

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ СВОБОДНОПОТОЧНЫХ И ВОДОВИХРЕВЫХ МИКРОГЭС НА СТАНЦИЯХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Производственно - практический журнал «Водоснабжение и водоотведение» -N<sup>о</sup>5–2014, С.36 – 42

С.Н. Шаляпин, академик ИАУ; Т.С. Шаляпина, к.т.н. ; И.Ю. Штонда, к.т.н. (ООО «Харьковская электротехническая компания»),

Ю.И. Штонда, академик ИАУ (ООО «ЭКВИК»)

Постоянный рост цен на тепловую и электрическую энергию приводит к резкому росту тарифов на питьевое и горячее водоснабжение, а также на услуги водоотведения. Однако приведение тарифов к экономически обоснованным нормативам упирается в неплатёжеспособность населения, что не позволяет в должной степени компенсировать затраты коммунальных предприятий и приводит к росту задолженности перед энергогенерирующими и энергораспределяющими компаниями, к появлению взаимозачётов, возникновению хозяйственных споров и т.п. Всё это диктует необходимость широкого внедрения в практику водоподготовки и водоотведения энергосберегающих технологий. К сожалению, применение только одних энергосберегающих технологий позволяет снизить затраты только на 10 – 15%, что не обеспечивает компенсацию затрат на использованные энергоресурсы. Поэтому наряду с внедрением энергосберегающих технологий актуальным становится поиск альтернативных источников энергоснабжения.

Анализируя широко применяемые схемы водоотведения промышленных, хозяйственно-бытовых и ливнёвых сточных вод приходится часто сталкиваться с тем, что в большинстве случаев отвод очищенной воды осуществляется по специально обустроенным каналам в самотёчном режиме. При этом расход воды, протекающей по одному каналу, как правило, составляет от 400 до 3600 м<sup>3</sup>/ч (0,11 – 1,0 м<sup>3</sup>/с), а скорость течения воды в канале составляет от 2 до 4 м/с. Это наталкивает на мысль о возможности использования отводящихся сточных вод для получения электрической энергии, которую можно применить для частичной компенсации энергозатрат, связанных с технологическим процессом очистки воды или использовать для других целей, например, для питания обеззараживающих УФ установок. Энергию  $P$ , которую несёт такой поток воды со скоростью  $v$  м/с, можно выразить формулой (в ваттах)

$$P = 0,5 \cdot \eta \cdot \rho \cdot S \cdot v^3, \text{ Вт}$$

где  $\eta$ –коэффициент полезного действия (к.п.д.) микроГЭС ( $\eta = 0,35 \dots 0,5$ ),  $\rho$ –плотность воды (кг/м<sup>3</sup>),  $S$ –сечение канала (м<sup>2</sup>),  $v$ –скорость потока воды (м/с).

Простой анализ энергетического потенциала используемых на очистных сооружениях водоотводящих каналов позволяет сделать вывод о том, что особой популярностью могут пользоваться небольшие свободнопоточные микрогидроэлектростанции (микроГЭС) единичной мощностью от 0,7 до 10 кВт. Главным достоинством таких микроГЭС является возможность их монтажа в существующем водоотводящем канале, либо по байпасной схеме рядом с водоотводящим каналом, откуда собственно и название - бесплотинные или свободнопоточные гидроэлектростанции. В случае наличия естественного перепада высот достаточной величины (5 – 10 м) возможно применение деривационных микроГЭС.



Рис. 1. Свободнопоточные микрогидроэлектростанции

Однако на практике такие перепады высот встречаются довольно редко. На большинстве существующих водоочистных сооружениях перепад высот составляет всего несколько метров (обычно от 1,5 до 4 м). Наличие такого небольшого перепада высот позволяет применить ещё один перспективный тип микроГЭС – водовихревой (Wasserwirbeltechnik), разработанный Францом Цотлётерером (Franz Zotlöterer) [1]. К основным достоинствам такой микроГЭС относится возможность эффективной генерации электроэнергии при малых перепадах высот. Так установленная в городке Оберграфендорф (Obergrafendorf) водовихревая микроГЭС при перепаде высот в 1,2 м и расходе воды равным 1 м<sup>3</sup>/с обеспечивает выработку электрической энергии в количестве до 9,5 кВт·ч.

