

УДК 620.075.8

UDC 620.075.8

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МАЛЫХ
ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**WAYS OF STABILIZATION THE ENERGY OF
SMALL HYDROPOWER PLANTS**

Винников Анатолий Витальевич
к.т.н., доцент, декан
9061870011@mail.ru

Vinnikov Anatoly Vitalyevich
Cand.Tech.Sci., senior lecturer, dean
9061870011@mail.ru

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

Попучиева Мария Александровна
студент, grigorasch61@mail.ru
*Кубанский государственный аграрный универси-
тет, Краснодар, Россия*

Popuchieva Maria Aleksandrovna
student, grigorasch61@mail.ru
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье раскрыты основные способы стабилизации напряжения генераторов малых гидроэлектростанций. Приведены структурные схемы их реализации и проведён анализ особенностей работы, достоинств и недостатков. Рассмотрены особенности работы функциональных схем стабилизаторов напряжения с дискретным балластом, с фазовым управлением и управлением по току нагрузки. Показано, что значительно улучшить характеристики малых гидроэлектростанций можно за счёт применения в их конструкции бесконтактных генераторов: асинхронных генераторов с емкостным возбуждением и синхронных генераторов с постоянными магнитами. Рассматривается функциональная схема стабилизатора напряжения, в конструкции которого имеется дополнительная обмотка подмагничивания, что позволяет упростить систему стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами, а также функциональная схема стабилизатора напряжения асинхронного генератора, выполненная с использованием повышающих трансформаторов, что значительно снижает массу конденсаторов обеспечивающих возбуждение генератора и компенсацию реактивной мощности нагрузки. Рассмотренные в статье способы и устройства стабилизации напряжения генераторов позволят повысить эффективность предпроектных работ по созданию новых устройств стабилизации параметров электроэнергии генераторов малых гидроэлектростанций с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками

The article deals with the basic methods of stabilizing voltage generators for small hydroelectric power plants. It shows a block diagram of the implementation and analysis of the characteristics of the work; it reveals the advantages and disadvantages. The authors explain the features of the work of the functional circuits voltage regulators with discrete ballast, with phase control and management of the load current. It is shown, that to improve the performance of small hydroelectric power plants considerably we have to use contactless generators in their construction: asynchronous generators with capacitive excitation and synchronous generators with permanent magnets. The functional scheme of the voltage regulator, the construction of which has an additional field winding, simplifies the system voltage stabilization of the synchronous generator with permanent magnets, as well as a functional scheme of an asynchronous generator voltage regulator, made using step-up transformers, which significantly reduces the weight of the capacitors providing excitation of the generator and compensation of reactive power load. We have discussed the methods and devices for stabilization of voltage generators which will improve the effectiveness of pre-design work on the creation of new devices of stabilization of parameters of electric power generators for small hydroelectric power plants with improved operational and technical specifications

Ключевые слова: МАЛАЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ, СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ, АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Keywords: SMALL HYDROPOWER PLANT, METHODS OF VOLTAGE REGULATION, INDUCTION GENERATOR, SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS

При проектировании малых гидроэлектростанций (МГЭС), в особенности в районах предгорных и горных рек, где напор воды не всегда устойчив, важным является вопрос стабилизации напряжения генераторов электроэнергии [1, 8, 12].

В настоящее время известны следующие способы стабилизации параметров генерируемой электроэнергии МГЭС:

– поддержание стабильной частоты вращения гидротурбины путём воздействия на элементы гидротехнического оборудования (рисунок 1, а);

