

УДК 621.311.212

РЕЖИМЫ РАБОТЫ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ

Лукутин Борис Владимирович¹,
lukutin48@mail.ru

Шандарова Елена Борисовна¹,
shandarovaelena@mail.ru

Попов Михаил Михайлович¹,
mix_mix13@tpu.ru

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Использование гидроэнергетического потенциала России для производства электроэнергии является одним из самых чистых и экологически безопасных методов, так как при этом не происходит выброса вредных веществ и углекислого газа в атмосферу. Кроме того, это надежный и эффективный источник энергии, так как вода является постоянным источником энергии. Для производства электроэнергии из воды используются гидрогенераторы, которые эффективно преобразуют энергию потока воды в электрическую энергию. Автобалластные системы имеют некоторые недостатки, которые связаны с трудностями обеспечения высокого качества производимой электроэнергии микрогидроэлектростанций. Это связано с тем, что нагрузка на автономную систему электроснабжения может изменяться не только по величине, но и по характеру, что существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации ее параметров.

Цель: определение диапазонов изменения выходных электрических параметров гидрогенератора, который не регулируется и работает в составе инверторной микрогидроэлектростанции для сельского бытового потребителя. Также ставится задача формулирования требований к гидрогенератору и силовым преобразовательным устройствам в статических и динамических режимах работы автономной системы электроснабжения.

Объект: микрогидроэлектростанция инверторного типа.

Методы: имитационное моделирование, программирование в среде Matlab Simulink.

Результаты. Разработана имитационная модель системы электроснабжения с инверторной микроГЭС. Предложена структура микроГЭС, а также получены диапазоны изменения напряжения генератора микроГЭС.

Ключевые слова:

микроГЭС, эффективность, алгоритм управления, стабилизация, инвертор, график нагрузки, накопитель электроэнергии.

Введение

Гидравлическая энергия малых водотоков широко используется для производства электроэнергии с помощью последовательного гидро-механического и электро-механического преобразования первичного энергоресурса – потока воды, обладающего кинетической и потенциальной составляющими гидроэнергии, первоисточником которых является гравитация Земли.

Относительно высокая энергетическая плотность потока воды по сравнению с другими природными возобновляемыми энергоресурсами: ветром, инсоляцией, а также возможность стабилизировать рабочий поток воды гидротурбины обеспечивают производство более дешевой электроэнергии по сравнению с другими установками возобновляемой энергетики. Например, в [1–4] предложена идея создания и оптимизации системы электроснабжения с эффективными источниками генерации энергии, которые могут использовать возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Эта концепция направлена на создание оптимальной конфигурации микросетей для повышения эффективности использования ВИЭ.

Возможность стабилизации энергии рабочего потока воды гидротурбины с помощью напорного тру-

бопровода, обеспечивающего неизменный напор и расход воды, логично приводит к возможности построения системы, стабилизирующей тормозной момент электромашинного генератора с помощью управляемой балластной нагрузки. Предложенная схема регулирования [5] позволяет обеспечить высокое качество выходных электрических параметров системы. В результате гидрогенератор работает в статическом режиме в оптимальной рабочей точке, генерируя электроэнергию с приемлемыми характеристиками качества: величины и частоты переменного напряжения [6]. Общей проблемой в управлении микроГЭС является нестабильное вращение турбины, вызванное изменением нагрузки от потребителей. Это приводит к изменению частотных колебаний в системе, которые могут вызвать повреждения как со стороны генерации, так и со стороны потребителей. В работе [7] приводятся способы регулирования частоты с использованием емкостного накопителя энергии. Достоинствами балластных систем стабилизации режима работы микрогидроэлектростанции (микроГЭС) являются их относительная простота и, соответственно, дешевизна. Однако для обеспечения эффективной регулировки выходного напряжения микроГЭС по величине и частоте необходима двухканальная си-

стема регулирования мощности с приоритетом токового канала относительно частотного [8]. Это позволит обеспечить быстрый отклик системы на изменения нагрузки и поддерживать стабильность работы микроГЭС в различных условиях эксплуатации. В качестве регуляторов балластной нагрузки предлагаются системы стабилизации дискретного или фазорегулируемого типа с использованием управляемых силовых полупроводниковых приборов [9].

