

Reduction of Voltage Fluctuations in Electrical Networks Supplying Motors with a Rapidly Changing Load by Installing Longitudinal Compensation Batteries

Basmanov V.G., Kalinina E.A., Cherepanov V.V.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The article deals with the reduction of voltage fluctuations in electrical networks of industrial enterprises with the help of longitudinal compensation batteries. The purpose of the article is to develop a method for calculating the optimal parameters of the longitudinal compensation installation, which makes it possible to perform calculations using numerical characteristics of the range of changes in the voltage and flicker dose. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: to develop a method for selecting the parameters of reducing voltage fluctuations, taking into account the random nature of the change in the parameters of network modes; using the proposed method, to develop a calculation method that allows choosing optimal parameters of capacitor units. The most significant result is the experimental and theoretical confirmation that the proposed method for selecting the parameters of longitudinal compensation batteries, taking into account the random nature of the change in the flicker dose, makes it possible to effectively apply longitudinal compensation to reduce voltage fluctuations in electrical networks of industrial enterprises with a rapidly changing load. The significance of the results is proved by the fact that the proposed method makes it possible to select a longitudinal compensation installation to limit voltage fluctuations at the design stage, thereby ensuring the quality of electric energy in networks with consumers having a rapidly changing load. The resulting calculation method is planned to be used in distribution electrical networks when performing technical measures to ensure the quality of electrical energy.

Keywords: asynchronous motors, rapidly changing load, voltage swing, flicker dose, active power, reactive power, longitudinal compensation installation.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.05>

UDC: 621.315.17

Reducerea fluctuațiilor de tensiune în rețelele electrice care alimentează motoare electrice cu o sarcină semnificativ variabilă prin instalarea bateriilor de compensare în serie

Basmanov V.G., Kalinina E. A., Cherepanov V.V.

Universitatea de Stat din Veatka, Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Articolul examinează reducerea fluctuațiilor de tensiune în rețelele electrice ale întreprinderilor industriale cu ajutorul bateriilor de compensare longitudinală. Scopul articolului este de a elabora o metodă de calculare a parametrilor optimi ai instalației de compensare longitudinală, care să facă posibilă efectuarea calculelor folosind caracteristici numerice ale intervalului de modificări ale tensiunii și dozei de pâlpâire. Pentru a atinge acest obiectiv, este necesar să se rezolve următoarele sarcini: să se elaboreze o metodă de selectare a parametrilor de reducere a fluctuațiilor de tensiune, ținând cont de natura aleatorie a modificării parametrilor modurilor de rețea; folosind metoda propusă, pentru a elabora o metodă de calcul care să permită alegerea parametrilor optimi ai unităților de condensator. Cel mai important rezultat este confirmarea experimentală și teoretică că metoda propusă pentru selectarea parametrilor bateriilor de compensare longitudinală, ținând cont de natura aleatorie a modificării dozei de pâlpâire, face posibilă aplicarea eficientă a compensării longitudinale pentru a reduce tensiunea fluctuații în rețelele electrice ale întreprinderilor industriale cu o sarcină în schimbare rapidă. Semnificația rezultatelor este dovedită de faptul că metoda propusă face posibilă selectarea unei instalații de compensare longitudinală pentru limitarea fluctuațiilor de tensiune în faza de proiectare, asigurând astfel calitatea energiei electrice în rețelele cu consumatori cu sarcină în schimbare rapidă. Metoda de calcul rezultată este planificată a fi utilizată în rețelele electrice de distribuție atunci când se efectuează măsuri tehnice pentru asigurarea calității energiei electrice.

Cuvinte-cheie: motoare asincrone, sarcină semnificativ variabilă, variație de tensiune, doză de pâlpâire, putere activă, putere reactivă, setare de compensare în serie.

Уменьшение колебаний напряжения в электрических сетях, питающих электродвигатели с резкопеременной нагрузкой, путем установки батарей продольной компенсации

Басманов В.Г., Калинина Е.А., Черепанов В.В.

Вятский государственный университет

Киров, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена уменьшению колебаний напряжений в электрических сетях промышленных предприятий с помощью батарей продольной компенсации. Актуальность работы подчеркивается тем, что проблема обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях продолжает оставаться одним из важнейших, определяющих надежность и эффективность электроснабжения потребителей. Целью данной работы является разработка способа расчета оптимальных параметров установки продольной компенсации, позволяющего выполнять расчеты, используя числовые характеристики размахов изменения напряжения сети и дозы фликера. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать методику выбора параметров средств для уменьшения колебаний напряжения, учитывающую случайный характер изменения параметров режимов сети, используя предложенную методику разработать способ расчета, позволяющий выбирать оптимальные параметры конденсаторных установок. В связи с этим авторами были выполнены исследования источников колебаний напряжения, которые применяются для создания полигонов математического ожидания и среднего квадратического отклонения, а также получения их основных числовых характеристик по активной и реактивной нагрузке обследованных электроприводов. Наиболее существенным результатом является экспериментальное и теоретическое подтверждение того, что предложенный способ выбора параметров батарей продольной компенсации с учетом случайного характера изменения дозы фликера позволяет эффективно применять продольную компенсацию для снижения колебаний напряжения в электрических сетях промышленных предприятий с резко переменным характером нагрузки. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный метод позволяет производить выбор установки продольной компенсации для ограничения колебаний напряжения на стадии проектирования, и, тем самым, обеспечить качество электрической энергии в сетях с потребителями, имеющих резко переменную нагрузку. Полученный способ расчета планируется использовать в распределительных электрических сетях при выполнении технических мероприятий по обеспечению качества электрической энергии, а также в проектных организациях при проектировании новых объектов.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, резко переменная нагрузка, размах изменения напряжения, доза фликера, активная мощность, реактивная мощность, установка продольной компенсации.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема качества электрической энергии была и на сегодняшний день остается одной из наиболее важных проблем электроэнергетики [1-16].

