

УДК 621.311.23: 620.9

**РАБОТА КОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ****Т. Ю. Шевченко, П. А. Белозёров**

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Объясняются причины использования собственной генерации промышленными потребителями. Это снижение доли затрат на энергоресурсы в себестоимости продукции и доступность первичных и вторичных энергоресурсов. В качестве примера приводится «Магнитогорский металлургический комбинат», имеющий доступ к электрическим сетям, но эксплуатирующий три собственные электростанции, которые снабжают потребителей электрической и тепловой энергией. Дано краткое описание принципа совместной выработки электрической и тепловой энергии на энергетических агрегатах с первичными тепловыми двигателями (когенерации). Демонстрируются некоторые характеристики когенераторных электростанций и их классификация по видам топлива и первичных двигателей. Описываются методы включения синхронного генератора на параллельную работу с электрической сетью. Сделан вывод о том, что для когенераторных установок предпочтительным является метод самосинхронизации.

**Ключевые слова:** когенерация, точная синхронизация, самосинхронизация, синхронный генератор, электрическая сеть, сокращение издержек, экологичность.

**OPERATION OF COGENERATION POWER PLANT IN PARALLEL WITH AN ELECTRICAL POWERGRID****T. Yu. Shevchenko, P. A. Belozarov**

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The article explains the reasons why industrial consumers use their own generation. This is a reduction in the share of energy costs in the cost of production and the availability of primary and secondary energy resources. Magnitogorsk Iron and Steel Works is given as an example, which has access to the electric grid, but operates three own power plants that supply consumers with electricity and heat. A brief description of the principle of joint generation of electric and thermal energy on power units with primary heat engines (cogeneration) is given. Some characteristics of cogeneration power plants and their classification by type of fuel and primary engines are demonstrated. Methods of enabling a synchronous generator to work in parallel with the electrical network are described. It is concluded that the method of self-synchronization is preferred for cogeneration plants.

**Keywords:** cogeneration, precise synchronization, self-synchronization, synchronous generator, electrical power grid, cost reduction, environmental friendliness.

**Введение.** Для промышленных предприятий всегда актуальна проблема надёжности и бесперебойности снабжения всеми видами энергоресурсов. Невозможно эффективно осуществлять производственную деятельность без выполнения этого условия. Также потребитель энергии стремится минимизировать свои издержки на нее, чтобы за счет этого снизить себестоимость выпускаемой продукции, то есть получить конкурентные преимущества на рынке. Известно, что при всех положительных качествах централизованного электроснабжения в цене электроэнергии заложены существенные затраты на содержание и ремонты основного оборудования не только электростанций, но и весьма протяженных линий электропередач, а также прибыль электросетевых компаний. Поэтому в условиях рыночной экономики ряд предприятий,

даже имея доступ к снабжению электроэнергией от централизованных электрических сетей, предпочитает строить свои генерирующие мощности. Это позволяет сократить долю затрат на энергетические ресурсы в себестоимости продукции.

**ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».** Показательным примером в этом отношении является ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) [1]. Предприятие входит в мировую двадцатку крупнейших сталелитейных компаний. Центральная электростанция (ЦЭС) ММК укомплектована 9 турбогенераторами мощностью в сумме 216 МВт, 8 энергетическими и 2 водогрейными котлами. ЦЭС снабжает часть промышленной площадки ММК и один из районов Магнитогорска тепловой энергией. ЦЭС подает цехам ММК химически очищенную воду, пар, конденсат. Имеется также ТЭЦ ПАО ММК. Ее электрическая установленная мощность составляет 330 МВт, а тепловая — 590 Гкал/час. Отпуск электроэнергии от ТЭЦ производится:

- по ЛЭП 10,5 кВ — для электроснабжения кислородно-компрессорного производства;
- по ЛЭП 35 кВ — для электроснабжения промышленных предприятий левого берега реки

Урал;

- по ЛЭП 110 кВ имеется связь с ЦЭС ММК и энергосистемой «Челябэнерго».

Тепловая энергия подается в формах:

– острый пар параметрами 100 атм 510 °С — в кислородный цех ММК для вращения воздушных турбокомпрессоров (конденсат возвращается на ТЭЦ);

– горячая вода для теплоснабжения прокатных цехов ММК с догревом в пиковом водогрейном котле на пиковую котельную.