Недостатки автобалластных систем связаны с трудностями обеспечения высокого качества генерируемой электроэнергии микроГЭС в силу изменяющейся не только по величине, но и по характеру нагрузки автономной системы электроснабжения. Кроме того, собственно балластные нагрузки обычно представляют собой электронагревательные элементы, тепловая энергия которых не всегда нужна потребителю. Установленная мощность балласта должна равняться установленной мощности гидрогенератора, соответственно, балластная система вносит заметный вклад в технико-экономические характеристики энергетического оборудования микроГЭС.

Развитие силовой преобразовательной техники и электромашиностроения позволяют сегодня обеспечить высокое качество выходного напряжения микроГЭС с помощью автономного инвертора при одновременном снижении требований к ограничению диапазона частот вращения гидрогенератора. При достаточной механической прочности ротора генератора, например, используя магнитоэлектрический генератор, можно отказаться от системы балластной стабилизации. В ряде работ рассмотрены вопросы повышения отказоустойчивости электрических гидрогенераторов, однако не рассматриваются особенности функционирования в статических и динамических режимах работы [10–14]. В работе [15] приведены исследования рабочих режимов микроГЭС с переменной частотой вращения гидрогенератора.

Преимуществами инверторной микроГЭС являются дальнейшее упрощение конструкции гидрогенератора, наличие звена постоянного тока в структуре преобразователей первичной электроэнергии, что позволяет легко интегрировать в их состав другие возобновляемые источники энергии, такие как солнечные панели или ветрогенераторы [16, 17].

Таким образом, по результатам литературного обзора следует, что на сегодняшний день актуальными направлениями исследований в области микрогидроэнергетики являются: совершенствование автобалластных систем стабилизации напряжения микроГЭС и изучение возможностей перспективных микроГЭС инверторного типа.

Целью данной статьи является определение диапазонов изменения выходных электрических параметров нерегулируемого гидрогенератора, работающего в составе инверторной микроГЭС на сельского бытового потребителя, и формулировка требований к нему, а также к силовым преобразовательным устройствам в статических и динамических режимах работы автономной системы электроснабжения.

Имитационное моделирование инверторной микрогидроэлектростанции

Структурная схема предлагаемой микроГЭС приведена на рис. 1. Турбина (Т) вращает генератор (Г) с возбуждением от постоянных магнитов. Выходное напряжение генератора U_{Γ} и его частота f_{Γ} определяются энергетическим балансом системы «турбина–генератор–нагрузка» и зависят от частоты вращения гидрогенератора, величины и характера тока генератора I_{Γ} . Далее переменное напряжение с нестабильными параметрами выпрямляется выпрямителем (В) и далее инвертируется автономным инвертором (АИ) с одновременной стабилизацией параметров выходного напряжения нагрузки $U_{\text{н}}$.

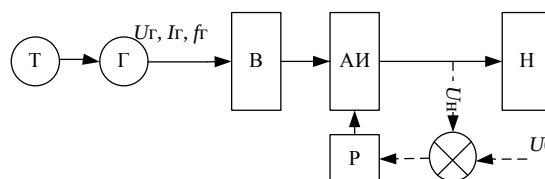


Рис. 1. Структурная схема микроГЭС со стабилизацией выходного напряжения инвертором

Fig. 1. Block diagram of a microelectric power station with output voltage stabilization by an inverter

Стабилизация величины выходного напряжения осуществляется ПИ-регулятором (Р), воздействующим на коэффициент широтно-импульсной модуляции (ШИМ) инвертора в соответствии с заданной уставкой по напряжению U_0 .

Построение рассматриваемого энергоисточника автономной системы электроснабжения требует анализа энергетических потоков в системе с целью формулировки требований к энергетическому оборудованию инверторной микрогидроэлектростанции. Исходными данными для анализа являются механическая характеристика пропеллерной гидротурбины и график бытовых электрических нагрузок сельских домов. Экспериментальная мощностная характеристика нерегулируемой пропеллерной гидротурбины, рабочий поток воды которой стабилизирован напорным трубопроводом, приведена на рис. 2 [18]. На рис. 2 показаны зависимости мощности (Р) и момента (М) турбины от частоты её вращения (Ω) для двух значений открытия направляющего устройства а при неизменном напоре воды, составляющем 9 м.

