

УДК 620

**АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ**

Григораш Олег Владимирович  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
[grigorasch61@mail.ru](mailto:grigorasch61@mail.ru)

Корзенков Павел Геннадьевич  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

В статье рассматривается перспективное направление, направленное на улучшение эксплуатационно-технических характеристик автономных систем электроснабжения, за счёт применения в их составе газопоршневых электростанций, ветроэлектрических и солнечных фотоэлектрических установок

Ключевые слова: АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ВЕТРО-ГАЗОПОРШНЕВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

UDC 620

**STAND-ALONE POWER SUPPLY SYSTEM BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Grigorash Oleg Vladimirovich  
doctor of engineering sciences, professor, head of the chair, [grigorasch61@mail.ru](mailto:grigorasch61@mail.ru)

Korzenkov Pavel Gennad'evich  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

The article discusses a promising direction, aimed at improving the operational and technical characteristics of the autonomous power supply systems, through the use of a part of their gas piston power plants, wind power and solar photovoltaic installations

Keywords: STAND-ALONE POWER SYSTEMS, RENEWABLE ENERGY, WIND POWER AND NATURAL GAS-FIRED POWER PLANTS, WIND-SOLAR POWER PLANTS

Во всём мире интенсивно развиваются автоматические системы управления технологическими процессами и производственными комплексами, электронные системы связи и обработки информации. Цена нарушений нормальных режимов работы, рассмотренных потребителей электроэнергии, связанных с перерывами в электроснабжении, отклонениями показателей качества электроэнергии, из-за аварийных ситуаций чрезвычайно высока. Эффективным средством для обеспечения надёжного и качественного электроснабжения ответственных потребителей является разработка и внедрение автономных (бесперебойных) систем электроснабжения (АСЭ), содержащих несколько источников электроэнергии, как правило, основной, резервные источники и аварийные [1, 2]. Кроме того, ограниченный ресурс органического топлива и отрицательные экологические последствия традиционной энергетики раскрывают широкие перспективы

для использования в составе АСЭ возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3, 4].

В статье рассматривается одно из перспективных направлений, направленное на улучшение эксплуатационно-технические характеристик АСЭ, за счёт применения в их составе газопоршневых электростанций (ГПЭ), ветроэлектрических установок (ВЭУ) и солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ) [5, 6].

В настоящее время одна из эффективных технологий, основанная на использовании газа для производства электрической энергии, является разработка электростанций на базе газопоршневых двигателей внутреннего сгорания. Газопоршневые электростанции (ГПЭ) имеют простую и надёжную конструкцию. Электрический КПД ГПЭ считается высоким, в сравнении с дизельными электростанциями, и при работе на качественном природном газе превышает 40% [4].

Важной особенностью ГПС является то, что практически все их модели способны работать в режиме когенерации, то есть как тепловые электростанции. Температура выхлопных газов на выходе из силовой машины ГПЭ –  $390 \pm 10^\circ\text{C}$ . При этом, электроэнергию и тепловую энергию ГПЭ вырабатывают одновременно, соотношение выдачи электрической и тепловой энергии – 1 : 1. Таким образом, применение ГПЭ в АСЭ расширяет их возможности и значительно повышает КПД системы.

Перспективным направлением является использование ГПС совместно с ветроэлектрическими установками (ВЭУ) в случае, когда целью использования последней является повышение надёжности электроснабжения ответственных потребителей и экономия топлива, стоимость которого с учётом расходов на доставку может быть очень высокой. Соотношение мощности компонентов АСЭ зависит от схемы генерирования нагрузки и ресурса ветра.

Режим одновременной параллельной работы ГПС и ВЭУ оценивается как недостаточно эффективный способ использования ВИЭ, поскольку доля участия ВЭУ в системе по мощности не должна превышать 15 – 20% мощности ГПС. Такие режимы можно использовать в комбинированных установках большой мощности для экономии топлива.

