

СТАТЬИ

УДК 004.942:621.225

**ОБОБЩЁННАЯ МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАТИМЫХ ГИДРОТУРБИН****Ильичев В.Ю., Юрик Е.А., Трутнев Д.С.***Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

В начале данной статьи приведён обзор современных установок для покрытия разных частей нагрузки в электрических сетях, показано, что актуальной проблемой является создание новых, более совершенных установок, предназначенных для покрытия пиков нагрузки. Главной целью описанной работы являлась разработка обобщённой поэтапной методики автоматизированного проектирования таких установок – энергогенерирующих и энергоаккумулирующих, использующих преобразование потенциальной энергии воды, расположенной на разных высотных уровнях, в кинетическую, и наоборот – гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), созданных на основе так называемых обратимых гидромашин, которые могут работать как в качестве турбины, так и в качестве насоса. Приведённая методика создана путём анализа наиболее передовых методов проектирования гидромашин, позволившего предложить новый метод проектирования, начиная с определения исходных данных, заканчивая профилированием рабочего колеса и созданием трёхмерной модели гидромашин. Показана и доказана важность и перспективность использования разработанной методики проектирования, так как она позволяет добиться качественного повышения показателей обратимых гидромашин и ускорения процесса их разработки. Упрощение процесса проектирования гидроаккумулирующих электростанций должно привести к их большему распространению и в конечном итоге к повышению качества работы энергосистем путём оптимизации перераспределения электрической мощности в течение суток. Это должно также существенно повысить и экономические показатели российских электрических сетей. В результате проведённых исследований предложены направления проведения дальнейших исследований и способы совершенствования конструкций и процессов в отрасли проектирования и строительства гидроаккумулирующих электростанций.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, гидроаккумулирующая электростанция, обратимая гидромашин, пиковая нагрузка, профилирование рабочего колеса, радиально-осевая гидротурбина

**THE GENERALIZED TECHNIQUE OF AUTOMATED DESIGN
OF REVERSIBLE WATER-WHEELS****Ilichev V.Yu., Yurik E.A., Trutnev D.S.***Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

At the beginning of this article the review of modern plants for a covering of different parts of loading is provided in electrical networks, it is shown that a current problem is creation of the new, more perfect units intended for a covering of peaks of loading. A main goal of the described work was development of the generalized, stage-by-stage technique of automated design of such installations – the energy-generating and power heat-sink, using transformation of potential energy of the water located at the different high-rise levels in kinetic and vice versa – the pumped storage power plants created on the basis of so-called reversible hydromachines which can work both as the turbine, and as the pump. The given technique is created by the analysis of the most advanced design methods of hydromachines which allowed to offer a new design method since definition of basic data, finishing with profiling of the driving wheel and creation of three-dimensional model of the hydromachine. Importance, relevance and prospects of use of the developed design technique as it allows to achieve high-quality increase in indicators of reversible hydromachines and acceleration of process of their development is shown and proved. Simplification of a designing process of pumped storage power plants has to lead to their bigger distribution and finally to improvement of quality of work of power supply systems by optimization of redistribution of electric power within a day. It has to raise also significantly and economic indicators of the Russian electrical networks. As a result of the conducted researches the directions of carrying out further researches and ways of improvement of designs and processes in the industry of design and construction of pumped storage power plants are offered.

Keywords: automated design, pumped storage power plant, reversible hydromachine, peak loading, profiling of the driving wheel, radial-axial water-wheel

График нагрузки в современных электрических сетях имеет сильную неравномерность, и поэтому важной задачей является покрытие кратковременных, но значительных по мощности пиков нагрузки. В энергетике все электростанции принято делить на базовые, полупиковые и пиковые. Базовыми называют энергетические

установки, работающие под нагрузкой 6000 и более часов в год, полупиковые работают 2000–6000 ч/год, а пиковые 500–2000 ч/год.

