

Бойко А.В., Усатый А.П., Жевноватченко И.В.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СТУПЕНЕЙ
ДЛЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Постановка и актуальность проблемы. Современные высокие темпы роста потребления энергоресурсов ведут к устойчивому повышению их дефицита и стоимости. Сжигание огромных масс органического топлива оказывает ощутимое влияние на экологию планеты. В этой связи вопросы, связанные с проектированием и совершенствованием всех составляющих элементов мощного энергетического оборудования приобретают особую актуальность. Известно, что регулировочная ступень мощной паровой турбины на пониженных режимах эксплуатации может вырабатывать до (9...10) % мощности всей турбины, а в некоторых случаях и больше. Так, например, для турбины К-310-240 зависимость доли мощности регулирующей ступени от расхода через проточную часть показана на рис.1.

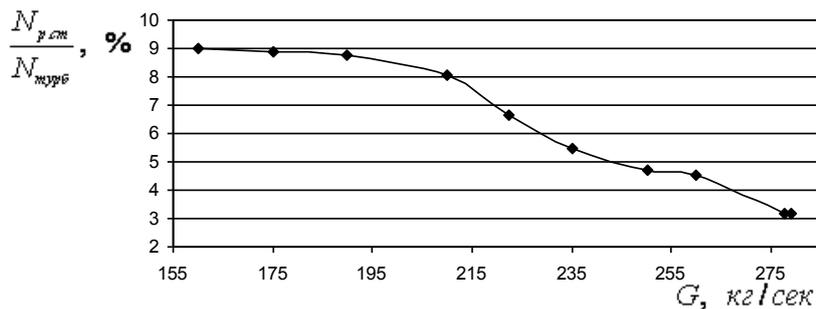


Рисунок 1 – Изменение доли мощности регулировочной ступени турбины К-310-240 от расхода через проточную часть

Поэтому проектирование регулировочных ступеней как составной части систем соплового парораспределения, характеризующихся высокими показателями эффективности, является на сегодняшний день достаточно важной и актуальной задачей. Основные идеи и подходы к расчету соплового парораспределения и его основной составляющей части – регулировочной ступени были разработаны еще в 50-е годы прошлого века, например [1], где оценка эффективности регулировочной ступени осуществляется по методике, основанной на обобщенных зависимостях. Наиболее важной частью данной методики является зависимость для окружного КПД ступени:

$$\eta_u = (U / C_0)^2 \times (-0,02224950 \times \rho^2 + 2,66898 \times \rho - 158,76728) + (U / C_0) \times (0,0167955 \times \rho^2 - 2,047149 \times \rho + 163,63490) + (-0,003767857 \times \rho^2 + 0,43656143 \times \rho + 45,3472), \quad (1)$$

где (U/C_0) – отношение окружной скорости регулировочной ступени к скорости эквивалентной ее располагаемому теплоперепаду; ρ – степень реактивности регулировочной ступени.

Вычисленное по (1) значение окружного КПД, затем уточняется рядом соответствующих поправок: на высоту лопатки, потерь от парциальности, ротационных потерь, потерь от выколачивания, потерь от диафрагменной и радиальной протечек, влажности и др. Несмотря на ее простоту, данная методика и в настоящее время находит широкое применение в практике проектирования на турбостроительных предприятиях. Ее использование позволяет находить достаточно хорошие решения, но она не дает возможности выявлять скрытые резервы повышения эффективности регулировочной ступени и всей системы соплового парораспределения. Особенно остро этот недостаток проявился с появлением современных систем управления положением регулирующих клапанов [2], способных осуществлять полностью независимое позиционирование каждого регулирующего клапана.

Таким образом, существующая обобщенная методика оценки эффективности регулировочной ступени, базирующаяся на зависимости (1), обладает как положительными качествами, так и существенным недостатком. С одной стороны, она проста, надежна, требует минимальных вычислительных ресурсов, имеется многолетний опыт ее использования. С другой стороны, она не учитывает влияния на эффективность регулировочной ступени основных параметров, характеризующих ее сопловую и рабочую решетки, например чисел лопаток, величин хорд, эффективных углов выхода потока с решеток, что практически исключает возможность ее использования в задачах оптимального проектирования.

