

УДК 621.313

UDC 621.313

**ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВЕТРО-  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СПОСО-  
БЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ИХ НАПРЯЖЕНИЯ**

**WIND POWER GENERATORS-ELECTRIC  
SYSTEMS AND METHODS OF VOLTAGE  
STABILIZATION**

Квитко Андрей Викторович  
старший преподаватель, [9061870011@mail.ru](mailto:9061870011@mail.ru)

Kvitko Andrey Viktorovich  
senior lecturer, [9061870011@mail.ru](mailto:9061870011@mail.ru)

Хицкова Алина Олеговна  
аспирантка, [grigorasch61@mail.ru](mailto:grigorasch61@mail.ru)  
*Кубанский государственный аграрный универси-  
тет, Краснодар, Россия*

Hitskova Alina Olegovna  
postgraduate student, [grigorasch61@mail.ru](mailto:grigorasch61@mail.ru)  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье раскрываются основные достоинства, не-  
достатки и особенности выбора генераторов элек-  
трической энергии для ветроэлектрических уста-  
новок, а также способы стабилизации их напряже-  
ния

The article describes the main merits, demerits and  
peculiarity of choice of electric power generators for  
wind power plants, as well as ways of stabilization  
their voltage

Ключевые слова: ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
УСТАНОВКА, АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР,  
СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫ-  
МИ МАГНИТАМИ, НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Keywords: INSTALLATION WINDFARMS,  
ASYNCHRONOUS GENERATOR, SYNCHRO-  
NOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAG-  
NETS, DIRECT FREQUENCY CONVERTER

Актуальным в настоящее время является вопрос внедрения в сель-  
скохозяйственное производство возобновляемых источников энергии  
(ВИЭ). Широкие перспективы для использования в Краснодарском крае  
раскрываются для ветроэлектрических станций (ВЭС), так как на боль-  
шей части его территории скорость ветра превышает 3 м/с [1, 2].

Для улучшения основных характеристик ветроэлектрических уста-  
новок (ВЭУ) перспективным является направление перехода от использо-  
вания в их конструкции универсальных (однотипных) модульных блоков и  
узлов, в том числе компактного серийного отечественного ветроэлек-  
троэнергетического оборудования.

Анализ научной и технической литературы показал, что в настоящее  
время электромеханические генераторы являются наиболее универсаль-  
ными источниками электроэнергии как переменного, так и постоянного  
тока с широким диапазоном мощностей и напряжений. Значительные пре-  
имущества по технико-экономическим показателям, в сравнение с эксплу-  
атируемыми электромеханическими генераторами, в настоящее время

имеют бесконтактные генераторы электроэнергии в диапазоне мощностей от десятков до сотен киловатт [3].

Основные преимущества бесконтактных генераторов электроэнергии являются: высокие показатели надежности, КПД и ресурса работы; относительно небольшая масса и габариты, а также низкие эксплуатационные расходы.

В настоящее время известны технические решения бесконтактных асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ), синхронных генераторов с вращающимися выпрямителями (СГВВ), синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) и асинхронных генераторов (АГ) представляющие собой синтез электрической машины и силовых электронных приборов [4].

Конструктивно АСГ выполнены так, что обмотка фазного ротора питается от преобразователя частоты тока, изменяющимся с частотой, пропорциональной скольжению, при этом АСГ, являясь индуктивной нагрузкой для преобразователя частоты, существенно ослабляет токи высших гармоник преобразователя, а изменение частоты вращения ротора не приводит к изменению частоты вращения магнитного поля и, соответственно, частоты тока выходного напряжения генератора.

АСГ имеет следующие недостатки: форма выходного напряжения отличается от синусоидальной; большая установленная масса (удельная массы свыше 20 кг/кВт); сложная система управления; относительно низкие показатели надёжности и КПД (0,78 – 0,85).

Ток в обмотку возбуждения СГВВ подается через кольцевой щеточный контакт, питание обмотки возбуждения осуществляется от специального возбудителя, обеспечивающего бесконтактную передачу энергии от ротора к статорной обмотке генератора электромагнитным путем. Основные технические характеристики СГВВ: при мощностях до 2500 кВА, имеют КПД 0,82 – 0,95 и удельную массу 3,6 – 18 кг/кВт.

