

- on Power System Technology (POWERCON). Hangzhou, China, 24–28 October 2010. pp. 1–6.
15. Yun L., Yonghu Y., Nanchao Z. Establishment of the HVDC digital-analogical hybrid simulation system. *International conference on Electrical Engineering (ICEE)*. YongPyong Resort, Korea, 9–13 July 2006. pp. 1–8.
 16. Forsyth P.A., Maguire T.L., Shearer D., Rydmell D. Testing Firing Pulse Controls for a VSC Based HVDC Scheme with a Real Time Timestep $< 3 \mu s$. *International Conference on Power Systems Transients*. Kyoto, Japan, 2–6 June 2009. pp. 1–5.
 17. Sreenivasarao D., Gupta S.P., Pillai G.N., Balasubramanyam P.V. RTDS® Simulation of small signal stability controller of STATCOM. *XXXII National Systems conference*. Roorkee, India, 17–19 December 2008. pp. 241–244.
 18. Gusev A.S., Hrushchev Yu.V., Gurin S.V., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. Vserezhimny modeliruyushchiy kompleks realnogo vremeni elektroenergeticheskikh sistem [Hybrid Real Time Simulation of Electrical Power Systems]. *Electrical Technology Russia*, 2009, no. 12, pp. 5–8.
 19. Yang Zh., Shen Ch., Zhang L., Crow M.L. The steady state characteristics of a StatCom with energy storage. *Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 16–20 July 2000. pp. 669–674.
 20. Singh B., Saha R., Chandra A., Al-Haddad K. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *IET Power Electronics*, 2009, vol. 2, no. 4, pp. 297–324.

УДК 621.313

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Встовский Алексей Львович,

канд. техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: val_1942@mail.ru

Федий Константин Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: fediy_k@mail.ru

Архипцев Максим Геннадьевич,

аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: maximus_09@mail.ru

Спирин Евгений Анатольевич,

ассистент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств механико-технологического факультета Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru

Показаны возможности использования асинхронной машины в качестве генератора автономной энергоустановки для энергоснабжения для северных регионов России. Представлены основные достоинства применения асинхронных машин в генераторном режиме для обеспечения питанием потребителей, как переменного трехфазного тока, так и постоянного тока через выпрямительные устройства. Представлена разработанная система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии. Такая система простая в эксплуатации, сравнительно недорогая, обладает высоким быстродействием и позволяет регулировать параметры напряжения в широком диапазоне нагрузки. С помощью эксперимента проведен анализ системы автоматического управления асинхронным генератором. Показана целесообразность использования автоматического регулятора напряжения с линейными конденсаторами в качестве регулирующего органа.

Ключевые слова:

Асинхронный генератор, автономный генератора, система управления, микроГЭС, конденсаторные батареи.

Использование альтернативных источников энергоснабжения для северных регионов России особенно актуально, вследствие их географического положения. Отдаленность этих территорий от линий электропередач определяет огромные материальные затраты по доставке энергоносителей. Основной возможностью использования альтернативных источников энергоснабжения для этих районов является наличие природных факторов [1], на основе которых возможно создание возобновляемых источников электроснабжения – это гидро-ресурсы рек и возможность использования энергии ветра в этих регионах.

В последние годы значительный интерес вызывает применение асинхронных машин в генераторном режиме для обеспечения питанием потребителей, как переменного трехфазного тока, так и постоянного тока через выпрямительные устройства. Эти машины сравнительно просты по конструкции, весьма надежны в эксплуатации, имеют достаточно высокие энергетические показатели и невысокую стоимость. Асинхронные генераторы (АГ) легко включаются на параллельную работу, а форма кривой выходного напряжения у них ближе к синусоидальной, чем у синхронного генератора (СГ) при работе на одну и ту же нагрузку [2]. Учитывая перечисленные достоинства АГ, его применение в автономных источниках электроснабжения имеет большое будущее, в частности, в микроГЭС при устойчивом режиме нагрузки [3].

