

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ОТДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ: ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 05.05.2017, в окончательном варианте – 03.10.2017.

Асиев Абай Турусбекович, Кыргызский государственный технический университет (КГТУ) имени И. Разакова, 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чынгыза Айтматова, 66, кандидат технических наук, ORCID 0000-0002-2013-6314, e-mail: asievat@gmail.com

Представлены результаты анализа текущего состояния и перспектив использования автономных систем электроснабжения в Кыргызской Республике (КР); основных тенденций развития энергопотребления, использования существующих источников энергии в КР и за рубежом. Показана целесообразность применения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в отдалённых и труднодоступных районах (особенно горных), где нет линий электропередач. Рассмотрено влияние показателей качества электрической энергии (ПКЭЭ) в автономной системе электроснабжения (АСЭ) на технико-экономические показатели и надёжность эксплуатации приемников электрической энергии. На качество электрической энергии оказывают влияние все элементы АСЭ и нагрузка. Математические модели (ММ) целесообразно использовать для исследования таких ПКЭЭ как установившееся и переходные отклонения напряжения, установившееся и переходные отклонения частоты, несимметрия системы напряжений, амплитудная модуляция напряжения. С помощью ММ можно промоделировать и провести анализ установившихся и переходных режимов при симметричных и несимметричных условиях работы. В данной статье для исследования применена ММ синхронного трехфазного генератора, на роторе которого расположена обмотка возбуждения и демпферная обмотка, имеющая контура по продольной и поперечной осям. При имитационном моделировании АСЭ применен блочный принцип с использованием уже имеющихся в MATLAB R2010b моделей основных элементов АСЭ. Это позволило создать сложные объектно-ориентированные модели из отдельных подмоделей. Полученные модели легко наращивать (масштабировать) и трансформировать – с учетом степени сложности и особенностей АСЭ.

Ключевые слова: автономные источники электроснабжения, электроэнергия, показатели качества, математические методы, имитационное моделирование, MATLAB, Simulink, синхронный генератор, влияние нагрузки, объектно-ориентированные модели.

AUTONOMOUS ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS IN REMOTE AREAS: JUSTIFICATION OF USE EXPEDIENCY AND THE METHODS OF ESTIMATING ELECTRICITY QUALITY INDICES BASED ON SIMULATION MODELING

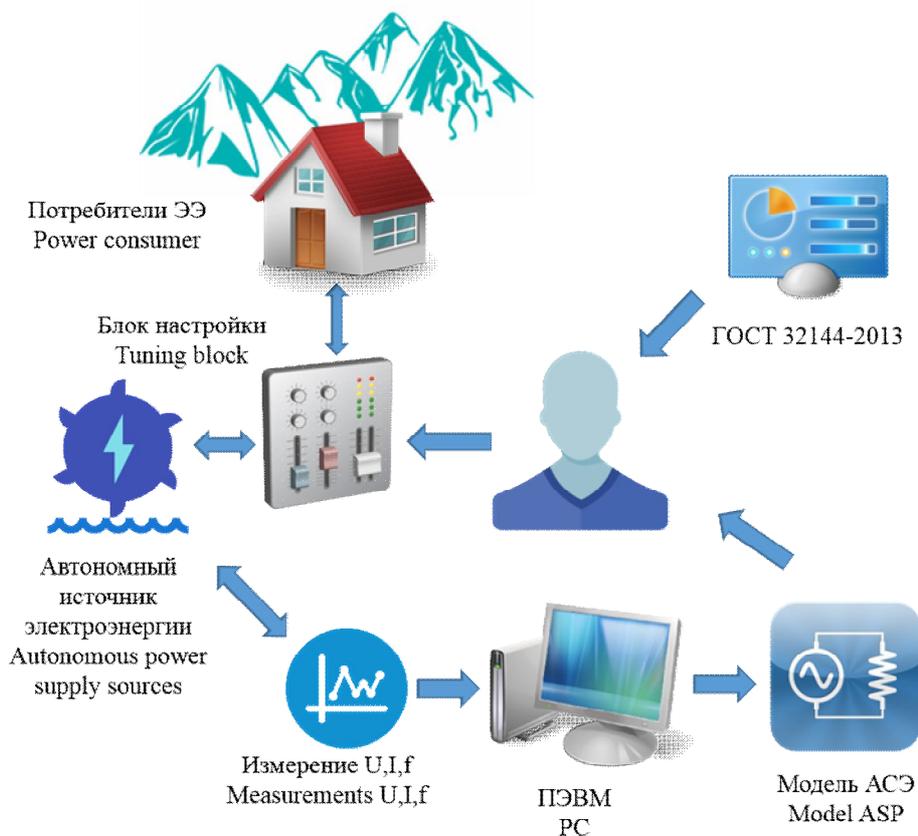
The article has been received by editorial board 05.05.2017, in the final version – 03.10.2017.

Asiev Abai T., Kyrgyz State Technical University named I. Razzakov, 66 Chingiz Aytmatova Ave., Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic, Cand. Sci. (Engineering), ORCID 0000-0002-2013-6314, E-mail: asievat@gmail.com

This article analyzes current state and prospects of autonomous electric supply systems in the Kyrgyz Republic, as well as the main tendencies in the development of energy consumption and the use of existing energy sources in the Kyrgyz Republic and abroad. The expediency of using non-traditional renewable energy sources in remote and hard-to-reach (especially mountain ones) areas where there are no power lines is shown. The influence of the electric power quality indicators in the autonomous electric supply system (AESS) on the technical and economic parameters of the electric energy receivers is considered. The quality of electric energy is influenced by all elements of the AESS and the load. In order to study such indicators of the electric energy quality as steady and transient voltage deviations, steady and transient frequency deviations, asymmetry of the stress system and amplitude modulation of the voltage, it is necessary to apply mathematical models that make it possible to simulate and conduct an analysis of steady and transient modes under symmetrical and asymmetrical operating conditions. For the study, a mathematical model of a synchronous three-phase generator having a rotor winding of excitation and a damper winding with contours along the longitudinal and transverse axis is applied. During the simulation modeling of the AESS, we applied a block principle with the models of the AESS basic elements that are already available in MATLAB R2010b, which allowed creating complex object-oriented models from the individual submodels. The obtained models can be easily expanded and transformed according to the degree of the AESS complexity.

Keywords: autonomous electric supply sources, electric power, quality indicators of electric power, simulation, mathematical methods, MATLAB, Simulink, synchronous generator, load influence, object-oriented models

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Введение. Важнейшим фактором, отражающим научно-технический и социальный прогресс любого государства, на современном этапе развития является уровень потребления энергии. Рост энергопотребления требует не только освоения новых способов ее производства, но и повышения эффективности использования энергии. При этом именно электроэнергия (ЭЭ) является наиболее важным элементом энергетического сектора и составляет основу современной цивилизации, т.к. нормальная жизнь современного общества без электричества невозможна. Это объясняется целым рядом замечательных свойств ЭЭ: возможность её выработки с высоким КПД, в том числе с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ); наличием технологий эффективной передачи ЭЭ на большие расстояния; хорошо разработанными технологиями и техническими средствами преобразования ЭЭ в другие виды энергии и т.д.

Особой задачей является обеспечение ЭЭ населения и небольших предприятий в отдаленных, горных районах. Основная причина – экономическая неэффективность строительства линий электропередач (ЛЭП) или прокладки кабелей для «транспортировки» по ним относительно небольших мощностей. При таких условиях рациональным является использование автономных систем электропитания (АСЭ) непосредственно в местах ее потребления. При проектировании АСЭ необходимо учитывать характер (особенности) нагрузки, на которую она работает. Для обеспечения такого учета может быть использовано имитационное моделирование. Однако соответствующие вопросы в существующей литературе исследованы не полностью. Поэтому целью данной статьи является попытка устранить указанный пробел.

Общая характеристика Кыргызской Республики с позиций потребления электроэнергии. Кыргызская республика (КР) расположена на северо-востоке Центральной Азии в пределах горных систем Тянь – Шаня и Памиро – Алая. Территория страны простирается с запада на восток на 900 км, с севера на юг на 410 км. Площадь КР равна 192,5 тыс. км². Население более 5 млн. человек. Рельеф Кыргызстана преимущественно горный.

Энергетическая система КР характеризуется высокой централизацией. Крупные гидроэлектростанции производят около 90 % общего количества ЭЭ и отдают (поставляют) её в общую сеть. Эта сеть, образована целой системой высоковольтных ЛЭП и используется для централизованного снабжения электроэнергией около 87 % населения страны.