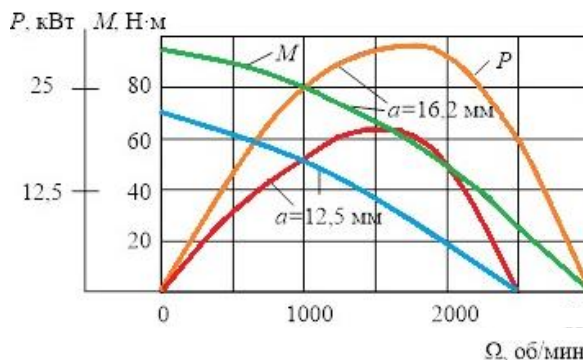


Рис. 2. Мощностная характеристика гидротурбины

Fig. 2. Power characteristics of a hydraulic turbine

Типовые графики электропотребления сельских домов приведены на рис. 3 [19].

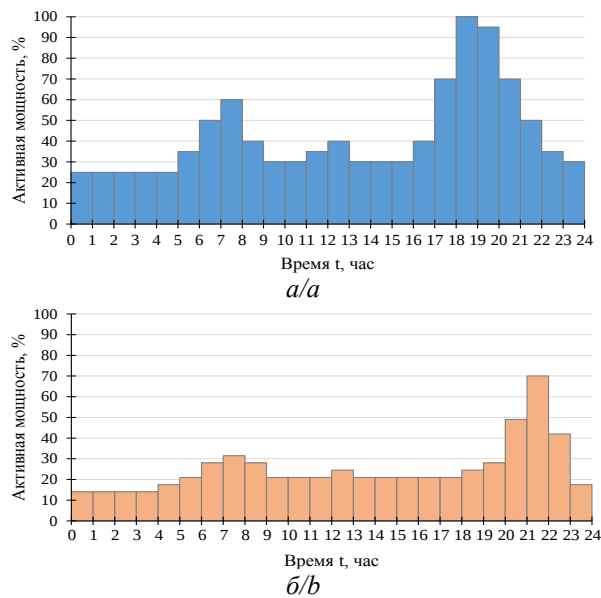


Рис. 3. Типовые графики электропотребления сельского дома для зимнего (а) и летнего периода (б)

Fig. 3. Typical schedules of electricity consumption of a rural house for the winter (a) and summer (b) period

Рабочая точка на характеристике гидротурбины определяется тормозной мощностью электромашиного генератора, соответствующей текущей мощности электропотребления. Учитывая максимальную мощность гидротурбины 30 кВт, полагаем соответствующую пиковую мощность электропотребления.

В соответствии с рис. 3, а, суточные значения мощности электрических нагрузок микроГЭС изменяются в диапазоне от 25–27 % пикового потребления в ночное время и до 100 % во время вечернего максимума нагрузки. Соответственно, частота вращения гидрогенератора с нерегулируемой гидротурбиной варьируется в широком диапазоне, что сопровождается изменением параметров генерируемого напряжения: величины $U_{\text{г}}$ и частоты $f_{\text{г}}$. Изменение частоты влияет на величину индуктивных сопротивлений генератора а, следовательно, и на его внешнюю характеристику.

Таким образом, все выходные параметры магнитоэлектрического синхронного генератора: напряжение, ток, мощность и частота, взаимосвязаны между собой и с мощностной характеристикой гидротурбины и изменяются в течение суток в соответствии с графиками электрических нагрузок. Возможность использования модели синхронного генератора представлена в [20] с помощью программы MathCad.

Диапазоны изменений величины и частоты генерируемого напряжения задают требования к параметрам преобразующих устройств инверторной микроГЭС. Выбор энергетических характеристик генерирующего и преобразующего оборудования рассматриваемой микроГЭС, а также системы стабилизации

напряжения на нагрузке, целесообразно производить путём имитационного моделирования процессов энергопреобразования в системе *MATLAB Simulink*.

Укрупнённая схема имитационной модели в системе *MATLAB Simulink* автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС со стабилизацией выходного напряжения регулированием коэффициента модуляции ШИМ-инвертора приведена на рис. 4.

