

другие методы требуют точных уравнений к моделям реального поведения, методы нечеткой логики могут приспособлять неоднозначности реально-го человеческого языка к логике.

Для использования нечеткой логики при управлении объектами применяются нечеткие контроллеры. Нечеткий контроллер формируется из трех шагов:

1. **ФАЗИФИКАЦИИ** – включает в себя создание функции членства, описывающего входные и выходные переменные. Каждая входная переменная нечеткого контроллера описывается термами традиционной логики, число которых зависит от необходимой точности описания процесса. Самый распространенный вариант это 5 термов (отрицательное большое, отрицательное среднее, нормальное, положительное среднее, положительное большое).
2. **FUZZY ИНТЕРФЕЙСА** – содержит базу правил, основанных на опыте инженера. Нечеткий контроллер принимает решения и генерирует выходные величины, по правилу:  
**IF** (условие1) **and** (условие2) **then** (действие).
3. **Фундаментальное заключение** основывается на способе *modus ponens*. Цель состоит в том, чтобы

генерировать логические заключения даже для правил с многократными априорными условиями и конфликтами правил.

4. **ДЕФАЗИФИКАЦИИ** – переводит лингвистический результат снова в реальную величину, представляющую текущую величину управляющей переменной или в данном случае определяет насколько верна определенная причина для того или иного случая.

В результате работы нечеткого контроллера компьютер выдает логическое заключение с указанием причины нарушения нормального хода того или иного процесса или тогда, когда процесс в норме, но желательны рекомендации по улучшению качества продукции. Результаты этого вывода предоставляются в виде экранных форм заданного формата.

Таким образом, на виртуальной панели в реальном масштабе времени отображается весь технологический процесс изготовления кабельных изделий. Также предусмотрена возможность контроля любого конкретного параметра кабеля при помощи многооконного режима. Использование нечеткой логики уже на ранних стадиях позволяет отслеживать нарушения производственного процесса и корректировать действия оператора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарле Д.Е. Зарождение отечественной кабельной техники // Вопросы истории науки и техники. – 1991. – № 3. – С. 47–53.
2. Жарков Ф.П., Каратаев В.В., Никифоров В.Ф., Панов В.С. Использование виртуальных инструментов LabVIEW. – М.: Радио и связь, 1999. – 268 с.
3. Фролов Д.Н., Свендровский А.Р., Гольцеймер А.А., Гладышев Ю.Г. Опыт разработки устройства бесконтактного измерения диаметра кабельных изделий // Электротехника. – 1991. – № 3. – С. 26–28.
4. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации. – М.: Машиностроение, 1975. – 186 с.

УДК 621.311

## РЕГУЛЯТОР БАЛЛАСТНОЙ НАГРУЗКИ АВТОНОМНОЙ МИКРОГЭС

Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов

Томский политехнический университет  
E-mail: serob99@mail.ru

*Представлены результаты исследований переходных и установившихся режимов работы автономных систем электроснабжения, использующих энергию малых водотоков, с автобалластными системами стабилизации напряжения. Предложена принципиальная электрическая схема регулятора балластной нагрузки автономной микроГЭС, обеспечивающая высокое качество стабилизации выходных электрических параметров станции. Приведены результаты лабораторных и промышленных испытаний предложенного устройства, даны его основные технические характеристики.*

Экономическое состояние любого государства во многом определяется уровнем и эффективностью использования энергии. При этом устойчивое экономическое развитие страны возможно только при сохранении благоприятного состояния окружающей среды и природно-ресурсного потенциала в целях удовлетворения жизненных потребностей нынешнего и будущего поколений. В связи с этим приоритетным направлением развития современной

энергетики во всем мире является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Наиболее конкурентоспособной областью применения установок малой энергетики являются зоны децентрализованного электроснабжения, которые расположены, как правило, в отдаленных труднодоступных районах. Потребителями энергии в этих районах являются в большинстве случаев различные сельскохозяйственные объекты, небольшие

поселки, коттеджи и т.д. Установленная мощность электрических нагрузок составляет от единиц до нескольких десятков кВт, в составе нагрузок преобладают различные бытовые приборы. График нагрузки крайне изменчив, возможна значительная несимметричная загрузка по фазам источника питания. В настоящее время электрификация подобных объектов осуществляется в основном от автономных дизельных электростанций, а себестоимость электроэнергии может достигать 15...20 руб. за кВт·ч [1].