Целью работ, проводимых специалистами Сибирского федерального университета, стало создание дешевой и доступной микроГЭС мощностью 2 кВт, выходным напряжением 220 В, частотой 50 Гц, основными частями которой являются: асинхронный генератор, оригинальная ортогональная турбина и система управления, разработанная специально для данной энергоустановки.

Ортогональная турбина в зависимости от характеристик используемого профиля крыла и параметров водного потока может иметь быстроходность в диапазоне $U=3,5...5$. При скоростях потока от 2,5 до 3,5 м/с появляется возможность применять недорогие напорные ортогональные турбины, имеющие сравнительно малые массогабаритные характеристики, диаметрами от 150 до 500 мм, обладающие мощностью от 1 до 10 кВт. Номинальная частота вращения таких турбин будет лежать в диапазоне от 500 до 2000 об/мин.

В качестве АГ для микроГЭС были рассмотрены асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии АИР. Учитывая, что скорость вращения турбины ограничивается скоростями течений рек, а режимы работы машины предполагают большие значения токов в обмотке статора, был выбран «низкоскоростной» асинхронный двигатель серии АИР112МВ8, номинальные данные которого приведены в таблице.

Рассматриваемая энергетическая установка предполагает в первую очередь достаточно стабильный поток малых рек, а соизмеримость мощ-

ностей нагрузки и гидравлического привода генератора определяют задачи стабилизации в нужных пределах частоты и напряжения переменного тока автономной энергоустановки.

Таблица. Технические характеристики электродвигателей серии АИР

Двигатель	Мощность, кВт	об/мин	Ток при 380 В, А	КПД, %	Коэф. мощности	Масса, кг
АИР112МВ8	3	710	7,8	79	0,74	48

К основным показателям качества источников электропитания относятся параметры выходного напряжения, характеризующиеся номинальными величиной и частотой. Поэтому важнейшим элементом энергоустановки является система стабилизации, обеспечивающая статически устойчивый режим работы гидроагрегата и стабилизацию его выходного напряжения.

Эксперименты с выбранным генератором показали, что самовозбуждение АГ наступает при нижней критической частоте вращения ротора (350 об/мин) и постоянно подключенной емкости (30 мкФ). Если сначала приводится во вращение ротор асинхронной машины (АМ), а затем в цепь статора включается емкость, то при частоте вращения, превышающей нижнюю критическую скорость, возможны перенапряжения, которые могут вывести из строя полупроводниковые элементы. Если скорость вращения ротора будет меньше нижней критической скорости, то самовозбуждения не произойдет. Для перевода машины в генераторный режим необходимо увеличить частоту вращения ротора от 350 об/мин и выше. Однако при этом асинхронная машина может попасть в режим жесткого самовозбуждения, в конце которого возможны перенапряжения еще большей кратности. При обратном порядке включения, когда сначала к статорным обмоткам подключают конденсаторы, а затем ротор приводят во вращение, процесс самовозбуждения протекает медленнее, чем в предыдущем случае, но при плавном нарастании амплитуды колебаний напряжения. Поэтому при разработке автоматической системы управления генератором следует исходить из условия постоянного подключения конденсаторов возбуждения к статорным обмоткам асинхронного генератора. Для определения основной величины емкости конденсаторов, которые будут постоянно включены в цепь статора, были проведены исследования зависимости частоты вращения и напряжения возбуждения, от величины емкости конденсаторов при различных вариантах включения асинхронного генератора, как на холостом ходу, так и под нагрузкой. При проведении экспериментальных исследований были обеспечены условия мягкого самовозбуждения асинхронного генератора.