В модели использованы стандартные моделирующие блоки: синхронный генератор с постоянными магнитами, трёхфазный мостовой выпрямитель, трёхфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с ШИМ. На вход системы управления (СУ) с выхода регулятора подается текущее значение коэффициента модуляции, определяющего величину основной гармоники выходного напряжения инвертора. СУ формируют эталонные синусоидальные напряжения фаз с предмодуляцией третьей гармоникой. В результате три сформированных сигнала задания подаются на стандартный элемент библиотеки *PWM Generator*, формирующий сигналы управления силовыми ключами инвертора с несущей частотой 5 кГц.

Номинальная активная мощность магнитоэлектрического синхронного генератора принималось равной 30 кВт, полная – 37,5 кВт. Активная мощность нагрузки каждой фазы в процессе моделирования изменялась от 100 Вт до 13 кВт, реактивная оставалась неизменной и равной 500 Вар.

Характеристика нерегулируемой пропеллерной гидротурбины с напорным трубопроводом представлена аппроксимирующим полиномом в относительных единицах (о.е.) относительно максимума мощности:

$$P(\omega) = -1,697 \cdot \omega^3 - 1,3581 \cdot \omega^2 + 3,0451 \cdot \omega + 0,0062.$$

В качестве регулятора коэффициента модуляции ШИМ-инвертора использован ПИ-регулятор с передаточной функцией $W(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p} \right)$. Парамет-

ры ПИ-регулятора рассчитывались из передаточной функции объекта (отношение напряжения на выходе выпрямителя к входному). В результате моделирования установлено, что передаточная функция может быть представлена инерционным звеном первого порядка

$$W(p) = \frac{k}{1 + T_1 p} = \frac{0,85}{1 + 0,115 p}.$$

Далее методом полной компенсации для заданной передаточной функции, являющейся критерием качества,

$$W_{\text{зд}}(p) = \frac{1}{1 + T_{\text{зд}} p}$$

$$\text{находились значения параметров регулятора } k_p = \frac{T_1}{2 \cdot k \cdot T_{\text{зд}}}, \quad T_{\text{и}} = T_1.$$

Так как передаточная функция объекта находилась для одного режима нагрузки, то полученные коэффициенты корректировались для обеспечения стабилизации во всех режимах работы станции.

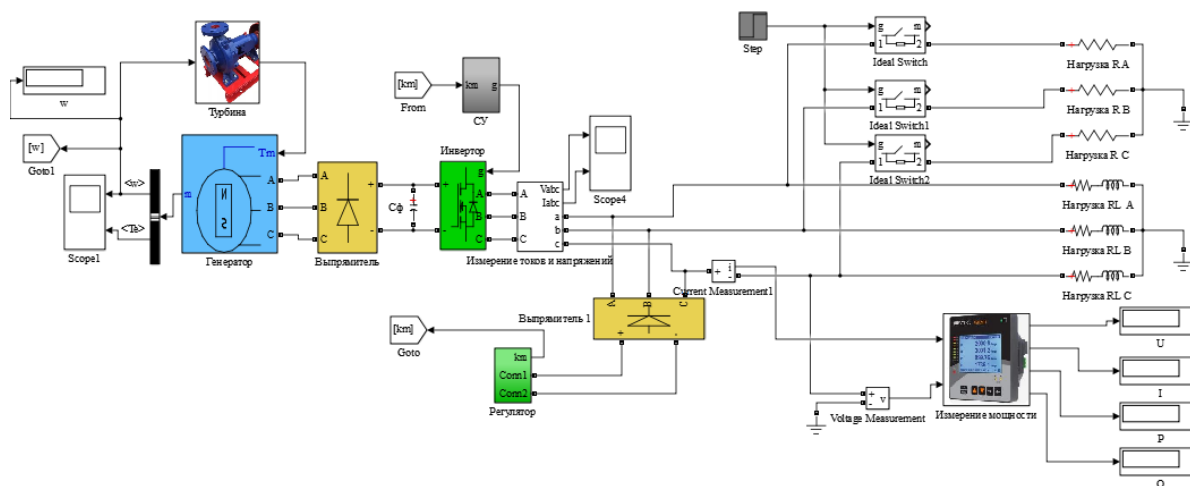


Рис. 4. Имитационная модель системы электроснабжения с инверторной микроГЭС

Fig. 4. Simulation model of an electric power supply system with an inverter microelectric power station

