

Специальные турбогенераторные установки

ГОЛОБОКОВ Г.В., КОВАРСКИЙ М.Е., КЛАН В.А., САРЫЧЕВ А.П.

Исследуются специальные турбогенераторные установки (СТГУ) мощностью до 10000 кВт для преобразования механической энергии пара в электрическую с улучшенными виброакустическими характеристиками. В состав СТГУ входят: паровая турбина, синхронный генератор с магнитоэлектрическим возбуждением и преобразователь частоты, регулирующий параметры выходной электрической энергии. Частота вращения турбины и генератора в зависимости от мощности установки обеспечивает на выходе значения частоты от 50 до 300 Гц. Рассмотрены различные схемы построения автономных установок с генераторами магнитоэлектрического возбуждения. Предложена конструкция турбогенераторной установки с параллельным включением преобразователя частоты, позволяющая значительно улучшить массогабаритные характеристики преобразователя и повысить надежность установки в целом.

Ключевые слова: синхронный генератор, электромагнитное возбуждение, паровая турбина, преобразователь частоты, параллельное включение

До настоящего времени в качестве преобразователей механической энергии пара в электрическую на судах применяются синхронные двухполюсные генераторы с электромагнитным возбуждением [1]. Частота генераторов 50 Гц на выходе, применяется водяное охлаждение статора и ротора, а также контактные кольца для питания обмотки возбуждения.

На рис. 1 представлена схема турбогенераторной установки (ТГУ) с электромагнитным возбуждением.

Привод установки осуществляет паровая турбина, которая соединяется с генератором посредством гибкой муфты. При мощности менее 2 МВт возможно одновальное исполнение турбины и генератора. Опорные и опорно-упорный подшипники роторов ТГУ выполняются сегментными гидростатическими подшипниками скольжения или применяется магнитный подвес. Генератор синхронный, двухполюсный с электромагнитным возбуждением на роторе. Для охлаждения статора генератора применяется схема непосредственного

водяного охлаждения. Для охлаждения ротора в его полость подается охлаждающая вода, образуя кольцевую ванну, из которой вода сливается в систему циркуляции. Конфигурация воды в ванне нестабильна во времени и препятствует балансировке ротора генератора. Несмотря на наличие большого разнообразия способов питания вращающейся обмотки возбуждения, на практике по причине разных конструктивных особенностей освоена только схема со скользящим контактом. Трущиеся поверхности вращающего контакта ухудшают вольт-амперную характеристику установки, требуют определенного регламентного обслуживания и выделяют угольную токопроводящую пыль.

Наиболее существенные конструктивные недостатки этой турбогенераторной установки:

ограничение частоты вращения ТГУ значением 50 Гц, при этом эффективность работы паровой турбогенераторной установки и её массогабаритные по-