Принципы стабилизации режима АГ, на основе которых выполнена система управления, предста-

влют собой двухканальную систему автоматического регулирования с адаптивными свойствами, которая позволяет решать задачу наиболее полного отбора мощности энергоустановки при существенном изменении условий её работы в зависимости от скорости водного потока. Однако при малых скоростях потока система выходит из режима стабилизации частоты и уровня выходного напряжения генератора, при этом допустимыми минимальными пределами являются уровень 45 Гц по частоте и 80 % номинального напряжения генератора. Такие уровни питания могут удовлетворить лишь неответственных потребителей электроэнергии микроГЭС.

Проведенный анализ системы управления выявил, что для АГ целесообразно использовать автоматический регулятор напряжения с линейными конденсаторами в качестве регулирующего органа. Такая система простая в эксплуатации, сравнительно недорогая, обладает высоким быстродействием и позволяет регулировать параметры напряжения в широком диапазоне нагрузки.

Структурная схема системы управления (рис. 1) состоит из силовых ключей на базе оптронных тиристоров Т1–Т3 с фазовым управлением, включающих ступени емкостных батарей С1–С3. Такие ключи не искажают форму тока и напряжения при максимальной мощности, рассеиваемой на балластных сопротивлениях. При этом происходит плавное изменение углов управления тиристоров во всем диапазоне регулирования. Три датчика напряжения (ДН) необходимы для снятия с фаз генератора значений напряжения и частоты. Значения фазных напряжений с датчиков поступают на измерительный блок, который анализирует их величину и передает на источник бесперебойного питания (ИБП), входящий в блок управления (БУ). Он необходим для сглаживания помех в кривой тока. Измерительный блок представляет собой трансформатор напряжения, все обмотки которого (первичные и вторичные) соединены звездой. К вторичным обмоткам трансформатора подключен трехфазный мостовой выпрямитель, напряжение с которого подается на вход измерительного контроллера.

Блок управления состоит из аналого-цифрового преобразователя, формирующего выходной сигнал фазного тока генератора в четырехразрядном двоичном коде, измерительных приборов электрических величин и компаратора. Компаратор сравнивает двоичный код с кодом, соответствующим 50 Гц, и вырабатывает сигналы управления «>» – больше, «<» – меньше, «=» – равно, и подает их на управляющие электроды тиристоров Т1–Т3, подключающие необходимые емкостные батареи.

Режим работы ключей Т1–Т3 формируется реверсивным счётчиком. При увеличении нагрузки частота напряжения генератора уменьшается, код увеличивается и подключается дополнительная емкость, что восстанавливает частоту и величину напряжения, при уменьшении нагрузки код умень-

шается, повышается частота напряжения генератора и отключается часть емкости. Для управления реверсивным счётчиком используются сигналы схемы сравнения. Сигнал «=» (частота 50 Гц) запрещает счёт. Сигнал «>» (частота >50 Гц) переключает счётчик на сложение и изменяет подключаемые емкости С1–С3.

Импульсы счёта на реверсивный счётчик подаются через схему защиты, которая не позволяет счётчику после заполнения обнулиться, а после опустошения перейти в заполненное состояние.

Вся информационная часть системы управления модулем стабилизации частоты защищена от высокого напряжения ключей Т1–Т3 гальваническими развязками (оптопары). С этой же целью в схеме управления используются гальванически развязанные источники питания основной части схемы и буферных каскадов силовых транзисторов IGBT.

Система управления генератором микроГЭС реализована на современных комплектующих изделиях с высокими технико-эксплуатационными параметрами. В частности, в качестве измерителей фазных напряжений использованы интегральные датчики напряжений LV-25Р, действие которых основано на эффекте Холла. Эти датчики обеспечивают простые и точные решения измерения напряжений при высоком уровне гальванической развязки цепей, линейности преобразования и отсутствие «мертвой зоны» при малых контролируемых токах.

Наиболее сложной проблемой при проектировании системы управления АГ для микроГЭС стала проблема стабилизации напряжения и частоты автономно работающего АГ, имеющего «мягкую» внешнюю характеристику. При использовании асинхронного режима генератора в составе автономной электроустановки (ЭУ) эта проблема осложняется еще и нестабильностью частоты вращения ротора.