Результаты моделирования

Результаты моделирования в виде графических зависимостей частоты вращения гидрогенератора и его напряжения от нагрузки микроГЭС показаны на рис. 5, 6. Как видно из графиков, частота вращения и напряжение на генераторе сильно зависят от изменения мощности потребителей. Так, действующее значение напряжения меняется от $1,4U_{\text{ном}}$ до $0,65U_{\text{ном}}$ при увеличении мощности нагрузки от 0 до 1,3 номинальной, где за номинальное значение принято напряжение генератора 1 при его номинальной нагрузке.

Угловая скорость гидрогенератора изменяется от $0,98\omega_{\text{ном}}$ до $0,52\omega_{\text{ном}}$ для того же диапазона изменения нагрузки и при базовой частоте вращения $\omega_{\text{ном}}$, соответствующей оборотам холостого хода. Обе характеристики изменяются практически одинаково, что объясняется пропорциональной связью между ЭДС генератора и частотой его вращения при условии неизменности магнитного потока.

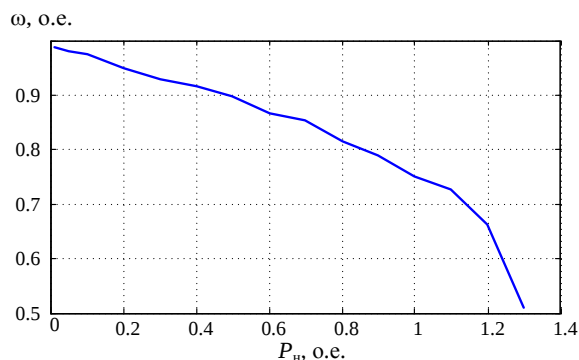


Рис. 5. Зависимость угловой скорости вращения гидрогенератора от активной мощности нагрузки

Fig. 5. Dependence of the angular rotation speed of the hydrogenerator on the active load power

Коэффициент несинусоидальности выходного напряжения инвертора без фильтрации не превышает 40 %. Применение фильтров позволит улучшить

форму кривой напряжения на нагрузке до необходимого уровня.

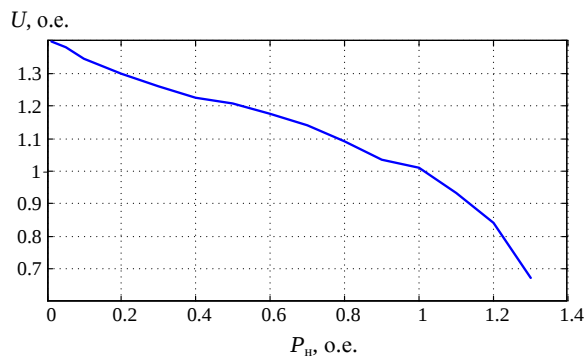


Рис. 6. Зависимость действующего значения напряжения гидрогенератора от активной мощности нагрузки

Fig. 6. Dependence of the effective value of the hydrogenerator voltage on the active power of the load

Коэффициент полезного действия преобразования электроэнергии гидрогенератора в энергию, потребляемую нагрузкой, находится в пределах 80–85 %. В плане энергопреобразования первичной энергии рабочего потока воды в электроэнергию нагрузки следует отметить экономию воды, которая расходуется только на покрытие нагрузок в отличие от систем балластного регулирования микроГЭС

На рис. 7 представлен результат работы регулятора, стабилизирующего действующее значение напряжения в переходном режиме при изменении активной мощности нагрузки в момент времени 0,05 с от $0,4P_{\text{ном}}$ до $0,9P_{\text{ном}}$ и в последующем установившемся режиме. Как показали результаты моделирования регулированием коэффициента модуляции инвертора можно обеспечить стабилизацию напряжения в пределах $\pm 5\%$ во всем диапазоне изменения мощности электрических нагрузок микроГЭС.

Характер переходного режима аperiodический, длительность переходного процесса составляет 0,2 с.