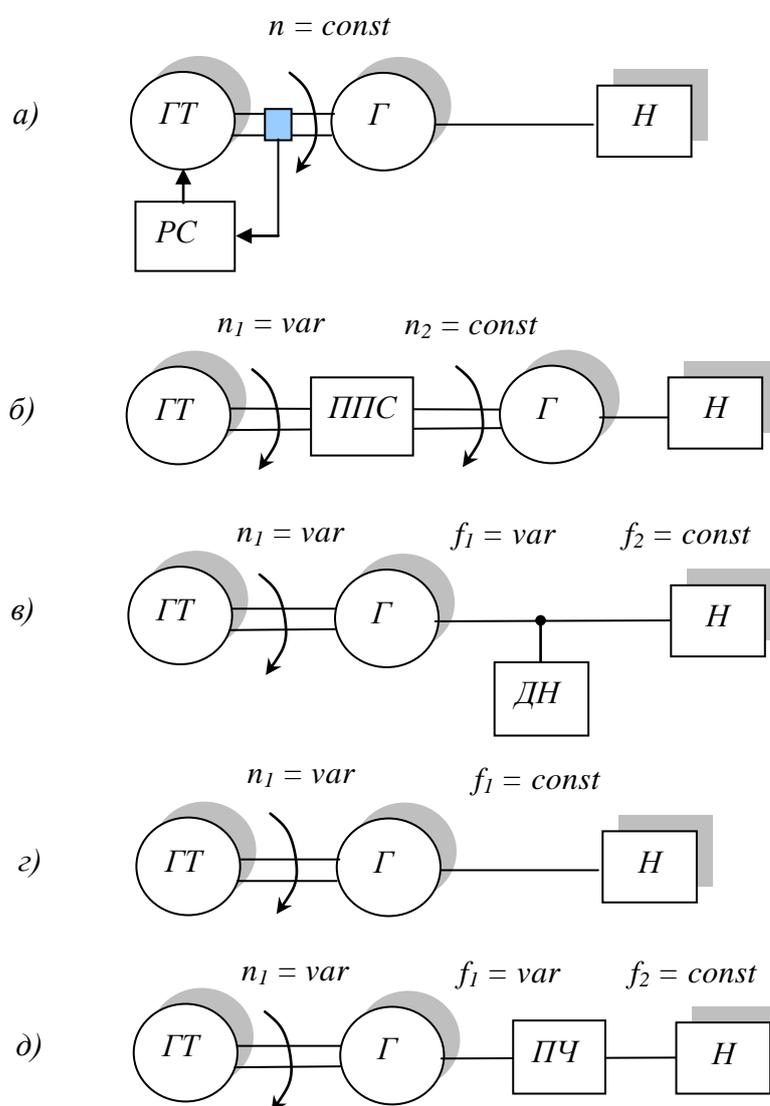


Рисунок 1 – Способы стабилизации параметров электроэнергии МГЭС: $ГТ$ – гидротурбина; $Г$ – генератор электроэнергии; $Н$ – нагрузка; $РС$ – регулятор скорости; $ППС$ – привод постоянной скорости; $ДН$ – дополнительная нагрузка; $ПЧ$ – преобразователь частоты

– поддержание стабильной частоты вращения гидротурбины путём установки между турбиной и генератором привода постоянной скорости (рисунок 1, б);

– поддержание стабильной частоты тока и напряжения путём размещения между генератором и нагрузкой дополнительной регулируемой нагрузкой (рисунок 1, в)

– поддержание стабильной частоты тока и напряжения с помощью специальных конструкций генераторов электроэнергии (рисунок 1, г);

– поддержание стабильной частоты тока и напряжения с использованием статических преобразователей частоты (рисунок 1, д).

Кроме рассмотренных способов стабилизации генерируемой электроэнергии МГЭС, могут применяться их комбинации в различных сочетаниях. Первые два способа стабилизации параметров электроэнергии предполагают использование различных гидро- и электромеханических регуляторов. Реализация этих способов усложняет конструкцию и снижает показатели надёжности МГЭС. Третий способ также имеет недостаток и, прежде всего, по показателям КПД. Четвёртый и пятый способы, позволяют упростить механическую конструкцию МГЭС, в том числе применить нерегулируемую гидротурбину, и значительно улучшить её эксплуатационно-технические характеристики.

Основная проблема при проектировании МГЭС заключается в оптимизации её структуры с целью получения наилучших значений эксплуатационно-технических характеристик. Важно то, что усложнение электрической части МГЭС приводит к упрощению гидротехнического оборудования [2, 10, 11].

В настоящее время широко применяется способ стабилизации напряжения МГЭС, включением на выходе генератора электроэнергии регулируемой балластной нагрузки. В качестве балластной нагрузки, как правило, применяется некоторая полезная нагрузка (электрообогреватели, ос-

ветительная нагрузка и т.п.). Поэтому данный способ стабилизации заключается в автоматическом перераспределении электрической мощности между потребителями, часть из которых допускает снижение величины напряжения источника питания или его отключение.