Одним из интересных свойств такой микроГЭС, которое может и должно найти своё применение в технологии очистки сточных вод, является то, что при работе лопастной турбины (которая вращается с низкой скоростью 60 – 75 об/мин) происходит принудительная аэрация всего проходящего через микроГЭС объёма воды, что положительно влияет на развитие живущих в воде микроорганизмов и конечную эффективность процесса очистки воды. Ещё одним из интересных свойств водовихревой микроГЭС является высокий коэффициент полезного действия гидротурбины, который превышает 79%.



Рис. 2. Водовихревая микроГЭС Франца Цотлётерера

Количество генерируемой водовихревой микроГЭС электрической энергии определяется следующими соотношениями:

$$P = \eta \cdot \frac{\partial}{\partial t} (W_k + W_{pot}), \text{ Bm}$$

где  $W_k$  – величина отбираемой из потока кинетической энергии, Дж,

$W_{pot}$  – величина потенциальной энергии потока, образованная при преодолении потоком воды перепада высот, равном  $h$

$$W_k = \frac{1}{2} m (\omega r)^2,$$

$$W_{pot} = mgh$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия (к.п.д.) гидротурбины,  $\eta = 0,65 \dots 0,75$ ,  $W_1$  – энергия потока воды,  $m$  – масса единичного объёма воды,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\omega$  – частота вращения турбины,  $\text{с}^{-1}$ ,  $r$  – радиус турбины,  $h$  – перепад высот между входом и выходом микроГЭС,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Из приведённого краткого обзора видно, что для трансформации кинетической энергии воды в вырабатываемую гидроэлектростанцией электрическую энергию для вышеприведённых условий наиболее целесообразно применение либо свободнопоточных микрогидроэлектростанций, либо водовихревых микроГЭС, при этом из-за более высокого к.п.д. предпочтительнее применение последних.

Ещё одной немаловажной деталью микроГЭС, оказывающей большое влияние на эффективность её работы, является тип применяемого электрогенератора. На сегодняшний день промышленностью выпускаются два основных типа генераторов, которые нашли применение в гидроэнергетике – это синхронные и асинхронные генераторы. Не останавливаясь на конструктивных особенностях синхронных и асинхронных генераторов необходимо заметить, что для обоих типов генераторов величина вырабатываемого напряжения зависит от частоты вращения его ротора, и что запуск генератора осуществляется при помощи специальных устройств, например при помощи конденсаторной батареи, или специального возбуждающего устройства. В большой и малой гидроэнергетике наибольшее распространение получили синхронные генераторы, которые характеризуются высокой стабильностью параметров вырабатываемой электроэнергии и хорошо приспособлены для работы в автономном режиме.

Принцип действия электрического генератора основан на законе электромагнитной индукции. При вращении ротора генератора происходит преобразование механической энергии потока воды в электрическую. Возбуждение синхронных генераторов осуществляется с помощью специальной обмотки возбуждения, которая подключается к источнику постоянного тока. На эту обмотку подаётся напряжение, которое образует вращающееся синхронное магнитное поле, в результате чего на зажимах генератора появляется выходное напряжение. Мощность возбуждения синхронного генератора не превышает нескольких процентов от мощности генератора. С увеличением оборотов ротора, в обмотке генератора происходит увеличение выходного напряжения, величина которого пропорциональна частоте вращения гидротурбины. Стабильность выходного напряжения генератора контролируется с помощью блока автоматической регулировки, который изменяет величину магнитного поля обмотки возбуждения. К преимуществам синхронных генераторов относится высокая стабильность выходного напряжения, к недостаткам – склонность к перегрузкам при повышенной нагрузке.

В последнее время в малой гидроэнергетике, а особенно в микрогидроэнергетике для получения электрической энергии стали применяться асинхронные генераторы, которые по сравнению с синхронными генераторами обладают более простой конструкцией, повышенной стойкостью к внешним авариям, значительным ресурсом и простотой технического обслуживания. Асинхронный генератор лучше защищён от попадания пыли и влаги, более устойчив к короткому замыканию и перегрузкам. Выходное напряжение асинхронного генератора по сравнению с синхронным генератором имеет меньше искажений. Коэффициент гармоник (кларфактор) асинхронного генератора в 7 раз меньше, чем у синхронного генератора и составляет около 2%, что позволяет использовать асинхронные генераторы не только для питания промышленных устройств, которые не критичны к форме выходного напряжения, но и обеспечивают возможность подключения электронной техники. Асинхронный генератор является идеальным источником тока для приборов, имеющих активную нагрузку: электронагревателей, сварочных преобразователей, ламп накаливания, электронных устройств, компьютерной техники.