Использование режима раздельной работы ГПС и ВЭУ позволяет поднять долю участия ВЭУ до 50 – 60% и более. Однако, в этом случае неизбежно усложнение АСЭ за счёт необходимости введения автоматической системы управления, автономных инверторов и аккумуляторных батарей, которые аккумулируют энергию, вырабатываемую ВЭУ при рабочих скоростях ветра для питания нагрузки в безветренную погоду или при небольших скоростях ветра [4].

Каждый раз, когда это возможно, электроэнергия вырабатывается за счёт ВЭУ, а аккумуляторные батареи непрерывно подзаряжаются. В период ветрового затишья, когда заряд АБ падает ниже определённого уровня, для обеспечения потребителей электроэнергией автоматически запускается ГПЭ. Такой режим значительно снижает количество запусков ГПС и, следовательно, ведёт к сокращению затрат на обслуживание и топливные расходы.

Таким образом, перспективным является направление разработки ветро-газопоршневых электростанций. Одна из простых схем АСЭ, выполненной на базе ВЭУ и ГПЭ приведена на рисунке 1 *a*. В схеме применяется стандартный ветроагрегат *ВА* с асинхронным генератором *АГ*, который работает постоянно на шину *Ш1* к которой подключаются потребители электроэнергии переменного тока. Автоматическая балластная нагрузка *БН* предотвращает перегрузку *ВА* при высоких скоростях ветра за счёт снижения частоты вращения до заданного расчётного уровня. Газопоршневая электростанция, содержащая газопоршневой двигатель *ГПД* и синхронный генератор *СГ*, который также подключён к шине *Ш1* и работает

постоянно, обеспечивая реактивной энергией асинхронный генератор *АГ*. Допускается полная (100%) доля нагрузки ветро-газопоршневой электростанции.

Экономия топлива ГПЭ будет определяться степенью снижения потребления топлива при частичной загрузке *ГПД*. Экономия топлива будет небольшой, но АСЭ имеет повышенную надёжность работы.

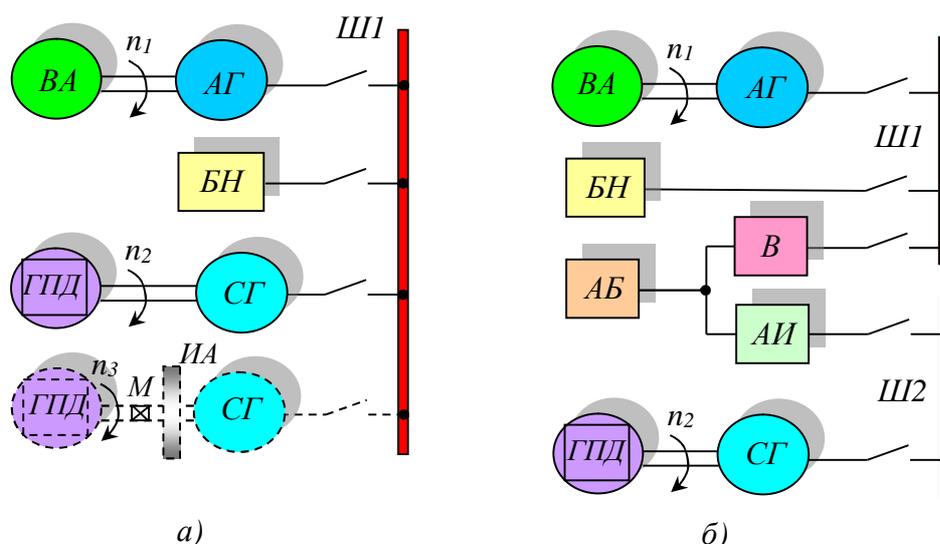


Рисунок 1 – Структурные схемы ветро-газопоршневых электростанций: *ВА* – ветроагрегат; *АГ* – асинхронный генератор; *БН* – балластная нагрузка; *СГ* – синхронный генератор; *ГПД* – газопоршневой двигатель; *М* – муфта; *ИА* – инерционный аккумулятор; *АБ* – аккумуляторная батарея; *В* – выпрямитель; *АИ* – автономный инвертор; *Ш1...Ш2* – шины для подключения нагрузки

