

УДК 62–18

В.В. Барсков

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

V.V. Barskov

SELECTION OF OPTIMAL SOLUTIONS IN THE DESIGN OF LOW-POWER GAS TURBINES

В статье рассматривается проблема выбора частоты вращения турбины и компрессора, оптимальных для получения максимального КПД газотурбинных установок малой мощности, возникающая при их проектировании. Предложена новая компоновка таких установок — с независимыми валами для турбины и компрессора. Обозначены ее возможности и достоинства, а также ограничения и проблемы.

ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (МГТУ). МГТУ С НЕЗАВИСИМЫМИ ВАЛАМИ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ОБОРОТОВ. ПОВЫШЕНИЕ КПД. ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА.

The article deals with the problem that arises when designing MGTU, in the selection of the optimal frequency of rotation of the turbine and compressor to maximize the efficiency of the plant. Proposed solution — the creation of MGTU with independent shafts for turbines and compressors. Marked limitations, problems, opportunities and advantages of the new layout.

LOW-POWER GAS TURBINES. INDEPENDENT SHAFTS. SELECTION OF THE OPTIMAL SPEED. INCREASE EFFICIENCY. OPTIMIZE THE LAYOUT OF TURBINE GENERATOR.

Газотурбинные установки малой мощности находят все более широкое применение в качестве автономных энергоисточников. На рынке востребованы подобные автономные энергоисточники благодаря длительному ресурсу, низкому уровню выбросов, возможности работать на различных видах энергоносителей и с относительно высокому КПД [1, 2].

В нашу страну импортные газотурбинные установки поставляют компании Elliott, Capstone, Turbес. Компания Elliott предлагает микротурбинные установки TA-100 RCHP и TA-100 R мощностью 100 кВт, а также установку Offshore для тяжелых условий эксплуатации на морских нефте- и газодобывающих

платформах, компания Capstone — установки С30, С60 и С65 мощностью соответственно 30, 60 и 65 кВт в различных вариантах исполнения, компания Turbес — установки Т100 мощностью 100 кВт [10].

Эффективность МГТУ малой мощности определяют:

- сравнительно низкая себестоимость производства электроэнергии;
- относительно высокий КПД;
- высокая надежность энергоснабжения;
- независимость режима работы от загрузки энергосистемы;
- уменьшение отчуждения территории под крупное энергетическое строительство;

применение перспективных современных технологий и технических решений при создании новой техники;

мобильность использования;

малое время развертывания (от возникновения потребности до ввода в эксплуатацию);

простота эксплуатации по сравнению с дизель-генераторами [1].

При проектировании МГТУ для получения высокого КПД (0,33–0,35) необходимо применять высокоэкономичную турбину с внутренним КПД по полным параметрам не менее 0,9. Такой турбиной в настоящее время является только радиально-осевая малорасходная турбина.

Наиболее простой вид МГТУ — одноваль-ный агрегат и простой цикл без рекуперации. Большая часть мощности, развиваемой газовой турбиной, затрачивается на привод компрессора и вспомогательных устройств, а оставшаяся часть передается потребителю (электрическому генератору). Подобный тип установки не может обеспечить приемлемый уровень КПД.

Внутренний КПД МГТУ простого цикла определяется по формуле

$$\eta_v = \frac{H_v}{q_1}, \quad (1)$$

где q_1 — удельный расход теплоты; H_v — внутренняя удельная работа МГТУ.

Один из способов повышения КПД МГТУ — использование цикла с рекуперацией. Цикл изображен на рис. 1. [2, 3].

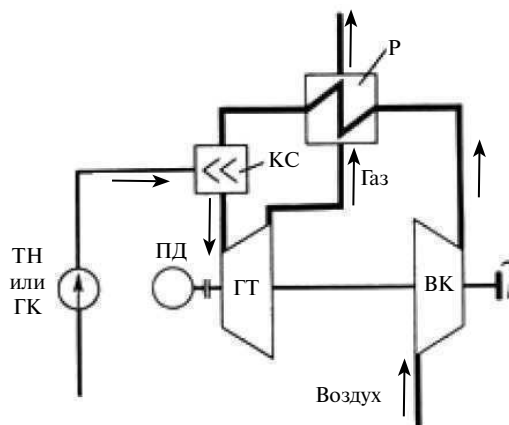


Рис. 1 Тепловая схема одновального МГТУ с рекуперацией:

Р — рекуператор; ВК — воздушный компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; ПД — пусковой двигатель (генератор); ТН — топливный насос; ГК — газовый компрессор

При проведении расчетов тепловых схем МГТУ необходимо найти оптимальную величину степени повышения давления в компрессоре π_k . Обычно этот диапазон π_k включает в себя оптимальную степень повышения давления как по полезной работе, так и по КПД МГТУ. Выбор диапазона изменения степени повышения π_k зависит от схемы МГТУ.