Основная часть населения проживает в Чуйской, Таласской долинах, предгорьях Ферганской долины, Иссык-Кульской котловине и в других мелких долинах среднегорья и высокогорья. На большей части территории республики в горных районах плотность населения составляет менее 1 чел/км². Соот-

ветственно, в этих местах слабо развиты электрические сети энергосистемы. В ряде мест высокогорной части территории КР вообще нет постоянного населения. После суверенизации КР произошли существенные изменения в электроэнергетике, в системе электроснабжения, особенно – в бытовом секторе. При этом насущной проблемой остается электроснабжение потребителей горных районов, особенно отдаленных. Такое электроснабжение имеет ряд особенностей: потребителям нужны относительно небольшие мощности; потребители значительно удалены от ЛЭП энергосистемы КР и значительно разбросаны по территории горных районов. При этом строительные и эксплуатационные расходы для систем электроснабжения в горных районах значительно выше [17], чем на равнине. Причины. (1) При использовании высоковольтных ЛЭП необходимо строительство дорогостоящих понижающих трансформаторных подстанций. (2) При использовании протяженных ЛЭП 0,4 кВ возникают большие потери ЭЭ при ее передаче. (3) Сечение проводов ЛЭП при проектировании выбирается по условиям их механической прочности с учетом ветровых нагрузок, налипания снега и пр. Поэтому сечения зачастую приходится использовать в десятки раз больше, чем требуется для электроснабжения маломощных рассредоточенных потребителей. Как следствие возрастает и нагрузка на опоры ЛЭП, удорожается стоимость их строительства. (4) Стоимость ремонтных работ на ЛЭП (включая устранение обрывов ЛЭП) значительно выше, чем в равнинных условиях. В зимнее время такие работы могут представлять опасность для ремонтного персонала или их вообще проводить нельзя.

Для отдаленных горных районов велики и расходы по доставке топлива (предназначенного для выработки ЭЭ) автомобильным транспортом, а тем более вьючным.

Исходя из этого, для обеспечения ЭЭ населения в отдаленных горных районах целесообразно развивать возобновляемую энергетику, в том числе, нетрадиционную и малую. Перспективно использование АСЭ, в том числе на базе энергии малых рек, ветра. Сейчас важнейшими потребителями ЭЭ с АСЭ в Кыргызии являются сельские регионы (до 80 %).

Основными направлениями энергетической политики Кыргызской Республики и структурной перестройки ТЭК по программе, составленной до 2025 года, являются использование местных топливно-энергетических ресурсов, включая применение ВИЭ; организация производства оборудования для нужд малой энергетики.

Очевидно, что себестоимость ЭЭ, получаемой с использованием АСЭ, выше, чем на крупных гидро- и теплоэлектростанциях. Однако особенности географии КР создают совокупность технических, экономических, экологических и социальных условий, обеспечивающих экономическую целесообразность развития АСЭ – особенно на базе ВИЭ, в том числе нетрадиционных.

Экономический потенциал АСЭ в условиях КР чрезвычайно высок. При этом распределение АСЭ по регионам неравномерно и зависит от их удаленности от централизованных электрических сетей, передающих большие мощности. Для создания в различных районах КР надежных и эффективных систем АСЭ требуется оптимизация эксплуатационных режимов работы малых электростанций, основанных на использовании наиболее эффективных для данной территории местных источников энергии [5, 9, 23].

Использование АСЭ для энергоснабжения отдаленных районов республики в последнее время рассматривается как один из основных вариантов сельской электрификации в силу высокой экономичности и экологической безопасности АСЭ по сравнению со строительством новых ЛЭП или использованием тепловых электростанций. Например, применение дизельных электростанций (ДЭС) для электрификации отдаленных потребителей неэффективно по таким причинам: стоимость топлива и его доставки в этих случаях достаточно высоки; каналы доставки топлива не всегда надежны (особенно в зимний период); надежность работы ДЭС не всегда достаточно высока – это особенно касается их запуска (включения) в условиях низких температур; при работе ДЭС имеют место вредные выбросы в атмосферу.

В общем случае оценки стоимостей проектных решений на основе АСЭ за заданный период времени будут включать такие основные компоненты: затраты на создание АСЭ; затраты на ее эксплуатацию (включая стоимости топлива и транспортировки его к АСЭ); потери, связанные с нарушением нормативных показателей качества ЭЭ (ПКЭЭ).

Для альтернативного по отношению к использованию АСЭ варианта (ЛЭП) оценки стоимости включают следующие компоненты: себестоимость переданной потребителям ЭЭ; затраты на создание ЛЭП и их обслуживание (включая стоимости аварийно-восстановительных работ); оценки ущерба, вызванных прекращением подачи ЭЭ через ЛЭП при обрывах линий, аварий на трансформаторных подстанциях и пр.

Большая часть маломощных сельскохозяйственных предприятий и личных хозяйств не могут построить собственные ЛЭП или достаточно крупные энергетические объекты. Для них целесообразнее получать электроэнергию от АСЭ на основе энергетических установок небольшой мощности. Последняя может наращиваться по мере необходимости путем ввода в эксплуатацию дополнительных источников ЭЭ [4, 7, 8, 12–15, 20, 21]. При этом в случае использования ВИЭ исключаются затраты на закупку энергоносителей и их транспортировку к местам потребления.

Поэтому разработка, создание и эксплуатация АСЭ на базе источников ЭЭ небольшой мощности использующих ВИЭ (например, применение малых гидроэлектростанций), является актуальной и жизненно необходимой для КР задач.

Обоснование необходимости использования имитационного моделирования для систем энергоснабжения, основанных на АСЭ. При проектировании и разработке новых образцов АСЭ нужно проводить оценку ПКЭЭ с учетом характера нагрузки. Такие исследования можно проводить на реально действующих или экспериментальных установках. Однако указанные подходы имеют недостатки. (1) Высокая стоимость проведения натурного эксперимента. Она обусловлена не только значительной стоимостью контрольно-измерительного оборудования, но и необходимостью вывода АСЭ из эксплуатации на определенное время (для обеспечения «чистоты» исследования). (2) Необходимы большие затраты времени на обработку экспериментальных данных. Это делает нецелесообразным проведение исследований на реально действующих образцах АСЭ.

Альтернативой натурным исследованиям является метод математического моделирования (ММ), который получает всё большее распространение в условиях расширения возможностей вычислительной техники, совершенствования программного обеспечения. С помощью компьютерной техники можно при небольших финансовых затратах изучать все режимы работы АСЭ, в том числе и аварийные без повреждения АСЭ. Кроме того можно быстро и высококачественно произвести обработку полученных при ММ результатов. Поэтому анализ ПКЭЭ выполним с помощью компьютерных моделей. При этом точность и достоверность результатов компьютерного моделирования (вычислительных экспериментов) можно оценивать путем их сравнения с экспериментальными данными.

Анализ возможных подходов к решению поставленной задачи. Как показал анализ, на качество электрической энергии оказывают влияние все элементы АСЭ и нагрузка. Для исследования таких ПКЭЭ, как установившееся и переходные отклонения напряжения, установившееся и переходные отклонения частоты, несимметрия системы напряжений, амплитудная модуляция напряжения, необходимо иметь ММ, с помощью которых можно промоделировать и провести анализ установившихся и переходных режимов при симметричных и несимметричных условиях работы АСЭ в отношении нагрузки.

Очевидно, что при построении ММ для исследования конкретного режима она должна как можно более полно соответствовать исследуемому объекту именно для этого режима, а не для всех принципиально возможных. При выполнении этого условия модель может заменить реальный объект, поскольку она будет адекватна оригиналу. В общем случае ММ АСЭ содержит в своем составе следующие элементы [1–6, 16–18]:

- первичный источник энергии с регулятором частоты вращения (например, гидравлическую или паровую турбину);
- электрический генератор (например, синхронный или асинхронный генератор) с автоматическим регулятором возбуждения;
- нагрузку (например, трансформаторы, осветительные устройства, электродвигатели и другое электромеханическое оборудование);
- дополнительные устройства регулирования (например, различные фильтры).

Моделирование синхронного генератора (СГ) в составе АСЭ будем осуществлять, применяя параметрические модели. Причина – использование полевых моделей приводит к усложнению ММ и увеличению времени расчета (моделирования).