В рассмотренных АСЭ в конструкцию ГПЭ могут быть внесены изменения: между *ГПД* и *СГ* устанавливается соединительная муфта *М* и инерционный аккумулятор (механический маховик). Это нужно в том случае, когда ветер сильный и *ВА* один способен обеспечить требуемую потребителям мощность, ГПЭ прекращает работу и муфта *М* разъединяет инерционный аккумулятор *ИА* с синхронным генератором *СГ* от *ГПД*. Ротор синхронного генератора будет продолжать вращение, обеспечивая асинхронный генератор *АГ* реактивной энергией.

Когда развиваемая мощность *ВА* начинает превышать потребность потребителей энергии, автоматически включается регулируемая балласт-

ная нагрузка *БН*, обеспечивая снижение частоты тока ( $50\text{Гц}$ ). Инерционный аккумулятор *ИА* обеспечивает некоторое сглаживание частоты тока и ускоряет процесс запуска *ГПД* при уменьшении скорости ветра, не допуская значительного снижения частоты тока в автономной сети. Как правило, инерционный аккумулятор *ИА* обеспечивает расчётную мощность не более 3 секунд, т.е. только на период запуска *ГПД*.

Основным достоинством АСЭ (рисунок 1 *а*) является то, что система управления имеет минимум электронного оборудования. Экономия топлива здесь существенно возрастает благодаря тому, что при благоприятных ветровых потоках ГПЭ не работает и не расходует топливо [1, 2].

Ветро-газопоршневая электростанция (рисунок 1, *б*) имеет в своём составе аккумуляторные батареи *АБ*. ВЭУ передаёт электроэнергию через выпрямитель *В* и автономный инвертор *АИ* к потребителям электроэнергии (шина *Ш2*). Выпрямитель также выполняет функции зарядного устройства *АБ*. Ёмкость *АБ* может быть различной: в одних случаях ёмкость *АБ* рассчитывается исходя из условия обеспечения работоспособности АСЭ при перерывах в электроснабжении от ВЭУ в течение нескольких минут, а в других – считается необходимым иметь *АБ*, обеспечивающие работоспособность системы в течение 2 – 3 часов.

В случае недостатка электроэнергии для обеспечения нужд потребителей недостающая часть поступает от *АБ*. В случае избытка энергии производится питание потребителей и заряд *АБ*. При штилевой погоде и при слабом ветре работает ГПЭ в режиме обеспечения потребителей необходимой мощностью и заряда *АБ*.

АСЭ, выполненная по схеме, приведённой на рисунке 1. *б*, позволяет максимально экономить топливо. Значительно повышается надёжность работы АСЭ при применении компьютеров и, соответственно, программного обеспечения в управлении системой, в том числе контролю её параметров.

Несмотря на довольно высокую, в настоящее время, стоимость фотоэлектрических батарей, их использование совместно с ВЭУ в некоторых случаях может быть эффективным. Поскольку в зимнее время существует большой потенциал ветра, а летом в ясные дни максимальный эффект можно получить, используя СФЭУ, то сочетание этих ресурсов оказывается выгодным с экономической точки зрения для потребителей.

Как правило, на начальном этапе в проект будущей ветро-солнечной электростанции закладывается мощность, на 20 – 30% больше заявленной заказчиком. Это позволяет «запасать» электроэнергию во время её потребления [4].

Применяя в одной конструкции ветроагрегат и солнечные батареи (рисунок 2) можно создавать АСЭ с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками небольшой мощности. Пример структурной схемы ветро-солнечной электростанции приведён на рисунке 3.