Также от ТЭЦ осуществляется подпитка тепловых сетей правого и левого берега р. Урал химически очищенной и деаэрированной водой.

Кроме ЦЭС и ТЭЦ на ММК имеется паровоздуховная электростанция (ПВЭС), которая производит 100 МВт электрической мощности своими турбогенераторами. ПВЭС обеспечивает дутьем нужных параметров доменные печи.

ММК использует более 70% электроэнергии собственного производства. 1 кВт×ч собственной электроэнергии стоит в 2,6 раза дешевле, чем покупной. На ММК полностью утилизируется коксовый и доменный газ. Раньше часть газа приходилось сжигать в атмосфере.

Как видим, на ММК есть потребности одновременно в электрической и тепловой энергии (это типично для промышленных предприятий различных размеров и отраслей), а также имеются собственные вторичные энергоресурсы в виде горючих газов (что встречается не во всех случаях). Во многих случаях, ввиду удаленного географического положения предприятия, например, нефте- и газодобыча, собственные генерирующие мощности не имеют альтернативы ввиду отсутствия электрических сетей и дороговизны их строительства.

**Использование когенерации.** Вариантом организации на предприятии собственной генерации электрической энергии совместно с тепловой является использование автономных теплоэлектростанций с двигателями внутреннего сгорания (газотурбинными, газодизелями, дизелями), имеющими функцию параллельной работы с сетью. Такие установки, получившие наименование когенераторных, вырабатывают, в первую очередь, электроэнергию. В случае наличия соответствующего оборудования они одновременно дают возможность утилизации значительного количества тепла, которое с помощью водяных теплообменников отбирается у горячих выхлопных газов первичного двигателя, а иногда, и у нагретых охлаждающих жидкостей (масла и воды). В зависимости от мощности и типа агрегата его электрический КПД составляет

около 24–42 %. Одновременно, учитывая выработку тепловой энергии, КПД достигает 70–88 % (цифра зависит от глубины утилизации вторичных энергоресурсов).

Диапазон мощностей, на которые зарубежными и отечественными фирмами изготавливаются когенераторные установки (КУ) составляет от десятков кВт до десятков МВт. «Коломенский завод», «Пермские моторы», «Русские моторы», «Рыбинские моторы» — это наиболее известные предприятия-производители КУ в России. Крупными иностранными поставщиками КУ являются: MAN B&W, VISSMANN (Германия), «Вяртсиля» (Финляндия), CATERPILLAR (США), ELTECO (Словакия). Если сравнивать КУ с энергетическим оборудованием, вырабатывающим только электричество или только тепло, то они оказываются более экологичными, поскольку требуют меньше топлива для производства того же количества энергии и более экономичными при корректной разработке проекта. На рис. 1 показана функциональная схема КУ.