Недостатки СГВВ связаны с относительно сложной силовой электрической схемой и наличием на роторе обмоток, полупроводниковых приборов, защитных элементов, фильтров и т.п., что снижает надежность его работы, ограничивает предельно допустимые частоты вращения ротора и температуры.

Лучшие характеристики имеют СГПМ и АГ. Их КПД находится в пределах 0,9 – 0,95, а удельная масса, без учёта массы конденсаторов возбуждения не ниже 3 кг/кВт [3].

Важная особенность работы и основным недостатком АГ и СГПМ в сравнении с генераторами с электромагнитным возбуждением является сложность регулирования и стабилизации выходного напряжения.

Принципы и технические решения регуляторов напряжения АГ аналогичны с СГПМ, т.е. стабилизация напряжения осуществляется за счет регулирования реактивной мощности, поступающей в генераторы от конденсаторов. Изменение реактивной мощности конденсаторов осуществляется за счет изменения реактивного тока, протекающего через конденсаторы, пропорционально изменению напряжения путем изменения времени открытого состояния силовых полупроводниковых ключей, которые к конденсаторам подключаются последовательно или параллельно.

При разработке систем стабилизации напряжения генераторов ВЭУ необходимо знать от чего зависит и каким образом определяется их мощность.

Электрическая мощность ВЭУ и генератора определяются по формулам

$$P_{ВЭУ} = N_{BK} \eta_{мех} \eta_{Г} 10^{-3}, \quad (1)$$

$$P_{ГЕН} = N_{Г} \eta_{Г} = 9,81 QH \eta_{Г} \eta_{Г}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{БК}}$  – механическая мощность ветроколеса;  $\eta_{\text{мех}}$  – механический КПД ВЭУ;  $\eta_{\text{Г}}$  – КПД генератора;  $N_{\text{Т}}$  – механическая мощность турбины;  $Q$  – расход воды;  $H$  – напор;  $\eta_{\text{Т}}$  – КПД турбины.

Важным показателем для АГ является масса конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности. Ёмкость конденсаторов определяется по формуле

$$C = \frac{P_{\text{н}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{Г}} + \operatorname{tg} \varphi_{\text{Н}})}{2\pi f m U_{\text{с}}^2}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{н}}$  – мощность, отдаваемая генератором;  $U_{\text{с}}$  – напряжение на конденсаторах;  $f$  – частота тока;  $\varphi_{\text{Г}}$  и  $\varphi_{\text{Н}}$  – углы сдвига фаз между напряжениями и токами генератора и нагрузки;  $m$  – число фаз.

Мощность конденсатор АГ

$$Q_{\text{с}} = \frac{m U_{\text{с}}^2}{X_{\text{с}}} = 2\pi f m C U_{\text{с}}^2. \quad (4)$$

Важно то, что АГ имеют следующие основные преимущества в сравнении с СГПМ: не требуют сложных систем защит при коротких замыканиях (они развозбуждаются в этом режиме) и при включение на параллельную работу; незначительная зависимость характеристик от температуры.

Широкие перспективы в создании СГПМ с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками открывает промышленное освоение производства магнитотвердых материалов интерметаллических соединений редкоземельных элементов с кобальтом, используемых для постоянных магнитов систем возбуждения СГПМ. Использование редкоземельных материалов улучшает массогабаритные показатели генераторов. Однако сдерживающим фактором в применении указанных материалов является их относительно высокая стоимость.

Использование энергии ветра посредством ВЭУ связано с определенными проблемами. Неравномерность и непостоянство ветрового потока приводит к значительному изменению частоты вращения ветроколеса ВЭУ (в пределах 40-90 об/мин) и, соответственно, колебаниям напряжения, частоты тока и отдаваемой мощности. Кроме того, сброс или подключение нагрузки также являются дестабилизирующими факторами. Таким образом, обеспечение требуемого качества электроэнергии в основном и определяет конкурентоспособность ВЭУ [4].

Непостоянство ветрового потока требует в составе ВЭУ применения буферного устройства, в качестве которого обычно используется аккумуляторные батареи (АБ). Поскольку АБ имеет напряжение кратное 12 В, то генератор ВЭУ должен выполняться на соответствующее напряжение постоянного тока. Для стабилизации генерируемого напряжения и обеспечения оптимального режима заряда АБ в составе системы предусмотрен регулятор напряжения. Получение напряжения переменного тока осуществляется с помощью автономного инвертора (АИ), содержащего повышающий трансформатор (рисунок 1).