Расчётная мощность ВЭУ и СФЭУ определяется с учётом графика нагрузок, ветровых потоков и солнечной активности для конкретного региона (района). В составе АСЭ должны быть предусмотрены резервные источники электроэнергии *АБ*. При этом, каждый из режимов работы *ВЭУ–СФЭУ*, *ВЭУ–АБ*, *СФЭУ–АБ* должны обеспечивать пиковую нагрузку.

Ветро-солнечная электростанция работает следующим образом. ВЭУ генерирует трехфазное напряжение, вырабатываемое генератором *G* напряжение через выпрямитель *B* прикладывается к шине постоянного тока *Ш1* или (*и*) с солнечной фотоэлектрической установки (СФЭУ) напряжение прикладывается к шине *Ш1*. Автономный инвертор *АИ* преобразует напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока, соответствующее качеству, необходимое для нагрузки, подключаемой к шине переменного тока *Ш2*.

В это же время происходит заряд аккумуляторной батареи *АБ* (зарядное устройство на рисунке 3 не показано). Защитное устройство *ЗУ1*

регулирует зарядное напряжение и осуществляет защиту аккумуляторной батареи *АБ* от перезаряда.

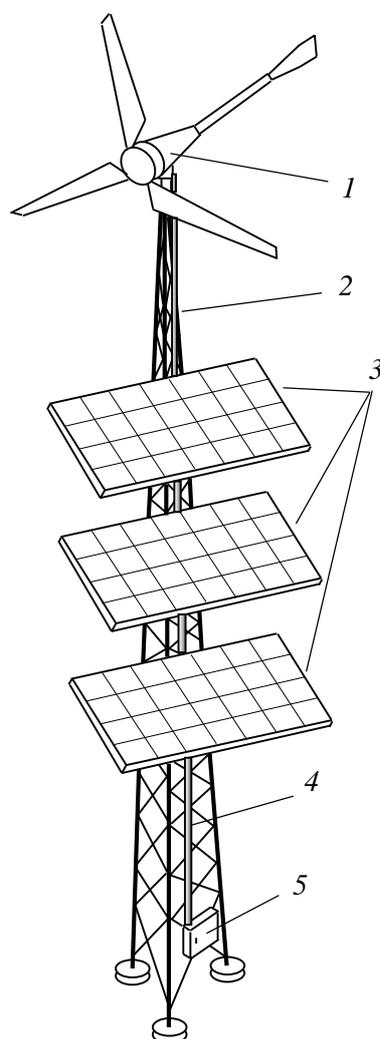


Рисунок 2 – Ветросол-  
нечная электростанция:  
1 – ветроагрегат;  
2 – мачта;  
3 – солнечные батареи;  
4 – кабельный канал;  
5 – распределительный  
щит

Избыток энергии ВЭУ (СФЭУ) идет на нагрев воды в бойлере или нагрев воздуха в помещении. Для этого используется водяной или воздушный соответственно *ТЭН*.

Делитель напряжения *ДН* преобразует напряжение постоянного тока, поступающего от *АБ* через защитное устройство *ЗУ2*, в напряжения *12*, *24* или *48 В*.

В случае штиля СФЭУ и (или) *АБ* осуществляет питание нагрузки переменного и постоянного тока через автономный инвертор *АИ* и делитель напряжения *ДН*. В этом случае ВЭУ отключена от шины *Ш1*.