В последние десятилетия большинство промышленных предприятий оснащается электронным оборудованием, микропроцессорной и вычислительной техникой, которые наиболее чувствительны к электромагнитным помехам, к изменениям качества электрической энергии. Изменение качества вызвано значительным увеличением установленной мощности нелинейных и резко переменных нагрузок [4-10].

К числу основных показателей качества электрической энергии относятся колебания напряжения. Колебания напряжения вызываются потребителями электроэнергии, имеющими электрическую нагрузку резко переменного характера [12,13,17-20]. Для этих приемников характерным является быстрые изменения амплитуды активной и реактивной мощности нагрузки,

потребляемой из питающей сети, и большая частота этих изменений.

По степени влияния резко переменных нагрузок на колебания напряжения и распространение этих колебаний можно выделить две группы таких приемников:

- приемники среднего напряжения номинальной мощностью в несколько сот киловатт и больше, применяемые в промышленности, например, дуговые печи, сталелитейные печи, электродвигатели переменного тока с частыми пусками и другие;

- приемники низкого напряжения номинальной мощностью в несколько десятков киловатт и меньше, применяемые в промышленности (сварочные машины, станы) и в коммунально-бытовом хозяйстве (лифты, электроприборы и аппараты в домашнем хозяйстве с электромеханическим и электрическим управлением потребления мощности и другие).

При резко переменных нагрузках низкого напряжения на величину колебаний напряжения влияют амплитуды изменений

активных и реактивных составляющих токов приемников. При резко переменных нагрузках среднего напряжения в основном влияние оказывают только изменений амплитуды реактивных составляющих нагрузок этих приемников [13,14].

К источникам колебаний напряжения относятся: дуговые сталеплавильные печи (ДСП), рудно-термические печи, индукционные печи [17,18,21]; дуговая и контактная сварка [15,17,18,20]; краны и лебедки; управляемые выпрямительные установки; станы горячей прокатки; приводы прокатных станков: блюминги, слябинги; пуск мощных электродвигателей (насосов, компрессоров); коммунально-бытовая нагрузка (кухонное оборудование, стиральные машины, водонагреватели, лифты, кондиционеры); рентгеновские аппараты и другие [15,17,18,22].

Колебания напряжения, возникающие при резкопеременной нагрузке, распространяются по всей сети, вызывая колебания напряжения на зажимах всех, в том числе, потребителей со спокойной нагрузкой, отрицательно сказываются на зрении человека и на протекание технологического процесса.

При колебаниях напряжения наблюдается погасание газоразрядных ламп, отпадают контакты магнитных пускателей, выходят из строя батареи конденсаторов и вентили преобразовательных агрегатов [4,8-10]. Также отрицательное влияние испытывают большинство потребителей электроэнергии. Кроме того, колебания напряжения считаются основной проблемой качества электроэнергии, вызывающей повышение температуры, перегрузку генераторов и двигателей и влияющей на людей через раздражающее мерцание света [17]. Надо также отметить, что в настоящее время развитие оборудования с цифровым управлением требует повышения качества электроэнергии. Однако не существует конкретной инфраструктуры, которая мотивировала бы проектирование энергосистемы для достижения определенного уровня качества электроэнергии [18]. В этой статье рассматривается механизм интерактивного динамического контроля качества электроэнергии для концептуализации затрат и выгод от качества электроэнергии. Основная цель состоит в том, чтобы обеспечить инженерную инфраструктуру и

процедуру, которые "подают правильные сигналы" поставщику электроэнергии и потребителю, чтобы сбалансировать качество электроэнергии и стоимость. В предлагаемой инфраструктуре используется вектор индекса уровня качества электроэнергии.

В статье [19] показано, что можно использовать индексы колебаний напряжения для эффективного определения местоположения возмущающих нагрузок в радиальных электросетях. Представленный способ определения местоположения возмущающих нагрузок и оценки параметров основан на индексах колебаний напряжения. Но в данной работе не предлагаются способы уменьшения этих колебаний.

В работах [23,24] предлагается новый алгоритм обнаружения колебаний напряжения на основе вейвлет-преобразования, предназначенный для обнаружения быстрых изменений в сигналах напряжения. Использование вейвлетов обеспечивает одновременную передачу частотно-временной информации о сигнале, что представляет особый интерес при обработке событий напряжения.

В статье [25] предложена усовершенствованная схема управления напряжением с прогнозом для работы регулятора напряжения в распределительной системе, чтобы минимизировать ожидаемый риск нарушения напряжения. В предлагаемой схеме прошлое кратковременное отклонение напряжения аппроксимируется, а прогнозные значения напряжения в местах расположения датчиков оцениваются по текущему вторичному напряжению регулятора напряжения. Таким образом, предлагаемая схема является автономной схемой управления и не требует измерения значений напряжения в режиме реального времени, как в других схемах управления напряжением.

В работе [26] предлагается метод оценки линии и выбора местоположения чувствительной нагрузки для уменьшения падения напряжения на чувствительных нагрузках.

Для сетевой стороны предложен энергетический индекс изменения напряжения.

Для стороны нагрузки предлагается функция степени влияния изменения напряжения. Предложенные показатели могут оценивать систему электроснабжения более комплексно и обоснованно.

Существуют различные направления по улучшению показателей качества электрической энергии, в т.ч. снижение колебаний напряжения. К числу, которых можно отнести применение устройств продольной компенсации (УПК), которые являются традиционным техническим средством, применяемым, для повышения пропускной способности, обеспечения эффективной загрузки и работы в целом линий. УПК является наиболее экономичным способом увеличения пропускной способности внутрисистемных и межсистемных связей, одновременно они могут применяться для улучшения показателей качества электроэнергии. Другим направлений по уменьшению колебаний напряжения является применение унифицированных кондиционеров качества электроэнергии (UPQC). Широкое применение UPQC для улучшения показателей качества электроэнергии в последние годы обусловлено возможностями одновременной компенсации как со стороны питающей сети, так и со стороны потребителя [27-32]. Но из-за высокой стоимости вопрос о размещении UPQC в системе распределения должен решаться с большой осторожностью и предпочтительно решаться как проблема оптимизации. Оптимизация задачи размещения UPQC в конкурентной среде заключается в минимизации потерь мощности, минимизации полных гармонических искажений (THD), улучшении профиля напряжения и уменьшении дисбаланса в нормальных условиях и условиях провисания напряжения [29].