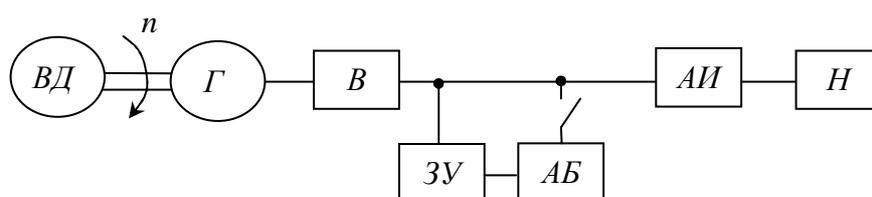


Рисунок 1 – Структурная схема ВЭУ: ВД – ветродвигатель; Г – генератор переменного тока; В – выпрямитель; АИ – автономный инвертор; ЗУ – зарядное устройство; АБ – аккумуляторные батареи; Н – нагрузка

АБ характеризуется возможностью отдавать значительную мощность, однако запастись электроэнергией она способна только на уровне мощности, определяемой величиной зарядного тока. Следовательно, избыток мощности ВЭУ над уровнем потребления нагрузкой и АБ в большин-

стве случаев не может использоваться полезно. «Лишняя» мощность расходуется на увеличение частоты вращения ветродвигателя при снижении КПД ветроустановки.

Несоответствие мощности ветрового потока и мощности потребителей электроэнергии определяется переменным характером графика нагрузок и нестабильностью ветрового потока.

Утилизация электроэнергии ВЭУ, которая не может быть потреблена нагрузками в конкретный момент времени, может производиться автоматически управляемой балластной нагрузкой, подключаемой к генератору электроэнергии параллельно потребителям. В качестве балластных нагрузок используются, как правило, электронагревательные приборы.

Согласовать зарядную мощность АБ с избытком мощности ВЭУ позволяет регулирование количества АБ, а, следовательно, и ёмкости АБ с помощью соответствующего управляющего устройства, которое подключается между входом АИ и АБ (рисунок 2).

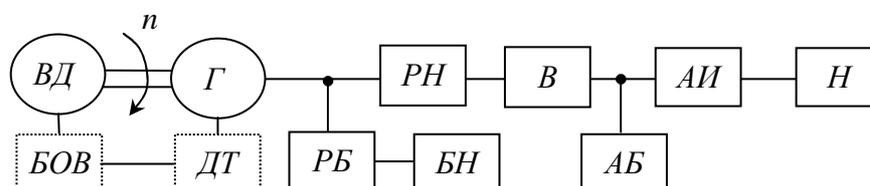


Рисунок 2 – Структурная схема ВЭУ с автобалластным регулированием

В основном балластные нагрузки включаются через полупроводниковый регулятор мощности на выход синхронного или асинхронного генератора параллельно полезной нагрузке ВЭУ. Балластная нагрузка является дополнительной к полезной нагрузке ВЭУ.

В зависимости от типа ВЭУ, характера изменения мощности ветровой энергии, закона регулирования балластной мощности  $P_B$ , рассмотренная система может решать различные задачи, связанные с генерированием электроэнергии. К примеру, автобалластное регулирование может обеспе-

чить стабилизацию выходного напряжения генератора по величине и частоте в условиях изменяющейся полезной нагрузки  $P_H$  или изменяющейся мощности генератора  $P_G$ , и мощности ветрового потока.

В качестве параметров регулирования мощности балласта целесообразно использовать мощность, потребляемую полезной нагрузкой, и скорость ветра, определяющую мощность ветроколеса. Формирование и стабилизация напряжения в таких системах осуществляется с помощью выпрямительно-инверторных преобразователей. Такие преобразователи, кроме того, позволяют эффективно использовать резервные источники электроэнергии, которыми являются АБ.

В настоящее время применяются два типа полупроводниковых регуляторов с балластной нагрузкой: регуляторы с набором по мощности балластной нагрузки и фазорегулируемые устройства, регулирующие мощность тепловой нагрузки.

В первого типа регуляторов коммутация полупроводниковых приборов осуществляется естественным образом, однако недостатком таких схем является наличие большого числа управляемых полупроводниковых приборов, что усложняет и естественно понижает показатели надёжности системы регулирования. Целесообразно полупроводниковые коммутаторы применять в ВЭУ небольшой мощности – до 10 кВт [1].