Для дальнейших исследований выберем в качестве наиболее распространенной активно-индуктивной нагрузки асинхронный двигатель (АД). Это позволит провести исследования всех ПКЭЭ для АСЭ согласно ГОСТ 32144-2013. Выбор в качестве нагрузки АД обусловлен тем, что работа такого двигателя достаточно большой мощности в различных режимах (пуск, реверс, изменение нагрузки, выбег и т.д.), оказывает сильное влияние на параметры электрической энергии в АСЭ. Кроме того, использование АД в качестве нагрузки позволяет моделировать целый ряд реальных эксплуатационных режимов работы АСЭ, в частности, симметричные и несимметричные режимы, режимы внезапного наброса и сброса нагрузки, режимы изменения нагрузки по заданным законам и т.п.

Особое внимание при разработке общей ММ АСЭ, включающей в себя модели отдельных элементов, следует уделить составлению связей между ними, так как именно логические связи между отдельными элементами однозначно определяют работу всей модели в целом.

Для моделирования СГ в составе общей модели АСЭ в общем случае можно использовать следующее:

- полные ММ, которые детально описывают реальные электромагнитные процессы, протекающие в СГ;
- упрощенные динамические модели;
- схемотехнические модели, построенные без существенного упрощения математического описания СГ (это дает возможность максимально приблизить модель к реальному объекту);

- идентификационные модели, основанные на прямой идентификации по полной нелинейной ММ СГ;

- модели на основе метода ортогональных сетей.

Два последних вида моделей для обеспечения высокой точности требуют трудоемкой настройки на реальный объект и обычно не учитывают особенности протекания реальных физических процессов в СГ – поэтому полная адекватность модели всем возможным режимам отсутствует. Для составления схемотехнических моделей необходимо знание экспериментальных аппроксимирующих зависимостей для нелинейных параметров СГ. Поэтому они предназначены, в первую очередь, для натурального моделирования, и, соответственно, цифровые модели на их основе реализовать весьма трудоемко.

Полные ММ базируются на использовании уравнений теории электромеханического преобразования энергии. При этом есть два основных способа математического описания электромагнитных процессов, протекающих в электрической машине.

(1) На основе моделирования магнитного поля машины и непосредственном математическом описании реальных физических процессов, протекающих в этом поле. Этот способ основан на теории электромагнитного поля и его математической базой является система уравнений Максвелла.

(2) Допущение о бесконечно большой магнитной проницаемости магнитопроводов СГ позволяет описывать машину системой независимых уравнений с переменными коэффициентами. Этот способ основан на теории электрических цепей и законах Кирхгофа.

Следует отметить, что при разработке модели конкретной АСЭ на базе описанных способов обычно используют дополнительные допущения, которые учитывают особенности протекания электромагнитных процессов в реальных типах электрических машин, входящих в состав АСЭ.

Конечно, из всех известных методов наибольшую точность при описании физических процессов, протекающих в индуктивной электрической машине, дают модели, основанные на полевом подходе. Однако такие модели представляют собой системы двух- или трехмерных конечно-разностных, или конечно-элементных уравнений. Для их решения необходимо использовать очень сложные граничные условия. Это очень сильно усложняет решение таких уравнений и затрудняет проведение анализа работы АСЭ [9–11, 22].

При составлении моделей, которые базируются на контурном методе, применяют ряд допущений. Основными из них являются следующие: бесконечность магнитной проницаемости $\mu = \infty$; синусоидальность распределения магнитного поля. Такие допущения позволяют значительно упростить математическое описание задач. Следует отметить, что для большинства обычных электрических машин такие допущения вполне корректны и не вносят существенных погрешностей в конечные результаты расчетов.

Допущение $\mu = \infty$ позволяет отказаться от непосредственного описания магнитного поля и получить модель машины в виде независимых контуров, связанных через потокосцепления. Их величины для каждого контура получают в виде линейной комбинации от всех контурных токов. Каждый контур описывается одним обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка, а суммарный магнитный поток машины определяется с использованием принципа суперпозиции.

Допущение синусоидальности магнитного поля основано на том, что процесс электромеханического преобразования энергии осуществляется основной гармоникой вращающегося магнитного поля, которое создается взаимно неподвижными полями статора и ротора. Высшие гармоники поля перемещаются в воздушном зазоре относительно друг друга, и, соответственно, не участвуют в основном электромеханическом преобразовании энергии, вызывая только дополнительные потери и паразитные моменты. При этом для их уменьшения в машине предусматривается целый ряд конструктивных мероприятий (распределение и укорочение обмотки, неравномерный воздушный зазор, скос пазов и т.д.).

При представлении реальной электрической машины в виде упрощенной контурной модели распределенная трехфазная обмотка статора заменяется тремя идеальными контурными обмотками, расположенными по осям А, В, С со сдвигом на 120 градусов на «статоре» схемы. Поскольку обмотки статора СГ выполняются исходя из условия обеспечения их симметрии, то такая замена вполне оправдана.

Обмотки ротора представляются на «роторе» модели следующим образом:

- обмотка возбуждения представляется в виде вращающегося контура, расположенного по продольной оси «d»;

- демпферная обмотка представляется в виде двух эквивалентных ортогональных вращающихся контуров, которые расположены по продольной (d) и поперечной (q) осям.

При составлении модели напряжение, подводимое к обмотке возбуждения, задается в виде идеального источника ЭДС, а эквивалентные контуры демпферной обмотки замкнуты накоротко.

Полученную таким образом идеализированную шестиконтурную модель СГ можно описать системой дифференциальных контурных уравнений и уравнениями потокосцеплений, а также алгебраическими уравнениями, учитывающими внешние электрические цепи и механический момент сопротивления на валу. К полученной модели можно применить законы Кирхгофа.

Уравнения напряжений и токов контуров статора связаны с уравнениями, описывающими модель нагрузки. При этом если нагрузка чисто активная, то связь алгебраическая, а при реактивной нагрузке связь дифференциальная. В случае изменяющейся нагрузки используются модели, которые учитывают динамику изменения потребляемой мощности во времени.

Таким образом, видно, что полученная модель описывается не очень большим числом в целом несложных уравнений, а входящие в них переменные и коэффициенты имеют четкий физический смысл. Поэтому такое описание АСЭ вполне пригодно для компьютерного моделирования. При этом в каждом конкретном случае различные контурные модели позволяют сократить число параметров и предусматривают конкретные способы определения исходных данных.

При составлении контурных моделей самым грубым является допущение бесконечности магнитной проницаемости $\mu = \infty$. Уменьшить погрешность от этого допущения можно разными путями. Например, можно учитывать влияние нелинейных эффектов за счет высших гармоник, вводя дополнительные контура, или повышать порядок системы уравнений и число необходимых исходных и текущих параметров. Однако это значительно усложняет модели и, соответственно, их решение. Как следствие, применение таких моделей ограничено.

(3) Последняя группа моделей объединяет контурный и полевой подход при их составлении. Однако такие модели применяются редко, т.к. они громоздки и при этом, по существу, остаются контурными.

Проведенный анализ известных моделей и допущений, лежащих в их основе, показал, что при расчетах рабочих режимов обычных СГ эти допущения для практических расчетов вполне приемлемы. Это позволяет отказаться от заведомо сложных моделей, обладающих большой трудоемкостью, и использовать сравнительно простую модель, которая с достаточной степенью точности описывает реальный процесс электромеханического преобразования энергии. В качестве такой модели выберем классическую модель Парка – Горева, которая учитывает все основные особенности СГ, имеющие практическое значение.

Подчеркнем, что при выборе конкретной модели для дальнейших исследований были приняты во внимание необходимость достаточно высокой точности получаемых результатов, а также доступность информации о необходимых параметрах. Конечно, по точности классическая модель Парка – Горева уступает некоторым более сложным моделям. Однако в случае необходимости, решение классической модели может быть уточнено с использованием современных методик. С помощью модели Парка – Горева можно описать переходные и установившиеся режимы трехфазной синхронной машины, имеющей полную демпферную обмотку и ротор любого типа (явнополюсный или неявнополюсный), причем имеется возможность приближенно учесть влияние высших гармоник.

Математические модели элементов АСЭ. Рассмотрим ММ синхронного трехфазного генератора, на роторе которого расположена обмотка возбуждения и демпферная обмотка, имеющая контура по продольной и поперечной осям.