Еще одним направлением по уменьшению колебаний напряжения является применение компенсаторов типа СТАТКОМ, где используются управляемые преобразователи напряжения. Принцип работы компенсатора СТАТКОМ основан на формировании желаемых мгновенных значений напряжений и токов, потребляемых на входе устройства, за счет применения векторного управления и широтно-импульсной модуляции [31, 33-35]. Для уменьшения колебаний напряжения более эффективно применение специализированного устройства, которое называется ДСТАТКОМ.

К числу устройств для снижения колебаний напряжения также относится динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН — DVR) [36,37].

Применение DVR в настоящее время является одной из наиболее распространенных процедур смягчения перепадов напряжения [36]. В процессе работы DVR подает напряжение последовательно с напряжением системы, а ДСТАТКОМ подает ток в систему для устранения проблем с качеством электроэнергии [37].

Анализ многочисленной литературы показал, что вопрос обеспечения качества электрической энергии в сетях с потребителями, имеющих резко переменную нагрузку, весьма актуален и требует решения комплекса методических, организационных и технических мероприятий. Нужно отметить, что часто эти решения являются дорогостоящими, и во многих случаях расходы приходится нести заказчику. Таким образом, перед применением решения для обеспечения качества электроэнергии необходимо детально проанализировать проблему и также рассчитать соотношение затрат и выгод. Кроме того, нужно отметить, что эффективность применения устройств для снижения колебаний напряжения определяется методикой выбора параметров устройств для уменьшения колебаний напряжения.

В детерминированной постановке методики выбора параметров устройств для уменьшения колебаний напряжения известны и описаны в литературе, например, [4,38]. В этих методиках в качестве показателя, характеризующего колебания напряжения принят размах изменения напряжения. В настоящее время показателем колебаний напряжения является доза фликера, изменяющаяся во времени случайным образом [12]. Анализ литературы показал, что методики выбора параметров перечисленных выше устройств с учетом случайного характера изменения дозы фликера отсутствуют. При их разработке необходимо использовать методы расчета дозы фликера, учитывающие стохастический характер ее изменения. Исходя из вышеперечисленного, авторами было принято решение о применении для уменьшения колебаний напряжения установок продольной компенсации реактивной мощности (УПК).

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель данной работы состоит в разработке способа расчета оптимальных параметров

установки продольной компенсации, позволяющего выполнять расчеты, используя числовые характеристики размахов изменения напряжения сети и дозы фликера.

В соответствии с целью были определены следующие задачи:

- разработка методики выбора параметров средств для уменьшения колебаний напряжения, учитывающей случайный характер изменения параметров режимов сети;

- используя методику, учитывающую случайный характер изменения параметров режимов сети, разработать способ расчета, позволяющий выбирать оптимальные параметры конденсаторных установок.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач использовались методы экспериментальных и теоретических исследований.

Экспериментальные исследования выполнялись на предприятии, деятельность которого направлена на обработку древесины и производство фанеры. Основными электроприемниками, участвующими в технологическом процессе, являются электродвигатели, имеющие повторно-кратковременный режим работы с резкопеременной нагрузкой случайного характера. Исследования выполнялись с помощью приборов:

- анализатор качества электрической энергии «PQM-701»
- анализатор электропотребления AR.5.

Решение поставленных задач достигалось путем применения методов математической статистики, теории вероятностей [38], теории случайных импульсов [39], с применением теоретических основ электропривода и электроснабжения [40].

На деревообрабатывающем предприятии в ходе экспериментальных исследований были получены зависимости активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей для механизмов с резкопеременной нагрузкой. Была выполнена математическая обработка, которая позволила получить усредненные статистические нагрузочные диаграммы. Данные диаграммы представляют собой совокупность наиболее вероятных значений характерных точек нагрузочных кривых $P(t)$ и $Q(t)$.

Вероятностный характер изменения нагрузки вызван воздействием нескольких случайных факторов: изменением плотности древесины, вкраплениями сучков, неравномерностью скорости подачи сырья, случайным диаметром фанерного кряжа.

Пример полученных усредненных статистических нагрузочных диаграмм по активной и реактивной мощностям для одного из обследованных механизмов приведен на рис. 1.

На рис. 1 применяются следующие обозначения: P_{act} , Q_{act} - фактические значения активной и реактивной мощностей; $P_{av.w.}$, $Q_{av.w.}$ - средняя активная и реактивная мощности за время работы t_w .

Полученные усредненные статистические нагрузочные диаграммы можно рассматривать как типовые. Их использование возможно для проектирования аналогичных производств при выборе электродвигателей электроприводов технологического оборудования, выборе кабелей, при расчете колебаний напряжения и дозы фликера.

В ходе выполняемых исследований установлено, что изучаемые процессы, происходящие при работе электроприводов с резко переменным характером нагрузки, являются случайными. Поэтому предложено рассматривать графики $P(t)$ и $Q(t)$ как импульсные случайные процессы со случайной амплитудой, временем цикла и продолжительностью включения под нагрузку.

Для исследования колебаний напряжения и дозы фликера значения имеют только точки экстремума графиков активной и реактивной мощности, поэтому предложено графики нагрузок рассматривать состоящими из точек, соответствующих экстремумам данных графиков, соединенных прямыми линиями. Такие графики предлагается описывать решетчатыми моделями и интерполировать сплайн-функциями первой степени.

Для примера на рис. 2 приведены полигоны моделей математического ожидания и среднего квадратического отклонения активной мощности главного привода одного из механизмов фанерного производства.

Предложено графики $Q(t)$, также как и графики $P(t)$, описывать решетчатой

моделью, интерполированной сплайн-функцией первого порядка.