На рис. 2 показана зависимость эффективного КПД цикла идеального МГТУ от π_k . Эта зависимость характеризуют максимальные значения КПД в идеальном МГТУ. В одновальных МГТУ π_k , приходящаяся на одну ступень,

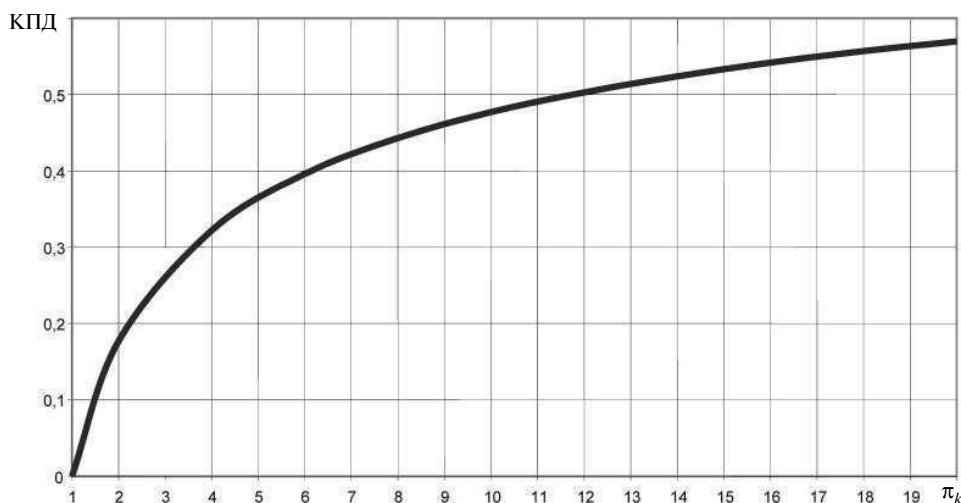


Рис. 2. Зависимость КПД идеальной ГТУ от степени π_k повышения давления в компрессоре

обычно не превышает 6–7. Теплоемкость и другие свойства рабочего тела приняты одинаковыми во всей области расчета и не зависящими от температуры рабочего тела.

В одновальных установках все элементы МГТУ — компрессор, турбина и генератор — находятся на одном валу и, естественно, имеют одну и ту же частоту вращения. Это приводит к тому, что в случае изменения характеристик одновальной МГТУ при снижении частоты вращения турбина быстрее теряет мощность, чем снижается мощность, потребляемая компрессором, а степень повышения давления в компрессоре π_k резко падает (см. рис. 1). Таким образом, одновальная МГТУ может обеспечить режим работы компрессора только в ограниченном диапазоне изменения частоты вращения вала, что значительно снижает возможности применения данных МГТУ в условиях с колеблющимся потреблением электроэнергии. С учетом особенности малогабаритных газотурбинных установок — высокой частоты и диапазона вращения ротора 20 000–80 000 об/мин — этот фактор становится ключевым [2, 3].

На рис. 3 и в таблице приведены зависимости эффективного КПД ($\eta \cdot 10^{-3}$) цикла МГТУ от степени π_k повышения давления в компрессоре при степени регенерации $\mu = 0,9$ и разных температурах T_3^* газа перед турбиной.

В известной схеме двухвальной МГТУ, когда турбина высокого давления приводит в действие компрессор, а турбина низкого давления — нагрузку, регулирование МГТУ усложнено.