Цель исследования. Цель настоящего исследования заключается в усовершенствовании обобщенной методики расчета эффективности регулировочной ступени мощных паровых турбин. Усовершенствование методики обеспечит учет воздействий на экономичность регулировочной ступени значительно большего количества конструктивных и режимных параметров и позволит более полно использовать потенциал повышения эффективности соплового парораспределения, заложенного в системах с независимым позиционированием каждого регулирующего клапана. Применение такой методики в процессе оптимального проектирования расширит возможности проектировщиков по оценке влияния конструктивных и режимных параметров, как на экономичность ступени, так и по выявлению дополнительных эффектов взаимодействия системы клапанов и сегментов регулировочной ступени. Безусловно, эту задачу можно решить полной заменой модели расчета регулировочной ступени на более совершенную, например [3] и такой подход, конечно, имеет право на свою реализацию. Однако, учитывая, тот факт, что регулировочные ступени в силу особенностей их работы и предъявляемым к ним требованиям характеризуются достаточно узким диапазоном изменения основных конструктивных параметров применять совершенную модель, имеющую более сложную информационную модель и требующую существенно больших вычислительных ресурсов в данном случае может быть не совсем оправданным. Здесь более целесообразным представляется подход, основанный на замене в существующей

методике оценки эффективности регулировочной степени зависимости (1) на зависимость, отражающую влияние на окружной КПД, большего количества параметров, характеризующих степень и ее решетки. Усовершенствованная таким образом методика оценки эффективности регулировочной степени будет с одной стороны обладать всеми положительными качествами существующей методики, а с другой стороны позволит осуществлять оценку влияния на ее эффективность существенно большего количества проектных параметров. Это позволит расширить число степеней свободы оптимизационных задач, решение которых обеспечит выявление скрытых резервов повышения эффективности систем соплового парораспределения.

Для получения усовершенствованной зависимости окружного КПД были использованы методы теории планирования эксперимента, которые хорошо себя зарекомендовали при решении ряда подобных задач [4,5], требующих нахождения обобщенных зависимостей различного назначения. В частности, в данном случае применены насыщенные планы Рехтшафнера [6], обработка, которых позволяет получать зависимости в виде полных квадратичных полиномов:

$$\eta_u(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \times q_i) + \sum_{i=1}^n (A_{ii} \times q_i^2) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (A_i \times q_i \times q_j), \quad (2)$$

где A – матрица коэффициентов полинома; \vec{q} – вектор нормированных значений вектора варьируемых параметров (\vec{Q}); n – число факторов полинома.

Для расширения возможностей модифицируемой методики в число компонент вектора \vec{Q} были включены восемь параметров:

$$\vec{Q} \{ (D_{cp2}/l_2), (l_1/b_1), (l_2/b_2), (t_1/b_1), (t_2/b_2), (U/C_0), \alpha_1, \beta_2 \}, \quad (3)$$

где D_{cp2} – средний диаметр рабочего колеса, l_2, b_2 – высота и хорда рабочей лопатки, l_1, b_1 – высота и хорда сопловой лопатки, t_1, t_2 – шаг сопловой и рабочей решеток, α_1, β_2 – эффективный угол выхода сопловой и рабочей решеток.

Диапазоны изменения компонент вектора \vec{Q} определялись по результатам статистической обработки соответствующих параметров регулирующих ступеней существующих турбин. Затем полученные диапазоны были дополнительно расширены примерно на (15...20) %. Окончательные границы области 8-ми факторного пространства приведены ниже.

$$\begin{aligned} (D_{cp2}/l_2) \in \{ 30...60 \}; & \quad (l_1/b_1) \in \{ 0,25...0,5 \}; & \quad (l_2/b_2) \in \{ 0,27...0,6 \}; \\ (t_1/b_1) \in \{ 0,7...0,9 \}; & \quad (t_2/b_2) \in \{ 0,5...0,7 \}; & \quad (U/C_0) \in \{ 0,3...0,6 \}; \\ \alpha_1 \in \{ 9...14 \}; & & \quad \beta_2 \in \{ 19...23 \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Спланированный численный эксперимент был проведен с использованием 1D модели прямого расчета осевых турбин [3] в указанной области пространства независимых параметров вектора \vec{Q} . В результате его обработки были получены коэффициенты A для зависимости (2), значения которых приведены ниже:

$$A_0 = 85,5167.$$

Таблица 1 – Коэффициенты при линейных компонентах вектора \vec{q}

i	1	2	3	4	5	6	7	8
A_i	-1,3742	-0,269806	0,159684	0,072580	-0,259314	5,14399	1,96559	-1,05157

Таблица 2 – Коэффициенты при квадратичных компонентах вектора \vec{q}

i	1	2	3	4	5	6	7	8
A_{ii}	-0,0187141	-0,250586	-0,210202	-0,139284	-0,164422	-6,04598	-1,56184	-0,76802