Уравнения электрического равновесия обмоток статора и ротора для удобства запишем в матричном виде. Для контуров статора:

$$|u_s| = |r_s| \cdot |i_s| + \frac{d|\psi_s|}{dt}, \quad (1)$$

где матрицы напряжений, токов, потокосцеплений и диагональная матрица активных сопротивлений контуров статора соответственно равны:

$$|u_s| = |u_A, u_B, u_C|^t, \quad (2)$$

$$|i_s| = |i_A, i_B, i_C|^t, \quad (3)$$

$$|\psi_s| = |\psi_A, \psi_B, \psi_C|^t, \quad (4)$$

$$|r_s| = \text{diag} |r_A, r_B, r_C|, \quad (5)$$

Для контуров ротора:

$$|u_r| = |r_r| \cdot |i_r| + \frac{d|\psi_r|}{dt}, \quad (6)$$

где матрицы напряжений, токов, потокосцеплений и диагональная матрица активных сопротивлений обмоток ротора соответственно равны

$$|u_r| = |u_f, 0, 0|^t, \quad (7)$$

$$|i_r| = |i_f, i_{kd}, i_{kq}|^t, \quad (8)$$

$$|\psi_r| = |\psi_f, \psi_{kd}, \psi_{kq}|^t, \quad (9)$$

$$|r_r| = \text{diag} |r_f, r_{kd}, r_{kq}|, \quad (10)$$

Выражения для потокосцепления обмоток статора и ротора имеют вид:

$$\begin{cases} |\psi_s| \\ |\psi_r| \end{cases} = \begin{cases} L_s \\ L_{rs} \end{cases} |i_s| + \begin{cases} L_{sr} \\ L_r \end{cases} |i_r| \quad (11)$$

где матрицы индуктивностей $|L_s|, |L_r|$ и взаимоиндуктивностей $|L_{sr}|, |L_{rs}|$, состоящие из индуктивностей и взаимоиндуктивностей фаз обмоток статора и ротора

Уравнение движения для синхронного генератора запишем в виде

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{изб} = M_{мх} - M_{\gamma} \quad (12)$$

где J — момент инерции маховых масс ротора; M_{γ} — тормозящий момент СГ; $M_{мх}$ — механический момент, приложенной к валу ротора.

Электромагнитный момент СГ равен

$$M_{\gamma} = \frac{1}{2} \left(|i_r|^t \frac{d|L_{rs}|}{d\gamma} |i_s| + |i_s|^t \frac{d|L_{rs}|}{d\gamma} |i_r| \right) \quad (13)$$

Уравнения (21)÷(13) представляют собой ММ СГ в фазных координатах. Теоретические исследования различных режимов работы проводились по описанным выше методикам с использованием ММ.

Анализ показал, что большинство ПКЭЭ можно оценивать при активной нагрузке, наиболее характерной для большинства потребителей в АСЭ. Запишем уравнения активной нагрузки.

$$|u_n| = |r_n| \cdot |i_n| + \frac{d|\psi_n|}{dt}, \quad (14)$$

Для трехфазной системы координат имеем:

$$|i_n| = |i_{na}, i_{nb}, i_{nc}|^t, \quad (15)$$

$$|u_n| = |u_{na}, u_{nb}, u_{nc}|^t, \quad (16)$$

$$|\psi_n| = |\psi_{na}, \psi_{nb}, \psi_{nc}|^t, \quad (17)$$

Потокосцепления можно записать следующим выражением:

$$|\psi_n| = |L_n| |i_n|, \quad (18)$$

где L_n — индуктивная нагрузка.

Обоснование выбора программного продукта для моделирования. Для индивидуального математического описания процессов, происходящих в различных объектах АСЭ, необходимо создать специальные прикладные программы, ориентированные именно на решение конкретных задач. Однако если требуется проводить исследования сложных систем, то необходимое количество таких специфических программ резко увеличивается, а их отладка и разработка удобного интерфейса требуют высокой квалификации программистов и значительных затрат времени. Поэтому более целесообразно применять универсальные программные средства, которые гарантированно работоспособные и удобные. Тем самым обеспечивается надежное решение сложных задач за короткое время. Таких программных продуктов и комплексов в настоящее время достаточно много. Их можно разделить на два больших класса: универсальные прикладные математические пакеты и специальные программы по моделированию конкретных систем.

При анализе возможности компьютерного моделирования АСЭ примем во внимание, что в MATLAB R2010b уже имеются все элементы АСЭ: модель синхронной машины, асинхронной машины и различных электрических нагрузок. Они включены в средства Sim Power System и позволяют моделировать энергетические и электромеханические устройства схемотехническими методами. Используя блоч-

ный принцип, реализованный в MATLAB R2010b, можно из отдельных стандартных блоков создавать сложные объектно-ориентированные модели. Наличие большого числа стандартных блоков и подмоделей существенно облегчает разработку имитационных моделей АСЭ практически любой сложности, которые позволяют провести анализ ПКЭЭ. Такая методология обеспечивает возможность легкой корректировки и увеличения степени сложности модели, причем изменение или введение новых блоков и подмоделей осуществляется без изменения общей структуры модели. Ввод или изменение отдельных элементов модели осуществляются посредством графического редактора или редактора формул.

Разработанная визуальная модель в компьютере автоматически описывается системой взаимосвязанных уравнений, т.е. преобразуется в ММ, записанную на внутреннем языке программы. Решение этой системы уравнений осуществляется по алгоритму, встроенному в MATLAB R2010b. При этом автоматически определяется оптимальный порядок вычислений, требующий наименьшего количества преобразований.

Результаты моделирования могут выводиться так: в виде графиков на экране монитора; в виде файла, который можно сопрягать с внешними программами (AutoCAD2011, Simplorer7, Maxwell14). Последнее позволяет использовать результаты для дальнейших расчетов и анализа, например, с применением математических пакетов типа MathCAD.

Как показал проведенный анализ, для моделирования работы АСЭ с целью анализа ПКЭЭ наиболее целесообразным является использование программного продукта MATLAB R2010b в комбинации с модулем Simulink. Такая связка позволяет моделировать различные электромеханические динамические системы.

Имитационные модели элементов АСЭ с различными типами нагрузки. Библиотека блоков SimPowerSystems (SPS) является одной из дополнительных библиотек Simulink 6.0. Эта библиотека ориентирована на имитационное моделирование сложных электротехнических систем. Достоинством библиотеки SPS является то, что при моделировании можно сочетать методы структурного и имитационного моделирования. Это позволяет упростить модели, повысить их качество и скорость работы.

Процесс создания и расчета модели АСЭ представлен на блок-схеме рисунка 1.

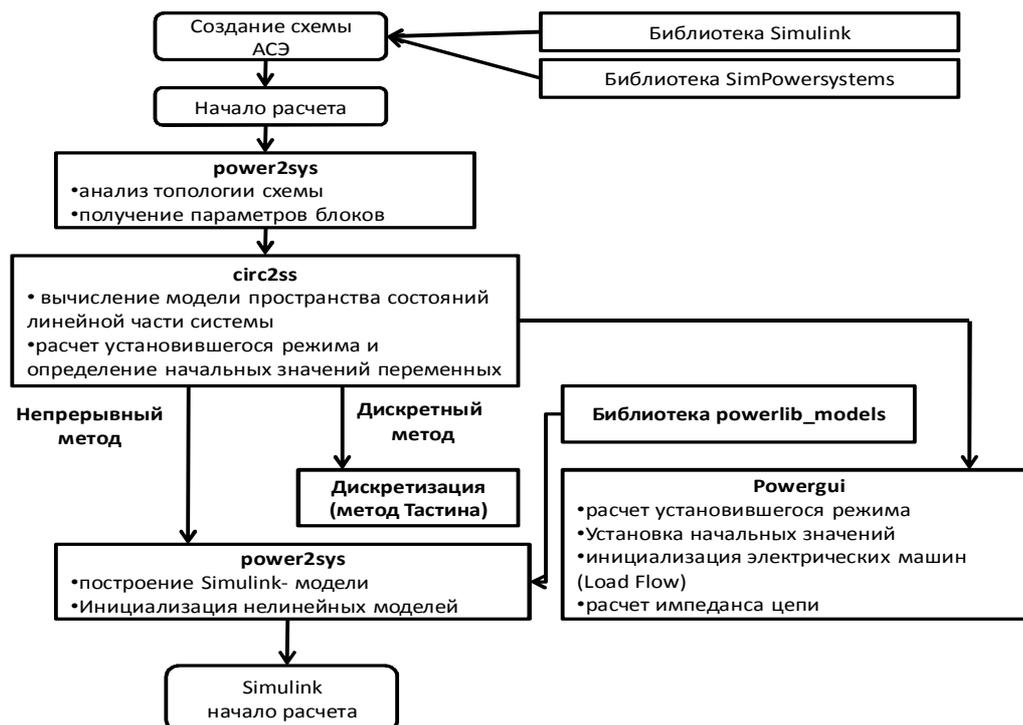


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма создания и расчета модели АСЭ

При инициализации программы функция power2sys выполняет следующие действия: определяет топологию схемы и автоматически присваивает номера ее узлам; сортирует SPS-блоки, т.е. разделяет их на две группы - линейные и нелинейные, и получает параметры блоков. Затем функция circ2ss производит вычисление модели пространства состояний линейной группы блоков, определяет начальные значения переменных и выполняет расчет установившегося режима. При задании дискретизации модели в пространстве состояний определяется дискретная модель схемы, использующая метод Тастина. После этого формируется Simulink-модель схемы, которая запоминается в одном из измерительных блоков.