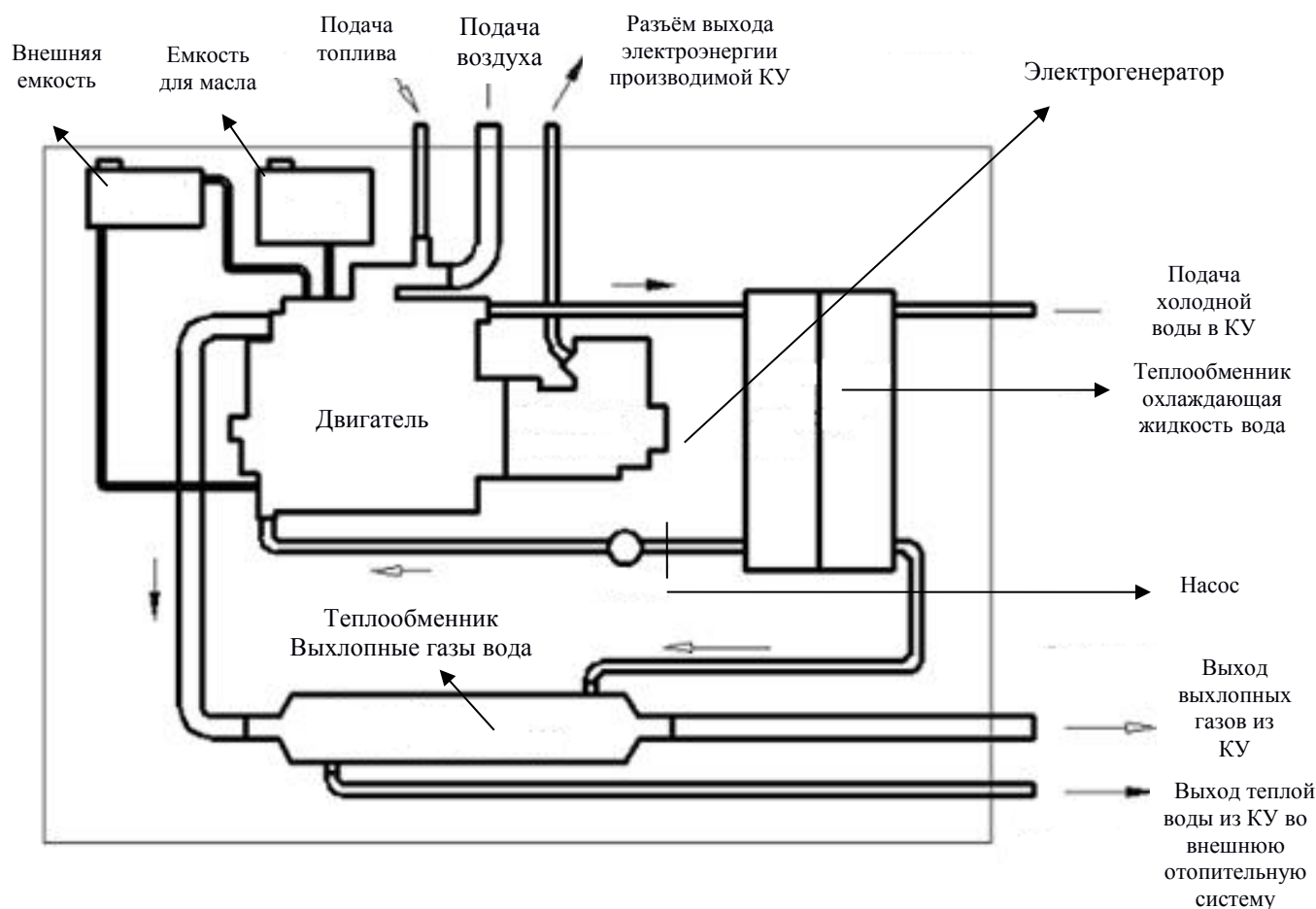


Рис. 1. Функциональная схема КУ

При мощности КУ до 1,5 МВт, как правило, применяют поршневые двигатели. Эффективность подобных КУ наглядно можно продемонстрировать, например, для КУ мощностью 100 кВт компании «Передовая энергетика». Режим работы данной КУ при 100 % загрузке и отпускной цене электроэнергии 3,35 руб /кВт·ч, позволит окупить затраты практически за 3 года, однако снижение коэффициента загрузки до 70 % увеличивает срок окупаемости до 10 лет.

Приведенные расчеты показывают важность не только параллельной работы, но и использования когенераторного режима, который за счет использования тепла, позволяет повысить экономичность КУ практически в два раза. При должной организации режимов, параллельной работе с сетью, позволяющей использовать КУ с загрузкой около 90 % срок окупаемости подобных проектов может составлять 2–3 года, что делает возможным реализации проектов с КУ, используя только заемные средства.

Газотурбинные двигатели, как правило, используют при мощностях выше 1,5 МВт. Существуют КУ, способные работать на тяжёлом топливе — мазуте и сырой нефти. Потребление собственных нужд КУ составляет приблизительно 3 % от общей выработки электроэнергии. На рис. 2 показан пример блочно-модульных КУ высокой заводской готовности производства *ELTECO* (Словакия).



Рис. 2. Блочно-модульные КУ высокой заводской готовности производства *ELTECO* (Словакия)

Как и в других электростанциях, в составе КУ в большинстве случаев используются синхронные электрические генераторы (СЭГ). Благодаря свойствам своего первичного теплового двигателя КУ при параллельной работе с сетью могут выполнять роль источника энергии пикового или полупикового режима (обладают высокой маневренностью). Поэтому важно обеспечить быструю и эффективную синхронизацию генератора КУ с сетью.

