

А. И. ЗЕМЦОВ**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ГАЗОКОМПРЕССОРНОГО ЦЕХА ЗА СЧЕТ ФОРМИРОВАНИЯ
МИКРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ****POWER SUPPLY EFFICIENCY INCREASE OF THE GAS-COMPRESSOR
WORKSHOP DUE TO MICROGRID FORMATION ON THE BASIS
OF OWN NEED GAS-DISTRIBUTING UNITS GENERATORS**

Рассмотрена возможность использования постоянного тока в системах внутрицехового электроснабжения предприятий с целью уменьшения потерь электроэнергии, повышения надежности электроснабжения и решения проблем электромагнитной совместимости. Для системы электроснабжения газокomppressorного цеха предложена структурная схема микросети постоянного тока на основе генераторов собственных нужд, которыми оснащены газоперекачивающие агрегаты. Проанализировано использование данных генераторов при изменяемой частоте вращения вала, с возможностью регулирования производительности газоперекачивающих агрегатов для оптимизации режима транспорта газа. Обосновано объединение генераторов собственных нужд в микросеть с целью использования избытка энергии для электроснабжения аппаратов воздушного охлаждения газа.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, компрессорный цех, электроснабжение, синхронный генератор, микросеть постоянного тока

The possibility of the direct current use in the enterprise intra shop power supply systems for the electric power loss reduction purpose, the power supply reliability and the electromagnetic compatibility problem solution is considered. The structural direct current micro network scheme on the basis of own need generators, equipping gas-distributing units for gas-compressor workshop electrical generating system, is suggested. The use of these generators at changeable shaft speed is analyzed, with a possibility of regulation of gas-distributing unit capacity for the transporting gas optimization mode. The own need generators combination in the micro network for the purpose of energy surplus use for the gas air coolers power supply is essential.

Keywords: gas-distributing unit, compressor workshop, power supply, synchronous generator, direct current microgrid

В себестоимости природного газа транспортная составляющая достигает 50 % и более, поэтому очевидна необходимость ее снижения за счет применения инновационных технологий.

Возможны следующие пути снижения энергозатрат на транспортировку газа:

- повышение КПД газоперекачивающих агрегатов (ГПА);
- снижение энергозатрат на эксплуатацию аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа;
- обеспечение сбалансированного режима работы ГПА и АВО газа;
- снижение затрат на выработку электроэнергии электростанциями собственных нужд (ЭСН) на компрессорных станциях (КС) с автономным или комбинированным электроснабжением.

Большой резерв экономии топливно-энергетических ресурсов заложен в совершенство-

вании технологии охлаждения газа, так как этот процесс является энергоемким. Мощность, потребляемая электродвигателями АВО газа одного компрессорного цеха, составляет сотни киловатт, что оказывает существенное влияние на структуру электропотребления КС МГ, особенно с газотурбинным приводом нагнетателей. Расход электроэнергии на охлаждение газа может составлять 60–70 % и более общего электропотребления на транспорт газа [1].

Существенный экономический эффект достигается, в частности, при оснащении электродвигателей АВО газа преобразователями частоты (ПЧ), с помощью которых осуществляется оптимальное регулирование производительности вентиляторов при вариациях температуры окружающей среды и технологических параметров транспорта газа [2].

Вместе с тем, интенсивный процесс внедрения частотно-регулируемых электроприводов

обозначил такую проблему, как снижение качества электроэнергии в сети [3]. Это объясняется тем, что входное звено ПЧ выполняется в виде выпрямителя, который потребляет из сети ток несинусоидальной формы. При определенном количестве работающих электроприводов показатели качества электроэнергии, характеризующие несинусоидальность напряжения, перестают соответствовать требованиям ГОСТ 32144-2013. Из-за высших гармоник токов и напряжений возрастают потери в кабельных линиях и трансформаторах, нарушается работа конденсаторных компенсирующих установок, устройств автоматики и защиты.

В этих условиях становится очевидным, что внутрицеховая система распределения энергии на переменном токе является неэффективной. Определенные преимущества может дать переход на электроснабжение цехов предприятия с использованием постоянного тока [4]. Реализация внутрицехового электроснабжения на постоянном токе позволяет уменьшить потери электроэнергии, повысить надежность электроснабжения, снизить остроту проблемы электромагнитной совместимости.

