

Analysis of Voltage Fluctuations in Power Supply Systems with Consumers with the Rapidly Changing Load

Bakshaeva N.S., Walz I.A.
Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The purpose of the research is to develop a methodology for calculating voltage fluctuations when connecting new equipment with rapidly changing load using mathematical models of typical consumers of timber processing enterprises. The urgency of the study is due to the need to provide a methodological basis for possibility of connecting a new consumer with rapidly changing load to the system. The purpose of the research requires solving some problems. The most significant problem is to find a way to calculate voltage fluctuations and flicker doses when modeling the connection of the new equipment. Methods of experimental and theoretical research and methods of mathematical statistics and the probability theory were used to process experimental data. The most significant results were: obtaining a methodology for determining the possibility of joint supply of household consumers and rapidly changing load based on the analysis of electrical load schedules and calculation of voltage fluctuations; mathematical models of work of voltage fluctuations sources - timber processing enterprises, consumers of electric energy. The developed methods are based on the analysis of electrical load schedules; spectrum analysis of the range of voltage fluctuations; mathematical modeling of common connection of consumers. In the course of the research, it was concluded that the proposed methods provide the basis for making a grounded decision about the possibility of connecting a new consumer with rapidly changing load and to make a decision-making process more objective.

Keywords: voltage fluctuations; variable load; electrical power quality; electrical load graphs, mathematical model, source of fluctuations.

DOI: 10.5281/zenodo.3562179

Analiza fluctuațiilor de tensiune în sistemele de alimentare cu variația bruscă a sarcinii consumatorilor

Bakshaeva N.S., Valț I.A.
Universitatea de Stat din Vyatka
Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivul lucrării este de a dezvolta o metodologie pentru calcularea fluctuațiilor de tensiune la conectarea echipamentelor cu variație semnificativă a sarcinii, utilizând modele matematice ale consumatorilor tipici ai întreprinderilor de prelucrare a lemnului. Relevanța studiului se datorează necesității de a oferi o bază metodologică pentru a lua o decizie argumentată cu privire la posibilitatea conectării unui nou consumator cu o sarcină foarte variabilă la schema existentă. Obiectivul este atins prin rezolvarea problemelor, dintre care cel mai semnificativ este: găsirea unei modalități de calculare a fluctuațiilor de tensiune și cotei flicherului la modelarea conexiunii unui echipament nou. Obiectul studiului îl reprezintă sistemele de alimentare cu energie electrică ale întreprinderilor de prelucrare a lemnului cu surse de fluctuații de tensiune de putere mică. Pentru a rezolva aceste probleme, s-au folosit metode de cercetare experimentală și teoretică. Prelucrarea datelor experimentale se realizează pe baza metodelor statisticilor matematice, teoriei probabilității. Cele mai semnificative rezultate: metodologia pentru determinarea posibilității alimentării comune a consumatorilor casnici și a unei sarcini în schimbare rapidă a sarcinii bazată pe o analiza curbelor sarcinii electrice și calculul fluctuațiilor de tensiune; modele matematice de lucru, caracteristice pentru întreprinderile de prelucrare a lemnului, care sunt surse de fluctuații a tensiunii. Metodologia dezvoltată se bazează pe analiza curbelor de sarcină, modelarea matematică a funcționării comune a echipamentelor și analiza intervalului de variație a tensiunii. Semnificația practică a rezultatelor constă în faptul, că modelele matematice obținute permit realizarea de studii numerice ale regimurilor de consum a energiei la conectarea echipamentelor noi și calcularea indicatorilor de calitate a energiei electrice.

Cuvinte-cheie: fluctuații de tensiune; sarcină brusc variabilă; calitatea energiei electrice; ciurbe de sarcină, modelul matematic, sursa de fluctuații.

Анализ колебаний напряжения в системах электроснабжения с потребителями с резкопеременной нагрузкой**Бакшаева Н.С., Вальц И.А.**

Вятский государственный университет

Киров, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является разработка методики расчета колебаний напряжения при подключении оборудования с резкопеременным характером нагрузки, использующей математические модели работы характерных потребителей лесоперерабатывающих предприятий. Актуальность исследования обусловлена необходимостью дать методическую основу для принятия обоснованного решения о возможности подключения нового потребителя с резкопеременной нагрузкой к существующей схеме. Поставленная цель достигается решением задач, наиболее значимой из которых является: найти способ вычисления колебаний напряжения и дозы фликера при моделировании подключения нового оборудования. Объектом исследования являются системы электроснабжения лесоперерабатывающих предприятий с источниками колебаний напряжения небольшой мощности. Для решения поставленных задач использовались методы экспериментальных и теоретических исследований. Обработка экспериментальных данных осуществляется на базе методов математической статистики, теории вероятностей. Наиболее значимыми результатами являются: методика определения возможности совместного питания коммунально-бытовых потребителей и резкопеременной нагрузки на основе анализа графиков электрических нагрузок и расчета колебаний напряжения; математические модели работы характерных для лесоперерабатывающих предприятий потребителей электрической энергии, являющихся источниками колебаний напряжения. В основу разработанной методики положены анализ графиков электрических нагрузок, математическое моделирование совместной работы оборудования и анализ спектра размахов изменения напряжения. Практическая значимость результатов состоит в том, что полученные математические модели позволяют выполнять численные исследования режимов электропотребления при подключении нового оборудования, рассчитывать показатели качества электрической энергии. Разработанную методику рекомендуется использовать при расчете колебаний напряжения как для существующих объектов электроснабжения, так и при моделировании подключения нового оборудования. В результате исследований сделан вывод, что предложенная методика дает критерии для принятия обоснованного решения о возможности подключения потребителя с резкопеременной нагрузкой к электрической сети и позволяет снизить субъективность при принятии решения.

Ключевые слова: колебания напряжения; резкопеременная нагрузка; качество электрической энергии; графики электрических нагрузок, математическая модель, источник колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленного производства приводит к внедрению передовых технологий и нового оборудования, которое при всей технологической эффективности оказывает отрицательное влияние на качество электроэнергии [1-3]. Поэтому, характерной особенностью многих современных промышленных предприятий является увеличение удельного веса электроприемников с резкопеременным характером нагрузки.

При работе электроприемников с резкопеременной ударной нагрузкой в электрической сети возникают резкие толчки потребляемой мощности. Это вызывает изменения напряжения в сети, размахи которых могут достигнуть существенных значений. Указанные обстоятельства крайне неблагоприятно отражаются на работе всех электроприемников, подключенных к данной сети, в том числе и электроприемников вызывающих эти изменения.

Колебания напряжения, вызванные одним источником, воздействуют на большое число потребителей. К числу электроприемников, чрезвычайно чувствительных к колебаниям напряжения относятся осветительные приборы, особенно лампы накаливания и электронная техника. Мигание источников освещения обуславливает возникновение фликера, т.е. субъективного восприятия человеком колебаний светового потока, что вызывает неприятный психологический эффект, утомление зрения и организма в целом. Это ведет к снижению производительности труда, а в ряде случаев и к травматизму [4, 5]. Влияние фликера на людей зависит не только от индивидуального восприятия данного явления человеком, но и от технических аспектов, например, характеристик ламп, которые работают в условиях колебаний напряжения в электрической сети [6-9].

Одним из главных условий электромагнитной совместимости источников

света с электрической сетью является питание их электрической энергией требуемого качества. Качество электрической энергии определяется совокупностью характеристик, которые регламентируются национальным стандартом [10]. Одним из показателей качества электрической энергии является колебание напряжения. Оценка соответствия колебаний напряжения нормам качества электрической энергии осуществляется по значению дозы фликера. Доза фликера определяется по кривым допустимых колебаний напряжения, полученных для ламп накаливания.

