

УДК 621.165

**Р.Р. Симашов, Ю.Л. Куликов**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К МНОГОРЕЖИМНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТУРБИН**

*Представлен анализ различных методик многорежимной оптимизации проточной части турбин.*

*Ключевые слова:* математическая модель, многорежимная оптимизация, переменный режим, малорасходная турбина.

**R.R. Simashov, U.L. Kulikov**

## **ANALYSIS OF EXISTING METHODS TO MULTIMODE OPTIMIZATION TURBINES**

*Presents analysis different methods of multimode optimization flowing part turbines.*

*Key words:* mathematical model, multi-mode optimization, variable mode, low-power turbine.

Большинство приводных механизмов эксплуатируются в широком диапазоне режимов, в то время как геометрические характеристики проточной части (ПЧ) определяются на номинальном режиме. Влияние переменных режимов при проектировании обычно учитывается субъективно путем проектирования не на номинальный, а на режим при пониженной среднеэксплуатационной нагрузке [6, 2]. Обеспечение высокой экономичности не только на режимах номинальной мощности, но и на частичных режимах при изменении параметров окружающей среды приводит к постановке и решению задачи оптимизации ПЧ турбины с объективным учетом ее характеристик на переменных режимах.

Попытка объективного учета влияния переменного режима предпринята в [7]. Многорежимная оптимизация (МО) четырехступенчатой газовой турбины осуществлялась на основе результатов расчета на всех режимах, включая и номинальный. В качестве функции цели (ФЦ) было выбрано среднее значение КПД на трех режимах. Режимы задавались частотами вращения (своя частота для данного режима работы). Параметры перед и за турбиной ( $P_0^*$ ,  $T_0^*$ ,  $P_2$ ) на всех режимах были одинаковыми, а расход газа  $G$  был задан в виде границы II рода ( $f(X) \geq 0$ ) на номинальном режиме. Варьировались по 6 основных геометрических параметров в ПЧ в каждой ступени ( $\alpha_{1к}$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $\beta_{2к}$ ). МО в такой постановке позволила повысить средний КПД турбины на 1,4 % и улучшить в целом характеристику турбины по сравнению к исходному варианту (рис. 1).

Дальнейшее развитие задача многорежимной оптимизации получила в работах ЛПИ (СПбГПУ) [4, 3]. Развитый в этих работах подход к задаче МО многоступенчатых осевых тепловых турбин позволил успешно применить его к выбору номинального режима цилиндра высокого давления (ЦВД) влажно-паровой турбины с большими нерегулируемыми отборами пара [8] и к оптимизации ПЧ отсеков низкого давления тепловых турбин [5]. Суть подхода заключается в следующем. Поиск оптимального варианта ПЧ многоступенчатой осевой турбины ведется с учетом изменения структуры потока вдоль радиуса в межвенцовых зазорах и расчетом характеристик синтезированной на каждом шаге поиска ПЧ на переменных режимах.

$\tau_n, \tau_n$  – время работы турбины на номинальном и переменном режимах; 1 – ПЧ, спроектированная только на номинальный режим ( $\bar{\tau} = 1$ ); 2 и 3 – ПЧ, спроектированные с учетом переменного режима ( $\bar{\tau} = 0,5$  и  $0,2$  соответственно).

Синтез ПЧ осуществляется на номинальном режиме в рамках квазидвухмерной постановки на заданную номинальную мощность. Расчет переменных режимов, которые однозначно задаются параметрами перед и за турбиной ( $P_{0i}^*, T_{0i}^*, P_{2i}$ ), ведется в рамках одномерной математической модели. В качестве ФЦ принят осредненный по всем режимам относительный внутренний КПД проточной части

$$\eta_T = \frac{\sum_{q=1}^t (\eta \cdot \tau)_q}{\sum_{q=1}^t \tau_q},$$

где  $t$  – число режимов;  $\eta_{\text{ФЦ}}$  – КПД;  $\tau_{\text{ФЦ}}$  – условное время работы турбины на соответствующем режиме.

Варьируемыми параметрами для каждой ступени выбраны углы потока в корневом сечении  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ , угол тангенциального наклона кромок направляющих лопаток  $\delta$  и показатель степени в уравнении, определяющем закрутку угла  $\alpha_1$  по высоте ПЧ. Поиск максимума ФЦ ищется в  $(b, x, y)$  – мерном пространстве, где  $y$  – число ступеней турбины. Приведенные в работах [3, 4] примеры расчета свидетельствуют о целесообразности данного подхода к повышению экономичности турбин на переменных режимах; турбины, спроектированные с учетом переменных режимов, имели больший КПД  $\eta_T$  (см. выше формулу) по сравнению с турбиной, спроектированной на номинальный режим (рис. 2). На номинальном режиме все рассчитанные варианты ПЧ имели примерно одинаковый КПД  $\eta_{T,н} \approx \text{idem}$ .