Реализация модели синхронного генератора. Данный блок позволяет моделировать синхронную электрическую машину в генераторном режиме (рис. 2). Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины.

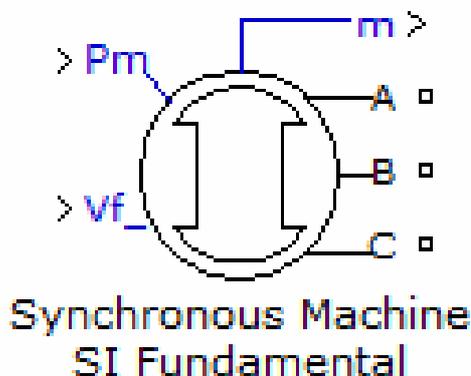


Рисунок 2 – Блок синхронной машины Synchronous Machine SI Fundamental

Выводы обмотки статора представлены портами модели «А, В и С». Сигнал, пропорциональный подводимой механической мощности к валу генератора от первичного двигателя, подается на входной порт P_m , а на входной порт V_f задается сигнал, равный напряжению обмотки возбуждения. На выходном порту « m » формируется векторный сигнал, содержащий информацию о выходных параметрах СГ: токи обмотки статора, угловая частота вращения ротора, электромагнитная мощность и др.

Электрическая часть представлена моделью пространства состояний четвертого порядка (рис. 3).

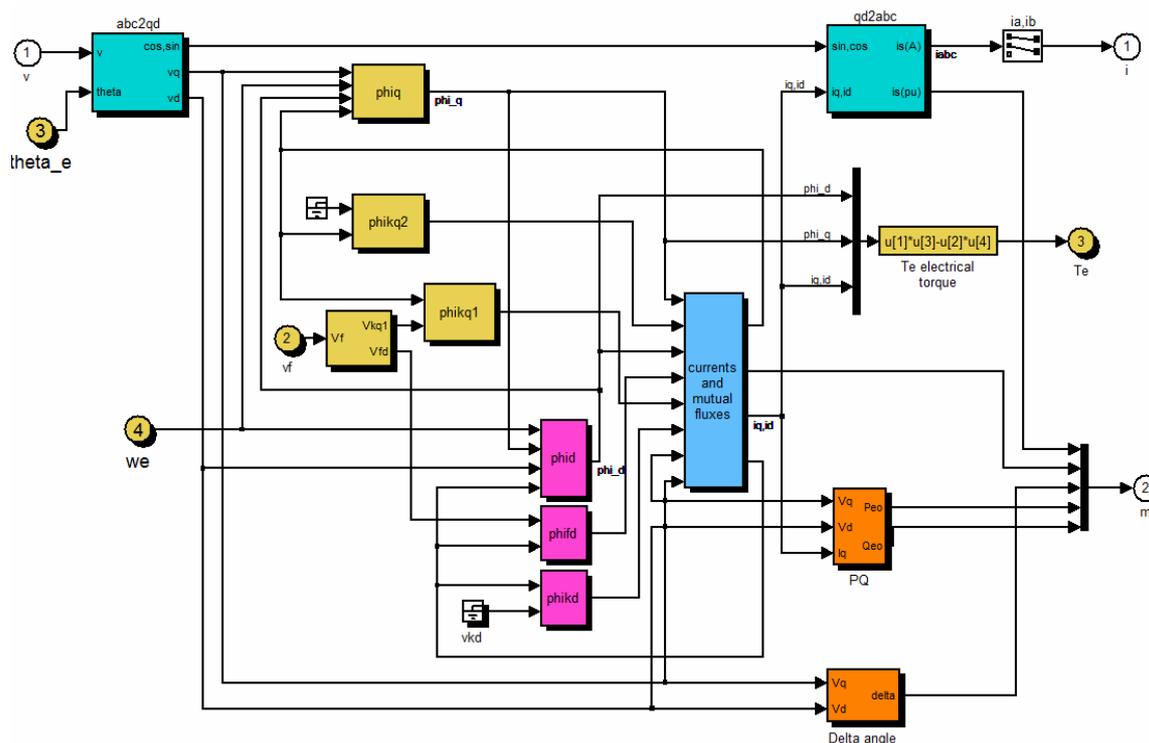


Рисунок 3 – Модель электрической части блока синхронного генератора

Реализация модели балластной нагрузки и регулятора. Рассматриваемая в работе балластная нагрузка (рис. 4) представляет собой систему дискретных блоков активной нагрузки (Resistive Loads) и систему управляемых переключений (Switches) (рис. 5).

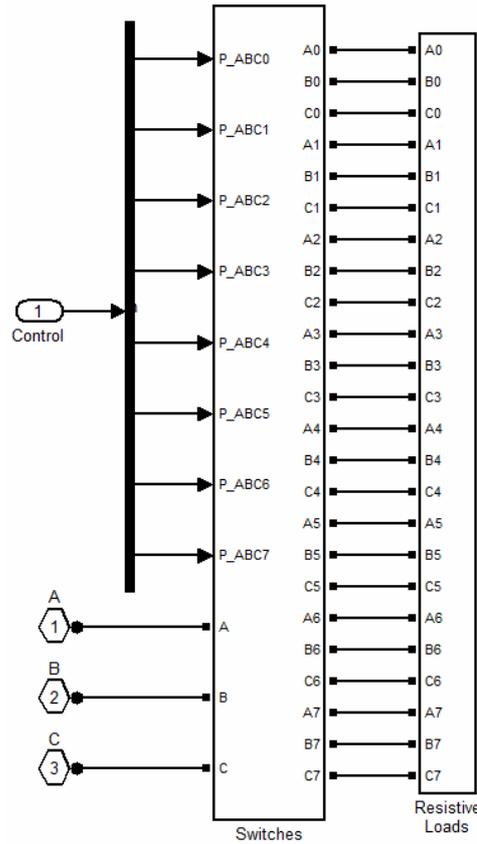


Рисунок 4 – Модель балластной нагрузки

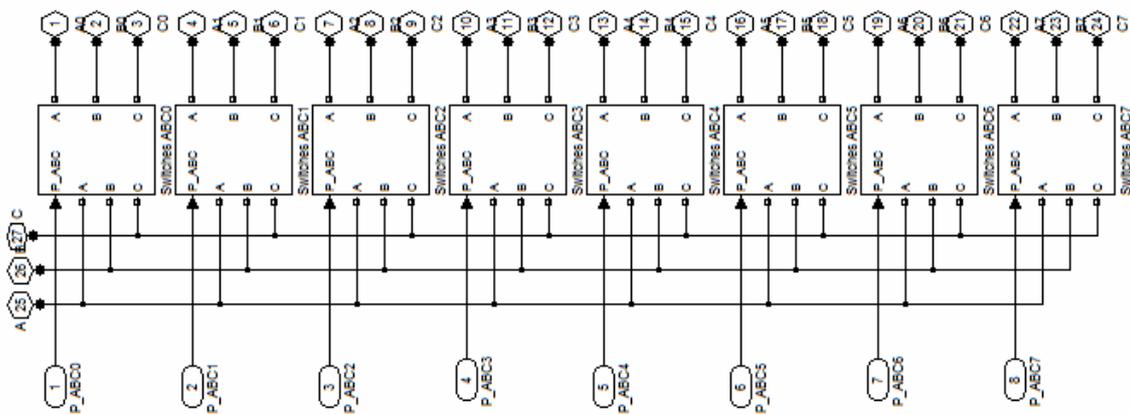


Рисунок 5 – Система переключателей балластной нагрузки

Балластная нагрузка подключается параллельно нагрузке потребителя и численно равна ей. Величина балластных сопротивлений блоков выбрана пропорциональной ряду геометрической прогрессии с коэффициентом 2: 1,2,4,8 и т.д. Входной сигнал Control является управляющим для системы переключателей и обеспечивает комбинацию включения дискретных нагрузок, при которой полная мощность, потребляемая балластной нагрузкой, будет изменяться в диапазоне от 0 до максимальной с равным дискретным шагом $step = 1/(2n-1)$, где n – число ступеней дискретных балластных сопротивлений.