Так как основная часть электрической нагрузки покрывается базовыми электростанциями, на них должны устанавливаться паровые турбины большой мощности, обладающие наибольшим КПД именно при вы-

работке номинальной мощности. Порядок и принципы проектирования таких турбоустановок достаточно хорошо разработаны и успешно применяются на практике.

Для покрытия пиковой части электрической нагрузки используется большое количество разнообразных энергоустановок и способов:

1) кратковременная перегрузка паротурбинных установок (за счёт изменения температуры и давления пара перед турбиной, отключения системы регенеративного подогрева питательной воды и т.д.);

2) использование гидравлических, дизельных, газопоршневых, газотурбинных энергетических установок, характеризующихся хорошими маневренными качествами;

3) преобразование механической энергии в энергию давления или в тепловую энергию, например путём сжатия воздуха, используемого затем в газотурбинных установках, нагрева воды в теплоаккумуляторах и др. [1].

Использование гидроаккумулирующих электростанций является одним из наиболее современных, совершенных и экономичных способов покрытия переменной части нагрузки в электросетях. При минимальных нагрузках в сети избыточная вырабатываемая энергоустановкой мощность расходуется на перекачивание воды из нижнего водохранилища в верхнее, а при максимальных нагрузках вода из верхнего водохранилища проходит через энергоагрегат в нижнее, вырабатывая мощность [2]. Оба режима работы осуществляются так называемыми обратимыми гидротурбинами, которые могут работать и в качестве насоса, и в качестве турбины.

Проектирование обратимых гидромашин является сложным и до сих пор не формализованным и не автоматизированным процессом. При их проектировании необходимо добиваться:

- уменьшения гидравлических потерь в рабочем колесе и в отводящей трубе;
- уменьшения возможности кавитации в гидротурбине для увеличения развиваемой ей мощности;
- уменьшения нестационарности потока за счёт оптимизации профилирования рабочего колеса [3].

К настоящему времени не существует обобщённой общедоступной методики поэтапного проектирования обратимых гидромашин, начиная с определения состава исходных данных до разработки конструкции всех элементов гидромашин, в том числе профилирования рабочего колеса. Есть лишь основные рекомендации по проектированию гидроаккумулирующих турбин, которые приведены в [4], и методы подбора гидромашин из уже существующих,

созданных предприятиями на основании накопленного ими опыта. Целью данной работы является разработка такой обобщённой методики с целью её применения разработчиками для создания гидромашин, обладающих лучшими эксплуатационными и экономическими характеристиками по сравнению с существующими.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных для автоматизированного проектирования используются напор воды (высота между верхним и нижним бьефами) и мощность гидротурбины [5].

Вначале осуществляется подбор модельной гидротурбины-прототипа [6]. Для обеспечения максимального КПД и заданного значения мощности турбины выбирается диаметр её рабочего колеса и частота вращения. При этом стараются также максимально уменьшить габариты энергетической установки.

В процессе выбора турбины-прототипа используются характеристики гидротурбин, наглядно изображающие связь их мощности, напора, расхода и КПД [7].

Блок-схема программы, разработанной для реализации описанного процесса оптимизации, приведена на рис. 1.

После выбора прототипа турбины необходимо спроектировать её рабочее колесо.

Профилирование колеса турбины состоит из следующих этапов:

- 1) изображение крайних обводов колеса;
- 2) изображение линий изгиба профилей в выбранных сечениях;
- 3) изображение объёмных моделей лопаточных профилей.

На первом этапе проектирования рабочего колеса турбины при помощи системы автоматизированного проектирования (например, AutoCAD, КОМПАС) разрабатывается форма крайних обводов колеса (периферийного и втулочного), которая в наибольшей мере определяет коэффициент потерь энергии при работе гидротурбины.

Профилирование обводов рабочего колеса наиболее удобно формировать, используя кривые Безье [8]. Кривые Безье описываются с помощью несложных формул и их построение легко автоматизируется.

Пример профилирования меридиональных обводов рабочего колеса (РК), произведённого авторами, приведён на рис. 2.