Асинхронный генератор может работать как в автономном режиме, т.е. без включения в общую электрическую сеть, так и в режиме подключения к общей электросети. В автономном режиме для получения реактивной энергии, необходимой для намагничивания генератора, используется подключенная параллельно нагрузке батарея конденсаторов. Непременным условием автономной работы асинхронного генератора, которое является необходимым условием для самовозбуждения генератора, является наличие остаточного намагничивания ротора. Изменением ёмкости конденсаторов можно изменять величину намагничивающего тока, а, следовательно, и величину выходного напряжения генератора.

Особенно интересен режим работы асинхронного генератора совместно с внешней электрической сетью. В этом случае частота ЭДС асинхронного генератора определяется скоростью вращения магнитного поля статора, которое задаётся частотой тока в сети, к которой подключён генератор и при небольших изменениях скольжения  $s$  (от 2 до 5%) не зависит от частоты вращения ротора (гидротурбины). Т.е. внешняя электрическая сеть стабилизирует частоту вырабатываемой генератором ЭДС, что упрощает систему управления. Так как обмотка статора подключена к внешней электрической сети напряжением равном выходному напряжению генератора и потребляет из сети намагничивающий ток, то в таком режиме асинхронный генератор потребляет из сети только реактивную энергию, которая необходима для создания вращающегося магнитного поля статора, и отдаёт в сеть активную энергию, получаемую в результате преобразования механической энергии гидротурбины. Т.е. асинхронный генератор выступает не только как источник электрической энергии, но и является своеобразным преобразователем реактивной мощности, что положительно сказывается на режиме работы всей электрической сети.

Несмотря на все преимущества асинхронных генераторов, они не получили широкого применения в электроэнергетике из-за чрезмерной громоздкости и высокой стоимости конденсаторных батарей. Однако применение асинхронных генераторов является весьма перспективным для генераторов мощностью до нескольких десятков киловатт.

На диаграмме приведена ёмкость конденсаторной батареи, необходимая для возбуждения асинхронного генератора мощностью от 2 до 15 кВт.



Рис. 3. Величина ёмкости конденсаторной батареи, необходимой для возбуждения асинхронного генератора.

Выбор того или иного типа электрического генератора во многом зависит от конструктивных требований к микроГЭС и стабильности частоты вырабатываемого тока. Стоит также заметить, что стоимость асинхронных генераторов мощностью до 15 кВт меньше стоимости аналогичного синхронного генератора, а также то, что в качестве асинхронного генератора можно применять серийно выпускаемые асинхронные электродвигатели.

Учитывая, что величина потока воды в водоотводящем канале на протяжении суток может изменяться в широких пределах, то скорость вращения гидротурбины также будет непостоянной. Это приведёт к большим разбросам амплитуды и частоты вырабатываемого тока и напряжения, и, как следствие, может привести к поломке самой микроГЭС, что негативно скажется на потребителях вырабатываемой микроГЭС электроэнергии. Для стабилизации частоты вращения гидротурбины микроГЭС наиболее целесообразно применение следующих методов:

1. Стабилизация частоты вращения гидротурбины;
2. Стабилизация частоты генерируемого тока при изменении частоты вращения гидротурбины;
3. Сочетание обоих вышеперечисленных методов.

Для стабилизации частоты вращения гидротурбины применяются специальные регуляторы, которые ограничивают поток поступающей на гидротурбину воды, чем достигается стабилизация основных электрических параметров вырабатываемой электроэнергии. Этот метод требует наличие специального регулирующего (направляющего) аппарата, состоящего из регулирующего величину потока заслонки и системы управления, которая обеспечивает изменение положения заслонки или угла атаки лопаток гидротурбины в зависимости от частоты вращения гидротурбины (ротора генератора).



Рис. 4. Система механического регулирования величины потока воды для микроГЭС.