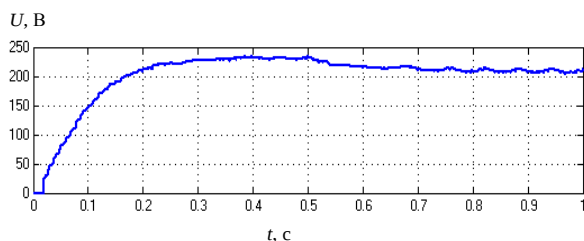


Рис. 7. Переходный процесс изменения действующего значения напряжения при набросе нагрузки инверторной микроГЭС

Fig. 7. Transient process of changing the current voltage value when loading an inverter microelectric power station

Выводы

1. Предложенные компьютерные модели позволяют оценить зависимости действующего значения генерируемого напряжения и угловой скорости вращения нерегулируемого гидрогенератора от активной мощности нагрузки с учётом энергетического взаимодействия гидротурбины пропеллерного типа, синхронного генератора с постоянными магнитами и электрической нагрузки автономной системы электроснабжения, представленной типовым графиком электропотребления сельского дома.
2. Путём имитационного моделирования установлен диапазон изменения напряжения генератора микроГЭС: при снижении нагрузки от номинального значения до холостого хода напряжение увеличивается на 40 %. Следовательно, рабочий диапазон входного напряжения инвертора, с учётом коэф-

фициента преобразования выпрямителя по напряжению, должен соответствовать полученному значению.

3. Угловая скорость вращения гидрогенератора при снижении его нагрузки от номинальной, принимаемой за 1, до холостого хода увеличивается на 25 % (рис. 5), что определяет требования к его механической прочности.
4. Разработанная имитационная модель инверторной микроГЭС позволила установить возможность обеспечения устойчивого режима её работы и стабилизации выходного напряжения в установившихся и переходных режимах применением инверторного типа регулирования выходного напряжения. Для регулирования коэффициента модуляции ШИМ-инвертора целесообразно использование ПИ-регулятора, обеспечивающего стабилизацию напряжения в пределах $\pm 5\%$ во всем диапазоне изменения мощности электрических нагрузок.
5. Проведённые исследования показали перспективность предложенной структуры инверторной микрогидроэлектростанции, обладающей простотой и известными преимуществами инверторных энергоисточников в части обеспечения потребителя качественной электроэнергией.
6. Предложенная имитационная модель инверторной микроГЭС позволяет проводить широкий спектр исследований режимов её работы в автономной системе электроснабжения с целью оптимизации технико-экономических характеристик комплекса электроснабжения с использованием энергии потоков воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выбор источников генерации для использования в микросетях на основе ВИЭ / В.В. Харченко, В.А. Гусаров, В.Б. Адомавичюс, И.Ю. Валицкас // Научный вестник Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Сборник научных трудов. – 2016. – № 240. – С. 31–43.
2. Ачитаев А.А., Жидков А.А., Наумкин Н.С. Исследование влияния замещения возобновляемых источников энергии в составе схемы питания собственных нужд малых и микро-ГЭС // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – Т. 14 (6). – С. 656–666. DOI: 10.17516/1999-494X-034.
3. Participation of load aggregator in grid frequency stabilization with consideration of renewable energy resources integration / E. Mudaheranwa, H. Berkem Sonder, Ye-O. Udoakah, L. Cipcigan, C.E. Ugalde-Loo // Energy Reports. – 2023. – V. 9. – P. 3967–3988.
4. Optimal sizing of micro hydropower to improve hybrid renewable power system / Syafii, Heru Dibyo Laksono, Novizon, Rahmad Fahreza // 7th International Conference on Electrical Engineering, Computer Sciences and Informatics (EECSI). – Yogyakarta, Indonesia, 2020. – P. 95–99. DOI: 10.23919/EECSI50503.2020.9251911.
5. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 307. – № 3. – С. 121–126.
6. Sabita Tripathy, Manoj Kumar Debnath, Sanjeeb Kumar Kar. Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition based learning for power system frequency control // e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2023. – № 4. – с. 100–135.
7. Optimal design capacitive energy storage (ces) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm / M. Ali, M. Ruswandi Djalal, M. Fakhrurozi, Kadarayono, Budiman, D. Ajiatmo // Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS). – Batu, Indonesia, 2018. – P. 21–26.
8. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанция с автобалластной нагрузкой, регулируемой по частоте выходного напряжения // Электромеханика. – 1990. – № 6. – С. 111–119.
9. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Фазорегулируемые автобалластные системы стабилизации выходных параметров микрогэс // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 113–118.
10. Шубин С.С. и др. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний // Известия Томского политехнического университета. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214.
11. Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 114–121.
12. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 102–111.
13. Курилин С.П., Денисов В.Н. Особенности конструктивного исполнения и проектирования синхронных генераторов для микро-ГЭС // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 78–84.
14. Коровкин Н.В., Гулай С.Л., Верховцев Д.А. Оптимизация параметров гидрогенератора // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – № 4. – С. 42–50.
15. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – V. 28. – № 2. – P. 452–459.

