

УДК 620.075.8

UDC 620.075.8

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ГЕНЕРАТОРА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**THE CHOICE OF THE GENERATOR AND ELECTRICITY STABILIZATION FOR SMALL HYDROPOWER PLANTS**

Квитко Андрей Викторович  
старший преподаватель  
9061870011@mail.ru, SPIN-код: 4151-8088

Kvitko Andrey Viktorovich  
senior lecturer  
9061870011@mail.ru, RSCI SPIN-code: 4151-8088

Дайбова Любовь Анатольевна  
доцент кафедры, 9061870011@mail.ru

Daybova Lyubov Anatolyevna  
professor, 9061870011@mail.ru

Кондратенко Юлия Евгеньевна  
студент, grigorasch61@mail.ru  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

Kondratenko Yulia Evgenyevna  
student, grigorasch61@mail.ru  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье проводится анализ основных характеристик генераторов электроэнергии для применения их в составе малых гидроэлектростанций. Показано, что бесконтактные асинхронные генераторы в сравнении с синхронными генераторами и генераторами постоянного тока имеют улучшенные эксплуатационно-технические характеристики, и прежде всего, показатели надёжности и КПД. Приведены графические зависимости стоимости и массы генераторов от мощности. Предложено в качестве стабилизатора параметров электроэнергии асинхронного генератора, применяемого в качестве источника электроэнергии в малых гидроэлектростанциях использовать непосредственный преобразователь частоты. Раскрыты особенности работы и выбора параметров генераторов, работающих совместно с непосредственными преобразователями частоты. Раскрыты особенности работы непосредственных преобразователей частоты с естественной коммутацией и с регулируемым углом сдвига фаз, в том числе их достоинства и недостатки. Приведены структурные схемы малых гидроэлектростанций, выполненных на асинхронных генераторах и непосредственных преобразователях частоты

The article analyzes the main characteristics of the electricity generators to use them as a part of small hydroelectric power plants. It is shown, that contactless asynchronous generators in comparison with synchronous generators and DC generators have improved their operational and technical characteristics, and above all, their reliability and performance efficiency. We have shown graphic dependences of the cost and the weight of power generators. It is proposed using direct frequency converter as a stabilizer of parameters of asynchronous generator of electricity, used as a source of electricity for small hydropower plants. The article explains the features of the work and the choice of parameters for generators, working together with the direct frequency converters. The authors have revealed some aspects of the work of direct frequency converters with natural commutation and with adjustable phase angle, including their advantages and disadvantages. The article also presents block diagrams for small hydroelectric power plants, made with the help of asynchronous generators and direct frequency converters

Ключевые слова: МАЛАЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Keywords: SMALL HYDROELECTRIC, RENEWABLE ENERGY SOURCES, ASYNCHRONOUS GENERATOR

Известно, что перспективным направлением в развитии энергетики является внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Малая гидроэнергетика в сравнении с другими видами ВИЭ выглядит предпочтительнее, и прежде всего, из-за относительно низких капиталовложений, в

особенности при оборудовании электростанций в предгорных и горных районах [1, 9].

При проектировании малых гидроэлектростанций (МГЭС) важным является вопрос расчёта мощности и выбора генератора электроэнергии [2, 8, 10].

На МГЭС для преобразования механической энергии в электрическую, как правило, используются синхронные генераторы (СГ), реже генераторы постоянного тока (ГПТ) и асинхронные генераторы (АГ).

Перспективным направлением является применение в составе МГЭС бесконтактных генераторов электроэнергии асинхронных генераторов ёмкостного возбуждения и синхронных генераторов с постоянными магнитами [2, 3, 6, 10].

При выборе типа генераторов электроэнергии необходимо придерживаться рекомендаций описанных в [2] которые основываются на требованиях потребителей к качеству электроэнергии, роду тока и его частоты, величины напряжения, а также его стоимости.

Для определения стоимости генераторов электроэнергии был проведён анализ стоимостных показателей оборудования основных ведущих отечественных и ряда зарубежных фирм. Цены на генераторы определялись путём нахождения среднего значения для трёх типов генераторов: синхронных генераторов (СГ), асинхронных генераторов (АГ) и генераторов постоянного тока (ГПТ). В ходе исследований установлено, что ценовая политика различных производителей отличается не более чем на 5%.