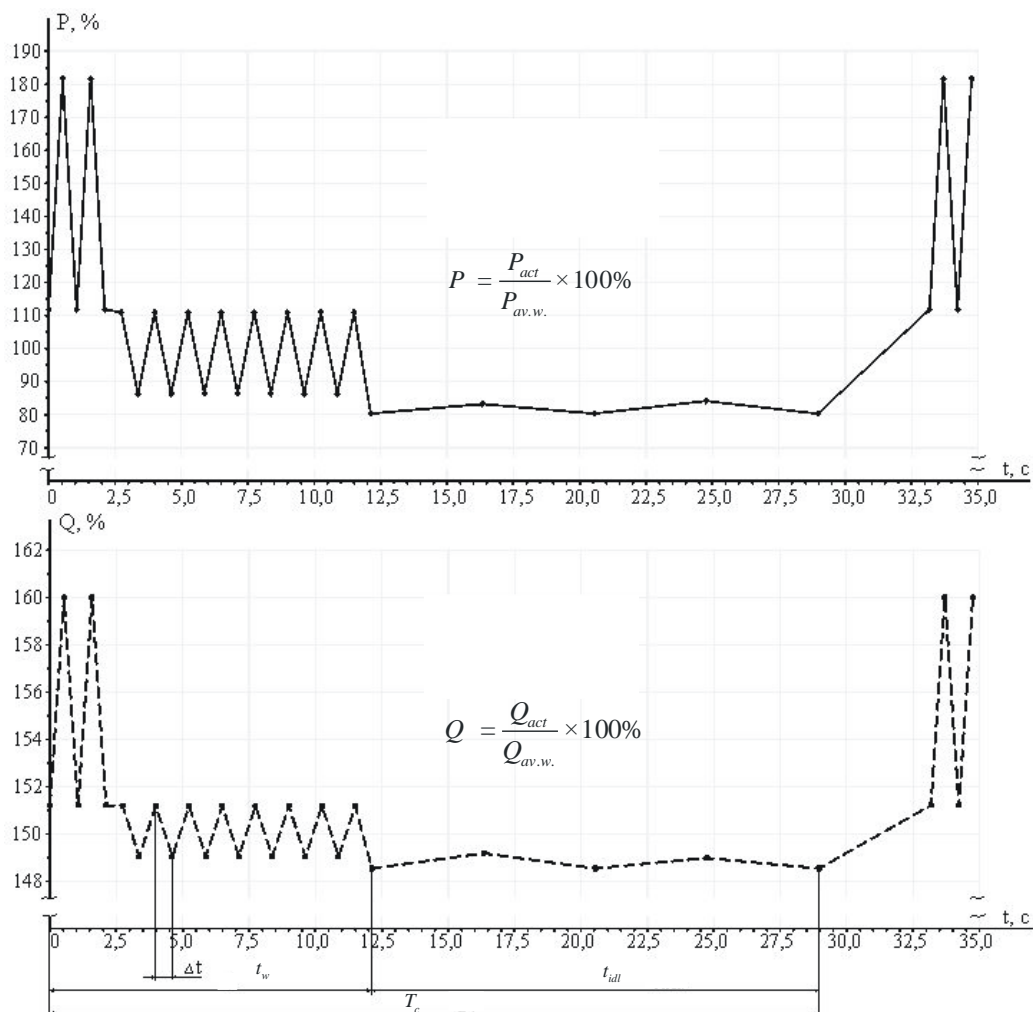


Рис. 1. Усредненные статистические нагрузочные диаграммы $P(t)$ и $Q(t)$ для электропривода механизма спиральной рубительной машины «Корорубка» фанерного производства.¹

Согласно [41], колебания напряжения характеризуются только одним показателем - дозой фликера [42]. Как известно, доза фликера рассчитывается по значениям размахов изменения напряжения сети $\delta U_{r\%}$, %,

$$\delta U_{r\%} = (\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x) / U^2 \cdot 100 \quad (1)$$

где U — напряжение на источнике питания;
 ΔP , ΔQ — размах изменения активной и реактивной мощностей, кВт, квар;
 r , x — активное и реактивное сопротивление сети.

Используя полигоны моделей математических ожиданий и средних квадратических отклонений активной и реактивной мощности, можно получить размахи изменения активной и реактивной

мощностей, и подставив их значения в уравнение (1) рассчитать размах изменения напряжения сети.

Обеспечение качества электрической энергии в сетях с потребителями, имеющих резко переменную нагрузку, требует решения комплекса методических, организационных и технических мероприятий.

Одним из способов ограничения колебаний напряжения, относящимся к техническим мероприятиям, является выбор и установка средств компенсации реактивной мощности.

Традиционно применяются два вида компенсации:

- поперечная компенсация;
- продольная компенсация реактивной мощности.