16. Modified particle swarm optimisation technique for optimal design of small renewable energy system supplying a specific load at Mansoura University / A. Hassan, M. Saadawi, M. Kandil, M. Saeed // IET Renewable Power Generation. – 2014. – V. 9. – P. 474–483.
17. Розаев И.А., Колотков С.Е. Система управления электрической подстанцией // Информационные технологии в науке, управлении, в социальной сфере и медицине. Сборник научных трудов. – 2014. – Т. 2. – С. 97–99.
18. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от Микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
19. Алюнов А.Н. Интерактивные расчеты систем электроснабжения // Онлайн Электрик URL: <https://online-electric.ru/dbase/graph24.php> (дата обращения 15.04.2023).
20. Математические модели синхронных генераторов при различных пространственных расстояниях точки возмущения / Ю.Н. Исаев, В.А. Колчанова, С.С. Тарасенко, О.В. Тихомирова // Международная конференция по машиностроению, системам автоматизации и управления (MEACS). – Томск, Россия, 2015. – С. 1–5.

Поступила: 21.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 08.06.2023 г.

Информация об авторах

Лукутин Б.В., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики.

Шандарова Е.Б., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики.

Попов М.М., старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики.

UDC 621.311.212

OPERATING MODES OF MICRO-HYDROELECTRIC POWER PLANT WITH OUTPUT VOLTAGE STABILIZATION USING INVERTER CONTROL

Boris V. Lukutin¹,
lukutin48@mail.ru

Elena B. Shandarova¹,
shandarovaelena@mail.ru

Mikhail M. Popov¹,
mix_mix13@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The use of Russia's hydroelectric potential for electricity generation is one of the cleanest and environmentally friendly methods as it does not result in the emission of harmful substances and carbon dioxide into the atmosphere. Moreover, it is a reliable and efficient source of energy as water is a constant source of energy. Hydro turbines are used to convert the energy of water flow into electrical energy, which effectively ensures more reliable and stable production capacity for hydroelectric installations. However, micro-hydroelectric power plants have some drawbacks related to difficulties in ensuring the high quality of produced electricity of autonomous power supply systems. This is due to the fact that the load on the autonomous power supply system can vary not only in magnitude but also in nature, which makes it difficult to maintain a stable level of electricity production.

The main goal of the research is to determine the ranges of variation of the output electrical parameters of a non-regulated hydrogenerator operating as part of an inverter-based micro-hydroelectric power station for rural domestic consumers. Additionally, the task is to formulate requirements for the hydrogenerator and power conversion devices in static and dynamic operating modes of the autonomous power supply system.

Object: inverter-based micro-hydroelectric power station.

Methods: simulation modeling, and programming in Matlab Simulink.

Results. A simulation model of an electric power supply system with an inverter microelectric power station was developed. The structure of microelectric power station is proposed, as well as the ranges of voltage changes of the microelectric power station generator are obtained.

Key words:

microelectric power station, efficiency, control algorithm, stabilization, inverter, load graph, power storage.