При определении стоимости учитывались системы возбуждения СГ, конденсаторные батареи АГ. Расчёт стоимости ГПТ определялся без учёта инверторов, стоимость которых составляет до 40 от стоимости непосредственно ГПТ.

На рисунке 1, *а* представлены графические зависимости рыночной стоимости генераторов различных типов средней мощности (до 200 кВт), а на рисунке 1, *б* – повышенной мощности (до 800 кВт) на 1 января 2014 г.

Как видно из рисунка 1, *а*, что использование АГ экономически оправдано при мощности генератора до 50 кВт, при большей мощности экономически оправдан СГ. Анализ экономического сравнения генераторов по рисунку 1, *б*, показывает то, что применение ГПТ на мощностях более 100 кВт является наименее оправданным.

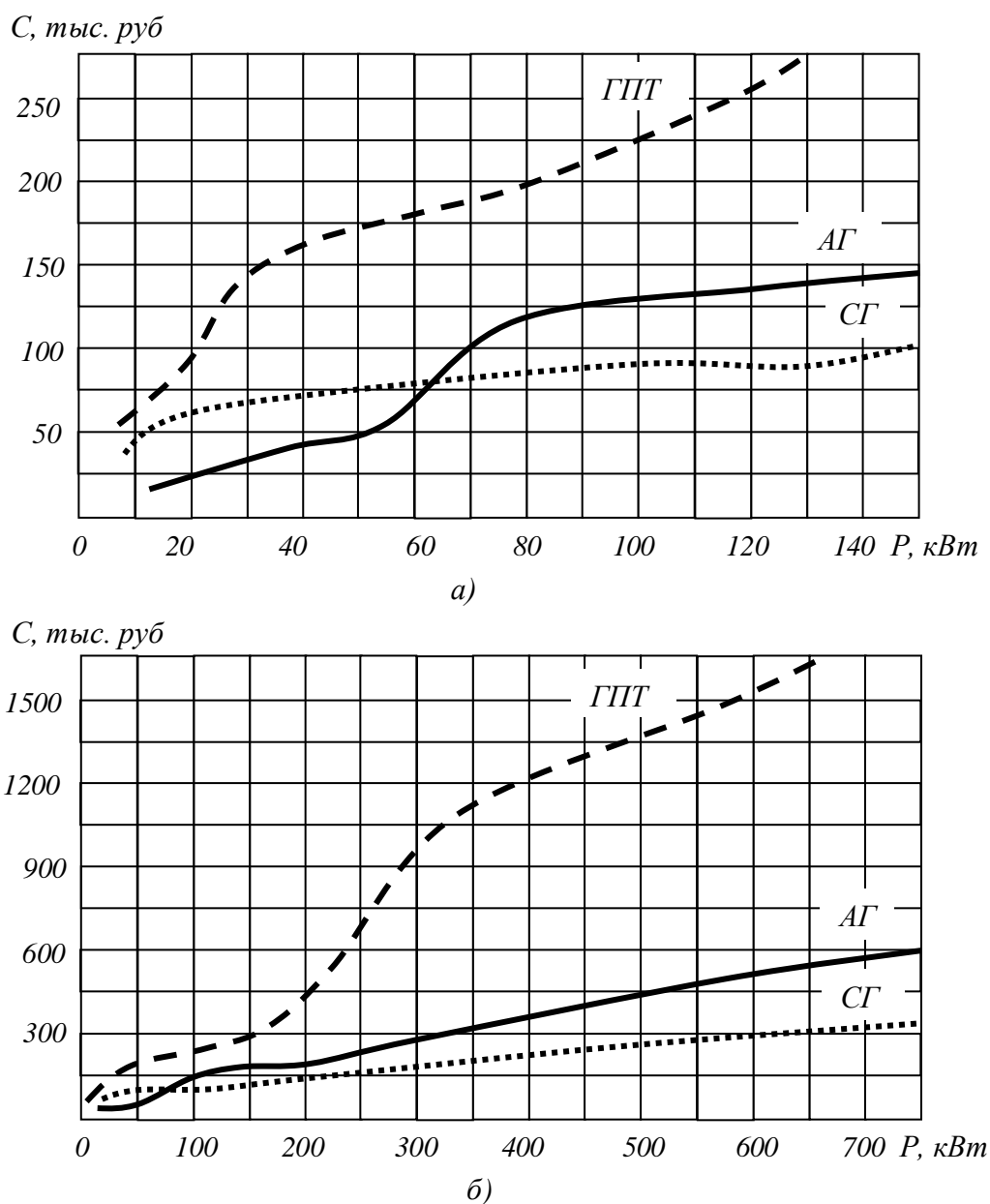


Рисунок 1 – Зависимости стоимости генераторов от мощности

Анализ кривых зависимости массы генераторов от мощности (рисунок 2) показывает, что на малых мощностях массы СГ больше, т.к. якорь СГ на этих мощностях больше ротора АГ по причине полюсности. На больших мощностях площадь рамки ротора АГ должна быть большой для создания необходимого магнитного