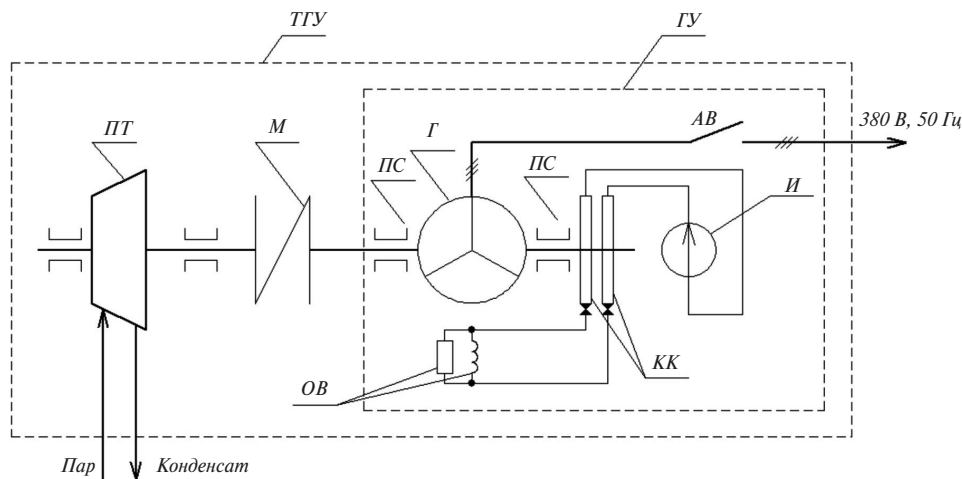


Рис. 1. Схема ТГУ с электромагнитным возбуждением генератора: ПТ – паровая турбина; ПС – опорно-упорный и опорные подшипники; М – механическая упругая муфта; ГУ – генераторная установка; Г – синхронный генератор с электромагнитным возбуждением; ОВ – обмотка возбуждения; КК – контактные кольца; И – источник тока возбуждения; АВ – защитное устройство

казатели в значительной мере зависят от частоты вращения – с ее увеличением растут показатели;

невозможность достижения стабильной балансировки ротора генератора из-за наличия внутри него водяной ванны для охлаждения;

контактные кольца на роторе вызывают дополнительный шум и вибрацию, а также загрязняют внутреннюю атмосферу.

Перечисленные недостатки отсутствуют в конструкции инновационной турбогенераторной установки с синхронным генератором (СТГУ), имеющим магнитоэлектрическое возбуждение от магнитов из редкоземельных материалов.

В СТГУ с выходными параметрами (частотой и напряжением), отличающимися от параметров сети, последовательно с генератором включается преобразователь частоты и напряжения [2]. Применение СТГУ сдерживалось отсутствием транзисторных модулей для преобразования и передачи электрической энергии генератора в промышленную сеть. Создание мощных IGBT-транзисторов позволило преодолеть это препятствие и создать компактные преобразователи частоты, обеспечивающие выполнение электрических стандартов промышленных сетей. Преобразователь может быть реализован двухзвенным с промежуточным звеном напряжения постоянного тока [3].

Первое звено – активный выпрямитель напряжения, осуществляющий отбор мощности от генератора и поддерживающий напряжение в звене постоянного тока, либо неуправляемый выпрямитель. Тип первичного звена (активный выпрямитель или неуправляемый выпрямитель) определяется соотношением выходного напряжения генератора и напряжения сети, а также требованиями, предъявляемыми к качеству тока в обмотках генератора [4].

Второе звено – трёхфазный инвертор напряжения с выходным фильтром. Инвертор формирует напряжение сети с заданными значениями частоты и амплитуды. Такой преобразователь пропускает всю активную мощность, отдаваемую в сеть, и

замыкает на себя реактивную мощность сети. Таким образом, данный преобразователь имеет полную мощность сети, в случае его выхода из строя СТГУ выводится из работы.

Схема СТГУ с последовательным включением ПЧ представлена на рис. 2.

Установленная мощность ПЧ (рис. 2) определяется мощностью потребителя. Функция преобразователя – согласование выходных параметров ГУ, в том числе напряжения и частоты тока с аналогичными показателями сети. В этой схеме ток на выходе преобразователя равен току, потребляемому сетью.

Частота вращения СТГУ ограничена прочностью конструкции генератора, а именно – бандажа, удерживающего магниты ротора. Зависимость расчётной предельной частоты вращения n от установленной мощности (для конструкционных металлов и сплавов с прочностью около 1000 МПа) показана на рис. 3. Кроме сплавов и металлов, в конструкции бандажей роторов генераторов предлагается использование современных композитных материалов, имеющих существенно более высокие механические прочностные характеристики, однако достоверной информации об этом не найдено.

При небольшой мощности (в пределах 50 кВт), частота вращения реализованных ТГУ достигает 100000 об/мин и более, при мощности (200÷300) кВт предельная частота вращения составляет примерно 60000 об/мин, при мощности (3000÷4000) кВт – 10000÷12000 об/мин, при мощности свыше 10000 кВт – 3000 об/мин.

Применение повышенной частоты вращения обеспечивает улучшение ВАХ и массогабаритных показателей СТГУ. Для автономных транспортных систем это приобретает решающее значение и дает бесспорное преимущество перед традиционными ТГУ с выходной частотой 50 Гц.