Значительно улучшить существующую ситуацию с электроснабжением потребителей, расположенных в децентрализованных зонах электроснабжения, позволяет использование микрогидроэлектростанций (микроГЭС). Энергия потоков воды занимает весьма существенное место в России по запасам и масштабам использования. Высокая энергетическая плотность потока воды и относительно стабильный временной режим в сравнении с другими видами ВИЭ, определяют самую низкую стоимость энергии, получаемой при помощи гидроэлектростанций, среди установок, использующих другие виды возобновляемых энергоресурсов.

По принятой классификации к ГЭС класса "микро" относят электрические станции с установленной мощностью до 100 кВт. Обычно микроГЭС содержит в своей конструкции такие обязательные элементы как гидротурбина, электромашинный генератор, система стабилизации выходного напряжения и ряд элементов, наличие и конструкция которых зависит от типа и особенностей станции: определенные гидротехнические сооружения, запорная арматура, балластные нагрузки и т.д. Как правило, микроГЭС не требуют возведения сложных гидротехнических сооружений – плотин. Поэтому их турбины устанавливаются либо в свободном потоке воды, либо в специальном напорном трубопроводе [2].

Отмеченные выше особенности размещения и эксплуатации автономных систем электроснабжения позволяют сформулировать основные требования, предъявляемые к микроГЭС:

- простота и надежность конструкции;
- высокое качество выходных электрических параметров в статических и динамических режимах;
- полностью автоматизированный режим работы;
- компенсация возможной несимметрии по фазам.

Из существующего многообразия конструкций микроГЭС наибольшее распространение получили бесплотинные станции, использующие напорный трубопровод. При постоянных параметрах потока воды и неизменной конфигурации рабочих лопастей частоту вращения гидротурбины можно регулировать путем изменения величины нагрузки. Для микроГЭС регулирование частоты энергоустановки наиболее просто осуществляется путем регулирования величины электрической нагрузки генератора. Конструкция турбины и других гидротехнических устройств в этом случае существенно упрощается.

Схема энергоустановки с автобалластным регулированием выходных параметров показана на рис. 1.

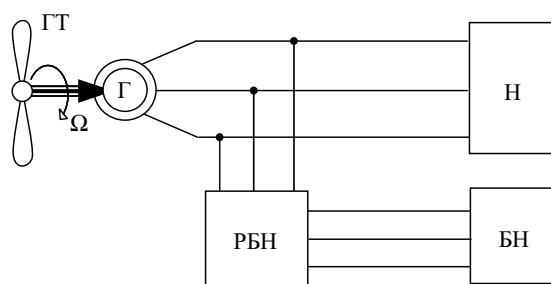


Рис. 1. Структурная схема стабилизации параметров микроГЭС автобалластного типа. ГТ – гидротурбина; Г – генератор; Н – полезная нагрузка; БН – балластная нагрузка; РБН – регулятор балластной нагрузки

Принцип автобалластного регулирования предельно прост: параллельно полезной нагрузке станции через регулятор подключается такая же по величине дополнительная, или балластная нагрузка. При изменении величины полезной нагрузки, величина балластной изменяется при помощи регулятора таким образом, чтобы суммарная нагрузка электрического генератора оставалась неизменной. В качестве балластной нагрузки обычно используют теплонагревательные элементы. И если учесть, что до 80 % электрической энергии автономный потребитель тратит на получение тепла, выделяемая на балластных сопротивлениях энергия также может быть полезно использована.

Достоинством данного способа регулирования является возможность стабилизации частоты вращения гидроагрегата при полном исключении из системы стабилизации электромеханических устройств. Замена их статическим регулятором весьма выгодна и с точки зрения улучшения характеристик микроГЭС и с точки зрения чисто экономической. Так, по данным [3, 4] стоимость регулятора автобалласта может составлять лишь 20 % от механического регулятора гидротурбины. Такая система регулирования может иметь высокое быстродействие, что положительно скажется на качестве выходного напряжения источника электропитания. Благодаря стабилизации частоты вращения приводного двигателя в рассматриваемых типах электроустановок могут применяться общепромышленные генераторы без большого запаса механической прочности ротора. Кроме того, автобалластный способ стабилизации хорошо сочетается с регулированием выходных параметров асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением, что позволяет применять в автономных микроГЭС как синхронные, так и асинхронные машины [5].