Для построения крайних обводов профиля лопаток необходимы следующие параметры, которые берутся с турбины-прототипа: наружный диаметр колеса на входе D_1 , втулочный, средний и внутренний диаметры на выходе из РК $D_{2вт}$, $D_{2ср}$, $D_{2к}$, ширина колеса B и высота лопатки на входе b_1 . Эти

размеры позволяют найти опорные точки для кривых Безье, формирующих втулочный и периферийный обводы.

Затем, также с помощью кривых Безье, проводится построение средних линий профилей в выбранных промежуточных сечениях лопатки по высоте.

На рис. 3 приводится пример спрофилированного по приведенному алгоритму меридионального профиля проточной части радиально-осевой турбины.

По полученным средним линиям в системах трёхмерного твердотельного моделирования (Ansys, SolidWorks и пр.) строятся профили лопаток рабочего колеса (рис. 4).

После осуществления профилирования рабочего колеса вокруг него необходимо сформировать все остальные элементы конструкции турбины, указанные на рис. 5.

Результаты исследования и их обсуждение

Таким образом, разработана методика поэтапного проектирования обратимых гидромашин, формализующая этот процесс и позволяющая существенно его упростить и ускорить. При этом достигаются оптимальные параметры работы гидромашин и обеспечение описанных в техническом задании характеристик.