В модели регулятора балластной нагрузки входным сигналом блока автобалластного регулирования (рис. 6.) является ток полезной нагрузки генератора.

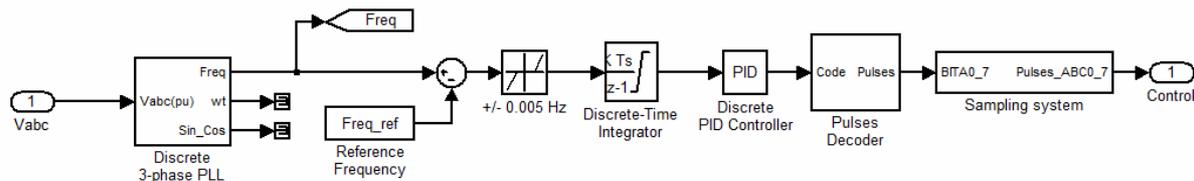


Рисунок 6 – Блок автобалластного регулирования

Разработка модели АСЭ в среде MATLAB. Разрабатываемая модель АСЭ предназначена для исследования ПКЭЭ с заданными параметрами, используемой для питания автономного потребителя, не подключенного к единой энергосистеме. Эта модель предусматривает питание автономного потребителя от трехфазной электролинии напряжением 380 В с частотой 50 Гц. Наиболее характерным режимом функционирования АСЭ является работа в режиме выработки постоянной активной мощности при условии постоянства крутящего момента на валу гидрогенератора.

Для поддержания номинального или близкого к номинальному режима работы АСЭ необходимо соблюдение баланса мощностей. Активная мощность, подводимая турбиной к генератору, должна строго соответствовать суммарной мощности, потребляемой нагрузкой потребителя, оборудованием станции и рассеиваемой балластной нагрузкой.

Реализация обобщенной модели АСЭ представляет собой объединение моделей подсистемы объекта, контуров управления, элементов с заданными параметрами и их связей. С этой целью применяется среда Simulink с использованием блоков из стандартной библиотеки Block Library и дополнительной библиотеки SimPowerSystems, ориентированной на имитационное моделирование электротехнических устройств.

Подробное описание моделирования элементов и подсистем АСЭ, учитывающего важные особенности физических процессов объекта, а так же вопросы математического описания, были рассмотрены выше. Разработанная обобщенная модель представлена на рисунке 7.

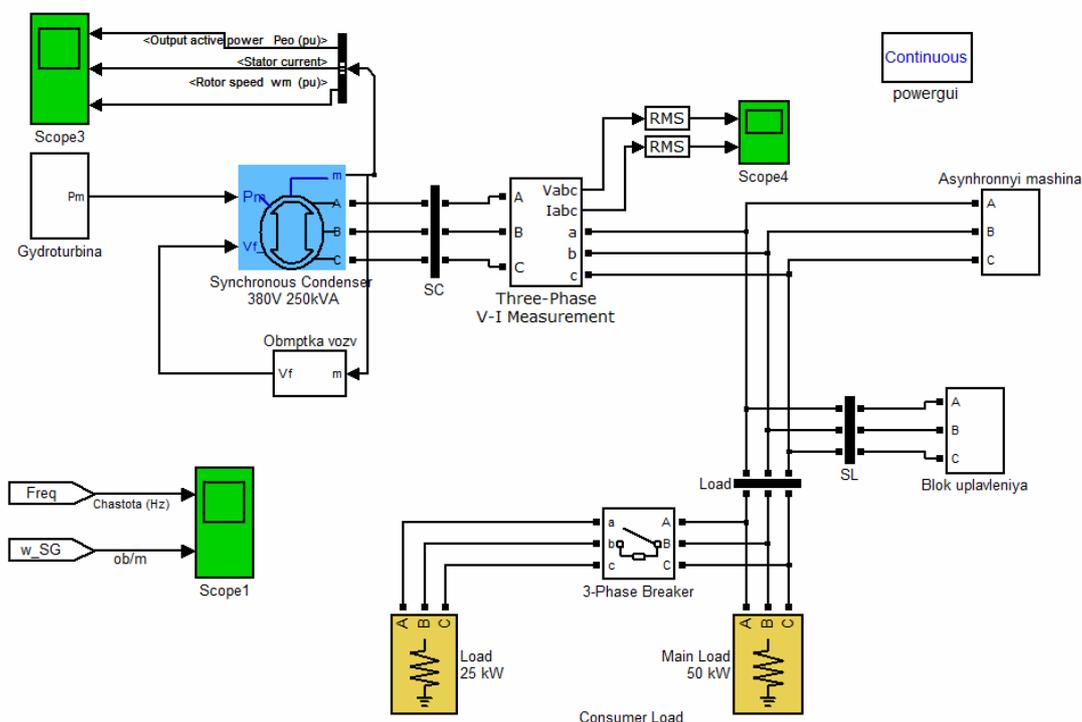


Рисунок 7 – Схема моделирования обобщенной модели АСЭ в среде MATLAB

Для модели расчета ПКЭЭ в режиме реального времени, регламентированных ГОСТ 32144-2013, наиболее эффективным является использование системы MATLAB. Покажем возможности данного метода на примере исследования измерителя ПКЭЭ, имитационная модель которого представлена на рис.8. Она реализована средствами входящих в MATLAB пакетов визуально-ориентированного программирования Simulink и Power System Blockset.

Разработанная модель отвечает следующим требованиям: открытый код, что позволяет изменять и совершенствовать алгоритм расчета; модульная структура, то есть расчет каждого показателя качества ЭЭ выполняется в отдельной подсистеме.

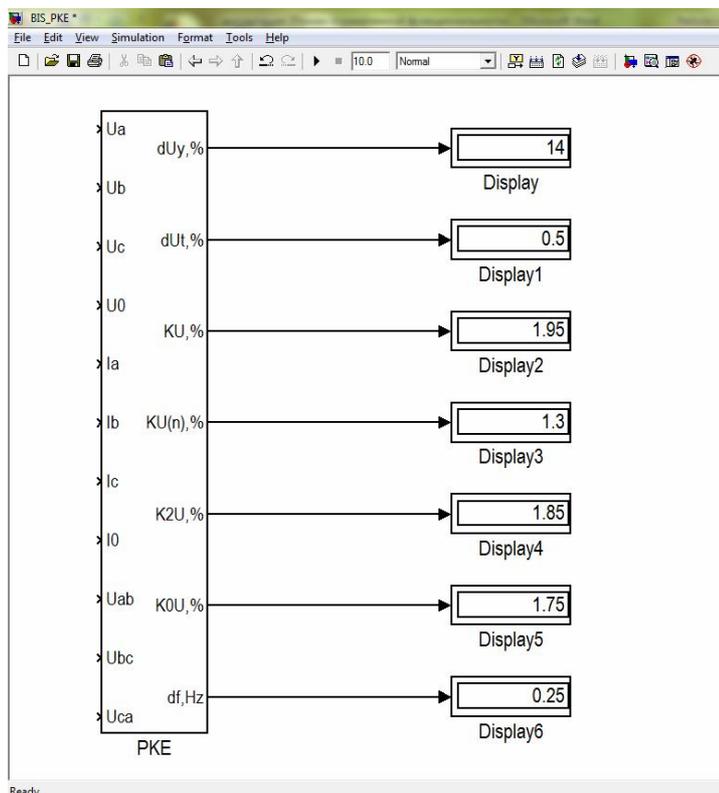


Рисунок 8 – Имитационная модель измерителя ПКЭЭ

Проведем исследования ПКЭЭ с использованием компьютерных моделей, представленных выше. Расчет отдельных ПКЭЭ в конкретных режимах работы производился с учетом требований ГОСТ 32144-2013. Полученные результаты исследований ПКЭЭ в АСЭ и режимов работы АСЭ представлены в [1, 2, 27].