Существует несколько основных вариантов построения регулятора электрической нагрузки станции. Простейший из них предусматривает наличие ряда дозированных нагрузок, которые могут подключаться или отключаться в определенных сочетаниях с помощью тиристорного коммутатора [2].

Структурная схема микроГЭС с тиристорным коммутатором дискретных балластных нагрузок показана на рис. 2. При изменении величины полезной нагрузки  $H$  система управления СУ выдает управляющий сигнал на определенные тиристорные ключи  $K_1-K_n$ , которые коммутируют одну или несколько ступеней балластной нагрузки  $БН_1-БН_n$ . В результате происходит изменение величины тормозного момента генератора, компенсирующее отклонение момента турбины, и частота вращения стабилизируется. Кроме того, регулируется ток якорной обмотки генератора, что положительно сказывается на стабильности его напряжения.

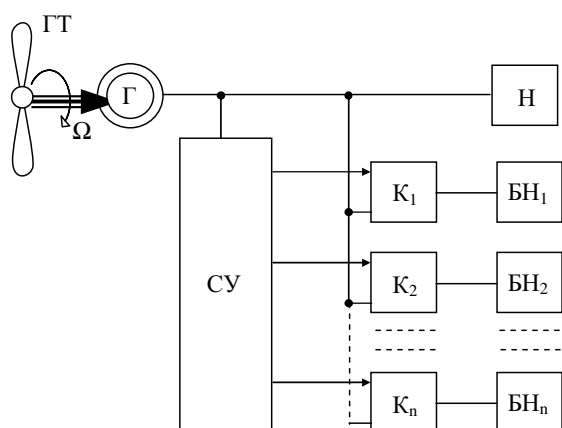


Рис. 2. Структурная схема микроГЭС с дискретным балластом

Коммутация вентиля коммутатора обычно осуществляется естественным образом, поэтому для ряда схемных решений тиристорных ключей характерно отсутствие искажений формы напряжения генератора. В этом заключается важнейшее достоинство автобалластных систем стабилизации с тиристорными коммутаторами.

Недостатком таких схем является необходимость использования большого числа управляемых вентилях, что усложняет и удорожает систему регулирования. Для достижения приемлемой точности стабилизации напряжения число дозированных ступеней балластной нагрузки выбирается не меньше чем  $n = 15$ . Кроме усложнения схемы, дробление балласта на ряд точно дозированных ступеней затрудняет полезное использование рассеиваемой на нем мощности. Поэтому тиристорные коммутаторы более целесообразны в установках небольшой мощности, в пределах нескольких кВт.

Устранить эти недостатки, при определенном ухудшении качества вырабатываемой электроэнергии, позволяет использование в регуляторах автобалласта схем с фазовым регулированием. Такие регуляторы требуют значительно меньшего количества тиристорных элементов для построения силовых схем и в наибольшей степени удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к микроГЭС – простота и надежность.

Структурная схема микроГЭС, система стабилизации которой построена на тиристорном преобразователе с фазовым регулированием мощнос-

ти балласта, показана на рис. 3. Система управления вентилями регулятора, обычно вертикального типа, формирует определенный угол управления тиристорами регулятора в зависимости от величины управляющего воздействия, характеризующего отклонение выходных электрических параметров установки относительно номинальных значений.

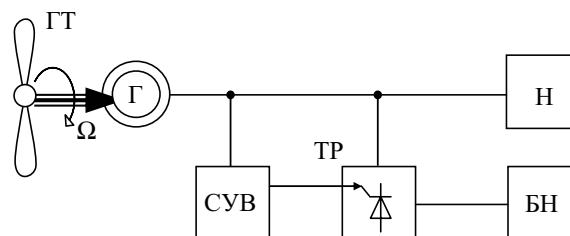


Рис. 3. Структурная схема микроГЭС с фазовым управлением. СУВ – система управления вентилями; ТР – тиристорный регулятор

Основным недостатком регуляторов автобалласта с фазовым регулированием по сравнению с тиристорными коммутаторами является искажение формы кривых фазных токов и напряжений генератора микроГЭС.

