

А. Н. МИНКО, В. В. ШЕВЧЕНКО

КОМПЛЕКСНАЯ СТРУКТУРА РАЗРАБОТКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

АННОТАЦИЯ Приведены результаты теоретического анализа развития турбогенераторных автономных источников электроэнергии за рубежом. Сформулирована структура разработки турбогенераторной установки блочно-модульного исполнения и определены исходные данные для процесса проектирования и конструирования структурных частей установки: одноступенчатой активной турбины, цилиндрического зубчатого редуктора и турбогенератора. Выделено комплексное представление о состоянии проблем проектирования турбогенераторной установки блочно-модульного исполнения.

Ключевые слова: турбогенераторная установка блочно-модульного исполнения, одноступенчатая активная турбина, цилиндрический зубчатый редуктор, турбогенератор.

A. MINKO, V. SHEVCHENKO

INTEGRATED STRUCTURE OF THE DEVELOPMENT OF THE TURBINE-GENERATOR SET OF A BLOCK-MODULAR TYPE

ABSTRACT Data of the theoretical analysis of the development of off-line turbine-generator electric power sources abroad have been given. A structure of the development of the turbine generator set consisting of the single-stage active turbine, cylindrical gear reducer and the turbine generator was formulated. For the single-stage active turbine the following initial parameters, in particular the pressure, flow rate, steam temperature and expected turbine power were adopted. The main design indices of the turbine structure are the optimal ratio of steam flow rates, the heat drop in the stage, nozzle block channel area, nozzle block cascade flow outlet angle, stage rotor diameter, stage rotor blade-to-blade space channel area, a number of the blades of stage rotor and the blade outlet angle. For the cylindrical gear reducer the following initial parameters were selected: circumferential velocity of driving and driven shafts and a number of drive stages. We proposed to define the following main design indices for the reducer structure: the gear diameters of driving and driven shafts of the reducer, a number of teeth for the gears of driving and driven shafts of the reducer and the value of contact stresses that arise at the interface of driving and driven shafts of the gear. The following indices were adopted for the turbine generator: total power, rated voltage, rated current, and the rotor speed and power coefficient. The ideas on the state of design problems of turbine-generator sets of this type were suggested.

Key words: turbine-generator set of a block-modular type, single-stage active turbine, cylindrical gear reducer, and the turbine generator.

Введение

В настоящее время в промышленно развитых странах Европейского Союза активно используются малые источники электроэнергии для обеспечения собственных нужд предприятий горно-металлургической, машиностроительной и сельскохозяйственной отрасли. В мировой практике в диапазоне мощностей от 100 кВт до 5 МВт наиболее часто в роли автономных источников электроэнергии используют турбогенераторные установки блочно-модульного исполнения (БМИ) [1]. Такое оборудование и комплектующие блоки к нему выпускают *G-Team a.s.* (Чехия), *Capstone Turbine Corporation* (США), *JFE Engineering Corporation* (Германия), *Turbec* (Италия), ГК «Турбопар» (Россия), *Dresser Rand* (Франция), *OPRA Technologies* (Нидерланды).

В настоящее время в Украине такое оборудование не выпускают и не используют, т.к. нет научно-технической базы для его разработки, проектирования и изготовления.

Цель работы

Целью настоящего исследования является разработка подхода (структуры) к проектированию турбогенераторной установки БМИ и определение начальных данных для проектирования и конструирования ее составных частей.

Изложение основного материала

В результате анализа зарубежных научно-технических публикаций и производственных технико-коммерческих предложений можно выделить три основных элемента турбогенераторной установки БМИ малой мощности: одноступенчатая активная турбина, цилиндрический зубчатый редуктор и турбогенератор, [2]. На рис. 1 предложена структура проектирования турбогенераторной установки БМИ:

1 Одноступенчатая активная турбина имеет следующие характеристики, [3]:

– рабочим телом турбины является свежий пар, характеристиками которого являются давление (p_1) и температура (t_1). Этот пар поступает на турбину от парогенераторов или от любого друго-

© А. Н. Минко, В. В. Шевченко, 2017

го источника пара, например, от систем испарительного охлаждения котла-утилизатора металлургического комбината. Расход пара (Q) определяется производительностью оборудования производящего пар, а мощность будущей турбины ($N_{тр}$) является задаваемым параметром. Значения расхода, давления и температуры пара являются начальными данными для расчета конструкции одноступенчатой активной турбины;

– давление отработанного пара (p_2) с температурой (t_2) на выходе из турбины определяется по координатам h, s -диаграммы и по значению энтальпии на выходе из сопловой решетки рабочего диска турбины;