Для рассматриваемых генераторных установок созданы серии преобразователей частоты ПЧ на мощности примерно 1500 кВА. Преобразователь обеспечивает питание только собственных нужд

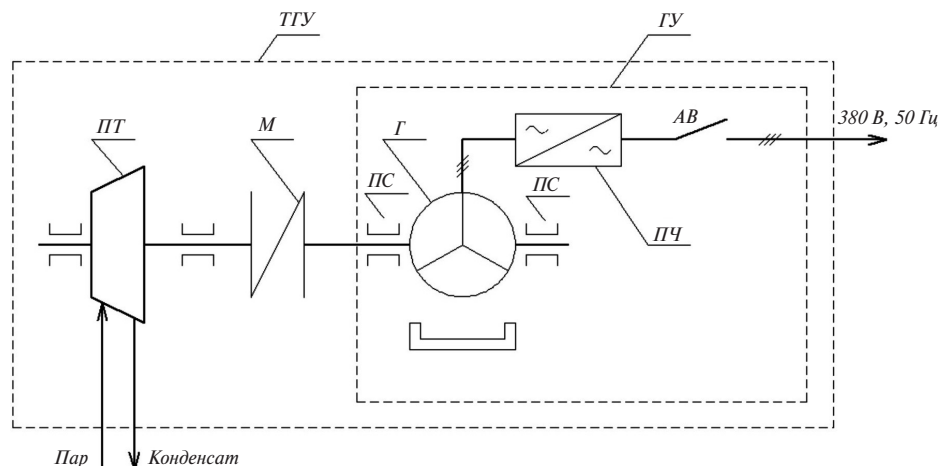


Рис. 2. Схема СТГУ с последовательным включением ПЧ

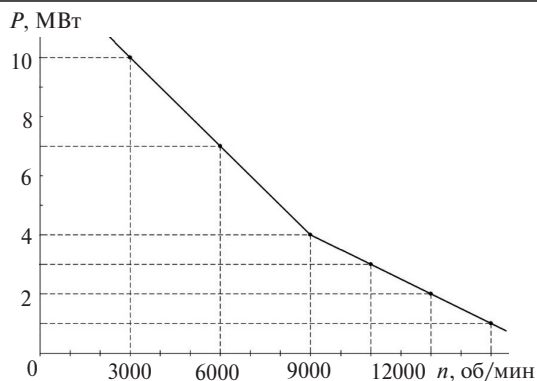


Рис. 3. Зависимость предельной частоты вращения ТГУ от установленной мощности

потребителей, рассчитанных на промышленную сеть 3×400 В, 50 Гц. Системы регулируемых электроприводов и электродвижения, не требующие согласования параметров сетей, могут питаться непосредственно от генератора, мощность этих систем не влияет на установленную мощность ПЧ. Для небольших и средних значений мощности СТГУ (до 5000 кВА) в качестве ПЧ могут быть использованы реализованные блочные модули ПЧ мощностью примерно 1500 кВА.

При выборе конструкции стационарных установок СТГУ, не имеющих ограничения по массогабаритным показателям, определяющими характеристиками становятся надежность и трудоемкость обслуживания. В этом случае предпочтительной конструкцией СТГУ становятся установки с выходной частотой 50 Гц и требуемым уровнем напряжения. Они проигрывают высокоскоростным установкам по габаритам, но выигрывают в надежности и могут комплектоваться менее мощным и менее дорогим ПЧ.

В СТГУ с согласованными параметрами сети должны быть использованы только стабилизаторы напряжения. По сути они представляют собой источники реактивного тока, которые за счет компенсации размагничивающего тока нагрузки в генераторе стабилизируют ЭДС и напряжение на

выходных зажимах генератора. Поскольку нагрузка подавляющего числа сетей в большей степени активная ($\cos \varphi \geq 0,85$), то реактивная мощность преобразователя составляет примерно 50% полной мощности сети. Параллельное подключение ПЧ к генератору в сети позволяет упростить резервирование, а в случае выхода преобразователя из строя СТГУ может продолжать снабжать потребителей напряжением с пониженными параметрами, обеспечивая тем самым «живучесть» энергосистемы в целом.