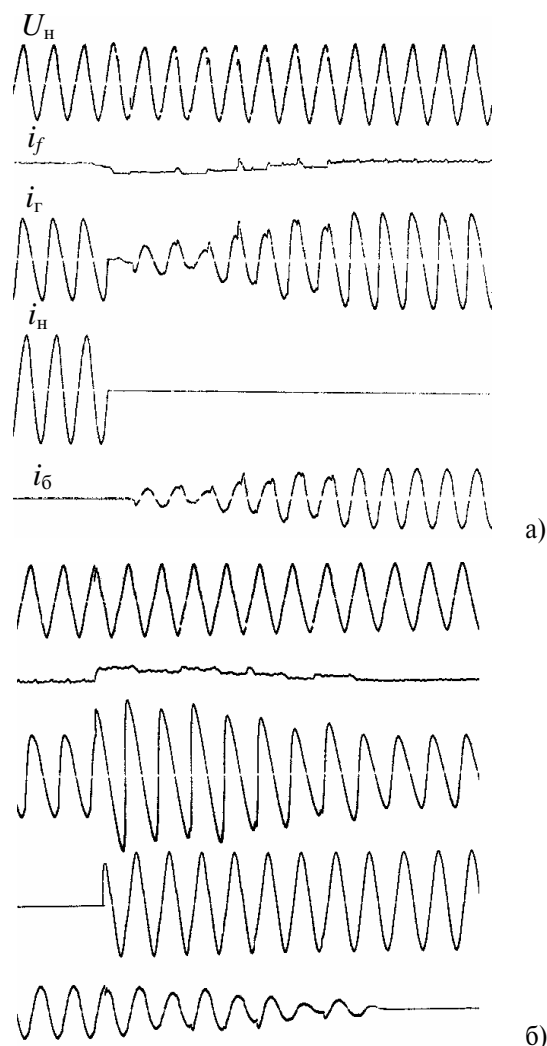
К параметрам автономной энергоустановки, по которым целесообразно осуществлять регулирование рабочих режимов гидроагрегата относятся, прежде всего, ток нагрузки и его составляющие: частота выходного напряжения и его величина.

Наиболее просто обеспечить баланс системы электроснабжения по активной мощности позволяет использование в качестве параметра регулирования частоты выходного напряжения генератора. Достоинствами данного способа регулирования является не критичность электроустановки к возможным изменениям энергии приводного гидродвигателя, что характерно для водотоков с сильно изменчивым во времени дебетом стока воды. К недостаткам следует отнести большую инерционность регулирования и невозможность компенсации возможной несимметрии нагрузки.

На рис. 4 представлены осциллограммы переходных процессов в микроГЭС с частотной системой стабилизации. Осциллограммы получены при лабораторных испытаниях образца микроГЭС мощностью 12 кВт с автобалластной системой стабилизации, реагирующей на изменение частоты выходного напряжения.

Представленные осциллограммы иллюстрируют действие стабилизирующих систем при внезапном изменении величины полезной нагрузки станции. Непосредственно после изменения рабочего режима частота вращения гидроагрегата, в силу его инерционности, измениться не может, и величина балластной нагрузки остается неизменной. Действия по стабилизации напряжения синхронного генератора осуществляет только канал регулирования возбуждения. Величина тока возбуждения достигает в этот момент предельных значений, так

