два раза превышать K_1 , т.е. должно выполняться условие: $2 \cdot R_4 = R_1$. Изменение масштаба (В/град) можно осуществить с помощью резистора R_2 .

Для подавления гармонических составляющих в выходном сигнале, представляющем последовательность прямоугольных импульсов, модулированных по ширине, требуется использование фильтра нижних частот по основной гармонике (порядка 50—60 дБ) при частоте среза около 10 Гц. Для этого передаточная функция $H(p)$ фильтра была аппроксимирована полиномом Чебышева и выбрана схема в виде активного фильтра второго порядка по структуре Рауха [18] (рис. 6): $H(p) = 1/Q(p)$, где $Q(p)$ — полином Чебышева

$$H(p) = -\frac{k}{1 + a_1 p + a_2 p^2}$$

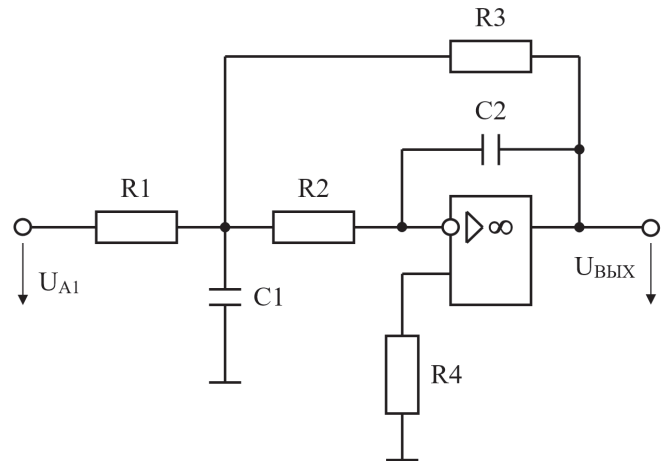


Рис. 6. Фильтр нижних частот датчика сети

где $k = R3/R1$; $a_2 = R2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2$;

$$a_1 = R2C2 + \frac{(R1 + R2)R3}{R1}C2.$$

На частоте среза данная характеристика дает затухание около 27 дБ, следовательно, нужно взять два подобных последовательно соединенных фильтра. В качестве операционных усилителей формируют импульсов, фазоинвертора, фильтра можно использовать микросхему КР533УД2.

Надежность устройства

Был произведен приблизительный расчет надежности регулятора [11]. В качестве исходных данных служат количество элементов определенного вида, типа, а также условия, при которых будет эксплуатироваться устройство (в данном случае стационарные условия станочного цеха). Графики представлены на рис. 7.

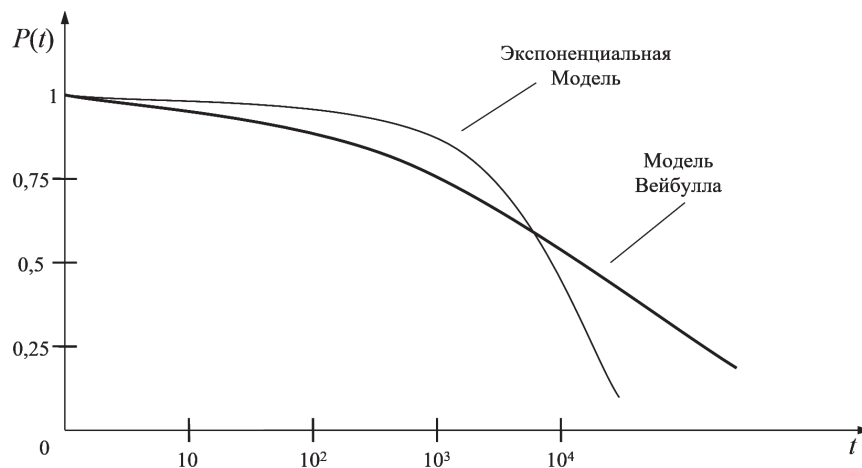


Рис. 7. Прогнозирование вероятности безотказной работы стабилизатора

Согласно модели Вейбулла наработка на отказ составляет 35377 часов. После 10 тыс. часов работы стабилизатора вероятность безотказной работы равна приблизительно 0,6. На этом же рисунке представлен график вероятности безотказной работы по экспоненциальной модели. Нарработка на отказ составляет 12,5 тыс. часов, что удовлетворяет желаемому периоду технического обслуживания устройства один раз в год.

Выводы

После детального анализа причин каскадных аварий и веерных отключений, причиной которых являлись нарушения, вызванные наличием реактивной мощности, предложена и рассчитана конструкция универсального быстродействующего регулятора реактивной мощности, который может работать

в автоматическом режиме регулирования с целью стабилизации напряжения резкопеременных нагрузок. В данной статье приводятся схемы отдельных его элементов без электрических принципиальных схем и подробных расчетов.

Так как регулятор имеет пофазные каналы управления тиристорами и регулирование реактивной мощности осуществляется в каждой фазе, то предполагается, что стабилизатор осуществляет частично и симметрирование в распределительной сети.