В настоящее время широкое распространение получили лампы, имеющие иной принцип действия, по сравнению с лампами накаливания. Это отличие обуславливает разницу в чувствительности таких ламп к колебаниям напряжения в электрической сети. Поэтому методы оценки фликера, обозначенные в [10, 11], не позволяют дать его достоверную оценку для ламп различных типов. Этой тематике посвящено большое количество работ [12-19], в которых получены экспериментальные кривые допустимых колебаний напряжения для различных источников света. Представленные кривые существенно снижают погрешность при определении дозы фликера. Авторами работ [12-19] рассматривается лишь один из технических аспектов, оказывающих влияние на величину дозы фликера. Величина фликера зависит не только от чувствительности источника света, но и в большей степени от особенностей схемы электроснабжения, условий работы и характеристик применяемого электрооборудования.

Следует отметить, что электрическое оборудование различных технологических процессов создает колебания напряжения разной формы и по-разному влияет на дозу фликера. Следовательно, при расчете колебаний напряжения необходимо использовать методики, адаптированные к различным производствам, которые учитывают все особенности функционирования оборудования. Подобные методики созданы для ограниченного числа производств.

В настоящей статье решаются проблемы создания методики оценки колебаний напряжения потребителями небольшой

мощности лесоперерабатывающих предприятий.

Значительное количество работ посвящено исследованию колебаний напряжения, возникающих при работе мощных электроприемников, а также способам уменьшения их влияния на систему электроснабжения. Применение синхронных компенсаторов как способа снижения колебаний напряжения и фликера, возникающих при работе дуговых сталеплавильных печей, предлагается в [20-24]. В работе [25] показатели качества электрической энергии определялись для сложносвязанной системы электроснабжения с учетом взаимного влияния обобщенных резкопеременных нагрузок прокатного предела и электрооборудования электросталеплавильного производства. В работе представлена методика расчета колебаний напряжения и дозы фликера, возникающих при работе дуговых сталеплавильных печей, которая основана на определении вероятностных характеристик колебаний напряжения по известным параметрам системы электроснабжения.

Существующие методики расчета колебаний напряжения и дозы фликера ориентированы в первую очередь на крупных потребителей и не позволяют учесть работу отдельных электроприемников с резкопеременной нагрузкой, поскольку основываются либо на использовании экспериментальных данных, полученных в реальных условиях работы, либо на теоретических расчетах при помощи математических моделей, полученных для конкретных крупных потребителей.

Исследования относительно влияния источников колебаний небольшой мощности в точке их присоединения к сети на основе анализа схем питания и режимов их работы не проводились. Хотя в настоящее время на промышленных предприятиях работает значительное количество электроприемников небольшой мощности с резкопеременным характером нагрузки. Влияние таких электроприемников на уровне энергосистемы практически не ощутимо, но в точке их присоединения к цеховой трансформаторной подстанции или распределительному пункту они могут вызывать существенные колебания напряжения. Эта незначительная с точки зрения энергосистемы проблема достаточно актуальна в условиях эксплуатации

оборудования предприятий, так как в указанной точке сети уровень колебаний напряжения может превышать допустимые значения [10].

Поскольку электроприемники небольшой мощности с резкопеременным характером нагрузки и потребители, чувствительные к колебаниям напряжения питаются, как правило, от общих шин подстанции или распределительного пункта, то особый интерес представляет исследование возможности их совместной работы.

Кроме того, в процессе эксплуатации оборудования предприятий часто возникает вопрос: как изменится суммарный уровень колебаний напряжения при подключении нового электроприемника с резкопеременным характером нагрузки и как это скажется на работе других потребителей?

Решение данного вопроса тесно связано с необходимостью получения разрешения на подключение новых потребителей к данному узлу нагрузки, выдаваемого энергоснабжающей организацией. Причем разрешение на подключение выдается, когда объект еще не существует. Поэтому ответить на поставленный вопрос представляется возможным только расчетным путем используя математические модели работы потребителей и разработав методику решения поставленной задачи.

В настоящее время разрешение на подключение новых потребителей выдается на основе мнения экспертов сетевой организации. Очевидно, что качество такого решения напрямую определяется компетентностью экспертов, полнотой учета фактических данных об уровне колебаний напряжения, правильностью прогнозирования изменения уровня колебаний при подключении нового оборудования.

В настоящее время научным коллективом кафедры «Электроснабжение» Вятского государственного университета проделан большой объем работы и достигнуты определенные результаты по теме «Исследование качества электрической энергии в электрических сетях предприятий и распределительных сетях энергосистем и разработка технических рекомендаций по его повышению». Наиболее значимыми из них являются: разработка методики расчета колебаний напряжения и дозы фликера в системах электроснабжения

лесоперерабатывающих предприятий, на основе анализа случайных процессов колебаний активной и реактивной мощностей, с использованием полученных математических моделей работы характерных потребителей с резкопеременной нагрузкой [27-31].

Полученные результаты стали основой дальнейших исследований. Наиболее перспективными являются направления: снижение негативного влияния колебаний напряжения, возникающих при работе резкопеременной нагрузки, за счет применения установок продольной компенсации реактивной мощности, а также разработка методики расчета колебаний напряжения при подключении к сети электроприемников с резкопеременной нагрузкой, по которому в данной статье представлены результаты проведенных исследований.

Надежные и простые инженерные методики, позволяющие еще до ввода в эксплуатацию нового оборудования оценить уровень колебаний напряжения и фликера отсутствуют. Решение этой проблемы позволит на стадии проекта осуществить поиск и оценку технических решений, направленных на снижение негативного влияния на качество электрической энергии электроприемников с резкопеременной нагрузкой.

Кроме того, предлагаемая методика оценки изменения уровня колебаний напряжения при подключении нового потребителя позволит во многом снять субъективность решений, которые уже будут основываться на фактических данных, повысить их качество и стабильность.

Решение данной проблемы является весьма актуальным еще и потому, что в настоящее время отсутствуют четкие рекомендации о возможности совместного питания коммунально-бытовых потребителей с источниками колебаний небольшой мощности на основе анализа схем питания потребителей, мощностей источников колебаний и режимов их работы [32-37].

В связи с вышесказанным, ряд поставленных вопросов, связанных с проблемой повышения качества электрической энергии в условиях эксплуатации оборудования предприятий, требует дальнейшего изучения и решения.

Таким образом, была поставлена цель исследований: разработать методику оценки изменения уровня колебаний напряжения при подключении нового оборудования с резкопеременным характером нагрузки используя математические модели работы потребителей с учетом анализа схем их питания, мощностей источников колебаний и режимов их работы.

Актуальность проводимых исследований продиктована также необходимостью выполнения требований национального стандарта в распределительных электрических сетях [10].

В статье приводится подробное описание этапов решения поставленных задач для достижения цели исследований.

Результаты, полученные в процессе исследований, содержат новизну и практическую значимость.

В работе представлен новый подход к расчету колебаний напряжения, возникающих при работе характерных потребителей лесоперерабатывающих предприятий, в основу которого положены математическое моделирование работы оборудования и анализ спектра размахов изменения напряжения.

Наиболее значимыми результатами, содержащими научную новизну, являются: методика определения возможности совместного питания коммунально-бытовых потребителей и резкопеременной нагрузки лесоперерабатывающих предприятий; математические модели работы характерных потребителей электрической энергии, являющихся источниками колебаний напряжения.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем: разработана методическая основа для принятия обоснованного решения о возможности подключения нового потребителя с резкопеременной нагрузкой к существующей схеме.