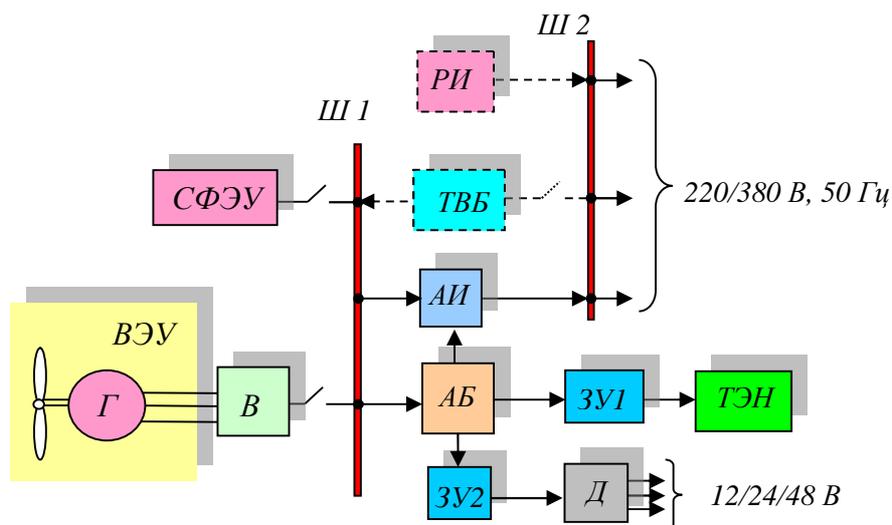


Рисунок 3 – Структурная схема ветро-солнечной электростанции

Для предотвращения переразряда *АБ* применяется защитное устройство *ЗУ2*. Как только напряжение на *АБ* приближается к опасному уровню переразряда защитное устройство *ЗУ2* отключает нагрузку постоянного тока. Защиту *АБ* от переразряда в цепи переменного тока осуществляет автономный инвертор *АИ*.

Емкость *АБ* так же делается избыточной и определяется исходя из необходимого времени работы в периоды безветрия и пасмурной погоды. Целесообразно в АСЭ использовать герметичные необслуживаемые AGM аккумуляторы, не требующие периодического добавления электролита и не выделяющие вредных газов. Срок службы АБ данного типа составляет от 3-х до 5-ти лет, в зависимости от режима эксплуатации.

В случае длительного шторма или отсутствия солнечного излучения в АСЭ может быть предусмотрен дополнительный резервный источник электроэнергии *РИ* (бензо-, дизельэлектрическая станция или ГПЭ), напряжение которого прикладывается к шине *Ш2*. В этом случае, питание потребителей постоянного тока осуществляется через трансформаторно-выпрямительный блок *ТВБ* от шины *Ш1*.

Вместо генератора трехфазного переменного тока в составе ВЭУ может использоваться генератор постоянного тока, тогда выпрямитель *В* исключается из схемы.

**Важный факт.** Суммарная мощность подключаемой нагрузки переменного тока определяется номинальной мощностью автономного инвертора *АИ*. Иногда потребители могут кратковременно при включении (пуск электрических машин) потреблять мощность, значительно превосходящую номинальную. Поэтому, для стабильной работы АСЭ автономные инверторы *АИ* необходимо выбирать с номинальной мощностью на 30 – 50% больше суммарной мощности подключённых потребителей. При большом количестве и разнообразии мощности потребителей целесообразно разбить автономные источники и инверторы на группы (рисунок 4).

Кроме того, следует отметить, что иногда более целесообразно строить ветро-солнечную электростанцию с использованием нескольких менее мощных ВЭУ, чем на основе одной с большой мощностью. В итоге упрощается процесс монтажа электростанции и повышается ее надежность, т. к. при выходе из строя одного узла, остальные части системы продолжают функционировать.

Комбинированные (гибридные) электростанции подразумевают совместное использование традиционных и ВИЭ. Практически к структурным схемам ветро-газопоршневых и ветро-солнечных электростанций могут быть подключены к шинам переменного тока традиционные источники электроэнергии бензо-, дизельные и газопоршневые электростанции [7, 8].

При необходимости обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей в АСЭ должны быть предусмотрены накопители электроэнергии, обычно это АБ. Чем меньше время перевода питания потребителей от одного источника электроэнергии к другому, тем меньше необходима ёмкость АБ.