Установившееся отклонение напряжения для всех систем электроснабжения определяют по формуле

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \tag{19}$$

где $U_{ном}$ и U_y – номинальное и установившееся значения напряжения соответственно.

Переходное отклонение напряжения при сбросе - набросе симметричной нагрузки $\delta U_{пер}$ вычисляют по формуле

$$\delta U_{пер} = \pm \frac{U_{max}(U_{min}) - U_y}{U_{ном}} \cdot 100\% \tag{20}$$

где U_{max} и U_{min} – максимальное и минимальное значения переходного напряжения, которые выходят за пределы допустимых значений напряжения в установившемся режиме.

Следует подчеркнуть, что отклонения переходного напряжения контролируют только в АСЭ. В системах централизованного электроснабжения отслеживаются другие ПКЭ: провал напряжения, размах изменения напряжения, временное перенапряжение, импульс напряжения и др. Эти показатели характеризуют уровень колебания напряжения в различных режимах. Диапазон изменения напряжения δU_t определяют с помощью зависимости

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}} \cdot 100\% \tag{21}$$

где U_i, U_{i+1} – значения в пределах каждого полупериода основной частоты соседних точек экстремумов напряжения или экстремума и горизонтального участка кривой среднеквадратичных значений напряжения.

Глубина провала напряжения δU_n рассчитывается по формуле

$$\delta U_n = \frac{U_{ном} - U_{min}}{U_{ном}} \times 100 \quad (22)$$

где U_{min} – минимальное значение напряжения.

Пиковые значения напряжения характеризуются коэффициентом временного перенапряжения $K_{перU}$, который равен

$$K_{перU} = \frac{U_{amax}}{\sqrt{2} \cdot U_{ном}} \quad (23)$$

где U_{amax} – максимальное амплитудное значение напряжения.

Расчетные зависимости для определения колебания частоты зависят от типа системы электроснабжения. Для централизованных систем электроснабжения величину отклонения частоты Δf вычисляют по формуле

$$\Delta f = f_y - f_{ном}, \quad (24)$$

где f_y – усредненное значение частоты, $f_{ном}$ – номинальное значение частоты.

В АСЭ для варианта неизменной симметричной нагрузки величину установившегося отклонения частоты δf_y вычисляют по формуле

$$\delta f_y = \frac{f_{max} - f_{min}}{2 \cdot f_{ном}} \cdot 100\% \quad (25)$$

где f_{max}, f_{min} – наибольшее и наименьшее значения частоты соответственно. Кроме величины δf_y для АСЭ регламентируется также переходное отклонение частоты при сбросе – набросе симметричной нагрузки, величина которого определяется по формуле

$$\delta f_{пер} = \frac{f_{max}(f_{min}) - f_{уст}}{f_{ном}} \cdot 100\% \quad (26)$$

где $f_{уст}$ – допустимое значение установившейся частоты; f_{max} и f_{min} – максимальное и минимальное величины частоты при переходном процессе, которые выходят за пределы $f_{уст}$.

Из указанных параметров наиболее важными являются те, которые характеризуют номинальные показатели системы электроснабжения. К ним относятся установившиеся отклонения напряжения и частоты. Стабильность поддержания этих показателей в установившихся режимах обеспечивает система регулирования возбуждения СГ.

Выводы. 1. Показано, что в условиях создания и эксплуатация АСЭ на базе источников ЭЭ небольшой мощности, использующих ВИЭ (например, применение малых гидроэлектростанций) в Кыргызской Республике актуальной является задача оценки показателей качества электрической энергии.

2. Составлены ММ всех компонентов АСЭ. Это позволяет построить единую ММ АСЭ с различными нагрузками. С ее помощью можно моделировать установившиеся, переходные, симметричные и несимметричные режимы работы АСЭ. В свою очередь это дает возможность определять ПКЭЭ в АСЭ с учетом влияния параметров нагрузки и всех элементов АСЭ.

3. Приведено обоснование выбора уравнения Парка-Горева для моделирования автономной системы электроснабжения.

4. Исследованы имитационные модели элементов АСЭ с различными типами нагрузки. Для этой цели использовался программный продукт Simulink 7.1 на базе системы компьютерной математики MATLAB R2010b.

5. С использованием этих средств реализована модель полезной и балластной нагрузок, а также модель дискретного регулятора балластной нагрузки.

6. На основе использования предложенных имитационных моделей, были для различных режимов работы АСЭ были проведены исследования ПКЭЭ, регламентируемых ГОСТ 32144-2013.

Список литературы

1. Асиев А. Т. Математическое моделирование в пакете Simulink режима короткого замыкания трансформаторов автономных электроэнергетических систем. // Известия КГТУ– 2010, № 21, С. 14-18.
2. Асиев А. Т. Моделирование в автономных системах электроснабжения на основе программы Simulink. // Известия КГТУ– 2011, № 23, С. 25-27.
3. Баловнев Д. И. К формированию математической модели автономных энергоустановок. // Первая городская научно – практическая конференция молодых ученых и студентов г. Смоленска. Тезисы докладов Смоленск. – 1998, С. 89-90.
4. Безруких П. П. Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России // Мировая электроэнергетика– 1996, №3, С. 22-27.
5. Брумштейн Ю. М., Захаров Д. А., Дюдиков И. А. Анализ и управление энергобезопасностью деятельности медицинских учреждений // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии – 2015, № 1 - С.44-58 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(29\)/44-58.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(29)/44-58.pdf))
6. Брумштейн Ю. М., Захаров Д. А., Сокольский В. М. Энергопотребление и энергоэффективность деятельности медицинских учреждений: направления анализа и возможности управления // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии– 2015, № 3 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(31\)/40-57.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(31)/40-57.pdf))
7. Доброхотов В. И. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Проблемы и перспективы // Теплоэнергетика– 1996, № 5, С. 2-9.
8. Кадыков Ю. М. Концепция развития энергосберегающих технологий, малой и нетрадиционной энергетики // Механизация и электрификация сельского хозяйства– 1997, №6, С. 2 - 3.
9. Караулов В. Н. Разработка математической модели электромагнитных процессов в специальных явнополюсных синхронных генераторах при работе на несимметричную и вентильную нагрузки: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.09.01 / В.Н. Караулов. - 1997. - 20 с.
10. Каримов Р. Р. Дискретная математическая модель синхронной электрической машины с вентильным возбудителем для исследования установившихся и переходных электромагнитных процессов: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.09.01 / Р.Р. Каримов. – 2001. - 20 с.
11. Кузнецов В. А. Применение локальных рядов Фурье для расчета электромагнитных переходных процессов в синхронных электрических машинах // Электротехника– 1997, №4, С. 34-37.
12. Лукутин Б. В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / М.: Энергоатомиздат – 2008, 231 с.
13. Лукутин Б. В. Микрогидроэлектростанция с автобалластной нагрузкой, регулируемой по частоте выходного напряжения. // Электромеханика – 1990, №6, С. 111-119.
14. Муругов В. П. Расширение сферы использования энергии возобновляемых источников // Техника в сельском хозяйстве -1996, №2, С. 17-19.
15. Перминов Э. М. Освоение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в России // Мировая электроэнергетика– 1995, №2, С. 43-48.
16. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. М.: Энергоиздат. - 1989.
17. Правила устройства электроустановок. Издание 6. - М.: Главгосэнергонадзор России, 1998. – 550 с.
18. Правила эксплуатации электроустановок потребителей. - М.: Энергоатомиздат, 1999.
19. Рахимов К. Р. Линии электропередачи Кыргызстана особенности, методы расчета и управления / Б.: ИЦ «Текник». – 2010, 152 с.
20. Стребков Д. С. Концепция и пути развития энергетики сельского хозяйства // Техника в сельском хозяйстве– 1996, №6, С. 2-8.
21. Стребков Д. С. Проблемы развития возобновляемой энергетики // Механизация и электрификация сельского хозяйства- 1997, № 6. С. 4-8.
22. Федотов А. И. Дискретные методы анализа режимов синхронных электрических машин с вентильными системами возбуждения : автореф. дисс. докт. техн. наук: 05.09.01 / А.И. Федотов. – Москва, МЭИ, 1998. - 40 с.
23. Шпильрайн Э. Э. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии // Энергия: эконом., техн., экол., – 1997, № 5 С. 6 - 15.