**Синхронизация генератора КУ с сетью.** Чтобы успешно включить СЭГ на параллельную работу с электрической сетью требуется, чтобы в момент включения уравнивающий ток объединяющего выключателя не превысил бы допустимого значения, а ротор СЭГ не перешел бы в асинхронный режим вращения [2]. Для этого автоматически или вручную производится регулирование частоты и модуля напряжения СЭГ таким образом, чтобы они были близки к одноименным характеристикам сети. Затем определяется момент подачи команды на включение объединяющего выключателя, соответствующий моменту равенства векторов напряжения



генератора и сети. Это называют точной синхронизацией. Распространены два способа включения СЭГ в сеть [2]: точная синхронизация и самосинхронизация. Точная синхронизация требует большего времени, чем самосинхронизация.

При самосинхронизации первичный двигатель подводит частоту СЭГ к синхронной частоте с разницей в пределах, как правило, не менее  $\pm 2-3\%$ . Включение объединяющего выключателя производится при выключенном возбуждении. Если включение выполнено при величине скольжения ротора СЭГ меньше  $3-5\%$ , то возбуждение поступает на обмотку ротора СЭГ одновременно с включением выключателя. При больших скольжениях ротора СЭГ возбуждение подается только после того, как частота СЭГ станет близкой к синхронной. Втягивание включаемого СЭГ в синхронизм обеспечивает синхронный вращающий момент.

В качестве недостатков способа самосинхронизации необходимо отметить сравнительно низкое качество переходных процессов при включении СЭГ. В момент включения отмечаются толчки уравнивающего тока, а также снижение напряжения на выводах СЭГ. Эти недостатки приводят к подгоранию контактов объединяющего выключателя, подвергают обмотки включаемого СЭГ дополнительным динамическим усилиям.

Согласно ПУЭ [3], в нормальных режимах работы энергосистемы для типичных мощностей КУ рекомендован в качестве основного для включения на параллельную работу способа самосинхронизации. Чтобы обеспечить возможно быстрый ввод в работу генерирующих мощностей в аварийных режимах электроэнергетических систем, допускается производить включение в сеть любых СЭГ способом самосинхронизации.

Для получения высококачественной синхронизации, а именно отсутствия уравнивающих токов, толчков мощности и изменения напряжения в системе, сопровождающихся нежелательными переходными процессами, нужно выполнять следующие требования для синхронизируемых объектов:

- равенство абсолютных значений напряжений;
- равенство частот;
- совпадение векторов напряжения по фазе;
- одинаковость чередования фаз напряжений.

**Заключение.** КУ является экономичным и экологичным решением по организации снабжения нужд предприятия электрической и тепловой энергией. Для организации параллельной работы КУ с сетью следует применять метод самосинхронизации.

### Библиографический список

1. Ионова, Ю. В. Исследование режимов трехфазного короткого замыкания на генераторном напряжении при различных конфигурациях электрической сети 110 кВ / Ю. В. Ионова, Ю. А. Чиркова // Молодёжь и наука : сб. мат-лов VII Всерос. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых учёных, посв. 50-летию первого полета человека в космос : [сайт]. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. — URL : <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/section01.html> (дата обращения : 07.04.2020).
2. Беляев, Н. А. Синтез систем адаптивной синхронизации генераторов с электрической сетью на основе методов автоматического управления с эталонной моделью: дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Беляев. — Томск, 2015. — 170 с.
3. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. — Новосибирск : Норматика, 2008. — 853 с.



*Об авторах:*

**Шевченко Татьяна Юрьевна**, магистрант кафедры «Интеллектуальные электрические сети» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [shewatanha@gmail.com](mailto:shewatanha@gmail.com)

**Белозёров Павел Андреевич**, магистрант кафедры «Интеллектуальные электрические сети» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [belozjorov@mail.ru](mailto:belozjorov@mail.ru)

*Authors:*

**Shevchenko, Tatyana Y.**, Master's degree student, Department of Intelligent Electrical Networks, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), [shewatanha@gmail.com](mailto:shewatanha@gmail.com)

**Belozerov, Pavel A.**, Master's degree student, Department of Intelligent Electrical Networks, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), [belozjorov@mail.ru](mailto:belozjorov@mail.ru)