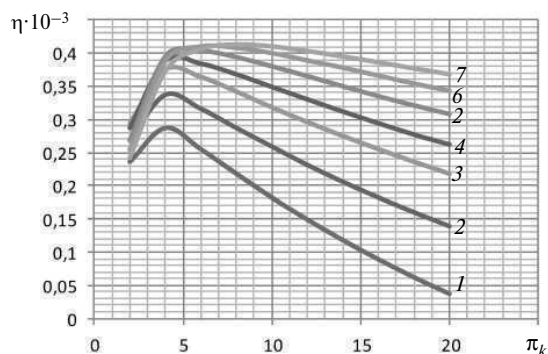


Рис. 3. График зависимости эффективного КПД от степени π_k повышения давления в компрессоре при $\mu = 0,9$ степени регенерации и температурах газа перед турбиной 900 (1), 1000 (2), 1100 (3), 1200 (4), 1300 (5), 1400 (6) и 1500 (7) К

Вал компрессора в МГТУ с независимыми валами, не будучи механически связанным с валом силовой турбины, может иметь практически любую частоту вращения. Поэтому есть возможность отдельной оптимизации турбины и компрессора, где основным граничным условием будет выступать массовый расход воздуха.

В предлагаемой схеме привод компрессора развязан по газовому тракту, что позволяет оптимизировать параметры как компрессора, так и турбины (см. рис. 3).

На основании параметров тепловой схемы МГТУ определяются характеристические числа U/c_0 в зависимости от частоты вращения ротора n и среднего диаметра турбины D_{cp} .

Оптимальные значения U/c_0 выбираются на основании опыта проектирования подобных турбин и лежат в пределах 0,68–0,72, а средний диаметр турбины — исходя из соотношения

$$L_1 = \frac{l_1}{D_{cp}} = 0,06-0,12 \text{ [5, 7].}$$

Учитывая, что частота вращения турбины из прочностных соображений не может превышать 80000 об/мин., средний диаметр турбины может находиться в пределах 0,191–0,229 м. Точные значения этих диаметров будут определены на этапе проектирования при детальном расчете радиально-осевой турбины. Размеры рабочего колеса компрессора выбираются также в этих пределах исходя из опыта проектирования подобных МГТУ [3, 4].

Для МГТУ с независимыми валами необходимо выполнить ряд условий:

КПД электрических машин для турбины и компрессора должен быть не менее 0,9;

габаритные размеры таких МГТУ не должны превышать одновальные аналоги более чем в 1,2 раза.

В качестве электрических машин предлагается использовать высокоскоростную синхронную электрическую машину с возбуждением постоянными магнитами. Данный тип электрической машины обладает наивысшими значениями КПД и удельной генерируемой мощности, а также высокой скоростью вращения ротора. Высокоскоростной синхронный стартер-генератор обеспечивает пуск и выработку электроэнергии от турбины МГТУ. Высокоскоростной синхронный стартер-двигатель обеспечивает пуск и вращение компрессора МГТУ

Зависимости эффективного КПД ($\eta \cdot 10^{-3}$) от степени π_k повышения давления в компрессоре
 (для варианта $\mu = 0,9$, $T_{ст} = 1100$ К, $\text{КПД}_{\text{КС}} = 0,98$) [6, 9]

Температура T_3 , К	КПД $\eta \cdot 10^{-3}$ при указанных значениях π_k									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
900	0,236	0,287	0,255	0,218	0,182	0,149	0,118	0,089	0,062	0,037
1000	0,269	0,337	0,316	0,287	0,259	0,231	0,206	0,182	0,16	0,139
1100	0,294	0,375	0,364	0,342	0,318	0,296	0,275	0,255	0,236	0,218
1200	0,287	0,388	0,384	0,368	0,349	0,33	0,312	0,294	0,277	0,262
1300	0,268	0,395	0,403	0,394	0,38	0,365	0,35	0,335	0,321	0,308
1400	0,254	0,388	0,41	0,408	0,4	0,389	0,378	0,366	0,354	0,343
1500	0,242	0,373	0,406	0,413	0,41	0,403	0,395	0,386	0,377	0,368

Для снижения габаритных размеров МГТУ с независимыми валами идут на отказ от опорных элементов с масляной смазкой и охлаждением. Для полного отказа от масляной системы необходимо также исключить все зубчатые передачи приводов агрегатов, что может быть реализовано, если применить интегрированный электрический стартер-генератор с ротором, закрепленным непосредственно на валу турбины, электроприводный двигатель, у которого ротор закреплен непосредственно на валу компрессора, и электроприводный топливный насос. В мировом и отечественном газотурбостроении большую популярность получили газодинамические подшипники (ГП). Это обусловлено простотой конструкции, малыми массогабаритными и стоимостными показателями, а также — благодаря отсутствию изнашивающихся механических частей под нагрузкой — большим ресурсом, надежностью и отсутствием необходимости в техобслуживании при длительной работе без останова. [2, 8].