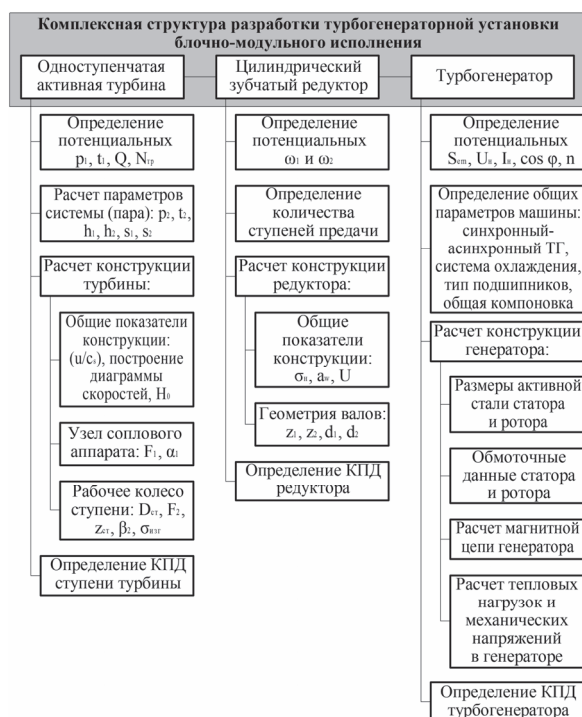


Рис. 1 – Структура проектирования турбогенераторной установки БМИ

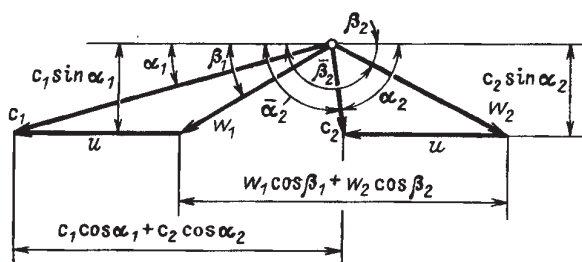


Рис. 2 – Диаграмма скоростей потока пара одноступенчатой активной турбины

– значение энтальпии (h_1) пара на входе в турбину и на выходе из турбины (h_2), а также значение энтропии (s_1) пара на входе в турбину и на выходе из турбины (s_2) определяется по h, s -диаграмме с учетом значения давления и температуры свежего пара;

– оптимальное отношение скоростей потока пара, которое будет соответствовать максимальному теплоперепаду и максимальному значению КПД турбины

$$\left(\frac{u}{c_{\phi}} \right)_{\text{опт}} \approx \frac{\varphi \cos \alpha_1}{2\sqrt{1-\rho}},$$

где u – окружная скорость диска турбины, м/с; c_{ϕ} – фиктивная скорость, м/с; φ – коэффициент скорости пара в сопловом аппарате, зависящий от расхода пара Q и от потерь пара на уплотнениях (обычно находится в диапазоне 0,9–0,98); α_1 – угол выхода потока из решетки соплового аппарата, град; ρ – степень реактивности (для одноступенчатых активных турбин ρ находится в диапазоне 0,02–0,4);

– диаграмма скоростей представлена на рис. 2, которая содержит: α_2 – угол выхода потока c_2 , град; w_1 – относительная скорость потока пара на входе в решетку рабочего колеса турбины, о.е.; β_1 – угол выхода потока w_1 , град; c_1 – поток пара на выходе из соплового аппарата; w_2 – относительная скорость потока пара на выходе из решетки рабочего колеса турбины, о.е.; β_2 – угол выхода потока w_2 , град; c_2 – поток пара на выходе из соплового аппарата.

– теплоперепад в ступени активной турбины, Дж/кг

$$H_0 = 0,5c_{\phi}^2;$$

– площадь канала соплового аппарата, m^2

$$F_1 = \frac{Q_1 v_1}{\left(0,982 - 0,005 \frac{D_{ан}}{l_{ан}} \right) \sqrt{2H_0(1-\rho)}},$$

где Q_1 – расход пара через сопловый аппарат, кг/с; v_1 – удельный объем пара при прохождении в сопловом аппарате, m^3/kg ; $D_{ан}$, $l_{ан}$ – диаметр и длина соплового аппарата, м;

– угол выхода потока из решетки соплового аппарата (α_1) для одноступенчатых активных турбин изменяется в диапазоне 12–30 град;

– средний диаметр рабочего колеса ступени турбины, м

$$D_{ст} = \frac{\sqrt{2H_0}}{\pi n} \frac{u}{c_{\phi}},$$

где n – частота вращения вала ступени, c^{-1} ;

– площадь канала межлопаточного пространства рабочего колеса ступени, m^2

$$F_2 = \frac{Q_2 v_2}{\left(0,965 - 0,01 \frac{b_{ст}}{l_{ст}} \right) \sqrt{2\rho H_0 + w_1^2}},$$