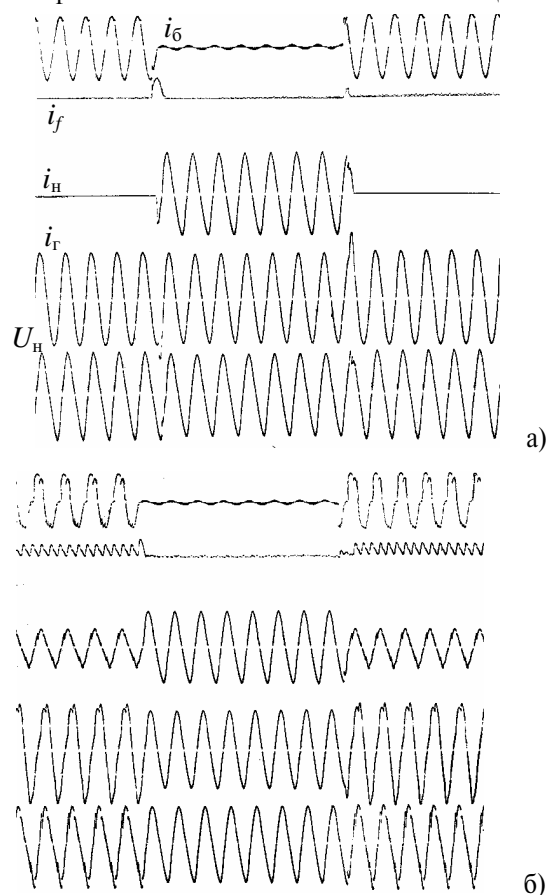
как автобалластная система еще не работает, и отклонения тока генератора от номинальной величины доходят до максимальных значений. Когда отклонение частоты выходного напряжения превысит зону нечувствительности регулятора, в работу вступает автобалластная система. Регулируемая балластная нагрузка значительно сокращает длительность переходного процесса в энергосистеме. Для реальных параметров синхронного генератора, работающего в составе микроГЭС, при оптимальных параметрах регулятора частоты, время переходного процесса составляет не более 0,1 с. При тех же параметрах генератора при работе от привода соизмеримой мощности, но без автобалластного регулирования, длительность электромеханического переходного процесса достигает 1...1,5 с [5, 6].



**Рис. 4.** Переходные процессы внезапного изменения 100 % нагрузки в микроГЭС с частотной системой стабилизации: а) сброс; б) наброс.  $U_n$  — напряжение на нагрузке;  $i_b$ ,  $i_r$ ,  $i_n$ ,  $i_g$  — токи возбуждения, генератора, нагрузки и балласта соответственно

Более перспективным вариантом построения стабилизирующей системы микроГЭС является выбор в качестве управляющего сигнала регулирования автобалласта тока полезной нагрузки генератора.

На рис. 5 изображены осциллограммы переходных процессов внезапного изменения нагрузки микроГЭС с токовой системой стабилизации.



**Рис. 5.** Переходные процессы внезапного изменения нагрузки в микроГЭС с токовой системой стабилизации: а) наброс и сброс 100 % нагрузки; б) наброс и сброс 50 % нагрузки.  $U_n$  — напряжение на нагрузке;  $i_b$ ,  $i_r$ ,  $i_n$ ,  $i_g$  — токи возбуждения, генератора, нагрузки и балласта соответственно

Осциллограммы показывают, что токовое автобалластное регулирование практически устраняет переходные электромагнитные процессы в якорной цепи генератора, вызванные внезапным изменением пассивной активно-индуктивной нагрузки. При этом обеспечивается практически мгновенное восстановление напряжения, а погрешность стабилизации определяется только статическими характеристиками микроГЭС. К тому же использование в качестве датчиков трансформаторов тока, установленных в каждой фазе генерируемого напряжения, позволяет легко построить регулятор, который практически устраняет любую возможную несимметричную загрузку фаз источника.

Эффективность и относительная простота схемных решений автоматических регуляторов балласта, реагирующих на величину тока полезной нагрузки, определили выбор именно этого типа автобалластной системы стабилизации. Принципиальная схема регулятора балластной нагрузки рассматриваемой микроГЭС показана на рис. 6. Работает схема следующим образом. Напряжение гене-

ратора  $U_r$  через первичные обмотки трансреакторов  $T1-T3$  поступает к нагрузке  $R_n$ , и к балластным нагрузкам  $R_6$ . Балластные нагрузки включены в звезду через силовой вентильный преобразователь, состоящий из тиристоров  $VS1-VS3$  и диодов  $VD1-VD3$ .