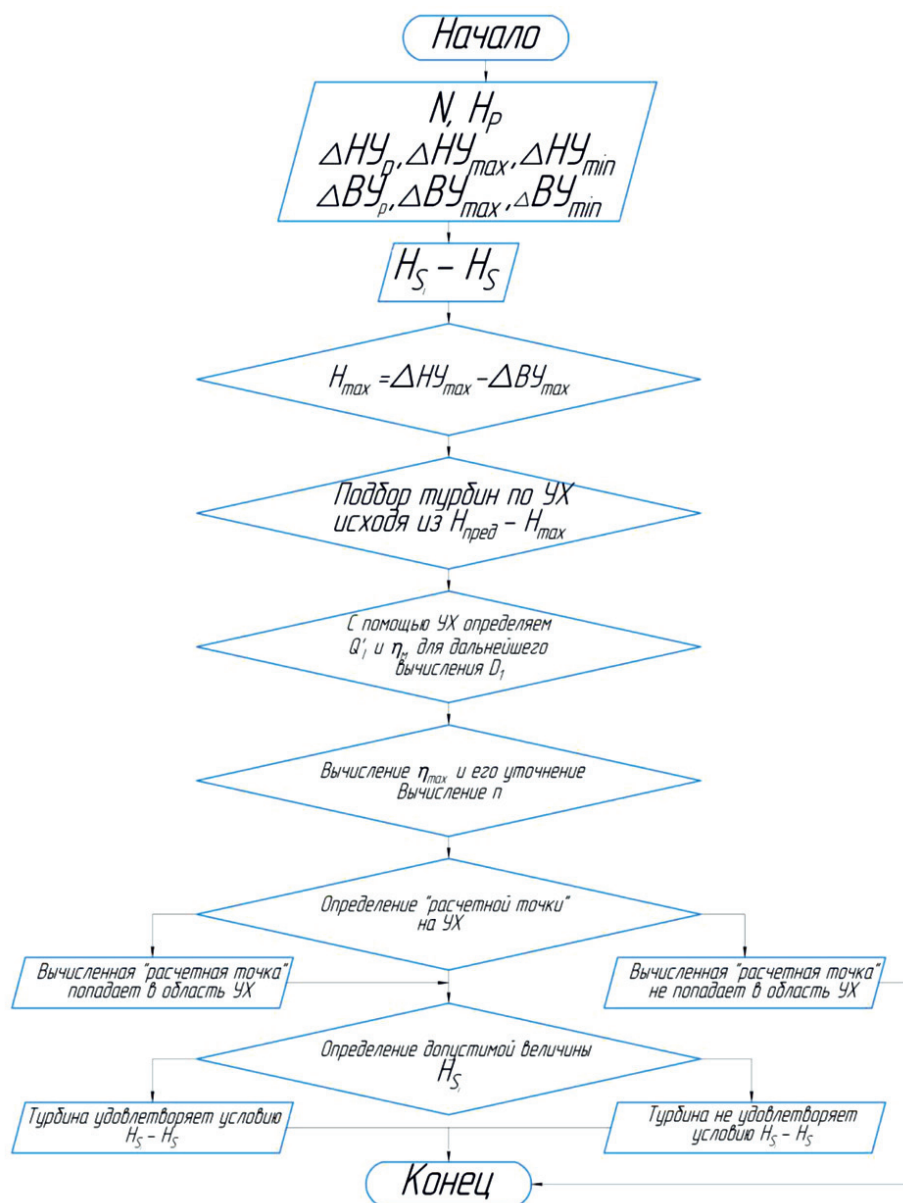


Рис. 1. Блок-схема программы для выбора модельной гидротурбины

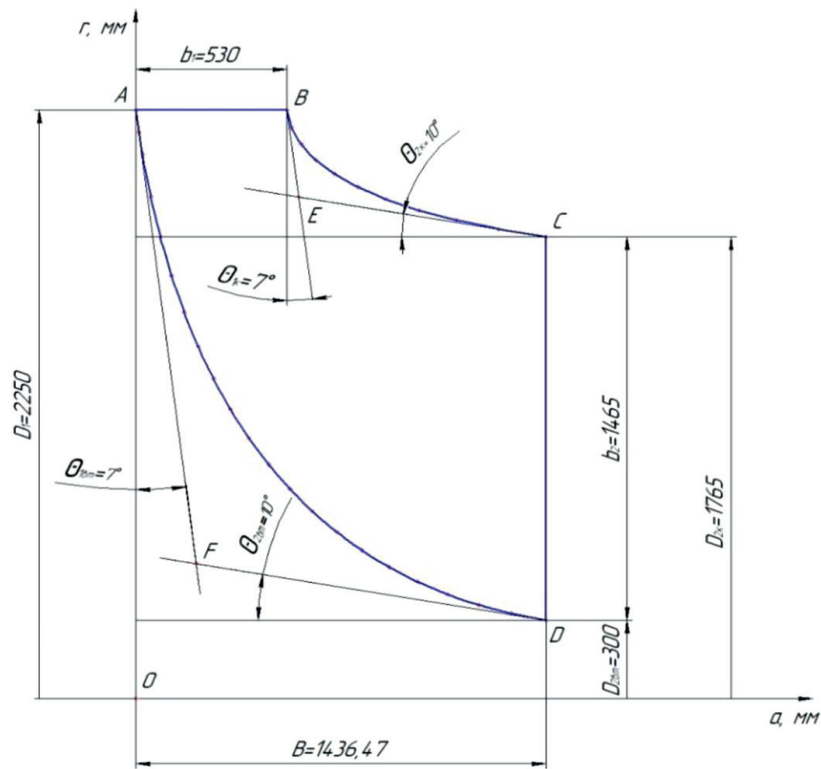


Рис. 2. Профилирование рабочего колеса