где Q_2 – расход пара через межлопаточное пространство ступени, кг/с; v_2 – удельный объем пара при прохождении межлопаточного пространства ступени, m^3/kg ; $b_{ст}$, $l_{ст}$ – высота и ширина лопатки колеса ступени, м;

– количество лопаток колеса ступени

$$z_{\text{ст}} = \frac{\pi D_{\text{ст}}}{0,75\gamma},$$

где γ – длина хорды лопатки колеса ступени, м;

– угол выхода потока w_2 , град

$$\beta_2 = \frac{F_2}{\pi(D_{\text{ст}} - 0,5b_{\text{ст}})eb_{\text{ст}}},$$

где e – длина дуги, занятой сопловой решеткой, отнесенной ко всей окружности сопловой решетки (степень парциальности);

– наибольшее изгибающее напряжение, которое возникает в корневом сечении лопатки при постоянном по высоте профиле, МПа

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{Rb_{\text{ст}}}{2z_{\text{ст}}eM},$$

где R – усилие, действующее на лопатку (зависит от перепада давления на входе и выходе из рабочего колеса ступени), кг/с; M – момент сопротивления профиля лопатки (зависит от сечения профиля лопатки), м³;

– относительный КПД ступени турбины, о.е.

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{2u(c_1 \cos \alpha_1 + w_2 \cos \beta_2 - u)}{c_{\text{ф}}}.$$

2 Цилиндрический зубчатый редуктор, [4]:

– ω_1 – окружная скорость вала одноступенчатой реактивной турбины и задается по результатам расчета турбины; ω_2 – окружная скорость вала ротора турбогенератора, определяется по результатам расчета генератора. Значения ω_1 и ω_2 являются начальными данными для расчета конструкции цилиндрического зубчатого редуктора;

– для сопряжения одноступенчатой активной турбины и турбогенератора с частотой вращения ротора 3000 об/мин достаточно использовать одноступенчатый редуктор (в случаях повышенной скорости вращения турбины возможно применение двухступенчатого редуктора);

– контактные напряжения, возникающие в местах сопряжения ведущего и ведомого вала редуктора, МПа

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{270}{a_w} \sqrt{\frac{T_2 k_{\text{н}} (U+1)^3}{h_2 U^2}},$$

где a_w – межосевое расстояние активной поверхности зубцов ведущего и ведомого вала редуктора, м; T_2 – крутящий момент ведомого вала, Н·м; $k_{\text{н}}$ – коэффициент нагрузки, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по ширине венца и между зубцами, а также динамические перемещения вала; U – передаточное отношение редуктора, $U = \omega_1 / \omega_2$, о.е.; h_2 – ширина колеса, на котором размещена шестеренка, м;

– количество зубьев на шестеренке ведущего вала

$$z_1 = \frac{2a_w \cos \lambda}{m(U+1)},$$

где $\cos \lambda$ – угол наклона зубцов, град; m – нормальный модуль зацепления, изменяется в диапазоне $(0,01 \dots 0,02) \cdot a_w$, м;

– количество зубьев на шестеренке ведомого вала

$$z_2 = z_1 U;$$

– диаметр шестерни ведущего вала, м

$$d_1 = \frac{m}{\cos \lambda} z_1;$$

– диаметр шестерни ведомого вала, м

$$d_2 = \frac{m}{\cos \lambda} z_2;$$

– относительный КПД редуктора, о.е.

$$\eta_{\text{ред}} = \eta_{\text{зуб}} \eta_{\text{под}},$$

где $\eta_{\text{зуб}}$ – КПД пары цилиндрических зубцовых колес, о.е.; $\eta_{\text{под}}$ – КПД подшипникового узла редуктора, о.е.

3 Турбогенератор (ТГ):

– под значениями полной мощности ТГ ($S_{\text{ем}}$), номинального напряжения ($U_{\text{н}}$), номинального тока ($I_{\text{н}}$), коэффициента мощности ($\cos \phi$) и частоты вращения ротора (n) понимаются основные электромеханические показатели будущего ТГ, и эти значения являются начальными данными для расчета конструкции ТГ;

– рекомендации по определению общих параметров машины: синхронный/асинхронный ТГ, система охлаждения, тип подшипников, общая компоновка подробно изложены в [5];

– определение размеров активной стали статора и ротора, обмоточных данных, расчет магнитной цепи ТГ, расчет тепловых нагрузок и механических напряжений в ТГ, а также определение КПД турбогенератора подробно изложены в [6].

Выводы

1 Анализ зарубежных публикаций и мировых тенденций развития малой энергетики показал, что применение БМИ для обеспечения собственных нужд крупных промышленных предприятий является эффективным способом энергосбережения в промышленности.