потока, обеспечивающего требуемую мощность. В связи с этим размеры ротора АГ значительно превышают размеры якоря СГ, где такой зависимости нет, а размеры машины определяются токами статора. Значение мощности, при которых массы СГ и АГ равны, составляют порядка  $90 \text{ кВт}$  [3].

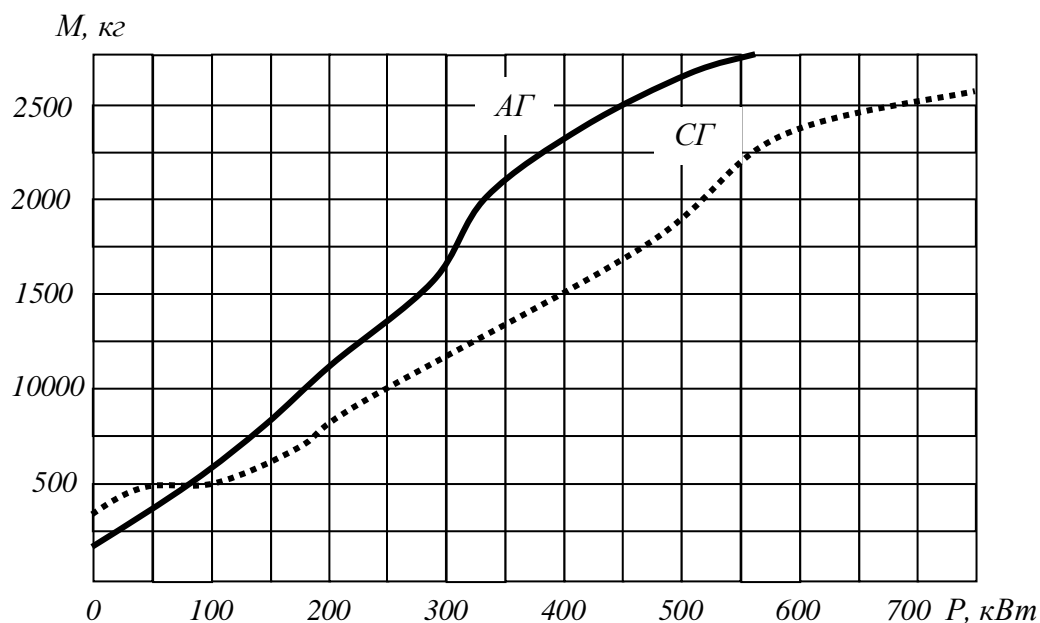


Рисунок 2 – Зависимости массы генераторов от мощности

Подход к выбору генератора электроэнергии для МГЭС в настоящее время носит чисто экономический характер и не учитывает особенности работы генераторов в автономном режиме и на сеть. Для окончательного ответа на вопрос о целесообразности применения того или иного типа генератора для МГЭС, необходимо также учитывать показатели надёжности и КПД вместе с устройствами стабилизации напряжения.

Перспективным является направление, которое позволит значительно улучшить эксплуатационно-технические характеристики МГЭС являет-

ся применение в качестве стабилизатора напряжения и частоты тока генератора непосредственных преобразователей частоты (НПЧ). Применение НПЧ упростит механическую часть и повысит показатели надёжности и КПД МГЭС [4, 10].