Основным недостатком системы механического регулирования является её сложность и инерционность, что существенно ограничивает область её применения. Однако существует и более лёгкий путь изменения частоты выходного напряжения генератора. Дело в том, что существует прямая зависимость между частотой вращения гидротурбины (ротора генератора) и величиной потребляемой электрической мощности (электрической нагрузкой генератора). Изменение электрической нагрузки генератора легко обеспечивается включением на выходе генератора так называемой «балластной» нагрузки, в роли которой может выступать любая полезная нагрузка, например, электрические нагреватели, часть из которых автоматически отключается при снижении напряжения на выходах генератора и наоборот. Основным достоинством этого метода регулирования выходного напряжения генератора и частоты вырабатываемого тока является достаточно высокое быстродействие, что положительно сказывается на качестве генерируемой электроэнергии. Существуют и другие методы стабилизации частоты выходного ЭДС, обеспечивающие высокое качество полученной электроэнергии, однако, из-за простоты исполнения наибольшее распространение на объектах малой энергетики получила именно автобалластная схема.

Структурная схема электрической части микроГЭС с тиристорными коммутаторами дискретных балластных нагрузок при работе микроГЭС в автономном режиме показана на рис. 5. При изменении величины полезной нагрузки  $R_i$  система управления БУ выдаёт управляющий сигнал на определённые тиристорные ключи  $V_1 \dots V_n$ , которые коммутируют одну или несколько балластных нагрузок  $R_1 \dots R_n$ . В результате происходит изменение величины тормозного момента генератора, компенсирующее отклонение момента гидротурбины, и частота вращения стабилизируется. Кроме того, регулируется ток якорной обмотки генератора, что положительно сказывается на стабильности напряжения. К основному недостатку такой схемы относится необходимость использования большого количества управляемых вентиляей.

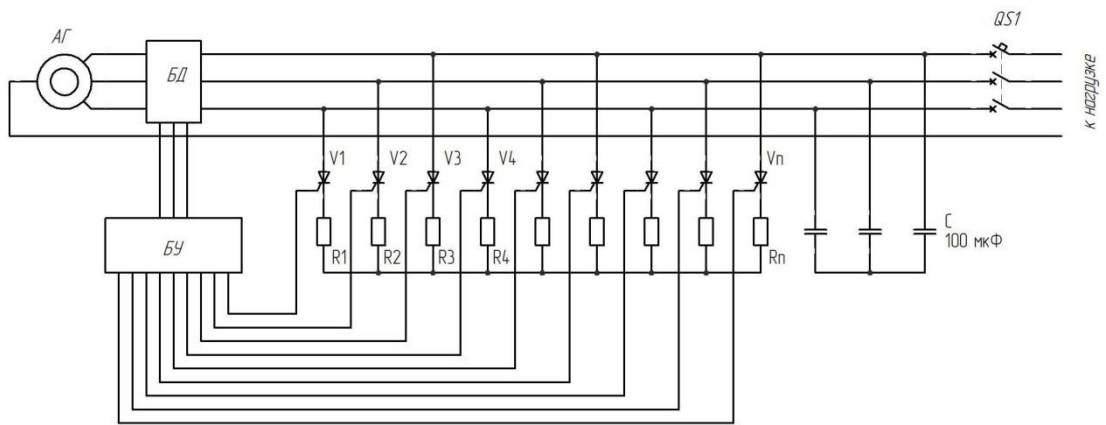


Рис. 5. Структурная схема системы управления асинхронным генератором мощностью 3 кВт с автобалластным управлением: АГ – асинхронный генератор, БД – блок датчиков, БУ – блок управления.

Одной из разновидностей схем микроГЭС автобалластного типа является схема с применением фазового регулирования. Такие регуляторы требуют значительно меньшего числа тиристорных ключей. Структурная схема электрической части такой микроГЭС показана на рис. 6.