REFERENCES

- Kharchenko V.V., Gusarov V.A., Adomavichyus V.B., Valickas I.Yu. Selection of generation sources for use in microgrids based on RES. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine*, 2016, no. 240, pp. 31–43. In Rus.
- Achitaev A.A., Zhidkov A.A., Naumkin N.S. Investigation of the impact of substitution of renewable energy sources as part of the supply scheme for auxiliary needs of small and micro hydropower plants. *Journal of the Siberian Federal University «Engineering and Technology»*, 2021, pp. 656–666. In Rus.
- Mudaheranwa E., Berkem Sonder H., Udoakah Ye-O., Cipcigan L., Ugalde-Loo C.E. Participation of load aggregator in grid frequency stabilization with consideration of renewable energy resources integration. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 3967–3988.
- Syafii, Heru Dibyo Laksono, Novizon, Rahmad Fahreza. Optimal sizing of micro hydropower to improve hybrid renewable power system. *7th International Conference on Electrical Engineering, Computer Sciences and Informatics (EECSI)*. Yogyakarta, Indonesia, 2020, pp. 95–99.
- Lukutin B.V., Obukhov S.G. Ballast load regulator for micro hydropower plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 307, no. 3, pp. 121–126. In Rus.
- Sabita Tripathy, Manoj Kumar Debnath, Sanjeeb Kumar Kar. Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition-based learning for power system frequency control. *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2023, no. 4, pp. 100–135.
- Ali M., Ruswandi Djalal M., Fakhrurozi M., Kadaryono, Budiman, Ajiatmo D. Optimal design capacitive energy storage (ces) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm. *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*. Batu, Indonesia, 2018, pp. 21–26.
- Lukutin B.V., Obukhov S.G. Mikrogidroelektrostantsiya s avtoballastnoy nagruzkoy, reguliruemoy po chastote vykhodnogo napryazheniya [Microhydro power plant with auto-ballast load regulated by the output voltage frequency]. *Elektromekhanika*, 1990, no. 6, pp. 111–119.
- Lukutin B.V., Shandarova E.B. Phase adjustable auto ballast systems for stabilization of output parameters of micro hydro power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 4, pp. 113–118. In Rus.
- Shubin S.S. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214.
- Borisov S.V. Koltunova E.A., Kladiev S.N. Sovershenstvovanie struktury imitatsionnoy modeli tyagovogo asinkhronnogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza [Improvement of the structure of the simulation model of the traction asynchronous electric drive of the mine electric locomotive]. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2021, vol. 247, pp. 114–124.
- Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. The use of a water-submersible hydrogenator of combined excitation as an alternative source of energy for small and middle rivers. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 102–111. In Rus.
- Kurilin S.P., Denisov V.N. Features of the design and design of synchronous generators for micro hydroelectric power plants. *MEI bulletin*, 2019, no. 4, pp. 78–84. In Rus.
- Korovkin N.V., Gulay S.L., Verhovcev D.A. Optimization of hydro generator parameters. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy series*, 2019, no. 4, pp. 42–50. In Rus.

15. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, vol. 28, no. 2, pp. 452–459.
16. Hassan A., Saadawi M., Kandil M., Saeed M. Modified particle swarm optimisation technique for optimal design of small renewable energy system supplying a specific load at Mansoura University. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 9, pp. 474–483.
17. Rozaev I.A., Kolotkov S.E. Sistema upravleniya elektricheskoy podstantsiy [Electrical substation control system]. *Information technologies in science, management, social sphere and medicine. Collection of scientific papers*, 2014, vol. 2, pp. 97–99.
18. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. *Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsy* [Autonomous power supply from Microhydropower plants]. Tomsk, STT, 2001. 120 p.
19. Alyunov A.N. *Interaktivnye raschety sistem elektrosnabzheniya* [Interactive calculations of power supply systems]. Available at: <https://online-electric.ru/dbase/graph24.php> (accessed 15 April 2023).
20. Isaev Yu.N., Kolchanova V.A., Tarasenko S.S., Tikhomirova O.V. Matematicheskie modeli sinhronnykh generatorov pri razlichnykh prostranstvennykh rasstoyaniyakh tochki vozmushcheniya [Mathematical models of synchronous generators at different spatial distances of the disturbance points]. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, Russia, 2015. pp. 1–5.

Received: 21 April 2023.

Reviewed: 8 June 2023.

Information about the authors

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena B. Shandarova, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail M. Popov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.