Кроме того, полученные математические модели позволяют выполнять численные исследования режимов электропотребления при подключении нового оборудования, рассчитывать показатели качества электрической энергии.

Разработанную методику рекомендуется использовать при расчете колебаний напряжения как для существующих объектов

электроснабжения, так и при моделировании подключения нового оборудования.

Таким образом, в работе в полном объеме были решены все задачи. Работа представляет собой законченное исследование, в результате которого была достигнута поставленная цель. Полученные результаты полностью соответствуют поставленной цели исследований.

I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения исследований в соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- изучить влияние резкопеременных нагрузок небольших по мощности электроприемников на параметры качества электроэнергии в различных точках электрической сети;

- получить математическую модель работы потребителей электрической энергии с резкопеременной нагрузкой, которая позволяет выполнить численные исследования режимов электропотребления при подключении нового оборудования;

- разработать критерии оценки возможности подключения нового оборудования с резкопеременным характером нагрузки на основе анализа изменения уровня колебаний напряжения;

- разработать алгоритм и оригинальное программное обеспечение, позволяющее моделировать подключение нового оборудования с резкопеременным характером нагрузки на основе анализа качества электроэнергии.

Для достижения поставленной цели и решения задач использовались методы экспериментальных и теоретических исследований. Обработка экспериментальных данных осуществляется на базе методов математической статистики, теории вероятностей. Экспериментальные исследования проводились на действующем объекте, в условиях эксплуатации характерных потребителей с резкопеременной нагрузкой лесоперерабатывающих производств. Вычислительный эксперимент выполнялся с использованием оригинального программного обеспечения.

Для решения поставленных задач проведены многочисленные экспериментальные исследования характерных потребителей лесоперерабатывающих предприятий: проведены измерения графиков

электрических нагрузок небольших по мощности электроприемников с резкопеременной нагрузкой (лесопильное оборудование, краны, линии разделки хлыстов, дробилки и др.), выполнен статистический анализ полученных данных.

Вывод о возможности совместного питания источника колебаний с коммунально-бытовыми потребителями делается на основе анализа соответствия колебаний напряжения, создаваемых данным источником, требованиям ГОСТ [10]. Анализ предложено проводить в следующей последовательности:

Этап 1. Исследование режимов электропотребления, статистическая обработка результатов измерений.

На данном этапе выполняются экспериментальные исследования графиков электрических нагрузок. Поскольку провести измерения электрических нагрузок не всегда представляется возможным, экспериментальные данные заменяются математическими моделями, которые были получены в результате статистической обработки значительного объема экспериментального материала [27]. Модели рекомендуется также применяться на стадии проектирования объекта, или когда к существующей схеме электроснабжения планируется подключить новое оборудование.

Этап 2. Расчет дозы фликера и размахов изменения напряжений, возникающих при работе потребителя с резкопеременным характером нагрузки.

Расчет выполняется на основе анализа схем питания потребителей с учетом мощностей источников колебаний и режимов их работы при помощи оригинального программного обеспечения.

Этап 3. Оценка результатов, вывод.

Вывод о возможности подключения нового оборудования делается на основе анализа соответствия суммарного уровня колебаний напряжения требованиям ГОСТ [10].

Далее приводится пример расчетов, выполненных по предложенной методике.

В качестве объекта экспериментального исследования было выбрано небольшое лесоперерабатывающее предприятие. Электроснабжение данного предприятия осуществляется от трансформаторной подстанции напряжением 10/0.4 кВ мощностью 400 кВА. Основными

потребителями являются нагрузки наружного и внутреннего освещения, силовые электроприемники, работающие в продолжительном и повторно-кратковременном режимах. Также от данной подстанции получают питание коммунально-бытовые потребители. Основным источником колебаний напряжения является пилорама Р63-4Б мощностью 24.4 кВт. Схема электроснабжения потребителей представлена на рис. 1, а.

Величина фликера зависит от значений размахов изменения напряжения, которые определяются как разница между соседними точками экстремума. Поэтому, для оценки дозы фликера необходим график изменения напряжения сети на определенном интервале времени. Как известно, напряжение является линейной функцией активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей. Следовательно, для расчета и анализа колебаний напряжения необходимо выполнить математическое описание графиков электрических нагрузок потребителей, являющихся источниками колебаний.

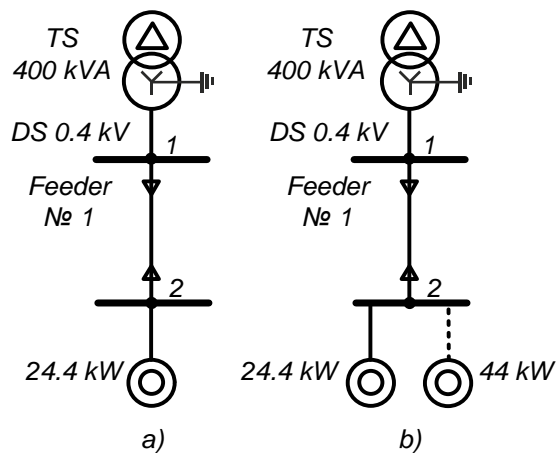


Рис. 1. Схема электроснабжения потребителей.¹

На первом этапе было проведено экспериментальное исследование и статистическая обработка графика электрической нагрузки пилорамы, а также собрана информация об объекте исследования, изучен технологический процесс, режимы и особенности работы оборудования.

Измерения активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей проводились в точке 2 (рис. 1, а) в течение одного часа. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием методов математической

¹ Appendix 1

статистики и теории вероятностей в следующей последовательности.

Графики активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей пилорамы носят резкопеременный характер и имеют точки экстремума. Разница между соседними точками экстремума дает величину колебания активной $\delta P(t)$ и реактивной $\delta Q(t)$ мощностей. Таким образом, из графиков активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощности были получены диаграммы колебаний мощностей. Затем по диаграммам был построен вариационный ряд (ряд распределения). Для колебаний активной мощности пилорамы вариационный ряд приведен на рис. 2.

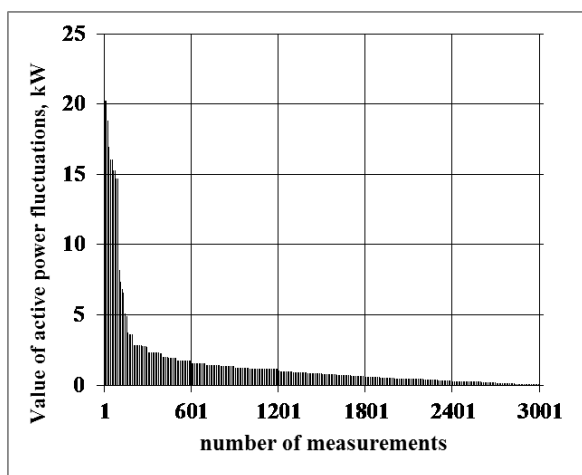


Рис. 2. Вариационный ряд колебаний активной мощности пилорамы.²

В результате обработки экспериментальных данных получены основные числовые характеристики графиков активной и реактивной мощностей, а также амплитуд их колебаний (табл. 1).

В результате проведенного исследования сделан вывод, что изменение электрической нагрузки пилорамы носит случайный характер, обусловленный целым рядом факторов.

Из теории вероятностей известно, что случайная величина полностью описана, если известен ее закон распределения. Используя вариационный ряд были получены гистограммы случайных процессов колебаний активной (рис. 3) и реактивной мощностей, которые являются эмпирическим аналогом функции плотности распределения или дифференциальной функции распределения вероятностей. Определены их основные вероятностные характеристики.