Достоинством данного способа является его хороший экономический эффект, заключающийся в возможности исключения механической системы стабилизации частоты вращения гидротурбины, а стабилизацию частоты тока осуществлять статическими полупроводниковыми стабилизаторами. Стоимость автоматической балластной нагрузки составляет около 20% от стоимости механического регулятора гидротурбины.

Применение силовых электронных приборов в составе автоматической балластной нагрузки повышает быстродействие системы стабилизации и защиты от аварийных режимов работы [3, 9, 12].

Важно, что рассмотренный способ и устройства стабилизации хорошо сочетаются с регулированием выходных параметров бесконтактных генераторов: асинхронных генераторов с емкостным возбуждением (АГ) и синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) [4, 5].

Ещё один простой способ стабилизации параметров генераторов МГЭС заключающийся в отключении части нагрузки при уменьшении энергии, подводимой к гидротурбине. На рисунке 2 приведена функциональная схема МГЭС с дискретным балластом. При изменении величины и характера полезной нагрузки H система управления $СУ$ направляет управляющие сигналы на тиристорные ключи $K1 - K3$, которые подключают одну или несколько ступеней балластной нагрузки $БН1 - БН3$. Коммутация тиристорных ключей осуществляется естественным образом. В результате изменяется тормозной момент генератора электроэнергии и происходит компенсация отклонения момента турбины, и частота вращения вала n стабилизируется.

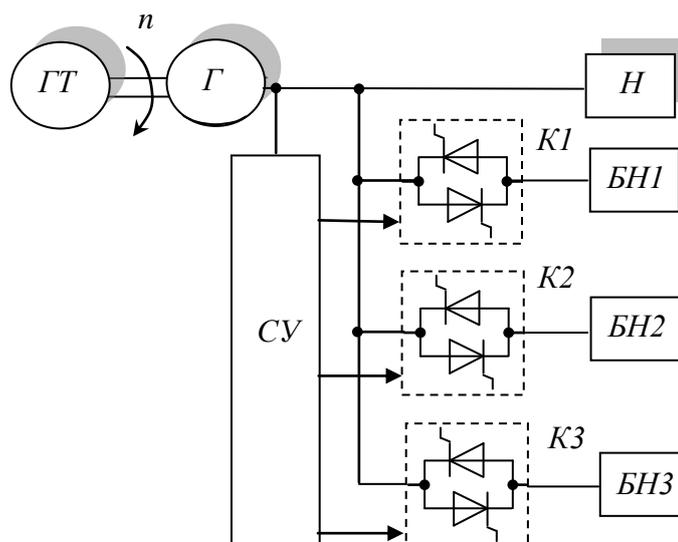


Рисунок 2 – Функциональная схема МкГЭС с дискретным балластом

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость использования большого числа управляемых полупроводниковых приборов, что усложняет систему управления и понижает надёжность её работы соответственно.

Функциональная схема МГЭС с фазовым управлением (рисунок 3) имеет лучшие показатели надёжности, но относительно низкие показатели качества электроэнергии (искажается форма фазных токов и напряжений).

Для стабилизации частоты переменного тока МГЭС необходимо так изменять мощность основной нагрузки, чтобы частота вращения вала оставалась неизменной при колебаниях полезной нагрузки и энергии рабочего потока воды. Регулировать величину балластной нагрузки в этом случае целесообразно по отклонению частоты переменного тока от номинального значения. При изменении энергии рабочего потока воды, поступающего на турбину, с помощью частотно-регулируемого балласта невозможно добиться стабилизации величины выходного напряжения генератора. Для этого необходим дополнительный канал регулирования напряжения генератора, который разрабатывается в зависимости от типа генератора, условий его работы и требований к точности стабилизации.

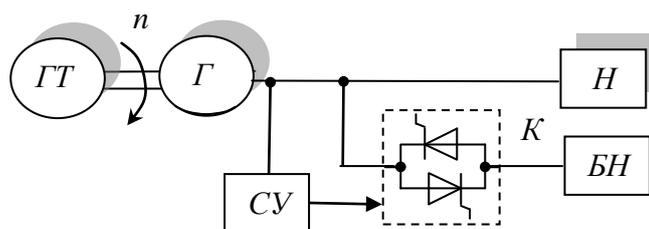


Рисунок 3 – Функциональная схема МГЭС с фазовым управлением

Когда напор и расход воды гидротурбины не меняется, что характерно для МГЭС рукавного типа, то для стабилизации достаточно стабилизировать мощность, потребляемую основной нагрузкой. Регулирование балласта здесь целесообразно осуществлять по мощности основной нагрузки, по активной составляющей тока генератора, а также по полному току, если характер нагрузки генератора изменяется в небольших пределах. Благодаря постоянству и равенству мощности, потребляемой нагрузкой, и мощности, развиваемой гидротурбиной, МГЭС работает в статическом режиме, который легко может быть оптимизирован по энергетическим показателям.