При выборе или разработке генератора для МГЭС, если в качестве стабилизатора параметров электроэнергии используется НПЧ, необходимо учитывать следующие особенности:

1) частота вращения ротора генератора должна находиться в пределах 750 – 1500 об/мин, что зависит от напора воды и редуктора, размещённого между турбиной МГЭС и генератором электроэнергии;

2) частота тока генерируемого напряжения должна быть в диапазоне частот 300 – 400 Гц (чем выше частота, тем лучше качество выходного напряжения и меньше масса выходного фильтра НПЧ);

3) повышение частоты генерируемого тока целесообразно осуществлять не за счёт увеличения передаточного числа механического редуктора, а за счёт увеличения числа пар полюсов генератора или за счёт комбинации рассмотренных выше способов.

4) для стабилизации параметров электроэнергии могут использоваться два типа НПЧ с естественной и искусственной коммутацией (с регулируемым углом сдвига фаз на входе) силовых полупроводниковых приборов.

НПЧ с естественной коммутацией (НПЧЕ) имеют улучшенные показатели надёжности и КПД, а НПЧ с регулируемым углом сдвига фаз на входе (НПЧР) имеет улучшенные массогабаритные показатели и качество выходного напряжения [4, 5, 7].

НПЧЕ преобразует эту мощность в выходную мощность с точно регулируемой фиксированной частотой 50 Гц. Г-образный LC-фильтр используется для обеспечения синусоидальности выходного напряжения.

Структурная схема МГЭС с использованием НПЧЕ приведена на рисунке 3.

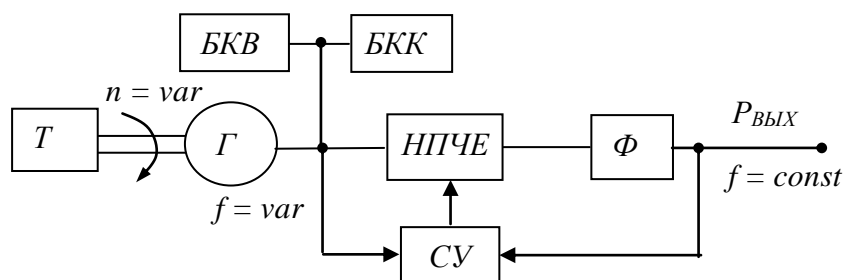


Рисунок 3 – Структурная схема МГЭС на НПЧЕ:  $T$  – турбина;  $\Gamma$  – генератор;  $БКВ$  и  $БКК$  – блоки конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности нагрузки, соответственно;  $СУ$  – система управления;  $НПЧЕ$  – непосредственный преобразователь частоты с естественной коммутацией;  $\Phi$  – выходной фильтр

Структурная схема МГЭС с использованием НПЧР приведена на рисунке 4.

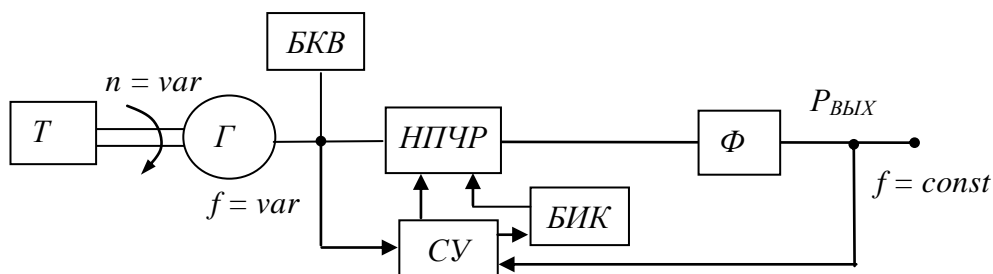


Рисунок 4 – Структурная схема МГЭС на НПЧР:  $T$  – турбина;  $\Gamma$  – генератор;  $БКВ$  – блок конденсаторов возбуждения;  $СУ$  – система управления;  $НПЧР$  – непосредственный преобразователь частоты с регулируемым углом сдвига фаз на входе;  $БИК$  – блок искусственной коммутации;  $\Phi$  – выходной фильтр

Перспективным источником электроэнергии для МГЭС является бесконтактный АГ емкостного возбуждения [3]. Особенностью работы АГ является то, что если на его статорные обмотки подается реактивная мощность, то он может генерировать активную мощность к присоединенной к нему внешней нагрузке. Потребность в реактивной мощности нагрузки и электрической машины должны обеспечиваться от внешних источников (конденсаторы с постоянной ёмкостью, коммутируемые конденсаторы, синхронные компенсаторы и различные типы статических источников).