При проведении исследований для количественной характеристики случайных величин колебания активной и реактивной мощностей достаточно определить значения математического ожидания, дисперсии и среднего квадратического отклонения.

Таблица 1.
Характеристики графиков активной и реактивной мощностей пилорамы.³

Параметр (Parameter)	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>med</i>
Активная мощность, кВт (Active power, kW)	29.39	4.54	13.39
Реактивная мощность, квар (Reactive power, kvar)	32.91	13.46	24.02
Колебания активной мощности, кВт (Fluctuations of active power, kW)	20.25	0.00	1.11
Колебания реактивной мощности, квар (Fluctuations of reactive power, kvar)	16.15	0.00	0.54

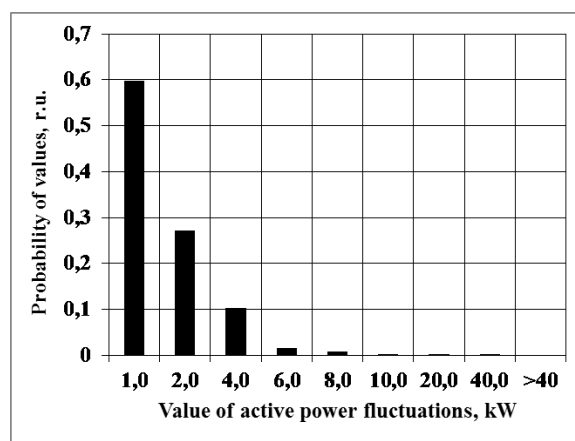


Рис. 3. Гистограмма колебаний активной мощности пилорамы.⁴

В качестве оценки математического ожидания принято, как наиболее вероятное, среднее арифметическое значение измеренной величины. Эта оценка является состоятельной, т.к. в соответствии с законом больших чисел при увеличении количества измерений n она стремится к истинному значению.

$$M(P(t)) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i. \quad (1)$$

В качестве оценки дисперсии результатов измерений принимаем эмпирическую

дисперсию. Эта оценка является несмещенной и состоятельной.

$$D(P(t)) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - M(P(t)))^2. \quad (2)$$

Среднее квадратическое отклонение.

$$\sigma(P(t)) = \sqrt{D(P(t))}. \quad (3)$$

На втором этапе выполняется расчет дозы фликера и размахов изменения напряжений, возникающих при работе пилорамы.

Размахи изменения напряжения $\delta U(t)$ определяются как разность идущих друг за другом экстремумов графика напряжения $U(t)$, измерение которого проводилось в точке 1 (рис.1, а) течение одного часа.

Для полученных размахов изменения напряжения $\delta U(t)$ построен вариационный ряд (рис. 4).

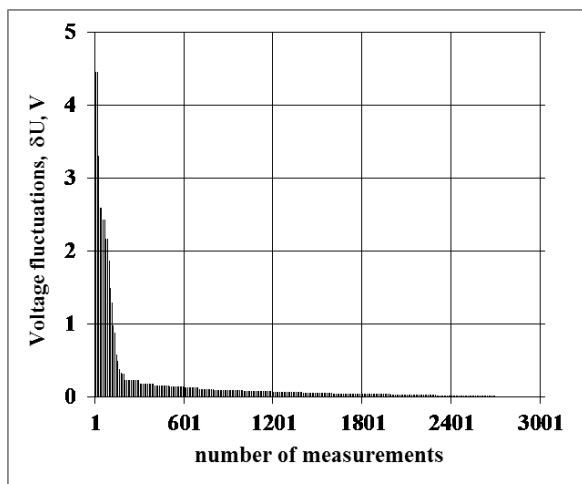


Рис. 4. Вариационный ряд колебаний напряжения.⁵

В расчетных методах оценки фликера используются кривые допустимых колебаний напряжения.

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям определяются в зависимости от частоты повторения изменений напряжения или интервала между изменениями напряжения Δt .

Анализ размахов изменения напряжения предлагается проводить в следующей последовательности.

1. Определяются вероятностные характеристики плотности распределения случайной величины колебаний напряжений, возникающих при работе пилорамы.

2. Строится график плотности распределения случайной величины колебаний напряжений (гистограмма колебаний напряжений). Для построения гистограммы определяется предварительное количество квантов k (интервалов), на которые должна быть разбита ось (рис. 4). Количество интервалов определяется по выражению в зависимости от количества измерений N :

$$k = 1 + 3,2 \cdot \lg N. \quad (4)$$

Полученное значение округляется до целого числа.

Определяют ширину интервала.

$$\Delta = \frac{\delta U_{\max} - \delta U_{\min}}{k}, \quad (5)$$

где δU_{\max} , δU_{\min} – наибольшее и наименьшее значение амплитуды размахов изменения напряжения. Величина Δ , как правило, округляется исходя из конкретных условий задачи.

Подсчитывают количество значений, попавших в каждый квант (интервал) n_i . Подсчитывают относительное количество (относительную частоту) значений, попавших в каждый интервал n_i/N . Строят гистограмму (аналог функции плотности распределения), представляющую собой ступенчатую кривую, значение которой на каждом i -ом интервале постоянно и равно n_i/N .

Результаты расчета сведены в таблицу 3. Гистограмма случайного процесса колебаний напряжения показана на рис. 5.

3. Анализ размахов изменения напряжения, возникающих при работе пилорамы.

Большинство известных расчетных методов оценки фликера имеют допущение, что колебания напряжения в электрической сети происходят с неизменной частотой и амплитудой. Данное положение используется при оценке размахов изменения напряжения с помощью кривой допустимых колебаний напряжения [11], ограничивающей порог восприятия фликера, под которым понимают минимальную величину изменения яркости

световых источников, приводящих к ощущению мерцания. Кривая допустимых колебаний напряжения представлена в виде спектра частот колебаний напряжений в электрической сети и соответствующих им значений амплитуды относительных изменений напряжения.

Оценка фликера при колебаниях напряжения произвольного вида может быть выполнена только методом непосредственных измерений с помощью фликерметра.

Поэтому для оценки колебаний напряжения произвольной формы в соответствии с кривой допустимых значений [11] предложен следующий подход.

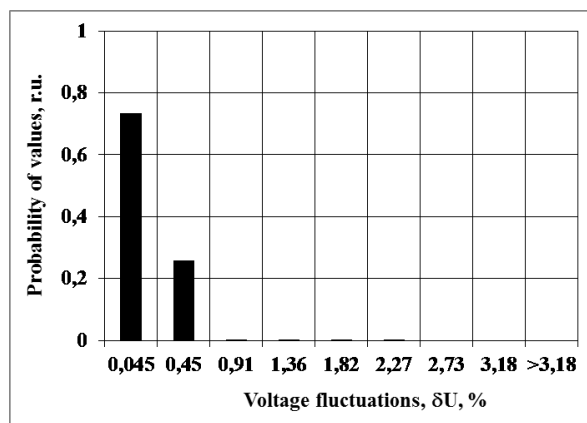


Рис. 5. Гистограмма колебаний напряжения, возникающих при работе пилорамы.⁶

Таблица 3.