Такого вида стабилизаторы могут быть реализованы различными способами. Первые подобные установки представляли собой набор ступеней конденсаторов. В настоящее время такие стабилизаторы созданы на базе преобразователей переменного тока на IGBT-транзисторах с широтно-импульсной модуляцией. Для создания тока, компенсирующего реактивный ток нагрузки, система регулирования формирует требуемое по фазе и амплитуде напряжение на выходе преобразователя, поддерживая тем самым напряжение на выходе генератора. В зависимости от требований к качеству напряжения и тока нагрузки в состав преобразователя может быть включен так называемый синус-фильтр, замыкающий токи пульсаций от ШИМ в конденсаторе фильтра и обеспечивающий «гладкое» напряжение. Возможна реализация стабилизатора напряжения и на тиристорных регуляторах, но они имеют ряд недостатков, в числе которых существенная генерация высших гармоник токов. Для таких систем требуется дополнительная установка относительно больших и дорогостоящих резонансных фильтров.

Для рассматриваемых установок применяется параллельная схема подключения. Схема СТГУ с параллельным включением показана на рис. 4.

При компенсации реактивной энергии, потребляемой нагрузкой, и энергии электромагнитного поля в воздушном зазоре ЭДС машины остается неизменной, и напряжение на зажимах генератора может быть стабилизировано в пределах требования потребителя. В качестве иллюстрации рассмот-

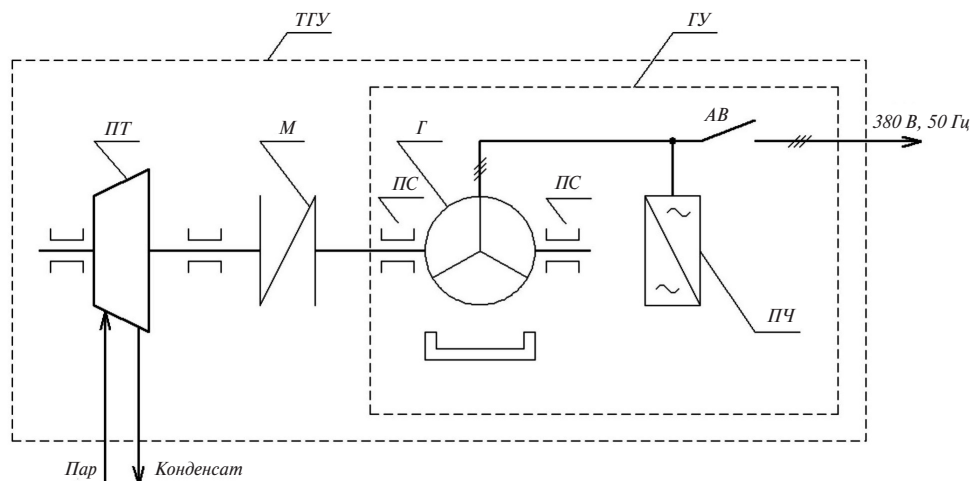


Рис. 4. Схема СТГУ с параллельным включением ПЧ

рим вариант ТГУ с параметрами $\cos\varphi=0,85$, $X_d=1$ и $f=50$ Гц.

Реактивная энергия, направленная потребителю, составляет 52% активной. Реактивная энергия электромагнитного поля в зазоре G равна 0,16% активной и может не учитываться в практических расчетах. Соответственно, ток, обеспечиваемый преобразователем частоты, составляет 52% тока нагрузки.

Таким образом, установленная мощность ПЧ, включенного по параллельной схеме, и его габариты могут быть снижены примерно в 1,5 раза по сравнению с ПЧ, включенным последовательно. Преимуществом параллельного включения ПЧ является также отсутствие аварийных последствий при его отключении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макриденко Л.А., Сарычев А.П., Коварский М.Е., Магин В.В. Электрические машины для специальных применений. – Вопросы электромеханики, 2008, т. 107.
2. Коварский М.Е., Портной Ю.Т., Магин В.В., Рожков Д.В. Результаты разработки нового поколения малощумных электроприводов герметичных электронасосов. – Труды VII Между-

народ. (XVIII Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012), 2012.