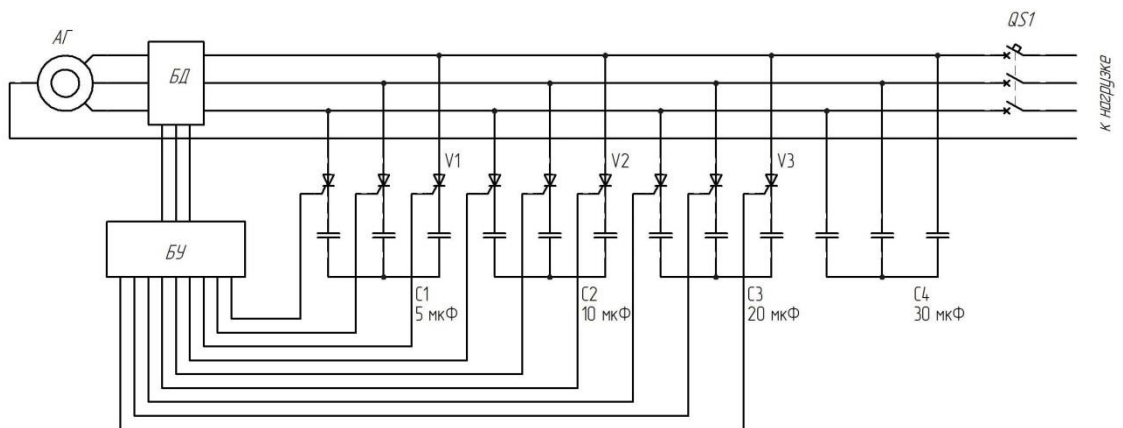


Рис. 6. Структурная схема системы управления асинхронным генератором с фазовым регулированием: АГ – асинхронный генератор, БД – блок датчиков, БУ – блок управления [2].

Система управления тиристорными ключами в зависимости от величины управляющего воздействия формирует определённый угол управления тиристорами регулятора, который характеризует отклонение выходных электрических параметров установки относительно номинальных значений. Основным недостатком такой схемы управления является искажение формы фазных токов и напряжений генератора микроГЭС.

Стоит отметить, что не существует какой-либо одной оптимальной схемы управления генератором микроГЭС, одновременно удовлетворяющей двум взаимоисключающим условиям – быть простой и обеспечивать достаточно высокие показатели качества получаемой электроэнергии. Выбор схемы управления во многом диктуется конструктивными параметрами микроГЭС и условиями её эксплуатации.

Следует отметить, что при работе асинхронного генератора в параллельном с внешней электрической сетью режиме необходимость в балластной нагрузке отпадает, т.к. в этом случае в качестве балластной нагрузки выступает сама электрическая сеть. В этом режиме работы микроГЭС выступает как дополнительный источник электрической энергии. При величине потребляемой полезной нагрузкой мощности меньше выходной мощности микроГЭС часть избыточно вырабатываемой электрической энергии передаётся во внешнюю электрическую сеть, обеспечивая постоянную нагрузку генератора тем самым стабилизируя величину выходного напряжения и частоту вырабатываемого электрического тока. При превышении потребляемой нагрузкой мощности происходит потребление электроэнергии из внешней сети, что также положительно сказывается на стабилизации выходного напряжения генератора и частоты вырабатываемого тока.

**Общие рекомендации.** Проведённый краткий анализ показывает, что в условиях существующих водоочистных сооружений наиболее перспективным является применение двух типов микроГЭС-свободнопоточных и водовихревых. Оба эти типа микроГЭС могут за счёт кинетической энергии потока сбрасываемых вод обеспечить получение электрической энергии, которую можно использовать для технологических нужд. В случае значительной протяжённости водоотводящих каналов предпочтительно применение свободнопоточных микроГЭС, которые можно устанавливать каскадно, увеличивая суммарную эффективность работы электростанции. Если позволяет рельеф местности, то имеет смысл установка водовихревых микроГЭС, которые обладают большей энергоёмкостью.

При выборе генератора для микроГЭС мощностью до 15 кВт имеет смысл использовать работающие в автобалластном режиме асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым или фазным ротором. При мощностях более 15 кВт более целесообразно применять синхронные генераторы.

Систему управления микроГЭС необходимо выполнять двухступенчатой с применением регулирования потока на первой ступени и стабилизацией выходного напряжения и частоты электрического тока на второй. Что обеспечит эффективную работу микрогидроэлектростанции.

Стоит отметить, что создание альтернативных источников энергоснабжения на базе свободнопоточных и водовихревых микроГЭС не требует значительных капитальных вложений, т.к. для их монтажа не требуется существенная переделка водоотводящих каналов. Стоимость капитальных вложений в расчёте на 1 кВт генерируемой мощности ориентировочно составляет от 3 до 4 тысяч евро. Что обеспечивает быструю окупаемость капитальных вложений.

В настоящее время Харьковской электротехнической компанией совместно с ООО «ЭКВИК» проводится подготовка предпроектных решений для создания альтернативных источников энергии на базе свободнопоточных и водовихревых микроГЭС, которые можно будет использовать в технологических схемах существующих систем водоотведения коммунальных предприятий с целью снижения себестоимости процесса очистки воды.

Литература.

1. <http://www.zotloeterer.com>.

2. Встовский А.Л., Федий К.С., Архипцев М.Г., Спиринов Е.А. Система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии. Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. №4. С. 133 – 138.