Результаты анализа размахов изменения напряжения.⁷

Интервал, δU , В (Interval, δU , V)	Интервал, δU , % (Interval, δU , %)	Количество попаданий, n_i/N , о.е. (Number of hits, n_i/N , r.u.)	Интервал времени между колебаниями Δt , мин (Time interval between fluctuations Δt , min)	Допустимые значения δU_{don} , % (Allowable values δU_{add} , %)
Колебания напряжения, возникающие при работе пилорамы (рис. 1, а) (Voltage fluctuations arising during the work of the power-saw bench (fig. 1, a))				
0–0.1	0–0.045	0.736	0.017	0.27
0.1–1.0	0.045–0.45	0.258	0.063	0.41
1.0–2.0	0.45–0.91	0.004	2.271	1.11
2.0–3.0	0.91–1.36	0.002	5.046	1.36
3.0–4.0	1.36–1.82	0.000	15.139	1.78
4.0–5.0	1.82–2.27	0.001	22.708	1.96
5.0–6.0	2.27–2.73	0.000	-	-
6.0–7.0	2.73–3.18	0.000	-	-
>7.0	>3.18	0.000	-	-
Колебания напряжения, возникающие при совместной работе пилорамы и крана (рис. 1, б) (Voltage fluctuations arising from the joint work of the power-saw bench and the crane (fig. 1, b))				
0–0.1	0–0.045	0.457	0.017	0.27
0.1–1.0	0.045–0.45	0.339	0.031	0.33
1.0–2.0	0.45–0.91	0.050	0.081	0.44
2.0–3.0	0.91–1.36	0.027	0.108	0.48
3.0–4.0	1.36–1.82	0.025	0.131	0.51
4.0–5.0	1.82–2.27	0.023	0.162	0.53
5.0–6.0	2.27–2.73	0.016	0.208	0.58
6.0–7.0	2.73–3.18	0.015	0.260	0.61
>7.0	>3.18	0.049	0.339	0.66

Выполняется анализ отдельно каждого интервала гистограммы колебаний напряжений (рис. 4, табл. 3). Поскольку превышение норм, указанных в [10], не допускается, то величина амплитуд колебаний напряжения на каждом интервале принимается равной значению максимальной его границы.

Для колебаний с одинаковыми амплитудами определяется величина интервала между размахами изменения напряжения Δt и частота их повторений (табл. 3). При расчете интервала Δt и частоты учитывается количество колебаний напряжения данной амплитуды и всех

колебаний, расположенных левее максимальной границы интервала (рис. 6).

По кривой допустимых колебаний напряжения [11] в зависимости от полученного спектра частот размахов изменения напряжения (или интервала Δt) определяется соответствующее значение допустимой амплитуды колебаний напряжения. Далее необходимо сравнить допустимое и фактическое значение амплитуды колебаний напряжения и сделать вывод о соответствии колебаний напряжения требованиям [10]. В таблице 3 представлены результаты анализа размахов изменения напряжения, возникающих при работе пилорамы. Расчетным путем установлено, что в ряде случаев превышены допустимые значения амплитуд колебаний напряжения, т.е. можно сделать вывод, что превышен порог восприятия фликера.

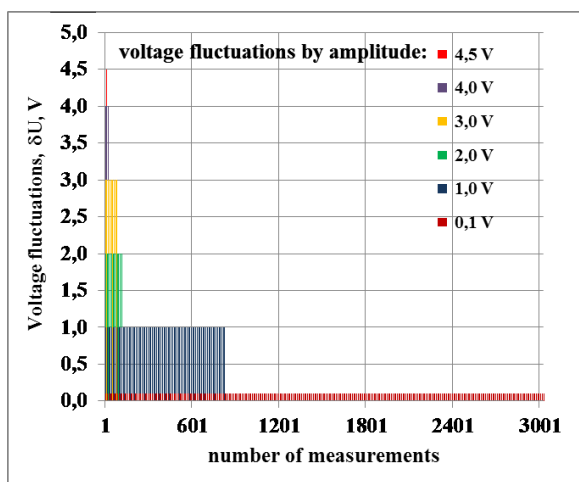


Рис. 6. Амплитуды колебаний напряжения, приведенные к значению максимальной границы интервала.⁸

4. Расчет фликера.

Расчет дозы фликера выполняется по методике, описанной в [27-30], в которой предложен способ определения дозы фликера, возникающей при стохастическом характере изменения размахов напряжения электрической сети, который заключается в том, что доза фликера рассматривается как случайная величина, а её числовые характеристики определяются через числовые характеристики размахов изменения напряжения сети. Авторами [27-30] предложено рассматривать дозу фликера как случайную величину, а ее числовые характеристики определять через размах изменения напряжения сети. Данный способ

расчета дозы фликера применяется в электрических сетях, питающих асинхронные электродвигатели с резкопеременным характером работы.

При работе пилорамы доза фликера составила 1.67.

На третьем этапе анализируются полученные результаты и делаются выводы: при работе пилорамы возникают размахи изменения напряжения, приводящие к недопустимым значениям дозы фликера, нормы [10] превышены.

Изложенную последовательность расчета рекомендуется применять для анализа возможности совместного питания источника колебаний с коммунально-бытовыми потребителями на действующих объектах, т.е. когда имеется возможность проведения измерений электрических нагрузок и напряжений.

Очень часто в процессе эксплуатации оборудования предприятия возникает ситуация, когда необходимо подключить новый электроприемник с резкопеременным характером нагрузки к существующей схеме электроснабжения (рис. 1, б). В данном случае определить, как изменится суммарный уровень колебаний напряжения возможно только расчетным путем с применением математических моделей работы оборудования. Затем на основании полученных результатов расчета делается вывод о возможности совместного питания источника колебаний с коммунально-бытовыми потребителями.

Рассмотрим случай, когда к существующей схеме электроснабжения рассматриваемого лесоперерабатывающего предприятия необходимо подключить кран ККС-10 мощностью 44 кВт. Таким образом, основному источнику колебаний напряжения на предприятии – пилораме добавится еще один – кран (рис. 1, б).

Порядок расчета предлагается следующий.

Этап 1. Исследование режимов электропотребления, статистическая обработка результатов измерений. Поскольку провести измерения электрических нагрузок в данном случае не представляется возможным (подключение нового потребителя находится в стадии проекта), экспериментальные данные заменяются математическими моделями.

В результате большого количества экспериментальных исследований работы

⁸Appendix 1

характерных потребителей, работающих на лесоперерабатывающих предприятиях в повторно-кратковременном режиме с резкопеременной нагрузкой, накоплен значительный объем статистического материала, обработка которого с использованием методов математической статистики и теории вероятностей привела к созданию математических моделей работы характерных потребителей [27-30].

Математическая модель работы крана представляет совокупность:

- диаграмм активной (рис. 7) и реактивной мощностей в относительных единицах (приведенных к номинальной мощности), которые перестраиваются в вариационные ряды колебаний мощностей (для колебаний активной мощности вариационный ряд приведен на рис. 7);

- гистограмм случайных процессов колебаний активной (рис. 8) и реактивной мощностей, которые являются эмпирическим аналогом функции плотности распределения;

- основные вероятностные характеристики случайных величин колебания активной и реактивной мощностей: математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение.

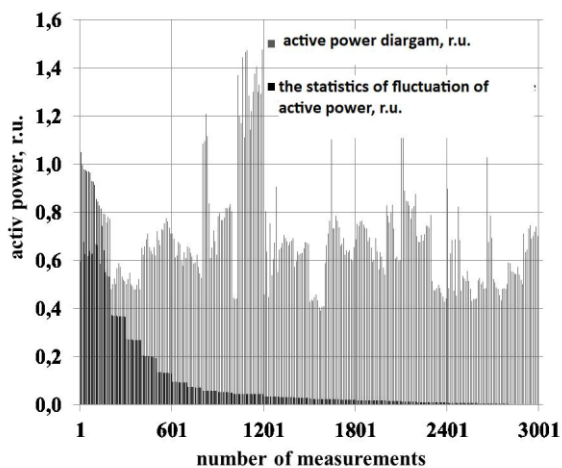


Рис. 7. График активной мощности крана (математическая модель).⁹

Основные числовые характеристики графиков активной и реактивной мощностей, а также амплитуд их колебаний для крана приведены в таблице 4.