Фазорегулируемые автобалласты лишены указанных недостатков, но вносят заметные искажения в форму кривых тока и напряжения генератора.

Стремление улучшить эксплуатационно-технические характеристики и точность регулирования автобалластных систем привело к созданию комбинированных схем регулирования, сочетающих принципы дискретного и фазового регулирования.

Расчёты показали, что для автономной ВЭУ, питающей бытовую нагрузку возможность увеличения выработки энергии при применении ав-

тобалластной нагрузки на 30 – 40%. При этом стоимость ВЭУ увеличится не более чем на 10 – 15% [5].

Перспективным направлением является применение непосредственных преобразователей частоты (НПЧ) в составе ВЭУ в качестве стабилизаторов напряжения и частоты тока. Это позволит повысить КПД ВЭУ за счёт упрощения конструкции редуктора (мультипликатора) [6].

Один из вариантов структурной схемы ВЭУ, выполненной с использованием НПЧ с естественной коммутацией (НПЧЕ) показан на рисунке 3. Генератор, нормально работает в диапазоне частоты вращения 750 – 1500 об/мин, выдает мощность на преобразователь в диапазоне частот 300 – 400 Гц. При этом, повышение частоты генерируемого тока может осуществляться разными способами: за счёт увеличения передаточного числа механического редуктора ВЭУ; за счёт увеличения числа пар полюсов генератора; за счёт комбинации рассмотренных выше способов. НПЧЕ преобразует эту мощность в выходную мощность с точно регулируемой фиксированной частотой 50 Гц. Г-образный LC-фильтр используется для обеспечения требуемого качества выходного напряжения.

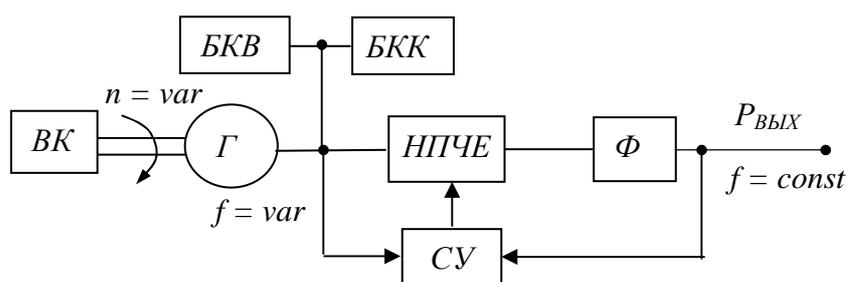


Рисунок 3 – Структурная схема ВЭУ на НПЧЕ: ВК – ветроколесо; Г – генератор; БКВ и БКК – блоки конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности нагрузки, соответственно; СУ – система управления; НПЧЕ – непосредственный преобразователь частоты с естественной коммутацией; Ф – выходной фильтр

Оригинальной системой генерирования мощности от ВЭУ является система, состоящая из АГ и НПЧ с регулируемым углом сдвига фаз на входе (НПЧР).

Если на статорные обмотки АГ 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 ВЭУ.

Особенность работы НПЧР, заключается в его способности изменять реактивную составляющую входного тока и, ее знак. НПЧР может быть использован 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 [4].

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 только 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 искусственной коммутацией. Конденсаторы нужны для подавления перенапряжений на входных выводах, которые при каждой коммутации образуются в результате быстрого изменения тока, проходящего через реактивное сопротивление рассеяния генератора. Кроме подав-

ления коммутационных перенапряжений конденсаторы возбуждения (для НПЧЕ дополнительно конденсаторы, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности нагрузки) 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.

Структурная схема ВЭУ, в которой используются АГ и НПЧР приведена на рисунке 4.

Если не принимать во внимание вопрос возбуждения генератора, то механизм управления этой системой оказывается идентичным тому, который используется для НПЧЕ. Возбуждение генератора и напряжение на входных выводах НПЧР регулируется путем сравнения фазных напряжений генератора с заданными и использования сигналов рассогласования для изменения фазы коммутирующих сигналов, обеспечивающих формирование кривых напряжений. Генератор коммутирующих сигналов является неотъемлемой частью системы импульсно-фазового управления.