Идеи по созданию систем электроснабжения промышленных предприятий с промежуточным звеном постоянного тока начали выдвигаться более 10 лет назад. Они оказались плодотворными для тех объектов, где имеется большое количество технологического оборудования с частотно-регулируемым электроприводом [5]. Надо отметить, что работы по развитию этого направления в электроэнергетике активно ведутся в Европе. По данным журнала SW&W в Германии реализуется проект по созданию высокоэффективных системных решений с электроприводами на основе сетей постоянного тока, в реализации которого принимают участие 21 промышленная компания, 4 научно-исследовательских института и Центральный Союз электротехнической и электронной промышленности [6]. Проект финансируется в течение трех лет концерном BMW в сумме 10 млн. евро.

В настоящее время концепция использования постоянного тока получила новый импульс в результате интенсивного процесса создания и развития микросетей. Этот процесс обусловлен тем, что микросети имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими способами генерирования, передачи и распределения энергии [7].

Перспективным направлением в энергетике магистрального транспорта газа является также перевод ГПА и АВО газа на автономное электроснабжение от генераторов собственных нужд (ГСН). Благодаря тому, что турбины ГПА работают в режиме, близком к оптимальному,

выработка электроэнергии ГСН осуществляется с меньшими затратами топливного газа, чем отдельно установленными газотурбинными электростанциями. Согласно проведенной оценке применение ГСН позволяет сократить расход топливного газа на собственное электроснабжение модульного ГПА на 11–28 % в зависимости от единичной мощности ГПА и типа агрегатов ЭСН [8].

Автономное электроснабжение газотурбинных ГПА является предметом изучения и обсуждения достаточно длительное время. Имеется опыт эксплуатации более 280 агрегатов импортного производства (ГТК-10И, ГТК-25И), оснащенных генераторами собственных нужд. Пуск газотурбинного ГПА осуществляется при внешнем электроснабжении, затем в работу подключается ГСН после того, как вал отбора мощности ГПА достигает рабочих оборотов.

ГСН представляет собой синхронную машину, в которой скорость вращения магнитного поля в ее рабочем зазоре равна скорости вращения ротора. На импортных агрегатах, например типа ГТК-10И, генератор подключается через редуктор к валу отбора мощности, который выходит от турбины высокого давления через осевой компрессор (рис. 1).

Существующие ГПА с ГСН рассчитаны на работу с постоянной частотой вращения вала отбора мощности. Частота f генерируемого напряжения связана с частотой вращения приводного вала n :

$$f = \frac{n \cdot p}{60}, \quad (1)$$

где p – число пар полюсов электрической машины.

Установленный в агрегате ГТК-10И генератор M2 315 фирмы Marelli Motori развивает мощность 250 кВт. Он имеет две пары полюсов и при номинальной скорости вращения вала 1500 об/мин генерирует напряжение 380 В с частотой 50 Гц.

Напряжение на выходе генератора при активно-индуктивной нагрузке определяется формулой

$$U = \sqrt{E_0^2 - (x_1 I_a)^2}, \quad (2)$$

где E_0 – ЭДС генератора; x_1 – синхронное реактивное сопротивление якоря; I_a – ток якоря.

ЭДС генератора можно вычислить по формуле

$$E_0 = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (3)$$

где C_e – постоянная для каждой электрической машины величина; Φ – основной магнитный поток в воздушном зазоре, который зависит от тока нагрузки I_a и тока возбуждения I_B .



Рис.1. Внешний вид генератора собственных нужд агрегата ГТК-10И

Недостатком схемы электроснабжения ГПА с ГСН является необходимость стабилизации частоты вращения вала турбины, что усложняет возможность регулирования технологического режима транспорта газа. В соответствии с ГОСТ Р 54404-2011 «Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия» конструкция ГПА должна обеспечивать регулирование его производительности. При этом изменение скорости вращения турбины может находиться в пределах от 70 до 105 % от номинальной в зависимости от требуемого технологического режима работы нагнетателя. Однако необходимость стабилизации скорости вращения вала ГСН не позволяет реализовать это требование.