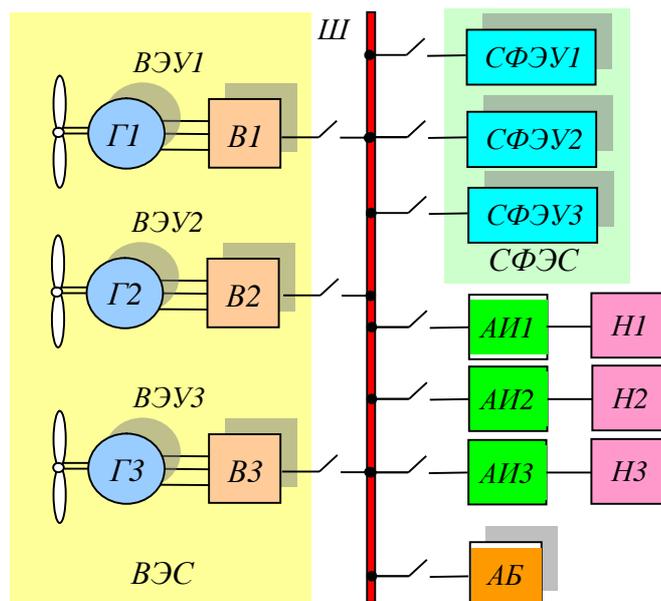


Рисунок 4 – Комбинированная структурная схема ветро-солнечной электростанции: ВЭС – ветроэлектрическая станция; СФЭС – солнечная фотоэлектрическая станция; Н1-Н3 – нагрузка.

В настоящее время известны технические решения мобильных комбинированных электростанций мощностью до 10 кВт. В основном это комбинация трёх ВИЭ: ВЭУ, СФЭУ и ДЭС. Основные преимущества мобильных комбинированных электростанций:

- большой срок службы;
- возможность быстрого развёртывания установки на отдалённых объектах в труднодоступных местах;
- применение ВИЭ позволяет снизить расход топлива от традиционных источников электроэнергии и как следствие, уменьшить себестоимость электроэнергии на удалённых объектах;
- продолжительное время автономной работы за счёт применения ВИЭ;
- автоматическая система позволяет осуществлять дистанционный мониторинг и управление режимами работы АСЭ по проводным и беспроводным каналам связи.

ВЭУ и СФЭУ могут использоваться совместно с микрогидроэлектростанциями. В таких системах обычно определяется основной источник электроэнергии в зависимости от наличия ветрового потока, солнечной радиации или напора и расхода воды. Т.е., к примеру, в период ветрового затишья энергия вырабатывается микрогидроэлектростанцией или СФЭУ. Здесь важно комбинировать работой ВИЭ с учётом эксплуатационных затрат и сроком службы оборудования (до капитального ремонта и предельный срок службы).

Перспективным регионом для внедрения АСЭ на ВИЭ является Краснодарский край, имеющий значительные ресурсы ветровой и солнечной энергетики [9, 10].

Таким образом, предложенные структурно-схемные решения АСЭ с использованием ВИЭ позволит улучшить их эксплуатационно-технические характеристики, а также решить вопрос дефицита энергоресурсов Краснодарского края [11].

### Список литературы

1. Григораш О.В. Системы автономного электроснабжения: Монография / О.В. Григораш, Н. И. Богатырёв, Н. Н. Курзин; под общ. ред. Н. И. Богатырёва. – Краснодар: Б/И. – 2001. – 333 с.
2. Григораш О.В. Модульные системы гарантированного электроснабжения: Монография / О.В. Григораш, С.В. Божко, Д.А. Нормов, С.М. Безуглый, А.В. Ракло. – Краснодар: КВВАУЛ. – 2005. – 306 с.
3. Амерханов Р.А. Перспективы использования возобновляемых источников энергии / Р. А. Амерханов, Б.К. Цыганков, С.Н. Бегдай и др. // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2013. – № 42. – С. 185 – 189.
4. Григораш О.В. Возобновляемые источники электроэнергии: Монография / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов, Е. А. Власенко, А. Г. Власов; под общ. ред. О.В. Григораш. – Краснодар: КубГАУ. – 2012. – 272 с.
5. Григораш О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. И. Стрелков // Промышленная энергетика. – 2001. – № 4. – С.37–40.
6. Григораш О.В. Возобновляемые источники энергии: термины, определения, достоинства и недостатки / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Е. Усков, А. В. Квитко // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2011. – № 5. – С. 189 – 192.
7. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь АГРУС. – 2008. – С. 152

8. Никитенко Г.В. Оценка вариантов автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев, П.В. Коноплев // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 1. – С. 16–17.