Кроме того, стабилизация напряжения МГЭС по нагрузке позволяет компенсировать несимметрию нагрузки генератора. На рисунке 4 приведена функциональная схема МГЭС с управлением по току нагрузки.

Фазные токи нагрузки (I_A, I_B, I_C) измеряются регуляторами тока PT_A, PT_B, PT_C и, если они отличаются от номинальных значений, то токи балластной нагрузки (I_{BA}, I_{BB}, I_{BC}) изменяются таким образом, чтобы ток каждой фазы генератора оставался неизменным.

Постоянные значения общей нагрузки и частоты вращения вала генератора определяет стабильность его выходного напряжения, что позволяет упростить схему системы стабилизации за счёт исключения канала регулирования напряжения. В этом случае конструкция МГЭС на базе бесконтактных генераторов существенно упрощается.

Система регулирования балластной нагрузки по нагрузочному току обеспечивает высокое качество выходного напряжения в переходных режимах, вызванных коммутацией в цепи нагрузки. Однако, статическая устойчивость системы управления существенно зависит от системы регулирования возбуждения генератора.

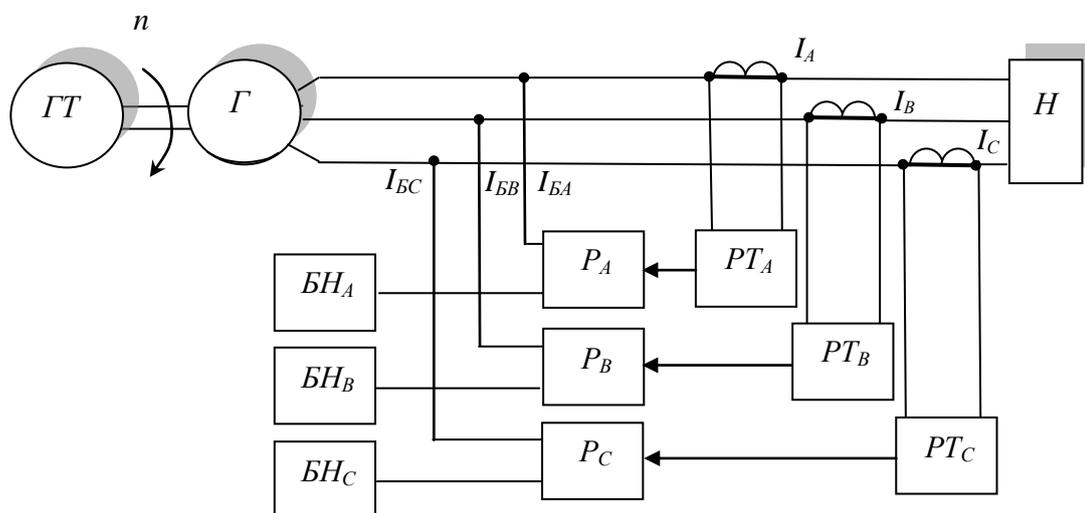


Рисунок 4 – Функциональная схема МГЭС с управлением по току нагрузки

Создание комбинированных систем стабилизации параметров генерируемой электроэнергии в которой объединены токовый и частотный способы регулирования мощности, рассеиваемой на балластных нагрузках, улучшает регулировочные характеристики системы при нестабильных параметрах энергоносителя, несимметричных режимах работы нагрузки и в тяжёлых пусковых режимах. Однако, система стабилизации параметров выходного напряжения генератора значительно усложняется.

Для повышения эффективности МГЭС необходимо их объединение в автономную систему электроснабжения, включающую несколько станций, работающих параллельно, что позволяет повторно использовать энергию водяного потока, а увеличение числа потребителей выравнивает график нагрузки электрической системы.