гидротурбины с помощью кривых Безье

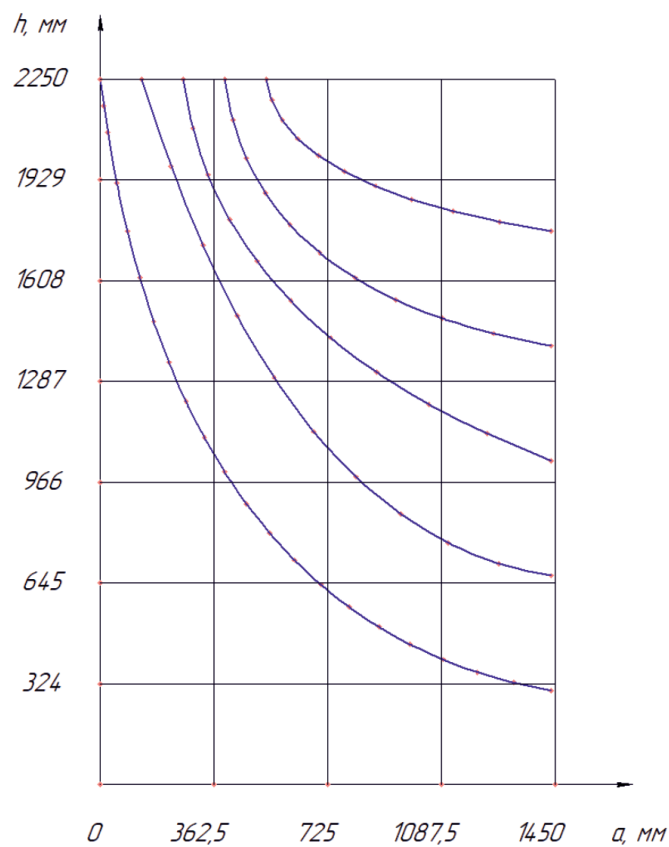


Рис. 3. Спроектированный меридиональный профиль рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины

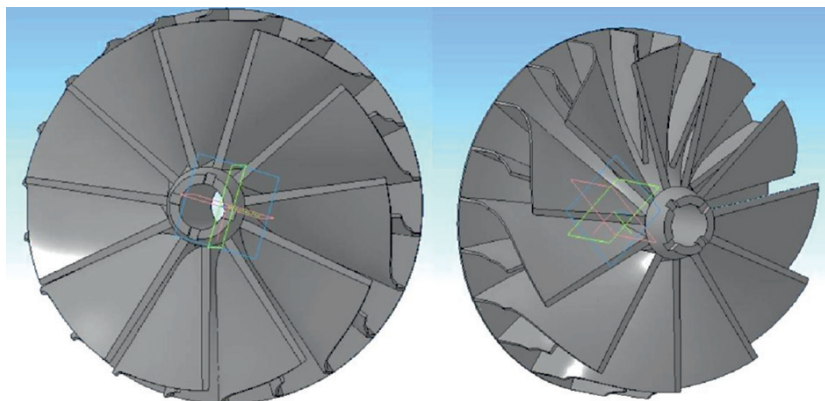


Рис. 4. Спроектированное рабочее колесо радиально-осевой турбины

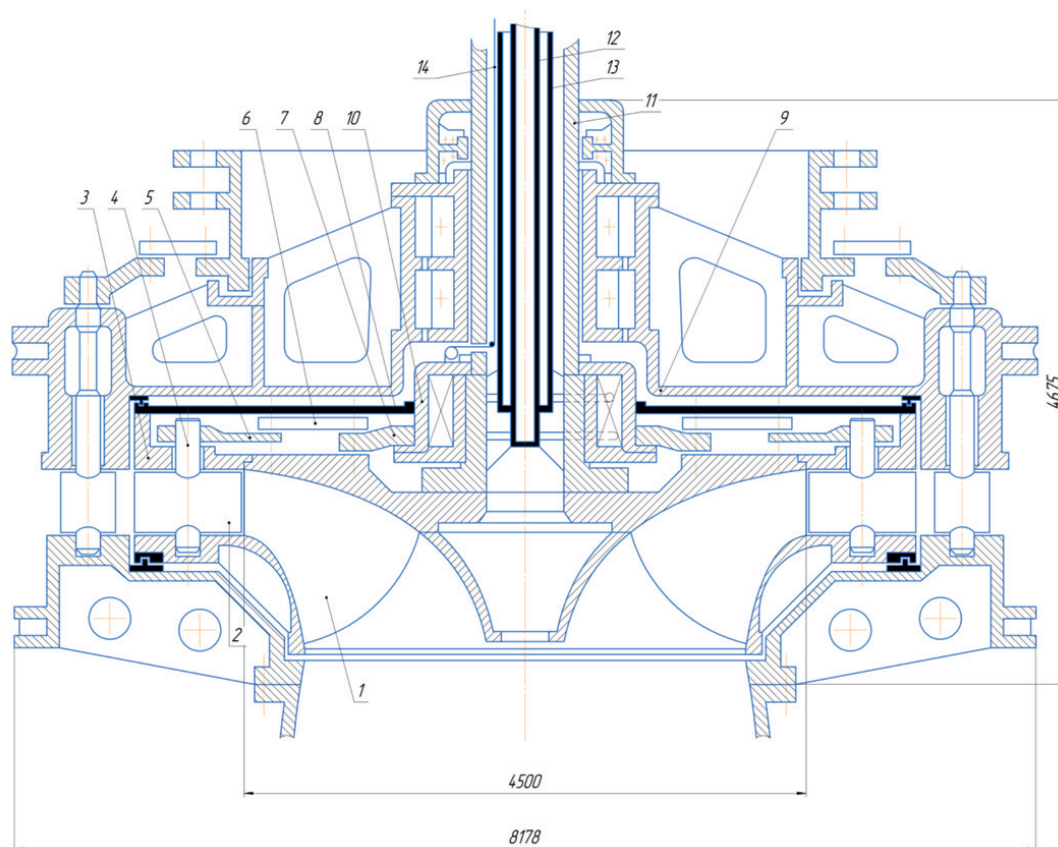


Рис. 5. 1 – неподвижные лопасти, 2 – поворотные лопасти, 3 – цапфа, 4 – верхний обод рабочего колеса, 5 – кривошип, 6 – серьга, 7 – регулирующее колесо, 8 – диафрагма, 9 – крышка, 10 – крыльчатый сервомотор, 11 – полый вал, 12, 13 – коаксиальные маслоотводы, 14 – обратная связь системы регулирования

Упрощение процесса проектирования гидроаккумулирующих электростанций должно привести к их большему распространению и в конечном итоге к повышению качества работы энергосистем путём оптимизации перераспределения электрической мощности в течение суток.

Заключение

Цель данной работы выполнена – произведён обзор и анализ современных методов бесперебойного обеспечения потребителей электроэнергией и создана обобщённая методика автоматизирован-

ного проектирования обратимых гидромашин. Предлагаются следующие направления отработки методов проектирования обратимых гидромашин:

– дальнейшая автоматизация расчётов путём полного перевода методики в программный код;

– верификация результатов проектирования путём проведения численных и натурных экспериментов и на базе этого оптимизация самого метода проектирования.

Список литературы

1. Беспалько С.А., Йовченко А.В. Техническая термодинамика. Практикум. Методические указания к практическим работам. Черкассы: ЧДТУ, 2009. 53 с.
2. Зысин Л.В., Сергеев В.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Часть 1. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. 133 с.
3. Силовые машины. Проектирование и исследование гидротурбин. [Электронный ресурс]. URL: <http://power-m.ru/customers/hydropower/turbines/> (дата обращения: 22.09.2019).
4. СО 153-34.20.161-2003 Рекомендации по проектированию технологической части гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 104 с.
5. ВНТП 41-85 Нормы технологического проектирования гидроэлектрических и гидроаккумулирующих электростанций. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293794/4293794474.htm> (дата обращения: 22.09.2019).
6. ГОСТ Р 55260.4.1-2013 Гидроэлектростанции. Часть 4–1. Технологическая часть гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2015. 76 с.
7. Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции (16–18 апреля 2019 г.) Т. 2. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 4–8.
8. Батурин О.В. Профилирование рабочих колес радиально-осевых турбин с помощью кривых Безье // Вестник СГАУ. 2011. № 3–3. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/profilirovanie-rabochih-koles-radialno-osevyh-turbin-s-pomoschyu-krivyh-bezie> (дата обращения: 22.09.2019).