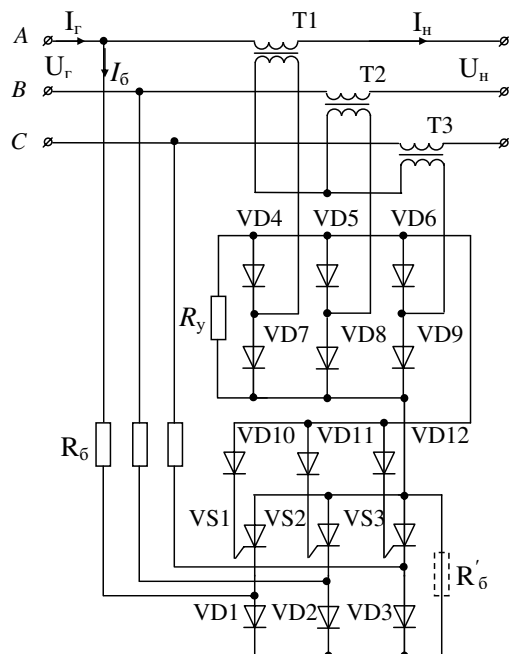


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема регулятора автобалластной нагрузки

Другим вариантом включения балластного сопротивления является включение его на выпрямленное напряжение преобразователя. Управление углами включения тиристоров  $VS1-VS3$  осуществляется с помощью управляющего выпрямителя  $VD4-VD9$ , питаемого от трансреакторов  $T1-T3$ . Выходное напряжение трансреакторов, пропорциональное фазным токам нагрузки  $I_n$ , выпрямляется и прикладывается к резистору управления  $R_y$ . Напряжение управления имеет запирающую полярность для диодов  $VD10-VD12$  поэтому, они могут открываться, включая соответствующие тиристоры  $VS1-VS3$  когда линейное напряжения генератора превысит величину управляющего напряжения на резисторе  $R_y$ . Следовательно, когда ток нагрузки равен нулю, напряжение управления также равно нулю и тиристоры  $VS1-VS3$  полностью открыты, обеспечивая максимум мощности, потребляемой балластными нагрузками  $R_6$  или  $R'_6$ . При номинальном токе нагрузки  $I_n$ , тиристоры  $VS1-VS3$  закрыты и балласт обесточен. Для любых промежуточных значений тока  $I_n$  в схеме осуществляется фазовое регулирование мощности балласта путем формирования углов управления тиристорами в результате сравнения на резисторе  $R_y$  линейного напряжения генератора с напряжением управления, пропорциональном току нагрузки станции.

Представленная схема регулятора использована в серии микроГЭС, мощностью 16 кВт, выпускаемой заводом "Тяжелэлектромаш" г. Бишкек с 1988 г. Конструкторскую проработку станции, включая

гидротурбину, осуществлял Проектно-конструкторский и технологический институт (ПКТИ) "Водоавтоматика и метрология" г. Бишкек. Система стабилизации напряжения и частоты автобалластного типа разработана в Томске и доведена до серийного производства в результате совместных усилий Томского политехнического университета (ТПУ) и ПКТИ "Водоавтоматика и метрология".

Испытания промышленных образцов микроГЭС с токовой автобалластной системой стабилизации, изготовленных в Кыргызстане, показали, что погрешность стабилизации выходных электрических параметров станции с одним автобалластным каналом регулирования лежит в следующих пределах:

- частота  $\pm 2\%$ ;
- напряжение  $\pm 10\%$ .

Коэффициент гармоник выходного напряжения станции не превышает 12 %.

При использовании в микроГЭС синхронного генератора со стандартным регулятором возбуждения погрешность стабилизации величины выходного напряжения составляет не более 5 %.

Удачное схемное решение регулятора балластной нагрузки позволило предложить эту же схему для микроГЭС, разрабатываемых ТПУ совместно с болгарской фирмой "Промышленная энергетика", г. София.

Особенностью этого договора являлось то, что он предусматривал создание технологии производства электроэнергии с помощью малых водотоков при максимальном использовании имеющегося гидро- и электротехнического оборудования общепромышленного назначения. В частности, в качестве турбин использовались наиболее распространенные и дешевые центробежные насосы. Исследования болгарской фирмы "Випом" подтвердили возможность эффективного использования центробежного насоса в турбинном режиме с небольшим снижением КПД. Более того, конструкция насоса позволяет в турбинном режиме снимать с него мощность, превышающую номинальную, а дополнительная обработка рабочего колеса насоса повышает его КПД в турбинном режиме практически до номинального значения. Эти особенности, а также широкая номенклатура насосов, позволяют строить целый ряд простых и экономичных микроГЭС.