Этап 2. На втором этапе выполняется расчет дозы фликера и размахов изменения напряжений, возникающих при совместной работе источников колебаний: пилорамы и крана. Для обоснования возможности

совместного питания источников колебаний и коммунально-бытовой нагрузки необходим анализ соответствия суммарного уровня колебаний напряжения требованиям ГОСТ [10].

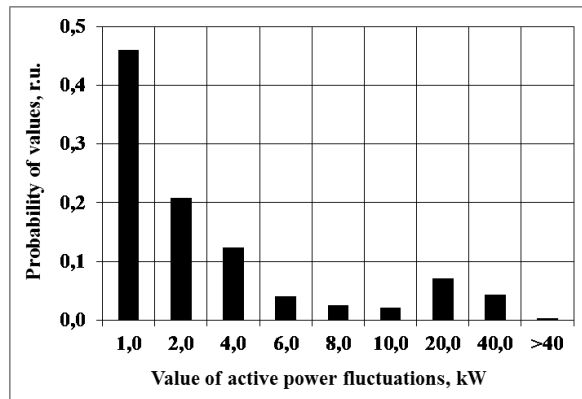


Рис. 8. Гистограмма колебаний активной мощности крана (математическая модель).¹⁰

Таблица 4.

Характеристики графиков активной и реактивной мощностей крана (математическая модель).¹¹

Параметр (Parameter)	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>med</i>
Активная мощность, кВт (Active power, kW)	70.86	6.75	30.28
Реактивная мощность, квар (Reactive power, kvar)	92.35	21.43	57.81
Колебания активной мощности, кВт (Fluctuations of active power, kW)	46.16	0.00	3.88
Колебания реактивной мощности, квар (Fluctuations of reactive power, kvar)	66.28	0.00	4.79

Поскольку, как было указано выше, в рассматриваемом случае нет возможности провести измерения величины напряжения на шинах трансформаторной подстанции, то значения напряжения будут получены расчетным путем. Напряжение в какой-либо точке сети $U(t)$ зависит от напряжения на источнике питания $U_0(t)$ и потери напряжения. Потеря напряжения в сети является линейной функцией нагрузки. В низковольтных сетях величина активного сопротивления элементов r обычно сопоставима со значением индуктивного x , поэтому в практических расчетах следует учитывать, как активную, так и реактивную составляющие мощности.

$$U(t) = U_0(t) - \frac{P(t) \cdot r + Q(t) \cdot x}{U_0(t)}, \quad (6)$$

где $P(t)$, $Q(t)$ – графики активной и реактивной мощности (математическая модель совместной работы пилорамы и крана);

r , x – активное и реактивное сопротивление сети.

Математическая модель совместной работы пилорамы и крана также может быть представлена диаграммами активной и реактивной мощностей, вариационными рядами колебаний активной (рис. 9) и реактивной мощностей, гистограммами случайных процессов колебаний активной (рис. 10) и реактивной мощностей и вероятностными характеристиками случайных величин колебания активной и реактивной мощностей.

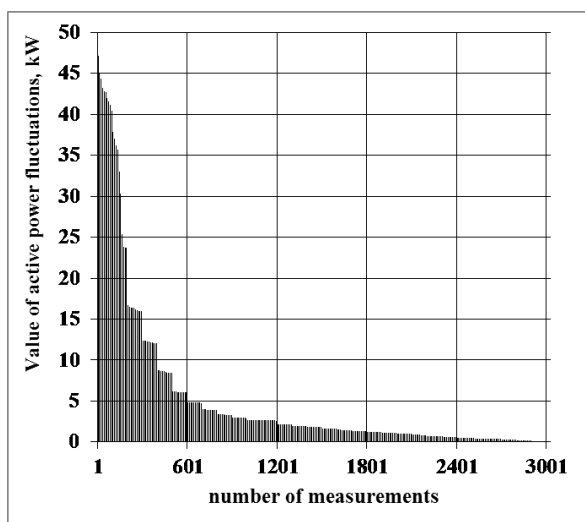


Рис. 9. Вариационный ряд колебаний активной мощности пилорамы и крана (математическая модель).¹²

Основные числовые характеристики графиков активной и реактивной мощностей, а также амплитуд их колебаний для пилорамы и крана приведены в таблице 5.

Размахи изменения напряжения сети определяются по графику напряжения, полученного расчетным путем. Анализ размахов изменения напряжения, возникающих при совместной работе пилорамы и крана выполняется в последовательности, описанной выше. Далее выполняется расчет дозы фликера. При

совместной работе пилорамы и крана доза фликера увеличится до 1.99.

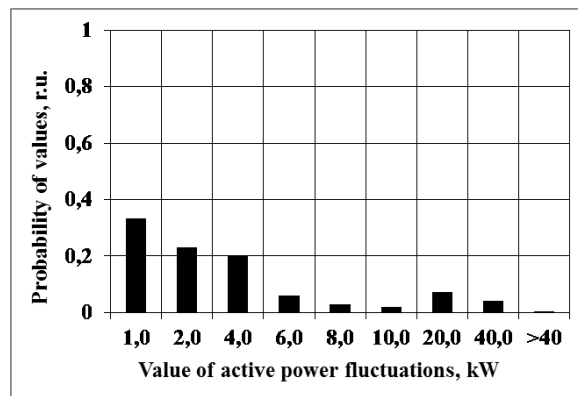


Рис. 10. Гистограмма колебаний активной мощности пилорамы и крана (математическая модель).¹³

Таблица 5.

Характеристики графиков нагрузки пилорамы и крана (математическая модель).¹⁴

Параметр (Parameter)	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>med</i>
Активная мощность, кВт (Active power, kW)	88.37	12.71	43.53
Реактивная мощность, квар (Reactive power, kvar)	119.4	40.40	81.69
Колебания активной мощности, кВт (Fluctuations of active power, kW)	47.09	0.00	4.18
Колебания реактивной мощности, квар (Fluctuations of reactive power, kvar)	65.96	0.05	4.88

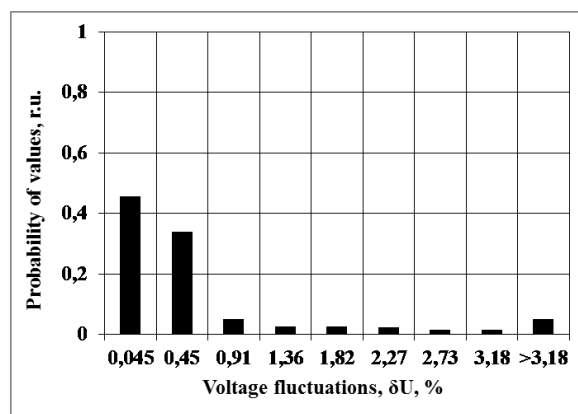


Рис. 10. Гистограмма колебаний напряжения, возникающих при работе пилорамы и крана.¹⁵

В таблице 3 представлены результаты анализа размахов изменения напряжения,

^{12, 13, 14, 15} Appendix 1

возникающих при работе пилорамы и крана. Расчетным путем установлено, что в ряде случаев превышены допустимые значения амплитуд колебаний напряжения, т.е. можно сделать вывод, что превышен порог восприятия фликера.