Другим недостатком АГ является потребление значительной реактивной мощности (50 % и более от полной мощности), необходимой для создания магнитного поля в машине, которая должна поступать из сети при параллельной работе асинхронной машины в генераторном режиме с сетью или от другого источника реактивной мощности (батарея конденсаторов (БК) при автономной работе АГ. В последнем случае наиболее эффективно включение батареи конденсаторов в цепь статора параллельно нагрузке.

Для этого при решении поставленной задачи параллельно статорной обмотке подключены четыре группы конденсаторов (С1–С4), соединенные в треугольник. Каждая группа конденсаторов подключается в зависимости от потребляемой мощности, так как индуктивная нагрузка, понижающая коэффициент мощности, вызывает резкое увеличение значения емкостного сопротивления. В рассматриваемой энергоустановке были установлены четыре батареи конденсаторов 30, 20, 10 и 4 мкФ,

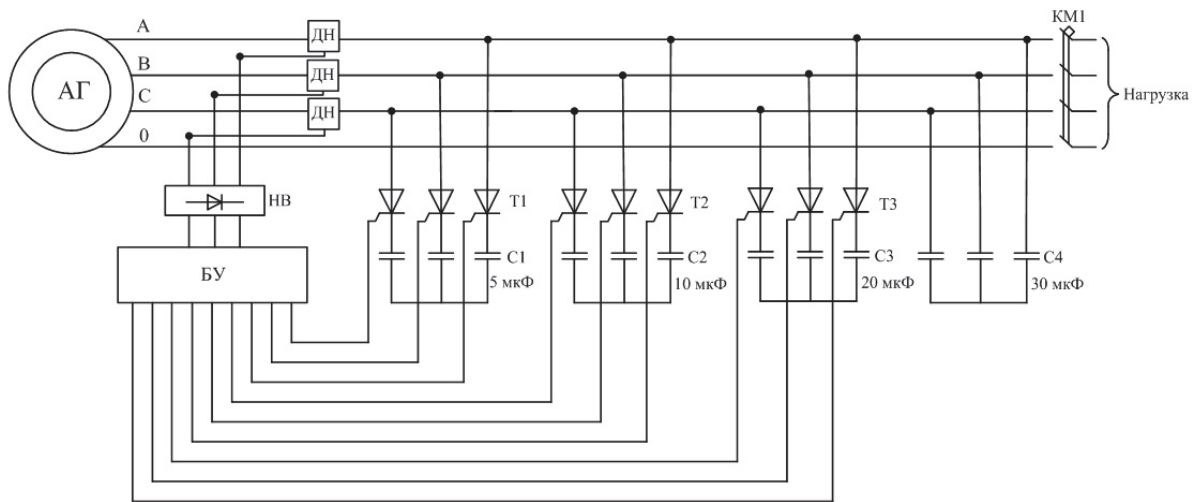


Рис. 1. Структурная схема системы управления

при этом батарея на 30 мкФ подключена постоянно для возбуждения АГ на малых частотах вращения. Конденсаторы установлены с возможностью быстрой замены, в случае выхода из строя.

Для предварительных испытаний генератора в различных рабочих и аварийных режимах был смонтирован экспериментальный стенд (рис. 2). На экспериментальном стенде исследуются основные характеристики и параметры генератора, отработка основных узлов системы управления, выявление каких-либо конструктивных недостатков при сборке с целью их устранения до установки на микроГЭС.

Экспериментальный стенд состоит из ЧП – частотного преобразователя (Altivar) для управления приводным асинхронным двигателем (Д) мощностью 5 кВт. Задача этого двигателя – формировать внешнюю характеристику турбины. Через ременную передачу приводной двигатель соединен с АГ. С АГ на блок управления (БУ) подаются ток и частота, которые регулируются в заданных пределах в зависимости от подключенной нагрузки (Н). В качестве нагрузки использовались лампы накаливания общей мощностью 2,1 кВт. На входе и выходе системы управления были подключены ИП – измерительные приборы (амперметр, вольтметр и частотомер) для снятия показаний тока, напряжения и частоты.