Отличительной особенностью регулятора является то, что его схема содержит в основном набор стандартных электронных компонентов, и соответственно, его можно изготовить практически на любом предприятии электротехнической промышленности. Конструкция регулятора легко унифицируется, а его габариты и вес мало зависят от установленной мощности станции. В лаборатории кафедры электроснабжения промышленных предприятий ТПУ разработаны несколько модификаций регулятора балластной нагрузки микроГЭС, обеспечивающих более высокое качество стабилизации выходных электрических параметров станции по сравнению с базовой моделью.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Яворский М.И. Перспективы малой энергетики в Томской области // Ресурсы регионов России. — 2002. — № 4. — С. 25–32.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. — Томск: STT, 2001. — 120 с.
3. Пивоваров В.А. Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. — Л.: Машиностроение, 1973. — 273 с.
4. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 199 с.
5. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Выбор способа регулирования микрогидроэлектростанций с автобалластной нагрузкой // Гидротехническое строительство. — 1990. — № 7. — С. 33–35.
6. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микрогидроэлектростанции с тиристорным автобалластом // Промышленная энергетика. — 2000. — № 8. — С. 49–52.

УДК 621.313

**ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИНДУКТОРНО-КОМПРЕССИОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

А.И. Чучалин, И.О. Муравлев, И.А. Сафьянников

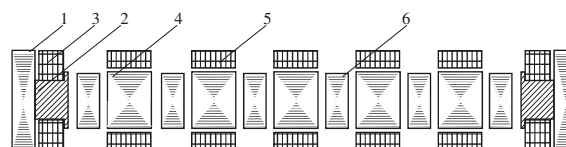
Томский политехнический университет  
E-mail: iom@cam.tpu.ru

*В системах питания электрофизических установок (источников накачки лазеров, установок высокого напряжения для питания ускорительной техники и т.д.) в качестве электромашинного источника импульсной мощности широко используют индукторно-компрессионные генераторы дискового типа. Такие генераторы позволяют получить частоту генерируемых импульсов 50..400 Гц при напряжении до 50 кВ и выше. В статье приведен принцип действия генератора, результаты исследования его работы на емкостную и активную нагрузки.*

С развитием новых технологий увеличивается число потребителей электроэнергии средней мощности  $\sim 10^4$  Вт, которые необходимо питать высоким переменным напряжением  $\sim 10^4$  В при частоте  $10^2 \dots 10^3$  Гц. Это автономные установки с активно-емкостным характером нагрузки, в том числе: мобильные озонаторные устройства для очистки воды и воздуха, установки по обеззараживанию воды, требующие компактных автономных источников электроэнергии, источники накачки лазеров, установки высокого напряжения для питания ускорительной техники и т.д. Для питания таких установок зачастую применяют электромашинные генераторы индукторного типа дисковой конструкции для обеспечения быстрого заряда конденсаторных батарей. Традиционно питание таких потребителей осуществляется за счет преобразования напряжения и частоты первичных источников электроэнергии, таких как промышленная сеть или автономный электромашинный генератор. Установки отвечают специальным требованиям по длительности импульсов и напряжению.

Генератор представляет собой электрическую машину, сочетающую достоинства компрессионных и индукторных генераторов [1–9]. Основные узлы и детали выполнены из электроизоляционных материалов, что дает возможность не ухудшая удельных энергетических характеристик значительно повысить выходное напряжение.

На рис. 1 представлено полюсное деление электромашинного индукторного генератора дискового типа.



**Рис. 1.** Полюсное деление генератора

Особенность конструкции состоит в том, что фазы статорной обмотки расположены на неподвижных дисковых модулях, которые зафиксированы в корпусе. Каждый дисковый модуль изолирован. Полюса – 4 с обмотками – 5 каждого модуля ориентированы по одной оси. По торцам машины находятся обмотки возбуждения – 3, расположенные на полюсах – 2. Магнитный поток машины направлен вдоль вала и замыкается по кольцевому магнитопроводу – 1 через соседний полюс. Модули статора и ротора чередуются. Полюса роторных дисков – 6 также ориентированы по одной оси. На рис. 2 изображен диск ротора. Следует отметить, что все вращающиеся части машины пассивные, то есть не имеют обмоток. Магнитопроводы – 2 чередуются с медными экранами – 1. Магнитопровод машины выполнен шихтованным из электротехнической стали.