Электрическая энергия, вырабатываемая ГСН, должна соответствовать требованиям ГОСТ 32144-2013. При работе с фиксированной частотой вращения вала штатная система стабилизации выходного напряжения ГСН обеспечивает выполнение своих функций за счет изменения тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Однако в соответствии с выражениями (1)–(3) при изменении режима работы ГПА происходит изменение не только частоты f выходного напряжения, но и его действующего значения U .

Для выполнения требований по качеству электроэнергии ГСН ГПА при работе с варьируемой частотой вращения приводного вала должен быть оснащен системой преобразования частоты. Возможные варианты схемных решений такой системы показаны в [9].

Вместе с тем оснащение ГСН ГПА системой преобразования частоты не позволяет передавать избытки электрической мощности от генератора в систему электроснабжения компрессорного цеха. Для решения этой задачи может быть использован подход, предусматривающий формирование микросети постоянного тока [10].

На рис. 2 показана схема электроснабжения газокompрессорного цеха с ГПА, оснащенными ГСН. Турбины ГПА вращаются с различными скоростями n_k , вследствие чего их ГСН вырабатывают электроэнергию с частотой f_k и действующим значением напряжения U_k . Потоки электроэнергии переменного тока с указанными параметрами с помощью выпрямителей B_k , регуляторов постоянного напряжения РПН $_k$ и сглаживающих фильтров СФ $_k$ преобразуются в электроэнергию постоянного тока, потоки которой суммируются на шине постоянного тока.

Далее инверторы I_k и выходные фильтры ВФ $_k$ каждого ГПА обеспечивают получение электроэнергии переменного тока промышленной частоты, необходимой для питания электроприемников ЭП $_k$ данного ГПА.

После запуска и выхода ГПА на номинальный режим ГСН, в зависимости от номинальной мощности, может отдать в микросеть 150 – 200 кВт. Если в работе находится N агрегатов, то суммарная избыточная мощность составляет $N \cdot (150 - 200)$ кВт. При определенном числе N этой мощности может оказаться вполне достаточным для обеспечения работы АВО газа. Избыток мощности в микросети постоянного тока с помощью инверторов $I_{\text{АВО}}$ преобразуется в электроэнергию переменного тока, частота и действующее значение напряжения которой требуется для питания электродвигателей АВО газа. Дефицит электроэнергии для питания электродвигателей АВО газа восполняется из питающей сети с помощью трансформатора T и выпрямителя B_0 . Эта же цепь служит для первоначального запуска электрооборудования ГПА.

Уравнение баланса мощностей в микросети постоянного тока (без учета потерь мощности в преобразовательных устройствах) имеет вид