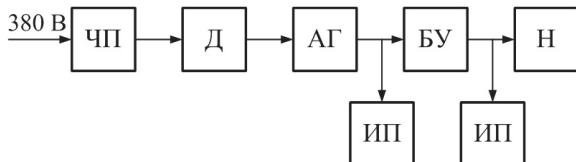


Рис. 2. Блок-схема испытательного стенда

Главная задача стендовых испытаний заключалась в проверке правильности выбора количества емкостных батарей и их значений, а также в ана-

лизе значений тока при сбросе и набросе нагрузки.

В результате эксперимента были получены данные изменения тока, напряжения, частоты напряжения и емкости подключаемых конденсаторов в зависимости от увеличения нагрузки $I, U, f, C = f(P)$ (рис. 3).

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что частота и амплитуда напряжения, вырабатываемого АГ при постоянных емкости конденсаторов возбуждения и частоты вращения ротора, зависят от величины и характера нагрузки. При активной нагрузке величина напряжения и его частота являются функциями скольжения. Подключение индуктивной нагрузки к АГ приводит к уменьшению емкостного тока и, как следствие, к снижению тока намагничивания, ЭДС и напряжения. Поэтому для стабилизации амплитуды и частоты напряжения, вырабатываемого микроГЭС, при колебаниях смешанной нагрузки и энергии рабочего потока воды необходимо регулировать и мощность балластной нагрузки, и величину тока конденсаторов возбуждения.

При испытаниях балластная нагрузка подключалась и отключалась в диапазоне изменения выходного напряжения генератора от 180 до 250 В и изменении частоты от 45 до 55 Гц, обеспечивая при этом высокое быстроедействие.

Анализ рис. 3, на котором показаны кривые тока, напряжения, частоты и величины подключаемых емкостей в зависимости от нагрузки, свидетельствует о том, что при нагрузке до 300 Вт ток и напряжение генератора практически не меняются. При нагрузке, равной 450 Вт, происходит подключение емкостных батарей, в результате чего происходит резкий скачек тока и незначительное увеличение напряжения, частота при этом снижается. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит подключение дополнительных емкостных батарей, из-за которых ток, напряжение и частота снижаются скачкообразно.