¹ Appendix 1

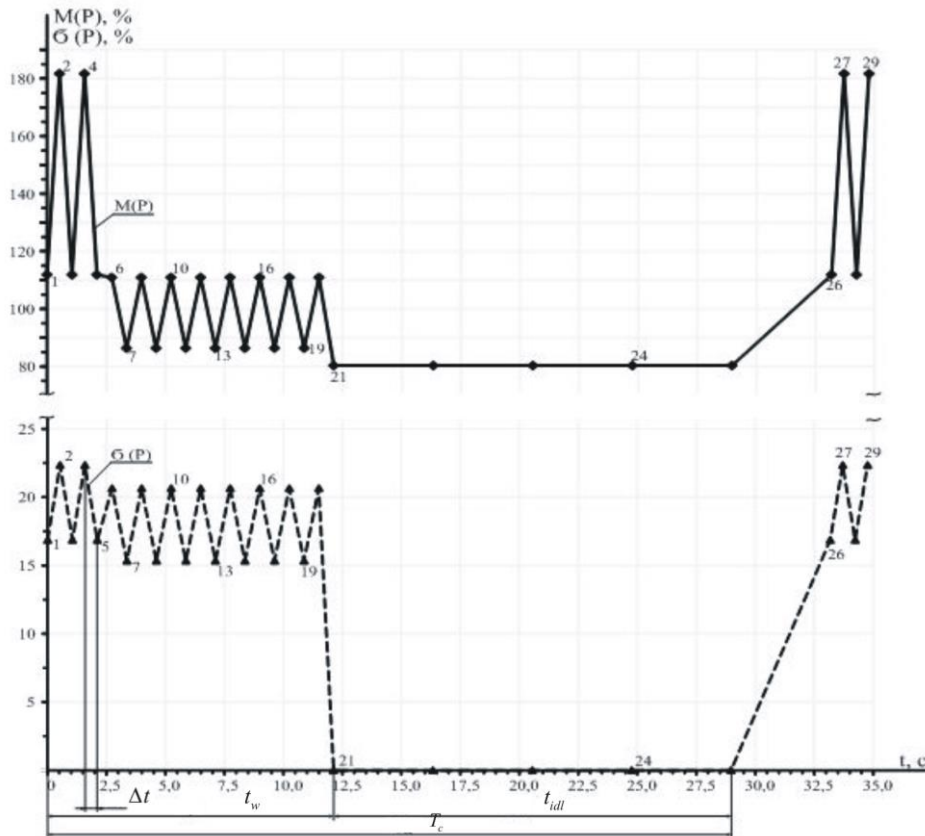


Рис. 2. Пример полигона моделей математических ожиданий и средних квадратических отклонений активной мощности главного привода механизма спиральной рубительной машины «Корорубка» фанерного производства.²

Поперечная компенсация нашла широкое применение, поскольку позволяет: уменьшить потери активной мощности при сохранении величины передаваемой мощности; увеличить пропускную способность сети; повысить передаваемую мощность.

Если есть колебания напряжения, применяется продольная компенсация реактивной мощности.

Главное её назначение – частичная компенсация индуктивного сопротивления участков электрической цепи для уменьшения потери напряжения в них. При продольной компенсации конденсаторы включаются в сеть последовательно, через них проходит полный ток линии.

На рис. 3 приведена принципиальная схема включения установки продольной компенсации (УПК) в электрическую сеть.

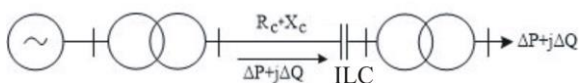


Рис. 3. Принципиальная схема включения УПК в электрическую сеть.³

При применении УПК уравнение (1) примет вид:

$$\delta U_{t\%} = (\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot (x - x_{ILC})) / U^2 \cdot 100, \quad (2)$$

где x_{ILC} — сопротивление установки продольной компенсации.

Ниже авторами предложен способ расчета сопротивления установки продольной компенсации.

Сопротивление установки продольной компенсации можно определить по известной формуле:

$$X_{ILC} = (\Delta U_{ILC} \cdot U_b) / \Delta Q, \quad (3)$$

где ΔU_{ILC} — величина напряжения, на которую необходимо уменьшить существующий размах напряжения с помощью УПК;

ΔQ — бросок (импульс) реактивной мощности;

U_b — базисное напряжение.

Предлагается вычислять максимальное значение дозы фликера P_{st}^{max} на интервале осреднения 10 мин., используя уравнение (4):

$$P_{st}^{\max} = M[P_{st10}] + \beta \sqrt{D[P_{st10}]} \\ = M[P_{st10}] + \beta \cdot \sigma[P_{st10}], \quad (4)$$

где β — коэффициент, зависящий от закона распределения дозы фликера P_{st} ;

$M[P_{st10}]$ — математическое ожидание дозы фликера на интервале осреднения 10 мин.;

$D[P_{st10}]$ — дисперсия дозы фликера на интервале осреднения 10 мин.;

$\sigma[P_{st10}]$ — среднее квадратическое отклонение дозы фликера на интервале осреднения 10 мин.

Далее определяется средний размах изменения напряжения, при котором достигается P_{st}^{\max} . При этом, можно записать:

$$P_{st}^{\max} = \sqrt[3]{n \cdot P_{st.av}^3}, \quad (5)$$

где $P_{st.av}$ — среднее значение импульса дозы фликера;

n — количество импульсов на интервале 10 минут.

Из уравнения (5) следует:

$$P_{st.av} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \cdot (P_{st}^{\max})^3} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \cdot P_{st}^{\max}}. \quad (6)$$

Если в уравнение (6) подставить нормативное значение кратковременной дозы фликера $P_{st}^{\max} = 1,38$ [41], то определим допустимое значение размаха напряжения d_{adm} , при котором доза фликера не будет превосходить указанное в стандарте значение, по формуле, приведенной в [11].

$$d_{adm} = \frac{P_{st} \cdot d_0}{F_{eq}}, \quad (7)$$

где F_{eq} — коэффициент эквивалентности, зависящий от формы колебаний напряжения [11];

d_0 — допустимый размах колебаний напряжения.

Величина ΔU_{ILC} вычисляется по формуле:

$$\Delta U_{ILC} = \frac{|d_{av} - d_{adm}|}{100} \cdot U_{nom}. \quad (8)$$

Размах изменения напряжения сети вычисляется по известному уравнению (1).

Учитывая, что активная и реактивная мощности для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором связаны аналитически, то с учетом этого, уравнение (1) можно записать в следующем виде,

$$\delta U_{t\%} = \frac{\Delta P \cdot r + L_Q \cdot \Delta P^2 \cdot x}{U^2} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где L_Q — линейные операторы активной и реактивной мощности.

Таким образом, уравнение (7) примет вид:

$$d_{av} = \frac{\Delta P_{av} \cdot r + L_Q \cdot \Delta P_{av}^2 \cdot x}{U^2} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где ΔP_{av} , ΔQ_{av} — среднее значение размаха изменения активной и реактивной мощностей, кВт, квар.