9. Григораш О.В. Современное состояние производства электроэнергии возобновляемыми источниками в мире и России / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. С. Пonomаренко, Ю. В. Кондратенко // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2012. – № 6. – С. 159 – 163.

10. Григораш О.В. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае / О.В. Григораш, В.В. Тропин, А.С. Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №09(083). С. 506 – 517. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.

11. Григораш О.В. Перспективы возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае / О. В. Григораш, В. П. Коваленко, Е. В. Воробьев, А. Г. Власов // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2012. – № 6. – С. 123 – 127.

### References

1. Grigorash O.V. Sistemy avtonomnogo jelektrosnabzhenija: Monografija / O.V. Grigorash, N. I. Bogatyryov, N. N. Kurzin; pod obshh. red. N. I. Bogatyryova. – Krasnodar: V.I. – 2001. – 333 s.

2. Grigorash O.V. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija: Monografija / O.V. Grigorash, S.V. Bozhko, D.A. Normov, S.M. Bezuglyj, A.V. Raklo. – Krasnodar: KVVAUL. – 2005. – 306 s.

3. Amerhanov R.A. Perspektivy ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии / R. A. Amerhanov, B.K. Cygankov, S.N. Begdaj i dr. // Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2013. – № 42. – S. 185 – 189.

4. Grigorash O.V. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenerгии: Monografija / O. V. Grigorash, Ju. P. Stepura, R. A. Sulejmanov, E. A. Vlasenko, A. G. Vlasov; pod obshh. red. O.V. Grigorash. – Krasnodar: KubGAU. – 2012. – 272 s.

5. Grigorash O.V. Netradicionnye avtonomnye istochniki jelektrojenerгии / O. V. Grigorash, Ju. I. Strelkov // Promyshlennaja jenergetika. – 2001. – № 4. – S.37–40.

6. Grigorash O.V. Vozobnovljaemye istochniki jenerгии: terminy, opredelenija, dostoinstva i nedostatki / O. V. Grigorash, Ju. P. Stepura, A. E. Uskov, A. V. Kvitko // Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2011. – № 5. – S. 189 – 192.

7. Vetrojenergeticheskie ustanovki v sistemah avtonomnogo jelektrosnabzhenija: monografija / G.V. Nikitenko, E.V. Konoplev Stavropol'skij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. – Stavropol' AGRUS. – 2008. – S. 152

8. Nikitenko G.V. Ocenka variantov avtonomnogo jelektrosnabzhenija sel'skohozjajstvennyh potrebitelej / G.V. Nikitenko, E.V. Konoplev, P.V. Konoplev // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2012. – № 1. – S. 16–17.

9. Grigorash O.V. Sovremennoe sostojanie proizvodstva jelektrojenerгии vozobnovljaemyimi istochnikami v mire i Rossii / O. V. Grigorash, Ju. P. Stepura, A. S. Ponomarenko, Ju. V. Kondratenko // Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2012. – № 6. – S. 159 – 163.

10. Grigorash O.V. Ob jeffektivnosti i celesoobraznosti ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jelektrojenerгии v Krasnodarskom krae / O.V. Grigorash, V.V. Tropin, A.S. Os'kina // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs].

– Krasnodar: KubGAU, 2012. – №09(083). S. 506 – 517. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.

11. Grigorash O.V. Perspektivy vozobnovljaemyh istochnikov jelektrojenergii v Krasnodarskom krae / O. V. Grigorash, V. P. Kovalenko, E. V. Vorob'jov, A. G. Vlasov // Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2012. – № 6. – S. 123 – 127.