Таблица 3 – Коэффициенты (A_{ij}) при перекрестных произведениях компонент вектора \vec{q}

j	2	3	4	5	6	7	8	i
	-0,139172	0,0771105	0,0269609	0,180255	-0,19719	0,654763	-0,173225	1
		0,101228	0,245667	0,163217	-0,129589	0,0194946	0,0735825	2
			0,0997564	0,200193	-0,180207	-0,332954	0,201609	3
				0,110105	-0,0293133	-0,326174	0,0555666	4
					0,308598	0,247169	-0,413334	5
						1,08473	-0,455043	6
							0,886742	7

Для всех компонент вектора \vec{q} справедливо соотношение $-1 \leq q_i \leq 1$. Обеспечение эквивалентных связей между пространством реальных параметров вектора \vec{Q} регулировочной ступени и его представлением в нормированном пространстве вектора \vec{q} осуществляется с помощью соответствующих прямых

$$q_i = f_{iQ}(Q_i) = (2 \times Q_i - Q_{i \max} - Q_{i \min}) / (Q_{i \max} - Q_{i \min})$$

и обратных

$$Q_i = f_{iQ}^{-1}(q_i) = 0,5 \times (Q_{i \max} + Q_{i \min} + q_i \times (Q_{i \max} - Q_{i \min}))$$

нормировочных зависимостей.

Сравнительные расчетные исследования эффективности регулирующей ступени, определяемых по (1) и (2) показали (рис. 2), что значения окружного КПД (η_u) по полученной обобщенной зависимости (2) дают более оптимистические уровни значений КПД по сравнению с существующей зависимостью (1) для $(U/C_0) > 0,4$ и обратная картина наблюдается для $(U/C_0) < 0,4$. Кроме того, заметно, что полученная зависимость более чувствительна к изменению (U/C_0) .

Такие различия вполне закономерны и объяснимы. Учитывая, что зависимость (1) была получена на основании статистической обработки, существовавших в свое время (40–50 годы прошлого века) ступеней осевых турбин, в которых применялись не достаточно совершенные по сегодняшним меркам профили сопловых и рабочих решеток. Понятно, что эффективность их по сравнению с решетками из современных профилей будет ниже. Общий низкий уровень эффективности таких решеток обусловил и их более слабую реакцию на изменение углов натекания потока. Поэтому зависимость (1) окружного КПД в функции (U/C_0) , по сути, отражает влияние только потерь с выходной скоростью и практически не учитывает дополнительных потерь от величины удара натекающего потока на рабочую решетку. Отчего кривая, полученная по зависимости (1) имеет более пологий характер с заниженными значениями окружного КПД (η_u).

Анализируя значения коэффициентов при квадратичных членах зависимости (2) (см. Таблицу 2), видно, что все они отрицательны. Это говорит о том, что соответствующие им параболические зависимости имеют свои максимумы и, следовательно, при оптимальном проектировании систем соплового парораспределения с помощью, полученной зависимости (2) можно будет определять сочетания компонент вектора \vec{Q} , обеспечивающие максимальные значения эффективности регулирующей ступени и всей системы в целом. Используя полученную зависимость (2) можно, например, найти значения (t_2/b_2) , обеспечивающие максимум (η_u) при различных значениях (U/C_0) .

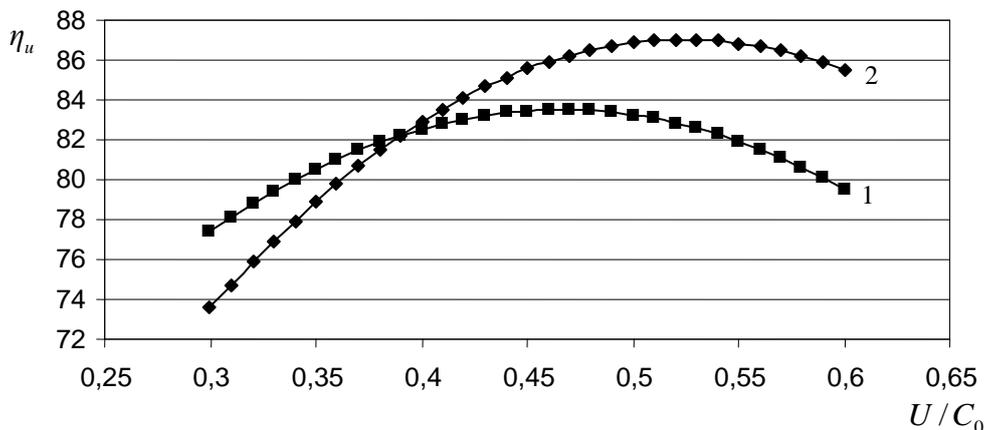


Рисунок 2 – Изменение окружного КПД (η_u) регулирующей ступени турбины К-310 от отношения скоростей. 1 – по зависимости (1), 2 – по зависимости (2)