При решении квадратного уравнения, уравнение (10) примет вид:

$$\Delta P_{av} = \frac{-r \pm \sqrt{r^2 + 4 \cdot L_Q \cdot x \cdot \frac{d_{av} \cdot U^2}{100}}}{2 \cdot L_Q \cdot x}. \quad (11)$$

Отсюда

$$\Delta Q_{av} = L_Q \cdot \Delta P_{av}^2 = \\ = \frac{r^2 \pm r \cdot \sqrt{r^2 + 4 \cdot L_Q \cdot x \cdot \frac{d_{av} \cdot U^2}{100}}}{2 \cdot L_Q \cdot x^2} + \\ + \frac{2 \cdot L_Q \cdot x \cdot \frac{d_{av} \cdot U^2}{100}}{2 \cdot L_Q \cdot x^2}. \quad (12)$$

Подставив уравнения (11) и (12) в уравнение (10), определяется величина X_{ILC} .

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Далее приводится пример расчета по предложенному авторами способу для группы деревообрабатывающего оборудования.

Расчет выполняется для шести электродвигателей: два лущильных станка, корорубка, барабанная рубительная машина «Дробилка шпона», окорочный станок и пила. Данные электроприемники являются источниками резкопеременной нагрузки, получают питание от одной секции шин трансформаторной подстанции (рис. 4).

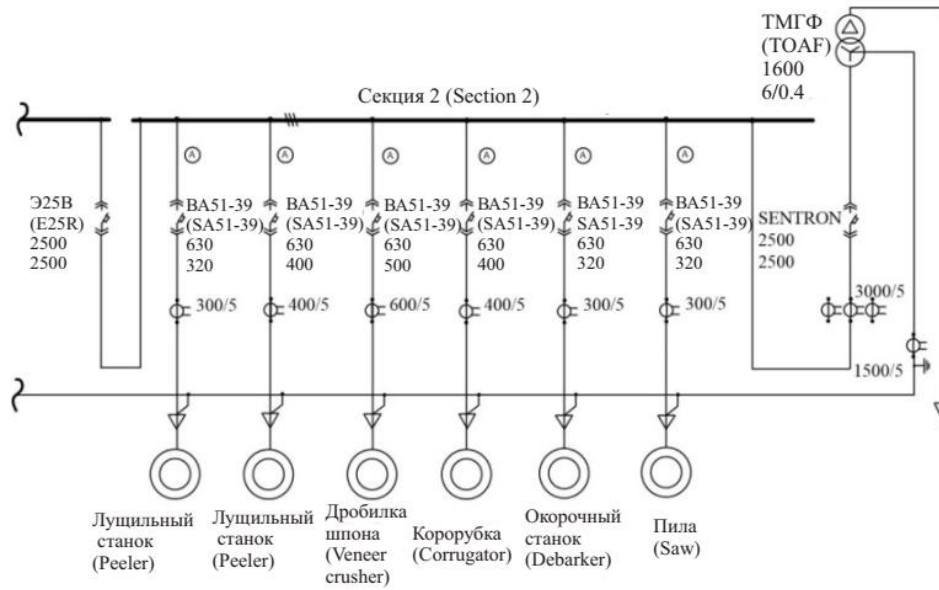


Рис. 4. Схема подключения главных приводов механизмов, являющихся источниками резкопеременной нагрузки.⁴

Задача заключается в определении сопротивления установки продольной компенсации, включаемой в сеть последовательно и предназначенную для снижения колебаний напряжения. Напряжение сети $U = 400$ В, активное сопротивление сети $r = 0,0015$ Ом, реактивное сопротивление сети $x = 0,0079$

Ом, количество импульсов на интервале 10 минут $n = 118$ шт., $L_Q = 1,97 \cdot 10^{-5}$, В/Вт.

На рис. 5 приведен фрагмент модели математического ожидания группового графика активной электрической нагрузки главных приводов механизмов, получающих питание от второй секции шин трансформаторной подстанции.

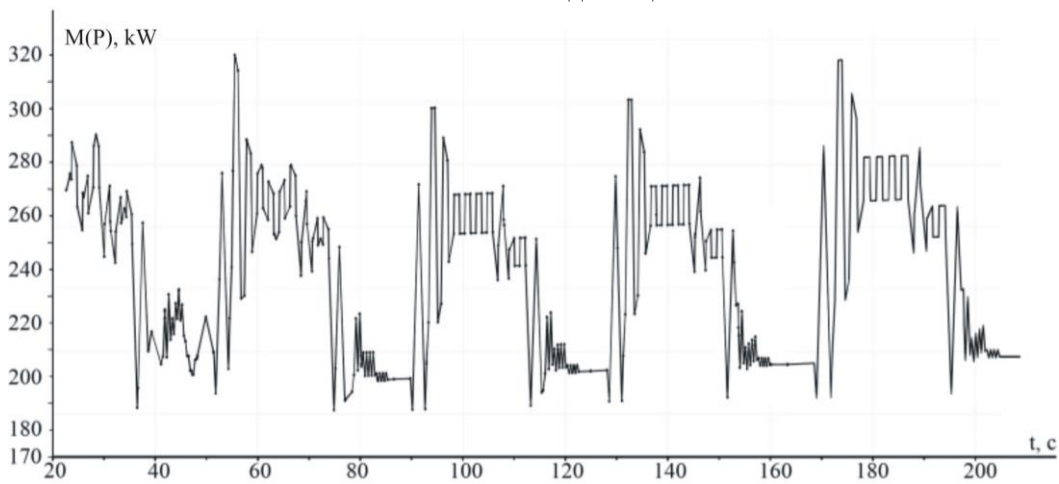


Рис. 5. Фрагмент модели математического ожидания группового графика активной электрической нагрузки.⁵

Расчет максимального значения дозы фликера на интервале осреднения 10 минут, возникающей при работе группы электроприводов (рис. 4) выполняется при помощи программы для расчета кратковременной дозы фликера при стохастическом характере нагрузок, которая разработана и описана в более ранних работах авторов статьи. В результате расчетов получили $P_{st}^{max} = 1,61$.

Используя уравнение (6), найдем $P_{st.av}$:

$$P_{st.av} = \sqrt[3]{\frac{1}{118}} \cdot 1,61 = 0,32. \quad (12)$$

Тогда по уравнению (7):

$$d_{av} = \frac{0,32 \cdot 2,75}{0,46} = 1,91.$$

Используя уравнение (6) найдем $P_{st.norm.}$:

$$P_{st.norm.} = \sqrt[3]{\frac{1}{118}} \cdot 1,38 = 0,28.$$

где $P_{st}^{max} = 1,38$ — норма значения кратковременной дозы фликера согласно [41].