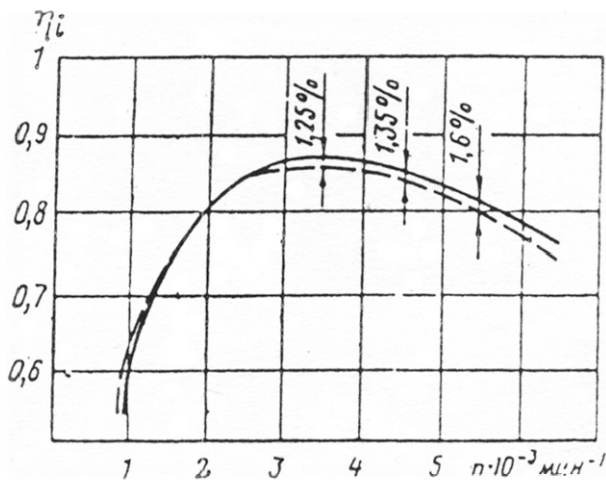


Рис. 1. Характеристики четырехступенчатой турбины до (---) и после (—) оптимизации  
Fig. 1. Characteristics of four-stage turbine before (---) and after (—) optimization.

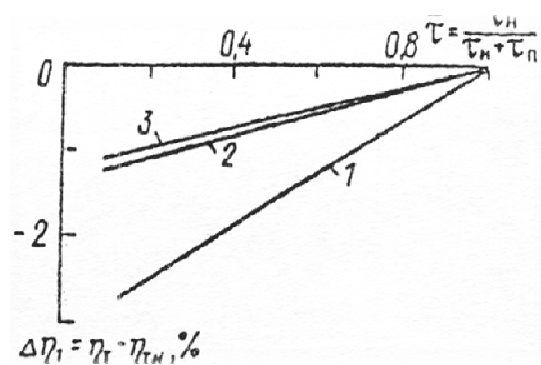


Рис. 2. Влияние  $\bar{\tau}$  на снижение КПД проточной части  $\Delta\eta_m$   
Fig. 2. Influence  $\bar{\tau}$  at reduce Energy Conversion Efficiency flow section  $\Delta\eta_m$

Развитый в работах [3, 4] подход к многорежимной оптимизации, как уже указывалось, позволяет решить задачу выбора оптимального номинального режима турбины, работающей с переменными расходами пара. Так как величина теплофикационного отбора

может существенно меняться, то турбина работает в спектре режимов ( $G_{мин} \leq G_{отб} \leq G_{макс}$ ), среди которых нужно выбрать номинальный (по расходу через отбор), чтобы ее экономичность за период эксплуатации была максимальной. В работе [8] эта задача решалась путем сравнения вариантов ПЧ турбин, спроектированных на различные  $G_{отб}$ . Для каждого варианта решалась задача многорежимной оптимизации в описанной выше постановке. Примеры оптимизации различных вариантов ПЧ турбин с большими нерегулируемыми отборами, приведенные в статье, показали возможность применения методов многорежимной оптимизации для выбора номинального режима отсека паровой турбины.

Параллельно работе [8] в работе [1] задача выбора оптимального номинального режима турбины с теплофикационными отборами была решена не путем сравнения вариантов, а как задача оптимизации для любого заданного числа отборов. Такая постановка, по сути, является развитием подхода, предложенного в работе [8]. Однако наличие еще одного иерархического уровня оптимизации привело к упрощению задачи собственно многорежимной оптимизации турбины: оптимизация на номинальном режиме ведется только на среднем диаметре, коэффициенты потерь при расчете переменных режимов принимаются постоянными. Результаты расчетов, приведенные в статье, и основные выводы согласуются с приведенными в работе [8].

Развитые в рассмотренных работах прогрессивные подходы к многорежимной оптимизации требуют дальнейшего совершенствования с учетом графиков нагрузок, системы парораспределения и программ регулирования турбины, т.е. разработки задачи многорежимной оптимизации МРТ в составе энергетической установки, как того требует системный подход к проектированию АЭУ.

### Список литературы

1. Гаркуша А.В., Субботович В.П. Методика выбора оптимальных расчетных режимов при проектировании ступеней турбины, работающей с переменными расходами пара // Энергетическое машиностроение. – 1988. – № 45. – С. 7-14.
2. Курзон А.Г. Теория судовых паровых и газовых турбин. – Л.: Судостроение, 1970. – 592 с.
3. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей многоступенчатых турбин. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1992. – 196 с.
4. Лапшин К.Л. Многорежимная оптимизация проточных частей осевых тепловых турбин // Теплоэнергетика. – 1986. – № 1. – С. 56-57.
5. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей отсеков низкого давления тепловых турбин // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 18-21.
6. Топунов А.М. Теория судовых турбин. – Л.: Судостроение, 1985. – 472 с.
7. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
8. Ферафонтьев Ю.В., Лапшин К.Л., Гаев В.Д. К выбору оптимального номинального режима ЦВД влажно-паровой турбины с большими нерегулируемыми отборами пара // Теплоэнергетика. – 1988. – № 11. – С. 64-65.

**Сведения об авторах:** Симашов Рафаиль Равильевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: forsिमашов@yandex.ru;

Куликов Юрий Львович, старший преподаватель, e-mail: kulikov-uryi@yandex.ru.