В частности, для регулирующей ступени турбины К-310-240 при $(U/C_0)=0,3$ (работа ступни с повышенной нагрузкой и, как правило, существенным ударом натекающего потока в «животик» профиля рабочей лопатки), оптимальное значение $(t_2/b_2)=0,512$, что качественно и количественно хорошо согласуется с атласными [7] данными для активных профилей типа Р2. В то же время для $(U/C_0)=0,5$, оптимальное значение (t_2/b_2) будет равно 0,672, а для $(U/C_0)=0,6$ – соответственно $(t_2/b_2)=0,734$, что тоже не расходится с общеизвестными атласными характеристиками. Особую важность факт влияния (U/C_0) на оптимальные значения (t_2/b_2) имеет для задач оптимизации параметров регулировочной ступени с учетом переменного режима эксплуатации. В этом случае каждый сегмент ступени будет работать с переменными значениями (U/C_0) и потребуются найти такие значения t_2/b_2 (и других параметров ступени), которые обеспечат наиболее эффективную работу соплового парораспределения на заданной гамме режимов работы.

Более наглядно влияние на окружной КПД (η_u) параметров (t_1/b_1) , (t_2/b_2) , (α_1) и (β_2) для различных значений (U/C_0) представлено на рисунках 3, 4.

Аналогичные достоверные результаты можно получить для других сочетаний параметров, входящими в обобщенную зависимость (2). Понятно, что в процессе последующих расчетных исследований с использованием полученной методики, может возникнуть потребность уточнения диапазонов изменения компонент вектора \vec{Q} . Для этого необходимо будет спланировать новый вычислительный эксперимент и получить уточненные значения коэффициентов (А). В общем случае, коэффициенты (А) можно определять для каждой проектируемой регулировочной ступени.

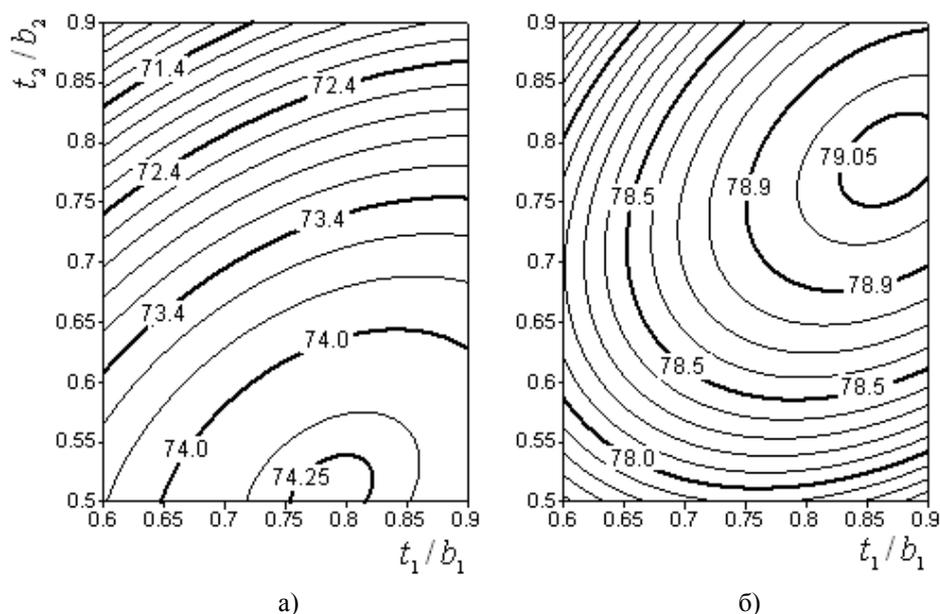


Рисунок 3 – Изменение окружного КПД (η_u) регулировочной ступени в зависимости от относительных шагов сопловой и рабочей решеток при:

а – $(U/C_0) = 0,3$, б – $(U/C_0) = 0,7$

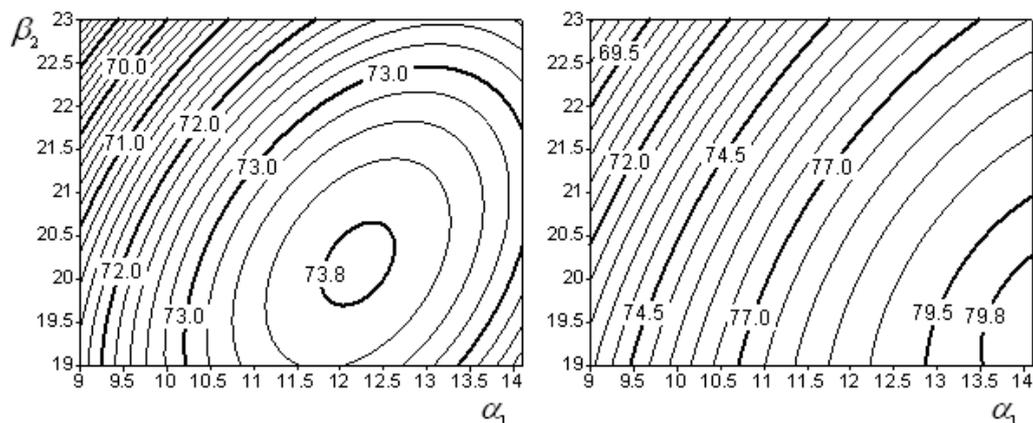


Рисунок 4 – Изменение окружного КПД (η_u) регулировочной ступени в зависимости от углов (α_1) и (β_2) при: а – $(U/C_0) = 0,3$, б – $(U/C_0) = 0,7$

Выводы

1. Предложен универсальный подход создания обобщенных зависимостей эффективности регулировочной ступени мощных паровых турбин, основанный на использовании более совершенной модели расчета ступени и методов теории планирования вычислительного эксперимента.

2. Усовершенствована обобщенная методика оценки эффективности регулировочных ступеней мощных паровых турбин, предназначена для использования в алгоритмах оптимального проектирования систем соплового парораспределения, в том числе и с учетом фактора переменности режимов эксплуатации.

3. Предложенная методика базируется на новой зависимости окружного КПД регулировочной ступени и учитывает влияние восьми важнейших параметров ступени.

4. Предварительные численные исследования подтвердили надежность и адекватность получаемых с использованием усовершенствованной методики результатов расчета систем соплового парораспределения.

Литература

1. Чупирев Д.А. Проектирование и тепловые расчеты стационарных паровых турбин. – Киев: МАШГИЗ., 1953. – 258 с.
2. Субботин В.Г., Бураков А.С., Рохленко В.Ю., Швецов В.Л. Электрогидравлические системы регулирования паровых турбин ОАО «Турбоатом» // Сб. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование.-Харьков:НТУ «ХПИ».- 2009.- №3.- С. 98–104.
3. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н. Основы теории оптимального проектирования проточных частей осевых турбин.– Учеб.пособие. Харьков: Вища шк. ХГУ, 1989.– 217 с.
4. Усатый А.П. Определение начальных приближений параметров проточной части осевой турбины в задачах оптимального синтеза и анализа. // Энергосбережение энергетика энергоаудит. Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал.– Харьков: НТЦ «Энергетические технологии».– 2008. – №11. С. 14–20.

5. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П. Использование планирования эксперимента для оценки экономичности решеток турбомашин // Энергетическое машиностроение.– №37.– 1984.– С. 20–25.

6. Rechtschaffner R.L. Saturated fractions of $2n$ and $3n$ factorial designs // Technometrics. – 1967. – № 9. – P. 569–575.

7. Профили рабочих лопаток постоянного сечения паровых стационарных турбин. Типы, основные параметры и размеры. ОСТ 108.260.02–84.

УДК 621.165

Бойко А.В., Усатий О.П., Жевноватченко І.В.

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ
ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮЮЧОГО СТУПЕНЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АНАЛІЗУ
І ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

В статті розглядається удосконалений варіант узагальненої методики розрахунку ефективності регулюючого ступеня, що забезпечує додаткове урахування впливу на його окружний ККД ряду основних конструктивних параметрів решіток ступеня. Нова залежність окружного ККД отримана за допомогою обробки результатів спланованого чисельного експерименту з використанням більш досконалої моделі розрахунку проточної частини осевої турбіни. Використання отриманої залежності дозволяє перейти до нового класу задач – оптимальному проектуванню систем соплового паророзподілу, у тому числі і з урахуванням зміни режимів експлуатації.

Boiko A.V., Usatyi A.P., Gevnovatchenko I.V.

**IMPROVEMENT OF THE GENERALIZED DESIGN PROCEDURE
OF ADJUSTING STAGES EFFICIENCY
FOR PROBLEMS OF ANALYSIS AND OPTIMAL DESIGN**

In article the improved variant of the generalized design procedure of the adjusting stage efficiency which allows considering in addition influence of some basic design data of the stage on its efficiency is given. New dependence of efficiency is received by processing of results of the planned numerical experiment with use of more perfect model of axial turbine flow path calculation. Use of the received dependence allows passing to a new class of problems – to optimal design of nozzle steam distribution systems, including taking into account change of operation modes.