2 Предложенная комплексная структура разработки турбогенераторной установки БМИ скомпонованная по схеме «турбина-редуктор-генератор» позволяет сформулировать общий подход и начальные данные процесса разработки и проектирования подобного рода установок.

3 Необходимо освоить разработку и изготовление турбогенераторных БМИ исполнения отечественными производителями по образцу европейских аналогов.

Список литературы

- 1 **Минко, А. Н.** О повышении конкурентоспособности отечественных турбогенераторов / **А. Н. Минко, В. В. Шевченко** // XI Міжнародної наук.-техн. конф. м. Кременчук 09–11 квітня 2013 р. – Кременчук : КрНУ. – 2013. – С. 220–221 – ISSN 2079-5106.
- 2 Український національний комітет міжнародної ради великих електричних систем CIGRE Громадська організація «Асоціація «СІГРЕ–Україна» [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://cigre.org.ua>. – Заголовок з екрану. – 15.01.2017.
- 3 **Овсянников, Б. В.** Теория и расчёт агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей / **Б. В. Овсянников, Б. И. Боровский**. – Москва : Машиностроение, 1986. – 376 с.
- 4 Расчеты деталей машин : справ. пособие. / **А. В. Кузьмин, И. М. Чернин, Б. С. Козинцев**. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск : Высшая школа, 1986. – 400 с.
- 5 **Шевченко, В. В.** Развитие систем охлаждения и оптимизация конструкций турбогенераторов: монография / **В. В. Шевченко, А. Н. Минко**. – Харьков: Издатель Иванченко И.С., 2013. – 242 с. – ISBN 978-617-7033-20-1
- 6 **Усольцев, А. А.** Электрические машины : учебное

пособие / **А. А. Усольцев**. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Minko, A. and Shevchenko, V.** (2013), "On increasing the competitiveness of domestic turbogenerators", *Documents XI International nauk.-tech. conf. Kremenchug 09–11 April 2013*, pp. 220–221, ISSN 2079-5106.
- 2 "Ukrainsky natsionalny komitet mizhnarodnoi for great elektrichnih systems CIGRE Gromadska organizatsiya "Asotsiatsiya" SIGRE-Ukraine", available at: <http://cigre.org.ua> (accessed 15 January 2017).
- 3 **Ovsyannikov, B. and Borovsky, B.** (1986), *Theory and calculation of aggregate supply of liquid rocket engines*, Mechanical engineering, Moscow, Russia.
- 4 **Kuzmin, V., Chernin, I. and Kozintsev, B.** (1986), *Calculations of machine parts*, Higher School, Minsk, Republic of Belarus.
- 5 **Shevchenko, V. and Minko, A.** (2013), *Development of cooling systems and optimization of turbine generators*, Monograph, Publisher Ivanchenko I.S., Kharkov, Ukraine, ISBN 978-617-7033-20-1.
- 6 **Usoltsev, A.** (2013), *Electrical Machines*, ITMO, St. Petersburg, Russia.

Сведения об авторах (About authors)

Минко Александр Николаевич – кандидат технических наук, заведующий отделом, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»; г. Харьков, Украина; e-mail: alexandr.minko@list.ru, ORCID 0000-0003-3206-0131.

Minko Alexandr – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Head. Department, SE "UkrSTC "Energestal", Kharkov, Ukraine.

Шевченко Валентина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрические машины», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков; e-mail: zurbagan@mail.ru, ORCID 0000-0002-9557-9849.

Shevchenko Valentine – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, Professor of "Electrical machines", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Минко, А. Н. Комплексная структура разработки турбогенераторной установки блочно-модульного исполнения / **А. Н. Минко, В. В. Шевченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 86–89. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.14.

Please cite this article as:

Minko, A. and Shevchenko, V. (2017), "Integrated Structure of the Development of the Turbine-Generator Set of a Block-Modular Type", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 86–89, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.14

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мінко, О. М. Комплексна структура розробки турбогенераторної установки блочно-модульного виконання / **О. М. Мінко, В. В. Шевченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 86–89. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.14.

АНОТАЦІЯ Наведено результати теоретичного аналізу розвитку турбогенераторних, автономних джерел електроенергії за кордоном. Сформульована структура розробки турбогенераторної установки блочно-модульного виконання та визначено початкові дані для процесу проектування і конструювання структурних частин установки: одноступінчастої активної турбіни, циліндричного зубчастого редуктора та турбогенератора. Відмічено комплексне уявлення про стан проблем проектування турбогенераторних установок блочно-модульного виконання.

Ключові слова: турбогенераторна установка блочно-модульного виконання, одноступенева активна турбіна, циліндричний зубчастий редуктор, турбогенератор.

Поступила (received) 15.02.2017