Снижение КПД в результате использования отдельных электрических машин для турбины и компрессора, а также электроприводного топливного насоса и потери от использования газодинамических опор компенсируются следующими достоинствами МГТУ с независимыми валами:

повышением КПД компрессора за счет выбора оптимального числа оборотов;

повышением КПД турбины за счет выбора оптимального числа оборотов;

упрощением конструкции ротора (замена одного длинного гибкого ротора двумя короткими жесткими; уменьшение перепада температур по длине ротора; работа ротора компрессора в зоне низких — меньше 300°C — температур);

возможностью оптимизации компоновки турбогенератора за счет уменьшения длин воздухопроводов и газоходов, что снижает потери в тракте;

упрощение ремонта турбогенератора благодаря тому, что можно отдельно менять компрессор и турбину или ротор компрессора и ротор турбины;

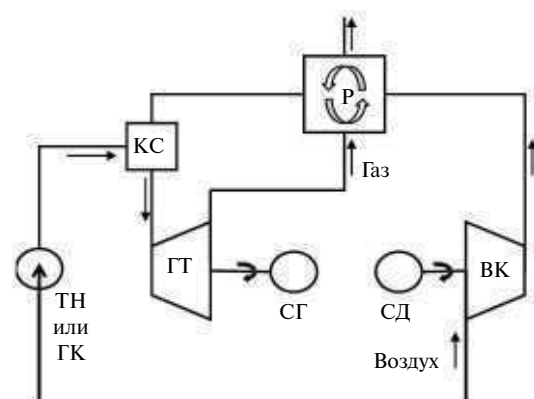


Рис. 4. Предлагаемая тепловая схема двухвального МГТУ с регенерацией:

Р — рекуператор; ВК — воздушный компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; СГ — стартер-генератор; СД — стартер-двигатель; ТН — топливный насос; ГК — газовый компрессор

упрощением конструкции и снижением металлоемкости за счет исключения общего силового корпуса;

использованием оптимальных металлов для корпусов по температуре и прочности.

Таким образом, установки МГТУ двухвальной схемы имеют следующие преимущества:

повышенный КПД во всем диапазоне вырабатываемой полезной мощности;

уменьшенные габариты (за счет оптимальной компоновки);

уменьшенные потери в патрубках вследствие уменьшения их длин и поворотов;

возможность применения модульной конструкции.

Применив при проектировании МГТУ перечисленные решения, можно достигнуть КПД МГТУ на уровне 0,33–0,35, оптимизировать конструкцию и упростить ее изготовление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беседин, С.Н.** Микротурбинный генератор электрической мощности 100 кВт (МТГ 100) [Текст] / С.Н. Беседин, Е.И. Окунев, В.А. Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 3(106).— С. 57–61.
2. **Беседин, С.Н.** Научно-техническое обоснование и практическая реализация создания микротурбинного генератора мощностью 100 кВт на основе современных расчетно-экспериментальных методов [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Беседин Сергей Николаевич / Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.— 2011.
3. **Рассохин, В.А.** Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом [Текст] / В.А. Рассохин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4(135).— С. 41–51.
4. **Кириллов, И.И.** Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кириллов.— 2-е изд, перераб. и доп.— Л.: Машиностроение, 1972.— 533 с.
5. **Соколов, Н.П.** Энергетические машины: Определение величины погрешности при экспериментальных исследованиях [Текст]: Учебное пособие / Н.П. Соколов [и др.] / Под ред. В.А. Рассохина, В.Г. Полищука.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— В надзаг.: Приоритетный национальный проект «Образование». Инновационная образовательная программа Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
6. **Галёркин, Ю.Б.** Турбокомпрессоры [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.Б. Галёркин, Л.И. Козаченко / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.— СПб., 2008.— Электрон. текстовые данные.— [〈URL:http://dl.unilib.neva.ru/dl/1544.pdf〉](http://dl.unilib.neva.ru/dl/1544.pdf).
7. **Андреев, К.Д.** Энергетические машины. Теплообмен в системах охлаждения газовых турбин [Текст]: Учеб. пособие для вузов по направлению подгот. «Технолог. машины и оборудование» / К.Д. Андреев [и др.] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет / Под ред. В.А. Рассохина, В.Г. Полищука.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 294 с.— В надзаг.: Приоритетный национальный проект «Образование». Инновационная образовательная программа Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
8. **Сипенков, И.Е.** Прецизионные газовые подшипники [Текст] / И.Е. Сипенков, А.Ю. Филиппов, Ю.Я. Болдырев [и др.] / Под ред. А.Ю. Филиппова и И.Е. Сипенкова / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор».— СПб., 2007.— 504 с.
9. **Беседин, С.Н.** Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности на базе газотурбинного цикла простой схемы с сильно развитой системой регенерации тепла [Текст] / С.Н. Беседин [и др.] // Инновационная политика и изобретатели («Россия — начало XXI века): матер. Межрегион. научно-техн. конф. изобретателей. Каталог Городской выставки изобретений 28–29 апреля 2009 года / Творческий союз изобретателей Санкт-Петербурга; Санкт-Петербургского государственного политехнического университета / Под ред. Ю.Г. Попова, А.Г. Семёнова.— СПб., 2010.— С. 58–61.
10. Рекламные буклеты компаний: Elliot, Capstone, Turbec.; [Электрон. ресурс]: [〈URL:http://www.bpcgroup.ru/press-center/publiCATION/〉](http://www.bpcgroup.ru/press-center/publiCATION/).