Однако каждый из этих источников значительно ухудшает эксплуатационно-технические характеристики МГЭС.

Особенность работы НПЧР совместно с АГ, заключается в том что преобразователь способен изменять реактивную составляющую входного тока и, ее знак, представляет возможность использовать этот НПЧР в двух целях: во-первых, для преобразования мощности с повышенной и изменяющейся частотой, генерируемой АГ, в выходную мощность постоянной более низкой частоты и, во-вторых, для питания АГ регулируемой реактивной мощностью, т.е. для регулирования его возбуждения.

Важной особенностью работы НПЧР является то, что он всегда нагружен на фильтр. Ток фильтра емкостный, поэтому НПЧР будет потреблять соответствующий емкостный ток от генератора, т.е. выдавать соответствующий отстающий реактивный ток генератору. Однако в зависимости от конкретных параметров фильтра может случиться, что этот ток недостаточен для возбуждения АГ. Тогда задача может быть решена путем присоединения параллельно генератору конденсаторов обеспечивающих его возбуждение. Это обычно не означает добавление «лишних» элементов в систему, поскольку на практике конденсаторы на входе обычно нужны для НПЧР, в которых используются отключающие устройства или тиристоры с принудительной коммутацией; они нужны для подавления перенапряжений на входных выводах, которые при каждой коммутации образуются в результате быстрого изменения тока, проходящего через реактивное сопротивление рассеяния генератора. Конденсаторы на входе также могут иметь преимущества для НПЧЕ. Кроме подавления коммутационных перенапряжений эти конденсаторы уменьшают также искажение токов генератора и улучшают форму кривой напряжения на его выводах. Таким образом, эти конденсаторы косвенно влияют на уменьшение искажения формы кривой выходного напряжения, которая формируется из участков кривых входного напряжения.

Для обеспечения должного возбуждения без нагрузки необходимо, чтобы общий ток генератора, составленный из тока конденсатора на входе и максимально достигаемого емкостного входного тока НПЧР, благодаря току фильтра на выходе был бы равен или больше тока возбуждения ненагруженного АГ при минимальной рабочей скорости. На практике этот критерий обычно удовлетворяется сам собой, поэтому емкость конденсаторов фильтра не должна быть увеличена сверх той, которая требуется по другим причинам.

Важным вопросом является пуск АГ в работу. Поскольку до пуска к АГ не приложено напряжение, то его конденсаторы сами по себе не смогут обеспечить требуемое начальное возбуждение. Однако асинхронные машины имеют некоторую остаточную намагниченность и даже если не имеют ее, это легко сделать путем введения только одного импульса тока в обмотку статора. Эта остаточная намагниченность обеспечивает начальное самовозбуждение естественным путем под действием положительной обратной связи. При вращении ротора в обмотке статора возникает небольшое напряжение благодаря остаточной намагниченности. Это напряжение создает некоторый ток через конденсаторы фильтров на входе, что в свою очередь увеличивает напряжение генератора. Когда напряжение на выводах генератора превысит какой-то установленный уровень, НПЧР включается в работу. Если желаемое напряжение генератора поддерживается замкнутой системой регулирования коэффициента сдвига НПЧР, то при пуске будет автоматически установлено наибольшее возможное опережающее значение коэффициента сдвига, обеспечивающее быстрое завершение начального возбуждения генератора. По достижении требуемого напряжения на выводах АГ замкнутая система регулирования НПЧР непрерывно регулирует реактивную составляющую входного тока так, чтобы поддержать это напряжение.



Таким образом, основным достоинством НПЧЕ, применяемых в составе в МГЭС с АГ является относительно не сложная силовая схема и система управления, а недостатком – на входе НПЧЕ угол сдвига фаз постоянно отстающий, т.е. преобразователь для АГ является активно-индуктивной нагрузкой, что требует повышенную ёмкость конденсаторов обеспечивающих его возбуждение. Основным достоинством НПЧР является то, что на его входе ток опережает напряжение, а значит, преобразователь для АГ является активно-емкостной нагрузкой, что позволяет значительно уменьшить массу конденсаторов, применяемых для возбуждения генератора, и практически исключить из схемы блок конденсаторов компенсации БКК (рисунок 4). Основными недостатками НПЧР являются: сложная силовая часть, из-за применения блока искусственной коммутации БИК, в состав которого входят силовые полупроводниковые ключи и реактивные элементы, и соответственно усложнена система управления, обеспечивающая не только стабилизацию параметров электроэнергии, но и искусственную коммутацию силовых полупроводниковых приборов.