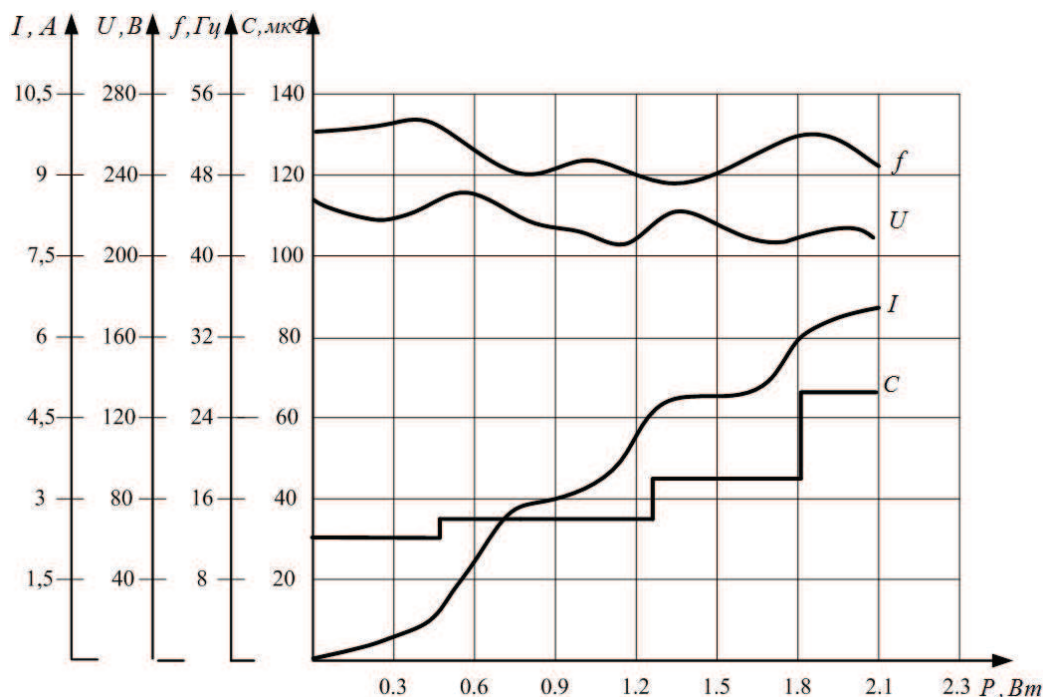


Рис. 3. Графики изменения тока (I), напряжения (U), частоты (f) и емкости (C) подключаемых конденсаторов в зависимости от увеличения нагрузки

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что использование емкостных батарей для системы управления является достаточно простым и надежным способом стабилизации и получения требуемых величин выходного напряжения и частоты. Для получения постоянного значения выходного напряжения и частоты при изменении нагрузки, подключаются емкостные батареи.

Выводы

Исследованная система управления асинхронного генератора стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии, основанная на подключении емкостных батарей с помощью тиристорных

преобразователей с фазовым регулированием, удовлетворяет требованиям потребителей.

При минимальном количестве емкостей системы управления микроГЭС регулирование выходного напряжения генератора возможно в пределах от 180 до 250 В и изменении частоты от 45 до 55 Гц. При большем количестве ступеней регулирования качество стабилизации напряжения и частоты повышается.

Разработанная система управления универсальна и может применяться как для объектов малой гидроэнергетики (низконапорные и свободнопоточные микроГЭС), так и для объектов ветроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
2. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 88 с.

3. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектростанции. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т; Севастополь: Севастопольский нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.

Поступила 16.03.2013 г.

UDC 621.313

ASYNCHRONOUS GENERATOR CONTROL SYSTEM FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES

Alexei L. Vstovskiy,

Cand. Sc., Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: val_1942@mail.ru

Konstantin S. Fediy,

Cand. Sc., Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: fediy_k@mail.ru

Maxim G. Arkhiptsev,

Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: maximus_09@mail.ru

Evgeny A. Spirin,

Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru

The paper demonstrates the possibility of using the asynchronous machine as a generator to supply power to battery power plant for the northern regions of Russia. The work introduces the main advantages of applying induction machines in generating mode to provide power to consumers both three-phase alternating current and direct current through the rectifier devices. The developed control system for asynchronous generator of renewable energy source is introduced. Such system is simple in application, relatively inexpensive, has high speed and allows adjusting parameters of voltage over a wide load range. The asynchronous generator automatic control system was experimentally analyzed. The authors demonstrate the availability of using an automatic voltage regulator with linear capacitors as such system.

Key words:

Asynchronous generator, autonomous generator, control system, micro-HPS, capacitor banks.

REFERENCES

1. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. *Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsiy* [Individual electricity from micro-hydropower stations]. Tomsk, STT, 2001. 120 p.
2. Toroptsev N.D. *Asinkhronnye generatory dlya avtonomnykh elektroenergeticheskikh ustanovok* [Asynchronous generators for autonomous power installations]. Moscow, NTF Energoprogress Publ., 2004. 88 p.
3. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. *Neischerpaemaya energiya. Vetroelektrogeneratory* [Inexhaustible energy. Wind power generators]. Kharkov, Sevastopol National Technical University Publ., 2003. B. 1, 400 p.