REFERENCES

1. **Besedin S.N.** Mikroturbinnyi generator elektricheskoi moshchnosti 100 kVt (MTG 100) [Tekst] / S.N.Besedin, E.I. Okunev, V.A. Rassokhin // Nauchnotekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. № 3(106).— S. 57–61. (rus.)
2. **Besedin S.N.** Scientific and technical justification and practical implementation of creating a microturbine generator power of 100 kW based on advanced computational and experimental methods [Tekst]: Dis. ... Candidate. tehn. Sciences: 05.04.12 / Besedin Sergey /

Saint-Petersburg State Polytechnic University.— St. Petersburg., 2011.— 298 p. (rus.)

3. **Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveyev Yu.V.** Osnovnie napravleniya razvitiya mikroturbinnykh tekhnologiy v Rossii i za rubezhom [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2011. № 4(135).— S. 41–51. (rus.)

4. **Kirillov I.I.** Teoria turbomashin [Tekst] / 2-e izd, pererab. i dop.— L.: Mashinostroenie, 1972.— 533 s. (rus.)

5. **Sokolov N.P. [et all.].** The energy machine: Determination of error in experimental studies: a tutorial, St. Petersburg State Polytechnic University, [ed. V.A. Rassokhin, V.G. Polishchuk].— St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2008. (rus.)

6. **Galerkin Yu.B., Kozachenko L.I.** Turbokompresory [Elektronnyi resurs]: ucheb. posobie [Tekst] / Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet.— SPb., 2008.— [Elektron. tekstovoye dan].— (URL: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/1544>). (rus.)

7. **Andreev K.D. [and other].** Energy machine. Heat transfer in the cooling systems of gas turbines: studies.

manual for high schools in the direction of Prep. «Technolog. Machinery and equipment» [Tekst] / St. Petersburg State Polytechnic University Ed. V.A. Rassokhin, V.G. Polishchuk.— St. Petersburg. Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2008.— 294 p. (rus.)

8. **Sipenkov I.E., Filippov A.U., Boldyrev Yu.Ia. [et all.].** Pretsizionnye gazovye podshipniki [Tekst] / Pod red. A.Yu.Filippova i I.E.Sipenkova / GNTs RF TsNII «Elektroprigor».— SPb., 2007.— 504 s. (rus.)

9. **Besedin S.N. [and other].** Development and the creation of autonomous power systems based on low-power gas turbine simple cycle schemes with highly — developed system of heat recovery [Tekst] / Innovation Policy and inventors (Russia — the beginning of XXI century): Proc. of the Intereg. Scientific Conf. of Inventors and Inventions exhibition catalog Urban 28–29 April 2009 / Creative Union of Inventors of St. Petersburg. St. Petersburg State Polytechnic University / Ed. G. Popov, A.G. Semenov.— St. Petersburg., 2010.— S. 58–61. (rus.)

10. Reklamnye buklety kompanii: Elliot, Capstone, Turbec [Elektron. resurs].— (URL: <http://www.bpcgroup.ru/press-center/publiCATION/>)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БАРСКОВ Виктор Валентинович — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: viktorbarskov@ntcmitt.ru

AUTHORS

BARSKOV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: viktorbarskov@ntcmitt.ru