References

1. Asiev A. T. Matematicheskoye modelirovaniye v pakete Simulyatsionnyye slyemy korotkogo zamykaniya transformatorov avtonomnykh elektroenergeticheskikh system. [Mathematical modeling in a package Simulation short-circuit systems of transformers of autonomous electric power systems] *Izvestiya KGTU* [News of KSTU] -2010, No. 21, pp. 14-18
2. Asiev A. T. Modelirovaniye v avtonomnykh sistemakh elektrosnabzheniya na osnove programm Simulink. [Modeling in autonomous power supply systems based on Simulink programs] *Izvestiya KGTU* [News of KSTU] -2011, No. 23, P. 25-27
3. Balovnev D. I. K formirovaniyu matematicheskoy modeli avtonomnykh energoustanovok. [To the formation of a mathematical model of autonomous power plants] *Pervaya gorodskaya nauchno - prakticheskaya konferentsiya molodykh uchennykh i studentov g. Smolensk. Tezisy dokladov Smolensk* [The first city scientific - practical conference of young scientists and students in Smolensk. Abstracts of Smolensk] - 1998, pp. 89-90
4. Bezrukikh P. P. Kontseptsiya razvitiya i ispol'zovaniya vozmozhnostey maloy i netraditsionnoy energetiki v energeticheskom balanse Rossii [The concept of development and use of small and non-traditional energy in the energy balance of Russia] *Mirovaya elektroenergetika* [World Electric Power Industry] - 1996, №3, P. 22-27
5. Brumshteyn Yu. M., Zakharov D. A., Dyudikov I. A. Analiz i upravleniye energobezopasnost'yu deyatel'nosti meditsinskikh uchrezhdeniy [Analysis and management of energy security of medical institutions] *Prikaspiyskiy zhurnal. Upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal. Management and High Technologies] - 2015, No. 1 - P.44-58 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(29\)/44-58.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(29)/44-58.pdf))

6. Brumshteyn Yu. M., Zakharov D. A., Sokol'skiy V. M. / Energopotreble-niye i energoeffektivnost' deyatelnosti meditsinskikh uchrezhdeniy: napravleniya analiza i vozmozhnosti upravleniya [Energy Consumption and Energy Efficiency of Medical Institutions: Areas of Analysis and Management Capabilities] *Prikaspiyskiy zhurnal. Upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal. Control and High Technologies] - 2015, No. 3 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(31\)/40-57.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(31)/40-57.pdf))
7. Dobrokhотов V. I. Netraditsionnyye vozobnovlyayemye istochniki energii: Problemy i perspektivy [Non-traditional renewable energy sources. Problems and prospects] *Teploenergetika*[Теплоэнергетика] -1996, № 5, S. 2-9
8. Kadykov Yu. M. Kontseptsiya razvitiya energosberegayushchikh tekhnologiy, maloy i netraditsionnoy energetiki [The concept of development of energy-saving technologies, small and non-conventional energy] *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. [Mechanization and electrification of agriculture] - 1997, №6, C. 2 - 3.
9. Karaulov V. N. Razrabotka matematicheskoy modeli elektromagnitnykh protsessov v spetsial'nykh yavnopolyusnykh sinkhronnykh generatorakh pri rabote na nesimmetrichnoy i ventil'noy nagruzke [Development of a mathematical model of electromagnetic processes in special pole-pole synchronous generators when operating on an asymmetric and a ventilated load] *avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.09.01* [the author's abstract. diss. Cand. tech. Sciences: 05.09.01] - 1997. - 20 p.
10. Karimov P. P. Diskretnaya matematicheskaya model' sinkhronnoy elek-tricheskoy mashiny s ventil'nym voz-buditelem dlya issledovaniya ustarevshikh i perekhodnykh elektromagnitnykh protsessov [Discrete mathematical model of a synchronous electric machine with a gate exciter for the study of obsolete and transient electromagnetic processes] *avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.09.01* [author's abstract of thesis. diss. Cand. tech. Sciences: 05.09.01] - 2001. - 20 p.
11. Kuznetsov V. A. Primeneniye lokal'nykh ryadov Fur'ye dlya rascheta elektromagnitnykh perekhodnykh protses-sov v sinkhronnykh elektricheskikh mashinakh [Application of Local Fourier Series for Calculating Electromagnetic Transient Processes in Synchronous Electrical Machines] *Elektrotekhnika* [Elektrotekhnika] -1997, No. 4, P. 34-37.
12. Lukutin B. V. Vozobnovlyayemaya energetika v detsentralizovannom elektrosnabzhenii [Renewable energy in decentralized electricity supply] *Energoatomizdat* [Energoatomizdat] - 2008, 231 p.
13. Lukutin B. V. Mikrogidroelektrostantsiya s avtoballastnoy nagruz-koy, reguliruyemoy po chastote vykhodnogo napryazheniya. [Microhydroelectric power station with autoballast load, regulated by the frequency of the output voltage] *Elektromekhanika* [Electromechanics] - 1990, №6, P. 111-119
14. Murugov V. P. Rasshireniye sfery ispol'zovaniya energii vozobnov-lyayemykh istochnikov [Expansion of the sphere of energy use of renewable sources] *Tekhnika v sel'skom khozyaystve* [Engineering in agriculture] -1996, №2, S. 17-19
15. Perminov E. M. Osvoeniye netraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Rossii [Mastering of non-traditional and renewable sources of energy in Russia] *Mirovaya elektroenergetika* [World Electric Power Industry] - 1995, №2, P. 43-48
16. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey. [Rules of technical operation of power plants and networks] Moscow: Energoizdat, 1989.
17. Pravila ustroystva elektroustanovok. [Rules for the installation of electrical installations] Moscow : Glavgo-senergonadzor of Russia, 1998, 550 p.
18. Pravila ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley. [Rules for the operation of electrical installations of consumers] Moscow: Energoatomizdat, 1999..
19. Rakhimov K. R. Linii elektroperedachi Kyrgyzstana osobennosti, me-tody rascheta i upravleniya [Power lines of Kyrgyzstan features, calculation and control methods] B.: IC Teknik. - 2010, 152 pp.
20. Strebkov D. S. Kontseptsiya i puti razvitiya energetiki khozyaystva [The concept and ways of development of power engineering of the economy] *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*[Engineering in agriculture] - 1996, №6, C. 2-8.
21. Strebkov D. S. Problemy razvitiya vozobnovlyayemoy energetiki [Problems of the development of renewable energy] *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture] - 1997, No. 6. C. 4-8.
22. Fedotov A. I. Diskretnyye metody analiza sinkhronnykh elektricheskikh mashin s ventil'nymi sistemami [Dis-crete methods for the analysis of synchronous electric machines with valve systems]: *avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk: 05.09.01* [: author's abstract. diss. Doct. tech. Sciences: 05.09.01.] -1998. - 40 p
23. Shpil'rayn E. E. Netraditsionnyye vozobnovlyayemye istochniki energii-gii [Non-traditional renewable energy sources] *Energiya: ekonom., Tekhn., Ekol.*[Energy: Econom., Techn., Ekol.] - 1997, № 5 C. 6 - 15

РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

В статье рассмотрены вопросы использования автономных систем электроснабжения (АСЭ) на основе возобновляемых источников энергии в отдаленных населенных пунктах, в которые по экономическим соображениям нецелесообразно проведение линий электропередач. При этом актуальны задачи контроля и управления качеством вырабатываемой в АСЭ электроэнергии, которые и рассматриваются в данной статье.

С учетом особенностей Кыргызии предпочтительным (в классе возобновляемых источников) является использование энергии рек на основе использования малых гидроэлектростанций или даже просто «погружных» электрогенераторов. Это позволяет обеспечить относительную стабильность вырабатываемой мощности, особенно при наличии средств автоматического регулирования, управления подачей потока воды на электрогенераторы. Как следствие, энергоаккумуляторы в виде аккумуляторов в этом случае не нужны.

В тоже время для ветроэлектрогенераторов вырабатываемая мощность значительно зависит от силы ветра и может сильно колебаться во времени – поэтому необходимо использование энергоаккумуляторов в виде аккумуляторов.

Солнечные панели пока достаточно дороги. В условиях высокогорья они могут обеспечивать выработку значительных мощностей, но только в дневное время и только при ясной погоде. Мгновенная вырабатываемая мощность таких панелей может колебаться в условиях облачности, появлении тумана/дымки и пр. Перспективным является использование управляемых сервоприводами солнечных панелей, которые могут поворачиваться вслед за положением солнца – однако такие конструкции при сильном морозе потребуют специального подогрева.