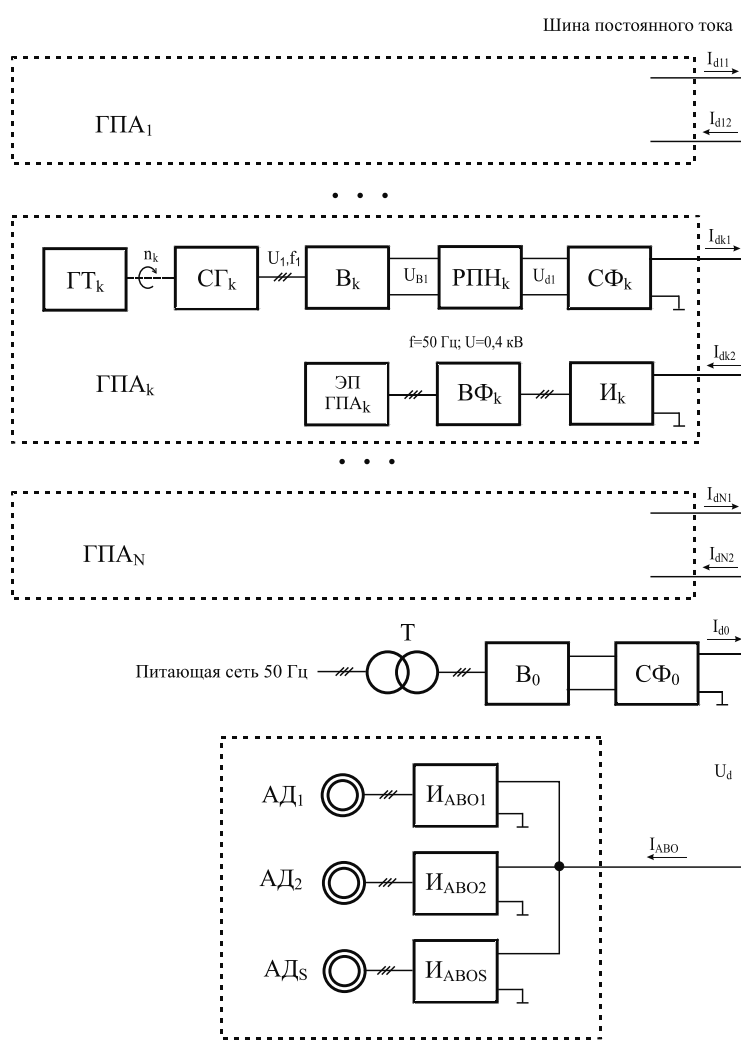


Рис. 2. Схема электроснабжения газокompрессорного цеха с микросетью постоянного тока

$$\sum_{k=1}^N P_{Гк} + P_T = \sum_{k=1}^N P_{ЭПк} + P_{ABO}, \quad (4)$$

где $P_{Гк}$ – мощности, отдаваемые генераторами собственных нужд $С_{Гк}$ соответствующего ГПА; P_T – мощность, забираемая из питающей сети через трансформатор T ; $P_{ЭПк}$ – мощности, потребляемые электроприемниками $ЭП_k$ соответствующего ГПА; P_{ABO} – мощность, потребляемая электродвигателями вентиляторов АВО газа.

На основании (4) следует, что мощность, потребляемая рассматриваемым электротехническим комплексом, может быть определена по формуле

$$P_T = \sum_{k=1}^N P_{ЭПк} + P_{ABO} - \sum_{k=1}^N P_{Гк}. \quad (5)$$

Таким образом, для уменьшения затрат на приобретение электроэнергии у сетевой организации необходимо, чтобы генераторы собственных нужд всех ГПА работали в номинальном режиме.

Так как суммирование и распределение потоков энергии происходит в микросети постоянного тока с напряжением U_d , то формулу (5) можно записать следующим образом:

$$I_{d0} = \sum_{k=1}^N (I_{dk2} - I_{dk1}) + I_{ABO}, \quad (6)$$

где I_{d0} – выходной ток выпрямителя $В_0$; I_{dk1} , I_{dk2} – токи k -го ГПА после сглаживающего фильтра $СФ_k$ и на входе инвертора $И_k$; I_{ABO} – суммарный ток, потребляемый АВО газа от шины постоянного тока.

Из формулы (6) следует, что выходной ток I_{d0} выпрямителя $В_0$ будет иметь минимальное

значение, если в заданном диапазоне изменения токов I_{dk2} и I_{ABO} токи I_{dk1} равны номинальным значениям. Этого можно добиться за счет соответствующего закона управления регуляторами постоянного напряжения РПН_к.

Выводы. Формирование микросети постоянного тока на основе ГСН позволяет использовать избыток энергии для электроснабжения АВО газа. При этом благодаря возможности ГПА работать с регулируемой производительностью оптимизируется режим транспорта газа, что снижает расход топливного газа. Повышается энергонезависимость газокomp-прессорной станции от неблагоприятных воздействий, возникающих в системе внешнего электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аршакиан И.И., Артюхов И.И. Динамические режимы в системах электроснабжения установок охлаждения газа. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т., 2004. 120 с.
2. Артюхов И.И., Аршакиан И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 1(54). Вып. 3. С. 25–32.
3. Артюхов И.И., Боцкарева И.И., Молот С.В. Влияние частотно-регулируемого электропривода вентиляторов на питающую сеть // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 29–35.
4. Змиева К.А., Кулагин О.А. Разработка энергоэффективной концепции построения распределительных сетей промышленного предприятия // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 3. С. 22–28.
5. Артюхов И.И., Аршакиан И.И., Коротков А.В., Погодин Н.В., Степанов С.Ф. Перестраиваемая по структуре автономная система электроснабжения технологического комплекса с многодвигательным электроприводом // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1 (10). Т.1. С. 20–28.
6. Forschungsprojekt: Gleichspannung für die industrielle Energieversorgung [Сайт] URL: <http://www.sonnewindwaerme.de/panorama/forschungsprojektgleichspannung-fuer-industrielle-energieversorgung/>
7. Dragicevic T., Lu X., Vasquez J.C., Guerrero J.M. DC Microgrids – Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issue // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31, № 5. Pp. 3528–3549.
8. Зюзьков В.В., Щуровский В.А. Автономное электроснабжение модульных газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2009): сб. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. С. 268–274.
9. Артюхов И.И., Боцкарев Д.А. Автономная система электроснабжения на основе генератора с изменяемой частотой вращения вала // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 178–183.
10. Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Боцкарев Д.А., Туленова Г.Н., Земцов А.И. Микросеть на основе группы автономно работающих синхронных генераторов // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, № 4. С. 127–131. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.22.