По уравнению (7):

$$d_{norm} = \frac{0,28 \cdot 2,75}{0,46} = 1,67.$$

Величина $\Delta U_{лс}$ вычисляется по уравнению (8):

$$\Delta U_{лс} = \frac{1,91 - 1,67}{100} \cdot 400 = 0,96.$$

Определим средние значения размаха изменения активной (Вт) и реактивной мощностей (вар):

$$\Delta P_{av} = \frac{-0,0015}{2 \cdot 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0079} \pm \sqrt{\frac{0,0015^2 + 4 \cdot 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0079 \cdot \frac{1,91 \cdot 400^2}{100}}{2 \cdot 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0079}} = 135393,4.$$

Отсюда

$$\Delta Q_{av} = 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 135393,4^2 = 361128.$$

Сопротивление установки продольной компенсации, Ом:

$$X_{лс} = \frac{0,96 \cdot 400}{361128} = 0,0011.$$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получены следующие результаты:

- разработана методика выбора параметров средств для уменьшения колебаний напряжения, учитывающая случайный характер изменения параметров режимов сети;

- разработан способ расчета, использующий методику, учитывающую случайный характер изменения параметров режимов сети, который позволяет выбирать оптимальные параметры установок продольной компенсации для снижения колебаний напряжения.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Averaged statistical load diagrams $P(t)$ and $Q(t)$ for the electric drive of the mechanism of the spiral chipper "Kororubka" of plywood production.

²**Fig. 2.** An example of a polygon of models of mathematical expectations and standard deviations of the active power of the main drive of the mechanism of the spiral chipper "Kororubka" of plywood production.

³**Fig. 3.** Schematic diagram of the inclusion of the LCU in the electrical network.

⁴**Fig. 4.** Wiring diagram of the main drives of mechanisms that are sources of rapidly changing load.

⁵**Fig. 5.** Fragment of the mathematical expectation model of the group graph of active electrical load.

Литература (References)

- [1] Kusko A., Thompson M.T., Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill, New-York, 2007. 225 p.
- [2] Chopade P.V., Bugade V.A., Bharadwaj D.G., Ensuring Power Quality and Reliability- A Step Towards Securing Energy for the Future. Proceedings of National Power System Conference NPSC, at Indian Institute of Technology (IIT) Roorkee, India, December 26-29, 2006, pp. 17-23.
- [3] Diakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K. Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike i elektrotehnike [Electromagnetic compatibility in electric power and electrical engineering]. Moscow, Energoatomizdat. 2003. 768 p. (In Russian).
- [4] Savina N.V. Kachestvo elektroenergii [Power quality]. Blagoveshchensk, Amurskiy gosudarstvennyy universitet. 2014. 182 p. (In Russian).
- [5] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. Third Edition. McGraw-Hill, 2012. 558 p.
- [6] Stones J., Collinson A. Power quality. *Power Engineering Journal*, 2001, vol. 15, no. 2, pp. 58-64. doi: 10.1049/pe:20010201.
- [7] Jazebi S., Vahidi B. Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 91, pp. 9-17, doi: dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2012.04.008.
- [8] Azcarate I., Gutierrez J.J., Lazkano A., Saiz P., Redondo K., Leturiondo L.A. Experimental study of the response of efficient lighting technologies to complex voltage fluctuations. *Electrical Power and Energy Systems*, 2014, vol. 63, pp. 499-506. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.039.
- [9] Gutierrez-Ballesteros E., Ronnberg S., Gil-de-Castro A. Characteristics of voltage fluctuations induced by household devices and the impact on LED lamps. *Electrical Power and Energy Systems*, 2022, vol. 141, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108158.
- [10] Gao Y., Wu C., Yao W., Cao Y., Zhang M. Time-varying voltage flicker analysis based on analytic-adaptive variational mode decomposition. *Electric Power Systems*