Важно то, что условия включения и устройства, обеспечивающие параллельную работу АГ и СГПМ значительно проще [4, 9, 12].

При объединении нескольких МГЭС в автономную систему возникает дополнительная проблема равномерной загрузки гидротурбин, работающих на общую нагрузку. На крупных ГЭС нагрузку между агрегатами обычно распределяют с помощью регулирования мощности приводных двигателей. В МГЭС с нерегулируемыми турбинами стабилизировать рабочий режим энергосистемы возможно только со стороны нагрузки. Здесь широкие перспективы раскрываются перед непосредственными преобразователями частоты (НПЧ), которые могут выполнять функцию двух стабилизаторов: напряжения и частоты тока [6, 7, 12].

Разработка универсальной конструкции МГЭС, способной работать как в автономном режиме, так и в составе автономных систем, даёт несомненные преимущества для более гибкого выбора возможного варианта системы электроснабжения с учётом рельефа местности, типа и характера нагрузок, требований к качеству электроэнергии и т. п.

Один из эффективных способов стабилизации напряжения СГПМ является применение в его конструкции дополнительной обмотки подмагничивания (рисунок 5).

В состав системы стабилизации напряжения входят: измерительный элемент *ИЭ*, состоящий из схемы выпрямления, регулировочного реостата R_p , конденсаторного фильтра C и стабилитрона $VD1$, выполняющего функции источника опорного напряжения; исполнительный орган *ИО*, в качестве которого используется обмотка подмагничивания $ОП$ и выпрямитель на диодах $VD2$ и $VD3$ с трансформатором напряжения TV ; усилитель $У$, выполненный на базе магнитного усилителя $МУ$ с рабочей обмоткой W_p и обмоткой управления W_y .

В измерительном элементе *ИЭ* происходит сравнение напряжения конденсатора C , которое пропорционально напряжению генерато-

ра, с опорным напряжением стабилитрона $VD1$. Напряжение на выходе измерительного элемента определяется как разность двух напряжений

$$U_{ИЭ} = U_C - U_{VD1}. \quad (1)$$

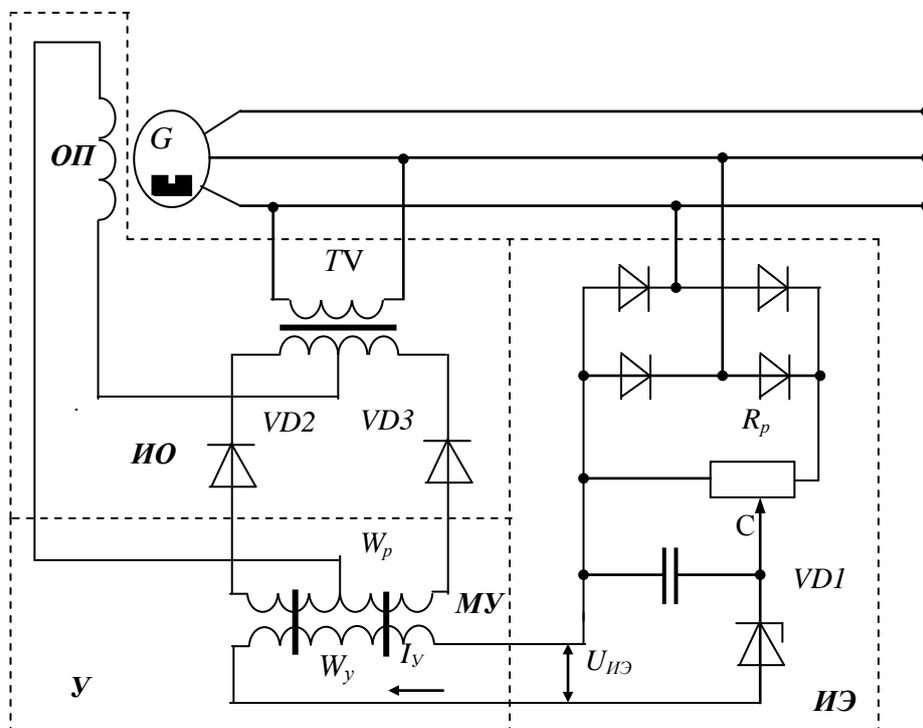


Рисунок 5 – Функциональная схема стабилизатора напряжения СГПМ

Если величина напряжения $U_C > U_{VD1}$, то в обмотке управления магнитного усилителя MU увеличится ток управления I_y , увеличится значение тока в рабочей обмотке усилителя, а, следовательно, и в обмотке подмагничивания. При этом магнитная проницаемость спинки статора и рабочий магнитный поток генератора уменьшаются, соответственно и уменьшается и напряжение генератора G до номинального значения. Если же под действием нагрузки напряжение СГПМ уменьшается, то ток в обмотке подмагничивания OP будет автоматически уменьшаться, а напряжение генератора будет увеличиваться.