REFERENCES

1. Arshakyan I.I., Artyukhov I.I. *Dinamicheskie rezhimy v sistemakh elektrosnabzheniya ustanovok okhlazhdeniya gaza* [Dynamic modes in power supply systems of gas cooling units]. Saratov: SSTU Publ., 2004. 120 p.
2. Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.SH., Trimbach A.A., Ustinov E.V. Resource-saving gas cooling technology at compressor stations. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2011, no 1(54), i. 3. pp. 25-32. (in Russian)
3. Artyukhov I.I., Bochkareva I.I., Molot S.V. The influence of variable frequency fans on the supply network. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2015, no 4. pp. 29–35. (in Russian)
4. Zmиеva K.A., Kulagin O.A. Development of an energy-efficient concept for building distribution networks of an industrial enterprise. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrotechnical complexes and control systems], 2012. no 3. pp. 22–28. (in Russian)
5. Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Stepanov S.F. The structure-independent autonomous power supply system of a technological complex with a multi-engine electric drive. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2006, i. 1 (10), vol.1, pp. 20–28. (in Russian)
6. Forschungsprojekt: Gleichspannung für die industrielle Energieversorgung (2018). Available at: <http://www.sonnewindwaerme.de/panorama/forschungsprojektgleichspannung-fuer-industrielle-energieversorgung/> (accessed 10 June 2018)
7. Dragicevic T., Lu X., Vasquez J.C., Guerrero J.M. DC Microgrids – Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issue, IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, Vol. 31, no 5. pp. 3528–3549.
8. Zyuz'kov V.V., Schurovskij V.A. Autonomous power supply of modular gas turbine gas pumping units. *Gazotransportnye sistemy: nastoyashee i budushee (GTS-2009): sb. dokl. III Mezhdunar. nauch.-tekhn. Konf* [Gas transmission systems: present and future (GTS-2009): col.of rep. III Internat. Scien. and techn. Conf.nce]. Gazprom VNIIGAZ, 2010, pp. 268–274. (in Russian)
9. Artyukhov I.I., Bochkarev D.A. Autonomous power supply system based on a variable speed shaft

generator. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2014, no 3, pp. 178–183. (in Russian)

10. Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Bochkarev D.A., Tulepova G.N., Zemtsov A.I. A microgrid based on a group of autonomously working synchronous generators. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2017, vol.7, no. 4, pp. 127–131. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.22. (in Russian)

Об авторе:

ЗЕМЦОВ Артем Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани 446001, Россия, г. Сызрань, ул. Советская, 45
E-mail: artex283@mail.ru

ZEMTSOV Artem I.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University, Syzran Branch 446001, Russia, Syzran, Sovetskaya, 45
E-mail: artex283@mail.ru

Для цитирования: *Земцов А.И.* Повышение эффективности электроснабжения газокompрессорного цеха за счет формирования микросети на основе генераторов собственных нужд газоперекачивающих агрегатов // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 175–180. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.22.

For citation: *Zemtsov A.I.* Power Supply Efficiency Increase of the Gas-Compressor Workshop Due to Microgrid Formation on the Basis of Own Need Gas-Distributing Units Generators // Urban Construction and Architecture. 2019. V.9, 3. Pp. 175–180. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.22.

Уважаемые читатели!

Научно-технический журнал «Градостроительство и архитектура» приглашает Вас опубликовать статью.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, индексируется в РИНЦ, CrossRef и ERIH PLUS

По вопросам, связанным с публикацией статей, обращаться **vestniksgasu@yandex.ru**

Полная информация о журнале на сайте **journal.samgasu.ru**