- Research*, 2022, vol. 212, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108245.
- [11] Zhezhenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Sayenko Yu.L., Neuberger N.A. *Elektromagnitnaya sovместimost potrebiteley* [Consumer Electromagnetic Compatibility]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p.
- [12] Wiczynski G. Analysis of Voltage Fluctuations in Power Networks. in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no. 11, pp. 2655-2664. doi: 10.1109/TIM.2008.925005.
- [13] Vagin G.Ya., Kotelnikov O.I. Kachestvo elektroenergii v setyakh promyshlennykh predpriyatiy [Studies of the quality of electrical energy at machine-building enterprises and measures to improve it]. Moscow. MDNTP. 1977. pp.74-80.
- [14] Voynov S.L., Gamm A.Z., Golub I.I., Zhezhenko I.V., Zhelezko Yu.S., Neyman V.V., Sayenko Yu.L. *Normirovanie pokazateley kachestva elektricheskoy energii i ikh optimizatsiya* [Rationing of indicators of quality of electric energy and their optimization]. Irkutsk, 1988. 249 p.
- [15] Perera S., Elphick S. Applied Power Quality. Analysis, Modelling, Design and Implementation of Power Quality Monitoring Systems. 1st Edition. Elsevier. 2022. p.336. Available at: <https://shop.elsevier.com/books/applied-power-quality/perera/978-0-323-85467-2#full-description> (accessed 10.03.2023).
- [16] Zhezhenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Indicators of the quality of electricity and their control at industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p. (In Russian).
- [17] Morsi W.G., El-Hawary M.E. On the appropriate monitoring period for voltage flicker measurement in the presence of distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 2009, vol. 79 (4), pp. 557-561. doi:10.1016/j.epsr.2008.06.019.
- [18] Lee G.-J., Heydt G.T. An interactive–dynamic mechanism conceptualizing the cost and benefit of electric power quality. *Electric Power Systems Research*. vol. 69, pp. 69–75, 2004. doi:10.1016/j.epsr.2003.07.011.
- [19] Wiczyński G. Determining location of voltage fluctuation source in radial power grid. *Electric Power Systems Research*. 2020, vol. 180, doi:10.1016/j.epsr.2019.106069.
- [20] Marei M.I., El-Saadany E.F., Salama M.M.A. Estimation techniques for voltage flicker envelope tracking. *Electric Power Systems Research*. 2004, vol. 70 (1), pp. 30-37. doi:10.1016/j.epsr.2003.11.001
- [21] Novoselov N.A. *Sovershenstvovaniye metodik rascheta pokazateley kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya s dugovymi staleplavilnymi pechami maloy moshchnosti* [Improving the methods for calculating the quality indicators of electric power in power supply systems with low-power arc steel-smelting furnaces. Cand. of tech. sci. diss.]. Magnitogorsk, 2012. 166 p.
- [22] Vagin G.Ya. *Rezhimy elektrosvarochnykh mashin* [Modes of electric welding machines]. – 2nd ed. reprint. and add. Moscow, Energoatomizdat. 1985. 192 p. (In Russian).
- [23] Latran M.B., Teke A. A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, vol. 71, pp. 131-139. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.02.040.
- [24] Barros J., Diego R.I., Apráiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 88, pp. 130-136. doi: org/10.1016/j.epsr.2012.02.009.
- [25] Yoshizawa S., Hayashi Y. Advanced voltage control based on short-time ahead voltage fluctuation estimation in distribution system. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 188. doi: org/10.1016/j.epsr.2020.106559.
- [26] Ma L., Li Y., Tian D., Lou J., Chen Y., Liu X. Assessment of voltage sag/swell in the distribution network based on energy index and influence degree function. *Electric Power Systems Research*, 2023, vol. 216. doi: org/10.1016/j.epsr.2022.109072.
- [27] Panda A.K., Patnaik N. Management of reactive power sharing & power quality improvement with SRF-PAC based UPQC under unbalanced source voltage condition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 84, pp. 182-194. doi: org/10.1016/j.ijepes.2016.05.010.
- [28] Patjoshi R.K., Kolluru V.R., Mahapatra K. Power quality enhancement using fuzzy sliding mode based pulse width modulation control strategy for unified power quality conditioner. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 84, pp. 153-167. doi: org/10.1016/j.ijepes.2016.05.007.
- [29] Sarker J., Goswami S.K. Optimal Location of Unified Power Quality Conditioner in Distribution System for Power Quality Improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 83, pp. 309-324. doi: org/10.1016/j.ijepes.2016.04.007.
- [30] Khalse S. S. The Unified Power Quality Conditioner (UPQC): The Principle, Control and Application. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, 2018, vol. 03, no. 11, pp. 126-129. Available at: <https://ijream.org/papers/IJREAMV03I113533.pdf>. (accessed 10.06.2023).
- [31] Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Springer

- New York. 2002. p. 460. doi: org/10.1007/978-1-4615-1153-3.
- [32] Aminia M.A., Jalilianb A. Modelling and improvement of open-UPQC performance in voltage sag compensation by contribution of shunt units. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 187. doi: org/10.1016/j.epsr.2020.106506.
- [33] Bhim S., Saha R. Modeling of 18 – pulse STATCOM for power systems applications. *Journal of power electronics*, 2007, vol. 7 (2), pp. 146-158.
- [34] Yang Z., Zhao G., Yu H., Current limiting control method with adaptive virtual impedance for grid-forming STATCOM, *Energy Reports*, vol. 9, Supplement 2, 2023, pp. 453-460. doi: org/10.1016/j.egyr.2023.03.023.
- [35] Koshelev K.S., Peshkov M.V. Vybor parametrov staticheskogo kompensatora reaktivnoi moshchnosti STATKOM [STATCOM static reactive power compensator parameter selection]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2007, no. 8, pp. 34–37.
- [36] Saeeda A.M., Abdel Aleemb S.H.E., Ibrahima A.M., Balcic M.E., El-Zahaba E.E.A. Power conditioning using dynamic voltage restorers under different voltage sag types. *Journal of Advanced Research*. 2016, vol. 7(1), pp. 95-103. doi: org/10.1016/j.jare.2015.03.001.
- [37] Ghosh H., Kumar Saha P., Kumar Panda G. Performance comparison between DVR and DSTATCOM used for load voltage control in distribution side. 2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), Mylavaram, India, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/APCET.2012.6302026.
- [38] Savina N.V. *Primeneniye teorii veroyatnostey i metodov optimizatsii v sistemakh elektrosnabzheniya* [Application of probability theory and optimization methods in power supply systems]. – Blagoveshchensk, Amurskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2007. 271 p. (In Russian).
- [39] Shpiganovich A. N. *Matematicheskoye modelirovaniye sistem i tekhnologicheskikh kompleksov sluchaynymi potokami* [Mathematical modeling of systems and technological complexes with random flows]. Lipetsk, 2007. 209 p.
- [40] Andreyev V.P., Sabinin Yu.A. *Osnovy elektroprivoda* [Drive Basics]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963. 772 p. (In Russian).
- [41] GOST 32144-2013 *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standart 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
- [42] Axelberg P.G.V. Measurement Methods for Calculating of the Direction to a Flicker Source. Thesis for the degree of Licentiate of Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2003. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266408498_Measurement_Methods_for_Calculating_of_the_Direction_to_a_Flicker_Source. (accessed 10.02.2023).

Сведения об авторах.



Басманов Владислав Геннадьевич, к.т.н., доцент. Область научных интересов: надежность электроснабжения, качество электрической энергии, энергосбережение. E-mail: basmanov@vyatsu.ru



Черепанов Вячеслав Васильевич, д.т.н., профессор. Область научных интересов: энергосбережение, качество электрической энергии. E-mail: stud2398@yandex.ru



Калинина Екатерина Андреевна, к.т.н. Область научных интересов: энергосбережение, качество электрической энергии "умные" сети. E-mail: kalininakaterina@bk.ru