3. Берестов В.М., Волков В.Ю., Клан В.А., Коварский М.Е., Магин В.В., Панкратов В.В., Портной Ю.Т., Раскин Л.Я. Регулируемые электроприводы герметичных корабельных насосов на базе синхронных машин с преобразователем для резервного электропитания от сети постоянного тока. – Известия ТГУ, 2010, вып. 3, ч. 2, с. 185–191.

4. Беспалов В.Я., Коварский М.Е., Сидоров А.О. Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным значениями q . – Электричество, 2018, № 5, с. 45–51.

[22.07.2019]

А в т о р ы: Голобоков Геннадий Вячеславович – генеральный конструктор ОАО «Калужский трансформаторный завод».

Коварский Михаил Ефимович – кандидат техн. наук, главный конструктор регулируемых электроприводов для ВМФ АО «Корпорация «ВНИИЭМ», диссертацию защитил в 1985 г.

Клан Виктор Александрович – генеральный директор ЗАО «ЭРАСИВ» (Новосибирск).

Сарычев Алексей Петрович – доктор техн. наук, первый заместитель генерального директора АО «Корпорация «ВНИИЭМ», диссертацию защитил в 2010 г.

Electrichestvo, 2019, No. 12, pp. 10–13

DOI:10.24160/0013-5380-2019-12-10-13

Special-Purpose Turbine–Generator Units

GOLOBOKOV Gennady V. (JSC «Kaluga Transformer Plant, Kaluga, Russia») – General Designer

KOVARSKY Mikhail Ye. (JSC «Corporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) – Chief Designer of Regulating Electric Drives for VMF, Cand. Sci. (Eng.)

KLAN Viktor A. (JSC «ERASIB», Novosibirsk, Russia) – General Director

SARYCHEV Aleksey P. (JSC «Corporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) – 1st Deputy Director-in-General, Dr. Sci. (Eng.)

Special-purpose turbine–generator units (TGU) with a capacity of up to 10 000 kW for converting the mechanical energy of steam into electricity with improved vibroacoustic characteristics are studied. The TGU includes a steam turbine, a synchronous generator excited from permanent magnets, and a frequency converter regulating the parameters of the electric power output. The turbine and generator rotation frequency is such that the TGU output frequency varies from 50 to 300 Hz depending on the TGU power. Different basic circuits of self-contained units equipped with generators excited from permanent magnets are considered. The design of a turbine–generator unit equipped with parallel-connected frequency converter is proposed, the use of which makes it possible to achieve essentially better mass and dimension characteristics of the converter and enhance the TGU reliability as a whole.

К е у w o r d s: synchronous generator, electromagnetic excitation, steam turbine, frequency converter, parallel connection

REFERENCES

1. Makridenko L.A., Sarychev A.P., Kovarsky M.Ye., Magin V.V. *Voprosy elektromekhaniki – in Russ. (Questions of Electromechanics)*, 2008, vol. 107.
2. Kovarsky M.Ye., Portnoi Yu.T., Magin V.V., Rozhkov D.V. *Rezultaty razrabotki novogo pokoleniya maloshumnykh elektroprivodov germetichnykh elektronasosov. – Trudy VII Mezhdunarod. (XVIII Vserossiiskoi) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2012)* (Results from development of new-generation low-noise

electric drives for sealed motor-driven pumps. Proc. of the 7th Intern. (18th All-Russian) Conf. on Automated Electric Drives (AED-2012), 2012.

3. Berestov V.M., Volkov V.Yu., Klan V.A., Kovarsky M.Ye., Magin V.V., Pankratov V.V., Portnov Yu.T., Raskin L.Ya. *Izvestiya TGU – in Russ. (News of TGU)*, 2010, iss. 3, part 2, pp. 185–191.

4. Bespalov V.Ya., Kovarsky M.Yu., Sidorov A.O. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 5, pp. 45–51.

[22.07.2019]