На рисунке 6 приведена функциональная схема стабилизатора напряжения АГ, выполненная на повышающих трансформаторах.

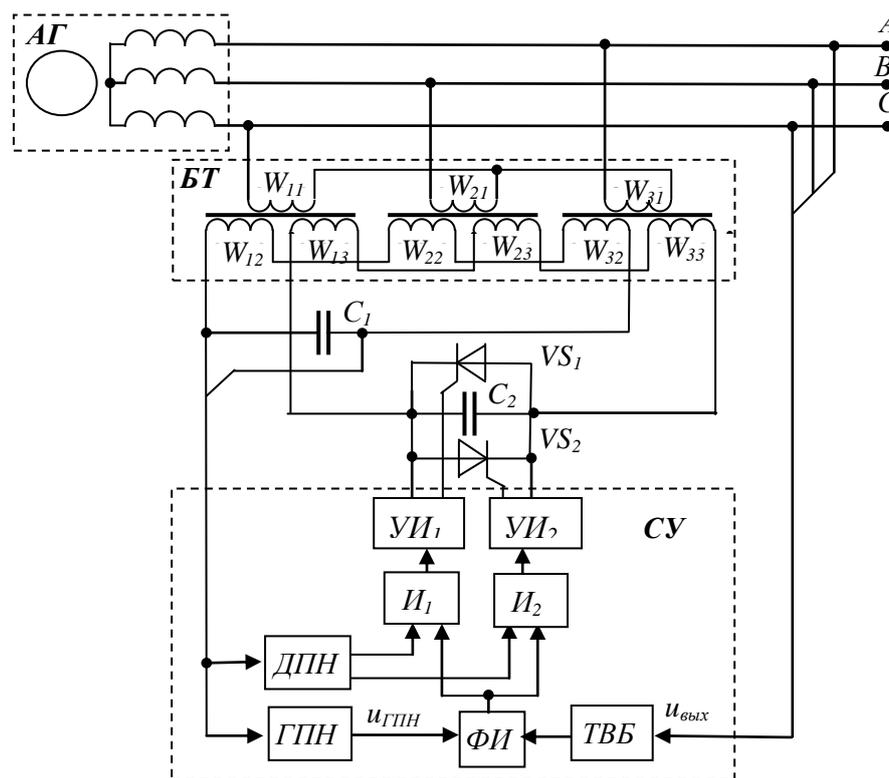


Рисунок 6 – Функциональная схема стабилизатора напряжения АГ на повышающих трансформаторах

В состав системы стабилизации напряжения АГ входят: блок трансформаторов *BT*, содержащий три однофазных повышающих трансформатора, первичные обмотки которых W_{11} , W_{21} и W_{31} подключены к выходу трехфазного генератора *АГ*. Первая группа вторичных обмоток однофазных трансформаторов W_{12} , W_{22} и W_{32} подключена к блоку конденсаторов возбуждения C_1 , а вторая группа их вторичных обмоток W_{13} , W_{23} и W_{33} подключена параллельно к блоку конденсаторов компенсации реактивной мощности C_2 и к встречно-параллельно соединенным тиристорам VS_1 и VS_2 . Входы системы управления устройством *СУ*, соединены с выходом *АГ* и выводами блока конденсаторов возбуждения C_1 , а её выход соединён с управляющими входами тиристоров VS_1 и VS_2 . Система управления состоит из трансформаторно-выпрямительного блока *ТВБ*, формирователя импульсов *ФИ*, генератора пилообразного напряжения *ГПН*, датчика по-

лярности напряжения ДПН, логических элементов И (I_1 и I_2), усилителя импульсов $УИ_1$ и $УИ_2$.