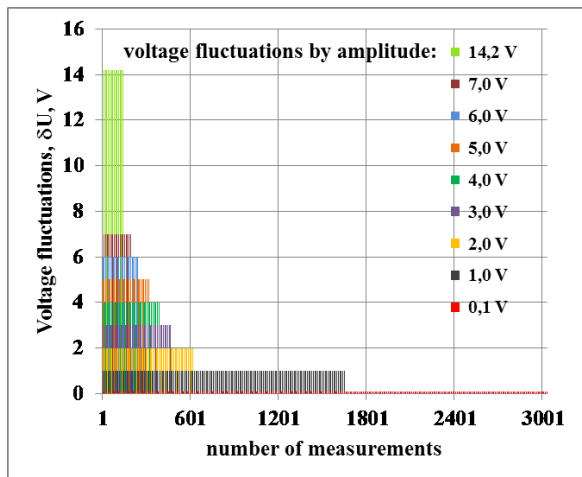


Рис. 11. Амплитуды колебаний напряжения, приведенные к значению максимальной границы интервала.¹⁶

Далее выполняется расчет дозы фликера. При совместной работе пилорамы и крана доза фликера увеличится до 1.99.

Этап 3. Выводы. Выполненные по предложенной методике расчеты позволяют сделать обоснованный вывод о невозможности подключения рассматриваемого оборудования к существующей схеме. Данный вывод делается на основании учета фактического уровня колебаний напряжения в точке подключения, его прогнозирования при подключении электроприемника и сравнения с нормативными значениями [10].

Аналогичные исследования с использованием предлагаемой методики и алгоритма расчета проводились на других объектах. При этом оценивалось влияние колебаний напряжения на осветительные установки и коммунально-бытовые потребители, питающиеся совместно с резкопеременной нагрузкой, выполнялись расчеты величины размахов изменения напряжения и дозы фликера в различных точках системы электроснабжения. Проведенные исследования позволяют принять обоснованное решение о возможности или невозможности совместного питания коммунально-бытовых потребителей и резкопеременной нагрузки.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Проведены измерения, обработка, анализ графиков электрических нагрузок небольших по мощности электроприемников, вызывающих колебания напряжения. Выполнены расчеты величины размахов изменения напряжения и дозы фликера в различных точках системы электроснабжения. Установлено, что указанные электроприемники при определенных условиях оказывают существенное влияние в точке их присоединения к сети на остальных потребителей, вызывая колебания напряжения превышающие допустимые значения.

2. Разработана методика определения возможности совместного питания коммунально-бытовых потребителей и резкопеременной нагрузки на основе анализа графиков электрических нагрузок и расчета колебаний напряжения, которая может использоваться как при анализе существующих объектов и схем питания, так и при моделировании подключения нового оборудования. Методика реализована в виде алгоритма и оригинального программного обеспечения.

3. Получены модели работы характерных потребителей электрической энергии для лесоперерабатывающих предприятий, которые позволяют выполнить численные исследования режимов электропотребления при подключении нового оборудования, а также оценить показатели качества электрической энергии.

Достоверность полученных результатов исследования определяется корректным использованием математического аппарата, обоснованностью принятых допущений и подтверждаются хорошим совпадением результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в работе экспериментальные и теоретические исследования позволяют сделать следующий вывод.

Предложенная методика оценки изменения уровня колебаний напряжения дает критерии для принятия обоснованного решения о возможности подключения нового

электроприемника с резкопеременным характером нагрузки и позволяет снизить субъективность при принятии решений.

В основу разработанной методики положен анализ спектра размахов изменения напряжения и математическое моделирование совместной работы подключаемого электроприемника с резкопеременной нагрузкой и оборудования исследуемого объекта.

Таким образом, в ходе проведенных исследований были решены все задачи и достигнута поставленная цель.

Внедрение результатов исследований позволит повысить надежность и увеличить фактический срок службы оборудования распределительного сетевого комплекса, а также дает возможность проведения предупреждающих корректирующих мероприятий по повышению качества электрической энергии в распределительных сетях и снизить неудовлетворенность потребителей качеством электроснабжения.

Результаты исследований целесообразно использовать в системах электроснабжения, распределительных сетях при расчетах режимов систем электроснабжения и норм качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, а также для оценки допустимости совместного питания коммунально-бытовых потребителей и источников резкопеременной нагрузки.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Consumer Power Scheme

²Fig. 2. Variation series of oscillations of the active power of the power-saw bench

³Table 1. Characteristics of active and reactive power graphs of a power-saw bench

⁴Fig. 3. Histogram of fluctuations in the active power of a power-saw bench

⁵Fig. 4. Variation series of voltage fluctuations

⁶Fig. 5. Histogram of voltage fluctuations that occur during power-saw bench work

⁷Table 3. Results of the analysis of voltage changes

⁸Fig. 6. Amplitudes of voltage fluctuations reduced to the value of the maximum interval boundary

⁹Fig. 7. Active crane power graph (mathematical model)

¹⁰Fig. 8. Histogram of fluctuations of the active power of the crane (mathematical model)

¹¹Table 4. Characteristics of the graphs of active and reactive capacities of the crane (mathematical model)

¹²Fig. 9. Variational series of oscillations of the active power of the power-saw bench and crane (mathematical model)

¹³Fig. 9. Histogram of fluctuations in the active power of the power-saw bench and crane (mathematical model)

¹⁴Table 5. Characteristics of the graphs of power-saw bench and crane loads (mathematical model)

¹⁵Fig. 10. Histogram of voltage fluctuations that occur during the work of the power-saw bench and crane

¹⁶Fig. 11. Amplitudes of voltage fluctuations, reduced to the value of the maximum boundary of the interval

Литература (References)

- [1] Zhezhenko I.V., Saenko Yu.L. *Kachestvo elektroenergii na promyshlennyh predpriyatiyah* [The electric power quality at industrial enterprises] Moscow: Energoatomizdat, 2005. 261p. (In Russian).
- [2] Zhelezko, Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii* [Loss of electricity. Reactive power. Power Quality.] Moscow: ENAS, 2009. - 456 p. (In Russian).
- [3] Bhattacharyya, S., Cobben, J.F.G., Consequences of poor Power Quality – An overview. *Publication in the book 'Power Quality'* ISBN 978-953-307-180-0, INTECH open access publisher, January 2011.
- [4] Cai, R. Flicker interaction studies and flicker meter improvement Eindhoven. *Technische Universiteit Eindhoven*, 2009. – 190 p.
- [5] Mark Halpin, Emmanuel, Rong Cai, Igor Papic, Sarath Perera and Xavier Yang. A Review of Flicker Objectives Related to Complaints. Measurements and Analysis Techniques. Prague, Czech Republic. – 8-11 June 2009.
- [6] Lisickij K.E. *Sovershenstvovanie metodov ocenki flikera v elektricheskikh setyah*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving flicker assessment methods in electrical networks. PhD] Bratsk, 2017, 144 p. (In Russian)
- [7] Bhattacharyya, S., Cobben, J.F.G., Myrzik, J.M.A., Kling, W.L. Flicker Propagation and Emission Coordination Study in a Simulated Low Voltage Network. *Published in European Transactions on Power Electrical Power (ETEP), special issue on 'Power Quality'*, pg 52-67, Vol. 20, No. 1, January 2010.
- [8] Gluskin E., Frangiskos V., Kateri T.I., Bisketzis N. The instantaneous light-intensity function of a fluorescent lamp, *Phys. Lett. A*, 2006, pp. 355–363
- [9] Rong, C. Flicker meter used for different types of lamp / C. Rong, J.F.C. Cobben, J.M.A. Myrzik, J.H. Blom, W.L. Kling // *9th International Conference of electrical power quality and Utilization (EPQU'2007)*, Barcelona, Spain, 9-11 October 2007. –P. 1–6.
- [10] *GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego*