*Работа выполнена при поддержке
Фонда Содействия Инновациям.*

Библиографический список

1. Frieu Gebremedhin-Abraha. Statistics of Electric Power Blackouts: Data Analysis and Data Modelling. Master Thesis. — Trondheim, Norway Norwegian University of Science and Technology. 2013, 71 p.
2. Holmgren J. and Molin S. Using disturbance data to assess vulnerability of electric power delivery systems // Journal of Infrastructure Systems. 2006. № 12(4), pp. 243-251.
3. Xianzhong Duan and Sheng Su. Self-Organized Criticality in Time Power Systems Fault, Its Mechanism, and Potential Application // IEEE Transactions on Power Systems. 2010. Vol. 25. No. 4, pp. 1857-1864.
4. 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. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. Часть II. С. 161-163.
5. 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 техноло-

- гической академии им. П.А. Соловьева. 2011. № 1 (19). С. 117-123.
6. Манин А.В., Юдин В.В., Кривов Ю.Н., Москалёва О.А. Энергетический анализ электрических цепей // Электрика. 2013. № 5. С. 7-13.
 7. Кузнецов П.А., Солёный С.В. Борьба с верными отключениями в системах электроснабжения // Зава-лишинские чтения: молодежная секция: Сб. докл. — СПб.: ГУАП, 2016. С. 82-83.
 8. Юдин В.В., Манин А.В., Юдин А.В. Моделирование процессов регулирования мощности в энергетических установках // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2010. № 1 (16). С. 151-156.
 9. Кривов Ю.Н., Манин А.В., Юдин В.В. К вопросу о моделировании процессов регулирования мощности потребителей // Электрика. 2013. № 7. С. 24-27.
 10. Горшечников В.А., Юдин А.В., Манин В.А. Устройство для регулирования реактивной мощности: Авторское свидетельство SU №1684858 А1. Бюл. № 38, 15.10.1991.
 11. Кузнецов П.А., Юдин А.В., Солёный С.В., Соленая О.Я. К проблеме выбора теоретического метода расчета и моделирования надежности работы радиоэлектронных схем // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко: Сб. науч. тр. — Харьков: ХНТУСГ, 2015. № 164. С. 78-80.
 12. Кузнецов П.А., Степанов О.А. Комплексная система защиты потребителей электроэнергии от аварийных режимов работы // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 145-154.

REACTIVE POWER COMPENSATION AUTOMATED SYSTEMS APPLICATION TO PREVENT BLACKOUTS

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 task of the article consists in electric power grids basic emergency modes, leading to rolling blackouts, analysis, and high-speed reactive power smooth regulator (RPR) design for the existing domestic reactive power compensation systems (RPCS).

Failures analysis at industrial enterprises and substations revealed that one of the main reasons resulting in avalanche failures and blackouts is reactive power circulation, representing an integral part of complex electromechanical mechanisms functioning. However, the excessive amount of reactive power and circulation leads to complications and serves as the cause of failures.

Various reactive power-compensating systems, such as either static (capacitor installations), or dynamic (synchronous compensators), are widely used in the industry. However, preference is given to the static ones due to low price and durability. Their implementation for the most part pursues only economic benefits, namely energy cost reduction. Nevertheless, with certain updating these installations can be implemented successfully for failures, resulting in blackouts, prevention.

On the example of compensating installation, developed by the authors, they suggest to replace one of the critical elements for the purpose of regulating properties improvement. This element is Reactive Power Regulator of foreign manufacture. It has a number of disadvantages, which presence may result in cascade fault.

The proposed new regulator is a thyristor reactive power regulator consisting of a transformer, network mode sensor, regulator, control block, thyristor switches and a filter.

This paper presents the schematic diagram and computation algorithms for voltage level sensor parameters, network mode sensor parameters and filter parameters. The computation of the unit reliability is presented either.

Keywords: blackout, reactive power, reactive power compensation system, electrical grid protection, thyristor regulator, cascade fault.

References

1. Friew Gebremedhin-Abraha. *Statistics of Electric Power Blackouts: Data Analysis and Data Modelling*. Master

- Thesis. Trondheim, Norway Norwegian University of Science and Technology. 2013, 71 p.
2. Holmgren J. and Molin S. Using disturbance data to assess vulnerability of electric power delivery systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, № 12(4), pp. 243–251.
 3. Xianzhong Duan and Sheng Su. Self-Organized Criticality in Time Power Systems Fault, Its Mechanism, and Potential Application. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, vol. 25, no. 4, pp. 1857-1864.
 4. Kuznetsov P.A., Stepanov O.A., Yudin A.V. *Problemy nedropol'zovaniya. Sbornik statei*. St. Petersburg, 2016, part II, pp. 161-163.
 5. Manin A.V., Yudin A.V., Groshev A.N., Moskaleva O.A. *Vestnik rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*, 2011, no. 1(19), pp. 117-123.
 6. Manin A.V., Yudin V.V., Krivov Yu.N., Moskaleva O.A. *Elektrika*, 2013, no. 5, pp. 7-13.
 7. Kuznetsov P.A., Solenyi S.V. *Zavalishinskie chteniya: molodezhnaya sektsiya. Sbornik statei*. St. Petersburg, 2016, pp. 82-83.
 8. Yudin V.V., Manin A.V., Yudin A.V. *Vestnik rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*, 2010, no. 1 (16), pp. 151–156.
 9. Krivov Yu.N., Manin A.V., Yudin V.V. *Elektrika*, 2013, no. 7, pp. 24-27.
 10. Gorshechnikov V.A., Yudin A.V., Manin V.A. *Avtorskoe svidetel'stvo SU №1684858 A1*, 15.10.1991.
 11. Kuznetsov P.A., Yudin A.V., Solenyi S.V., Solenaya O.Ya. *Vestnik khar'kovskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta sel'skogo khozyaistva im. Petra Vasilenko. Sbornik statei*. Khar'kov, 2015, no. 164, pp. 78-80.
 12. Kuznetsov P.A., Stepanov O.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 145-154.