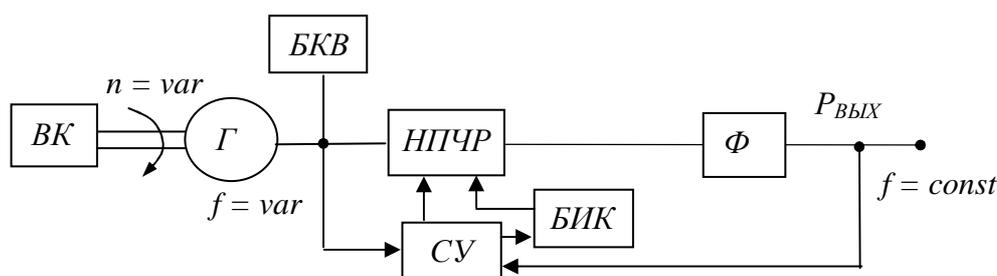


Рисунок 4 – Структурная схема ВЭУ на НПЧР: ВК – ветроколесо; Г – генератор; БКВ – блок конденсаторов возбуждения; СУ – система управления; НПЧР – непосредственный преобразователь частоты с регулируемым углом сдвига фаз на входе; БИК – блок искусственной коммутации; Ф – выходной фильтр

Основным достоинством НПЧЕ, применяемых в составе ВЭУ является относительно не сложная силовая схема и система управления, а недостатком – на входе НПЧЕ угол сдвига фаз постоянно отстающий, т.е.

преобразователь для АГ и СГПМ является активно-индуктивной нагрузкой, что требует повышенную ёмкость конденсаторов обеспечивающих его возбуждение.

Основным достоинством НПЧР, применяемых в составе ВЭУ является то, что на его входе ток опережает напряжение, а значит, преобразователь для АГ и СГПМ 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 (см. рисунок 4), 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.

Применение комбинированных (независимых) систем стабилизации напряжения и частоты АГ и СГПМ, также улучшает их эксплуатационно-технические характеристики [7, 8].

Таким образом, перспективным является направление применения бесконтактных генераторов электроэнергии АГ и СГПМ в составе ВЭУ и ВЭС в комплексе.

#### Список литературы

1. Григораш О.В. Возобновляемые источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов и др. Краснодар, 2012, с. 272.
2. Григораш О.В. Выбор оптимальной структуры системы автономного электро-снабжения / О. В. Григораш, С. А. Симоненко, А. М. Передистый и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2—7. № 8. С.31-33.
3. Григораш О.В. Автономные источники электроэнергии: Состояние и перспективы / О. В. Григораш, С. В. Божко, А. Ю. Попов и др. – Краснодар 2012. с. 174.
4. МОНОГРАФИЯ Григораш С.А.
5. Григораш О.В. К расчету экономической эффективности ветроэлектрических установок / О. В. Григораш, Р. А. Сулейманов, А. В. Квитко и др. // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2011. Т.1. № 33. С. 192-195.

6. Григораш О.В., Квитко А.В., Алмазов В.В. и др. Непосредственный трехфазный преобразователь частоты естественной коммутацией / Патент на изобретение RUS 2421867. 12.05.2010.

7. Григораш О. В. Стабилизатор напряжения и частоты ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, А. В. Квитко, Ю. М. Петренко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2010. Т.1. № 26. С. 140-143.

8. 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.

### References

1. Grigorash O.V. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenergii / O.V. Grigorash, Ju. P. Stepura, R. A. Sulejmanov i dr. Krasnodar, 2012, s. 272.

2. Grigorash O.V. Vybora optimal'noj struktury sistemy avtonomnogo jelektrosnabzhenija / O. V. Grigorash, S. A. Simonenko, A. M. Peredistyj i dr. // Mehanizacija i jelektifikacija sel'skogo hozjajstva. 2—7. № 8. S.31-33.

3. Grigorash O.V. Avtonomnye istochniki jelektrojenergii: Sostojanie i perspektivy / O. V. Grigorash, S. V. Bozhko, A. Ju. Popov i dr. – Krasnodar 2012. s. 174.

4. MONOGRAFIJA Grigorash SAJe

5. Grigorash O.V. K raschetu jekonomicheskoj jeffektivnosti vetrojelektricheskikh ustanovok / O. V. Grigorash, R. A. Sulejmanov, ju A. V. Kvitko i dr. // Trudy Kubansko-go gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. T.1. № 33. S. 192-195.

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

7. Grigorash O. V. Stabilizator naprjazhenija i chastoty vetrojenergeticheskoj ustanovki / O. V. Grigorash, A. V. Kvitko, Ju. M. Petrenko // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010. T.1. № 26. S. 140-143.

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