- naznacheniya; Vved. 2014-07-1 [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general-purpose power supply systems; Introduction 2014-07-1] – Moscow: Standartinform, 2014. – 16 p.
- [11] GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general-purpose power supply systems] – Moscow: Publishing house of standards, 1998. – 31 p.
- [12] Rong Cai, J.F.G. Cobben, J.M.A. Myrzik, J.H. Blom and W.L. Kling. Flicker Responses of Different Lamp Types. *IET Generation, Transmission and Distribution* 3(9). October 2009. – pp.816-824.
- [13] Spring A. et al. Effects of Flicker in a Distribution Grid with high PV Penetration. *Editorial Board Members.* – 2014. – C. 2001.
- [14] Chau-Shing, Wang, Michael, and J. Devaney. Incandescent Lamp Flicker Mitigation and Measurement. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 53, No. 4, 2004, pp. 1028-1034.
- [15] C. Rong, J.H. Blom, J.M.A. Myrzik and W.L. Kling. New Flicker Weighting Curves for Different Lamp Types Based on the Lamp Light Spectrum. *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2008)*, Wollongong, Australia, 28 September – 1 October 2008.
- [16] J.F.G. Cobben, C. Rong, W.L. Kling, and J.M.A. Myrzik. The Cheapest Way to Solve the Flicker Problem. *Universities Power Engineering Conference 2006*, Newcastle upon Tyne, UK, September 2006.
- [17] Cai Rong, J.F.G. Cobben, J.M.A. Myrzik, and W.L. Kling. Flicker curves of different types of lamps. *China International Conference on Electricity Distribution 2006*, Beijing, China, 17-20 September 2006.
- [18] Cobben J.F.G. Power quality implications at the point of connection. Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2007, ISBN: 978-90-386-1030-6.
- [19] Cai R., Cobben J.F.G., Myrzik J.M.A., Kling W.L. Flicker curves of different type of lamps. *Proc. China Int. Conf. Electricity Distribution, Beijing*, P.R. China, 17–20 September 2006.
- [20] Zbigniew Olczykowski, Methods of determination of the voltage fluctuations and light flicker at simultaneous operation of three-phase arc furnaces. *Electrical Power Quality and Utilisation, Vol. IX*, № 1, 2003.
- [21] Chong Han, Alex Q. Huang, Subhashish B.attacharya, and Mink Ingram. Field Data-based Study Electric Arc Furnace Flicker Mitigation. *IEEE Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting, Vol. 1*, 2006, pp. 131-136.
- [22] C.Sharmeela, G.Uma, M.R.Mohan and K.Karthikeyan. Voltage Flicker Analysis and Mitigation Case Study in Electric Arc Furnace Using PSCAD/MTDC. *IEEE International Conf. on Power System Tech.*, 2004.
- [23] A.Elnady, W.El-Khattam and M.M.A. Salama. Mitigation of AC Arc Furnace Voltage Flicker using the Unified Power Quality Conditioner. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2*, 2002, pp. 735-739.
- [24] Cong Han, Zhanong Yang, Bin Chen, Alex Q. Huang, Bin Zhang, Mike Ingram and Aty Edris. Evaluation of Cascade-Multilevel Converter Based STATCOM for Arc Furnace Flicker Mitigation. *14th IAS Annual Meeting*, 2005, pp. 67-71.
- [25] Novoselov N.A. *Sovershenstvovanie metodik rascheta pokazatelej kachestva elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya s dugovymi staleplavil'nymi pechami maloj moshchnosti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the methods for calculating the quality indicators of electricity in power supply systems with low-power arc steel-smelting furnaces. PhD] Magnitogorsk, 2012, 166 p. (In Russian)
- [26] Tarasov V.M. *Povyshenie effektivnosti upravleniya ekspluatatsionnymi rezhimami sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij s rezkoperemnoy nagruzkoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the management of operational modes of power supply systems of industrial enterprises with abruptly variable load. PhD] Magnitogorsk, 2012, 179 p. (In Russian)
- [27] Kalinina E.A. *Razrabotka metodiki rascheta kolebanij napryazheniya v sistemah elektrosnabzheniya derevoobrabatyvayushchih proizvodstv*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a methodology for calculating voltage fluctuations in power supply systems of wood-working industries. PhD] Kirov, 2017, 166 p. (In Russian)
- [28] Cherepanov V.V., Kalinina E.A. Metodika rascheta kolebanij napryazheniya i dozy flikera v elektricheskikh setyah, pitayushchih asinhronnye dvigateli s rezkoperemnoy nagruzkoy [Methodology for calculating voltage fluctuations and flicker doses in electric networks supplying asynchronous motors with abruptly variable load] *Promyshlennaya energetika – Industrial power*. 2018. № 2. Pp. 50-55. (In Russian)
- [29] Cherepanov V.V., Kalinina E.A. Raschet kratkovremennoj dozy flikera, vznikayushchej pri stohasticheskom haraktere izmeneniya elektricheskikh nagruzok [Calculation of a short-term flicker dose that occurs with the stochastic nature of changes in electrical loads] *Fundamental'nye*

- issledovaniya – Basic research.* 2016. № 11-5. Pp. 960-967. (In Russian)
- [30] Cherepanov V.V., Kalinina E.A. Raschet kolebanij napryazheniya elektricheskoy seti pri rabote asinhronnyh dvigatelej s rezkoperemennoj nagruzkoj [Calculation of voltage fluctuations of the electric network during the operation of asynchronous motors with abruptly variable load] *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы – Electrical systems and complexes.* 2016. № 3 (32). Pp. 20-26. (In Russian)
- [31] Ozhegov A.N., Bardysh D.N. Ob algoritme programy dlya opredeleniya vozmozhnosti podklyucheniya elektropriemnika s rezkoperemennym harakterom nagruzki k ponizitel'noj podstancii [About the algorithm of the program for determining the possibility of connecting an electrical receiver with abruptly variable load to a step-down substation] *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal – Research journal of international studies.* – 2013. – № 6-1. – Pp.78-79 (In Russian).
- [32] Cyruk S.A., Kosharnaya YU.V. Dejstvuyushchee federal'noe zakonodatel'stvo i normativno-pravovye akty RF o vzaimootnosheniyah sub'ektov elektroenergetiki i potrebitelej elektricheskoy energii [Current federal legislation and regulatory legal acts of the Russian Federation on the relationship of electric power industry entities and consumers of electric energy] *Elektrika – Electrics.* – 2010. – № 3. – Pp. 8. (In Russian).
- [33] Gamazin S.I., Petrovich V.A., Nikiforova V.N. Opredelenie fakticheskogo vklada potrebitelya v iskazhenie parametrov kachestva elektricheskoy energii [Determination of the actual consumer contribution to the distortion of electric energy quality parameters] *Promyshlennaya energetika – Industrial energy.* – 2003. – № 1. – Pp. 32. (In Russian).
- [34] Ouyang, S. The Study and Application of Comprehensive Evaluation of Regional Power Grid Power Quality. *Advanced Materials Research / S. Ouyang, X. Y. Zhang, Y. S. Hou, R. Y. Huang // GB/T 15543-2008/ – 2013. – P. 1644-1650.*
- [35] *IEC 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.* International Standard. 2015-02-20. – 146 p.
- [36] IEEE STD 519 – 2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. *Transmission & Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society (PES).* 2014. – 29 p.
- [37] G.T.Heydt, M.bakroun, and A.Inan. Voltage Flicker Estimation based on Linearization and Lp Norms. *IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, 2003.*

Сведения об авторах.



Бакшаева Наталья Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: качество электроэнергии, энергосбережение.
E-mail: bakshaeva@vyatsu.ru



Вальц Ирина Александровна, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: качество электроэнергии, энергосбережение.
E-mail: suvorova@vyatsu.ru