#### Список литературы

1. Григораш О.В., Тропин В.В., Оськина А.С. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 83 (09). С. 188 – 199.
2. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы: Монография. – Краснодар: ВУЦ ВВС. – 2012. – 174 с.
3. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения // Электротехника – 2002. – № 1. – с.22 – 26.
4. Атрощенко В.А., Григораш О.В. Непосредственные преобразователи частоты с улучшенными техническими характеристиками для систем автономного электроснабжения // Электротехника – 1997. – № 11. – с.56 –60.
5. Григораш О.В., Квитко А.В., Алмазов В.В. и др. Непосредственный трехфазный преобразователь частоты с естественной коммутацией / Патент на изобретение RUS 2421867. 12.05.2010.
6. Григораш О.В., Гарькавый К. А., Квитко А.В., и др. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки / Патент на изобретение RUS 2443903. 12.05.2010.

7. Григораш О.В., Степура Ю.П., Квитко А.В. Структурно-параметрический синтез автономных систем электроснабжения // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 71-75.

8. Григораш О.В., Попов А.Ю., Квитко А.В. и др. Удельная масса и предельная мощность бесконтактных генераторов электроэнергии // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2011. – № 29. – С.198 –202.

9. Григораш О.В., Квитко А.В., Хамула А.А. Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2013. – № 08. С. 207.

10. Григораш О. В. Статические преобразователи электроэнергии систем автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей: дис. ... д-ра техн. наук. / О. В. Григораш; КубГАУ. – Краснодар, 2003. – 338 с.

### References

1. Grigorash O.V., Tropin V.V., Os'kina A.S. Ob jeffektivnosti i celesoobraznosti ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v Krasnodarskom krae // Politematicheskij setevoj jelektronnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU). – Krasnodar: KubGAU, 2012. – № 83 (09). S. 188 – 199.

2. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr Avtonomnye istochniki jelektrojenerгии: sostojanie i perspektivy: Monografija. – Krasnodar: VUC VVS. – 2012. – 174 s.

3. Grigorash O.V. Asinhronnye generatory v sistemah avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Jelektrotehnika – 2002. – № 1. – s.22 – 26.

4. Atroshhenko V.A., Grigorash O.V. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty s uluchshennymi tehničeskimi harakteristikami dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Jelektrotehnika – 1997. – № 11. – s.56 –60.

5. Grigorash O.V., Kvitko A.V., Almazov V.V. i dr. Neposredstvennyj trehfaznyj preobrazovatel' chastoty s estestvennoj kommutaciej / Patent na izobretenie RUS 2421867. 12.05.2010.

6. Grigorash O.V., Gar'kavyj K. A., Kvitko A.V., i dr. Ustrojstvo stabilizacii naprjazhenija i chastoty vetrojenergetičeskoj ustanovki / Patent na izobretenie RUS 2443903. 12.05.2010.

7. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Kvitko A.V. Strukturno-parametricheskij sin-tez avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija // Polzunovskij vestnik. – 2011. – № 2-1. – S. 71-75.

8. Grigorash O.V., Popov A.Ju., Kvitko A.V. i dr. Udel'naja massa i predel'naja moshhnost' beskontaktnyh generatorov jelektrojenerгии // Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2011. – № 29. – S.198 –202.

9. Grigorash O.V., Kvitko A.V., Hamula A.A. Resursy vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии Krasnodarskogo kraja // Politematicheskij setevoj jelektronnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU). – Krasnodar: KubGAU, 2013. – № 08. S. 207.

10. Grigorash O. V. Sticheskie preobrazovateli jelektrojenerгии sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija sel'skohozjajstvennyh potrebitelej: dis. ... d-ra tehn. na-uk. / O. V. Grigorash; KubGAU. – Krasnodar, 2003. – 338 s.