При протекании тока по первичным обмоткам однофазных повышающих трансформаторов BT , в первой и во второй группах вторичных обмотках W_{12} , W_{22} , W_{32} и W_{13} , W_{23} , W_{33} соответственно, индуцируется трехфазная система напряжений. Так как две вторичные обмотки в первой группе W_{12} и W_{22} , и во второй W_{13} и W_{23} соединены согласно, а третья обмотка первой группы W_{32} и во второй W_{33} включены встречно двум другим соответственно, напряжения на блоках конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности будут определяться по формулам

$$\bar{U}_{C1} = \bar{U}_{W12} + \bar{U}_{W22} + \bar{U}_{W32}, \quad (2)$$

$$\bar{U}_{C2} = \bar{U}_{W13} + \bar{U}_{W23} + \bar{U}_{W33}, \quad (3)$$

где $\bar{U}_{W12}, \bar{U}_{W22}, \bar{U}_{W32}$ и $\bar{U}_{W13}, \bar{U}_{W23}, \bar{U}_{W33}$ – векторы напряжений на выводах вторичных обмоток повышающих трансформаторов.

Под действием напряжения U_{C1} по блоку конденсаторов возбуждения C_1 будет протекать ток, который, трансформируясь в первичные обмотки повышающих трансформаторов, протекает также по статорным обмоткам AG , обеспечивая возбуждение генератора.

При подключении нагрузки к выводам A, B, C генератора AG стабилизация напряжения осуществляется за счёт изменения величины емкостного тока, протекающего через блок конденсаторов конденсатор C_2 .

Процесс стабилизации напряжения AG происходит следующим образом. При положительной полуволне напряжения на блоке конденсаторов возбуждения C_1 срабатывает логический элемент I_1 и сигнал управления через усилитель импульсов $УИ_1$ поступает на управляющий электрод тиристора VS_1 , при отрицательном полуволне напряжения на блоке конденсаторов возбуждения C_1 срабатывают соответственно элементы I_2 и $УИ_2$ и управляющий сигнал поступает на управляющий электрод тиристора VS_2 .

Если, к примеру, напряжение на выходе АГ уменьшится, тогда уменьшится напряжение постоянного тока на выходе *ТВБ* и увеличится угол управления тиристорами VS_1 и VS_2 , что приведет к уменьшению времени открытого состояния тиристоров VS_1 и VS_2 и увеличению емкостного тока в статорной обмотке АГ и, как следствие, к повышению напряжения на его выходах.

Таким образом, рассмотренные способы и устройства стабилизации напряжения генераторов позволят повысить эффективность предпроектных работ по созданию новых устройств стабилизации параметров электроэнергии генераторов МГЭС с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками.

Список литературы

1. Григораш О.В., Коваленко В.П., Воробьев Е.В., Власов А.Г. Перспективы возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае // Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2012. – № 39 (06). – С.123 –126.
2. Григораш О.В., Степура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. – Краснодар, 2012. С. – 272.
3. Богатырев Н.И., Григораш О.В., Курзин Н.Н. и др. Преобразователи электрической энергии: основы теории, расчета и проектирования. – Краснодар, 2002. – С. 358.
4. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы: Монография. – Краснодар: ВУЦ ВВС. – 2012. – 174 с.
5. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения // Электротехника – 2002. – № 1. – с.22 – 26.
6. Атрощенко В.А., Григораш О.В. Непосредственные преобразователи частоты с улучшенными техническими характеристиками для систем автономного электроснабжения // Электротехника – 1997. – № 11. – с.56 –60.
7. 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.
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.
9. Григораш О.В., Степура Ю.П., Квитко А.В. Структурно-параметрический синтез автономных систем электроснабжения // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 71-75.
10. 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.

11. 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.

12. 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., Kovalenko V.P., Vorob'ev E.V., Vlasov A.G. Perspektivy vozobnovljaemyh istochnikov jelektrojenergii v Krasnodarskom krae // Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2012. – № 39 (06). – S.123–126.

2. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Sulejmanov R.A. i dr. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenergii. – Krasnodar, 2012. S. – 272.

3. Bogatyrev N.I., Grigorash O.V., Kurzin N.N. i dr. Preobrazovateli jelektricheskoj jenergii: osnovy teorii, rascheta i proektirovanija. – Krasnodar, 2002. – S. 358.

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

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

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

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

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

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

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

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

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