

УДК 621.165

А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПИ»;

А. П. УСАТЫЙ, д-р техн. наук, с.н.с.; НТУ «ХПИ»;

Е. П. АВДЕЕВА, аспірантка НТУ «ХПИ»

МЕТОДОЛОГИЯ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Разработана методология оптимизации проточной части мощных паровых турбин с учетом режимов эксплуатации. Представлена новая сложная иерархическая структура оптимизационной задачи реализованной в САПР «Турбоагрегат», которая основана на принципах единого интегрированного информационного пространства, путем добавления новых объектов оптимизации. Для организации эффективного информационного обмена процесс оптимального проектирования реализован с использованием рекурсивного обхода уровней оптимизации.

Ключевые слова: единое интегрированное информационное пространство, оптимальное проектирование, режим работы, паровая турбина.

Введение

Повышение эффективности турбоустановок является актуальной задачей и всегда стояла и стоит на повестке дня их создателей. Оптимизация системы регулирования турбин на переменном режиме является одним из резервов повышения КПД. Благодаря быстрому развитию вычислительной техники данную задачу целесообразно решать на этапе предварительного проектирования в рамках использования новых систем автоматизированного проектирования (САПР).

В основном существующие алгоритмы оптимального проектирования проточной части турбоустановок применимы к турбинам, предназначенным для работы на постоянном режиме. Вместе с тем, большинство турбин работает на нерасчетном режиме, что обусловлено сезонными и суточными колебаниями нагрузки энергосистемы. Следовательно, стоит задача поиска оптимальной конструкции турбины, способной максимально эффективно работать не только на номинальном режиме, но и во всей области изменения эксплуатационных нагрузок. Решению данной задачи посвящен ряд научных исследований [1–6 и др.]. Особенно активно в этом направлении работают ученые кафедры турбиностроения НТУ «ХПИ» работы, которых посвящены проблемам создания САПР «Турбоагрегат» и методам оптимального проектирования сложных технических систем и объектов [6–8 и др.].

В частности, в работе [6] изложена методология рекурсивной объектно-ориентированной трехуровневой оптимизации проточной части турбины, где общая оптимизационная задача была представлена в виде иерархически подчиненных уровней задач оптимизации. Объектами уровней задач оптимизации здесь выступали «Цилиндр», «Ступень» и «Лопатка». На каждом уровне осуществлялось решение своих оптимизационных задач с необходимыми наборами соответствующих математических моделей, функциональных и параметрических ограничений, критериев качества, векторов оптимизируемых параметров и методов оптимизации. Применение рекурсивного алгоритма управления решением локальных (уровневых) задач оптимизации обеспечивает получение эффективного решения глобальной оптимизационной задачи.

© А.В. Бойко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева, 2014

Преимуществом разрабатываемой на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» САПР «Турбоагрегат» является возможность быстрого внедрения различных процедур, добавление объектов и уровней проектирования для решения более сложных задач с использованием существующих оптимизационных алгоритмов.

Целью данной работы является рассмотрение создания и подключения новых уровней оптимизации в подсистему оптимального проектирования САПР «Турбоагрегат» и комплексное решение задачи многокритериальной оптимизации мощной паровой турбины с учетом режимов эксплуатации.

Создание новой иерархической структуры

Поиск оптимальной конструкции мощной паровой турбины является весьма сложной задачей, решение которой требует комплексного подхода. САПР «Турбоагрегат» реализуется на принципах единого интегрированного информационного пространства (ЕИИП) и подразумевает иерархически структурированный формат описания информационных моделей объектов оптимального проектирования [6].

На рис. 1 приведена конструктивная схема объекта оптимизации: многоцилиндровая турбина с системой соплового регулирования расхода, а на рис. 2 приведена иерархическая структура её информационной модели.

На первом уровне имеется три разнотипных объекта: сопловое парораспределение (СПР), уравнивательная камера (УК) и цилиндр. При этом, каждый из них имеет свою математическую модель, систему оценки качества и свою подчиненную иерархию, кроме УК. Для оценки потерь давления в УК используется подход, изложенный в [9].

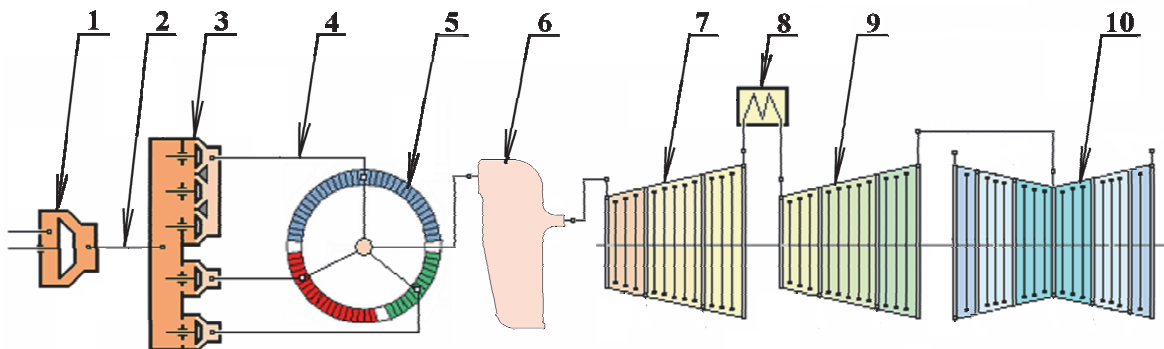


Рис. 1 – Схема проточной части:

- 1 – стопорный клапан (СПР); 2 – трубопровод стопорного клапана (СПР);
 3 – коробка с регулирующими клапанами (СПР); 4 – трубопроводы сегментов (СПР); 5 – сегменты регулирующей ступени (СПР); 6 – уравнивательная камера (УК); 7 – цилиндр высокого давления (Цилиндр); 8 – пароперегреватель (Цилиндр); 9 – цилиндр среднего давления (Цилиндр); 10 – цилиндр низкого давления (Цилиндр)

Вектор оптимизируемых параметров наивысшего (нулевого) уровня формируется из параметров низлежащих уровней (СПР и цилиндров). Таким образом, на уровне «Турбина» оптимизируются следующие параметры: диаметры регулирующих клапанов; количество сопловых каналов в сегментах; корневой диаметр направляющего аппарата регулирующей ступени; высота сопловой лопатки регулирующей ступени; корневые диаметры направляющих аппаратов первых ступеней цилиндров (ЦВД, ЦСД и ЦНД); высоты сопловых лопаток первых ступеней указанных цилиндров.

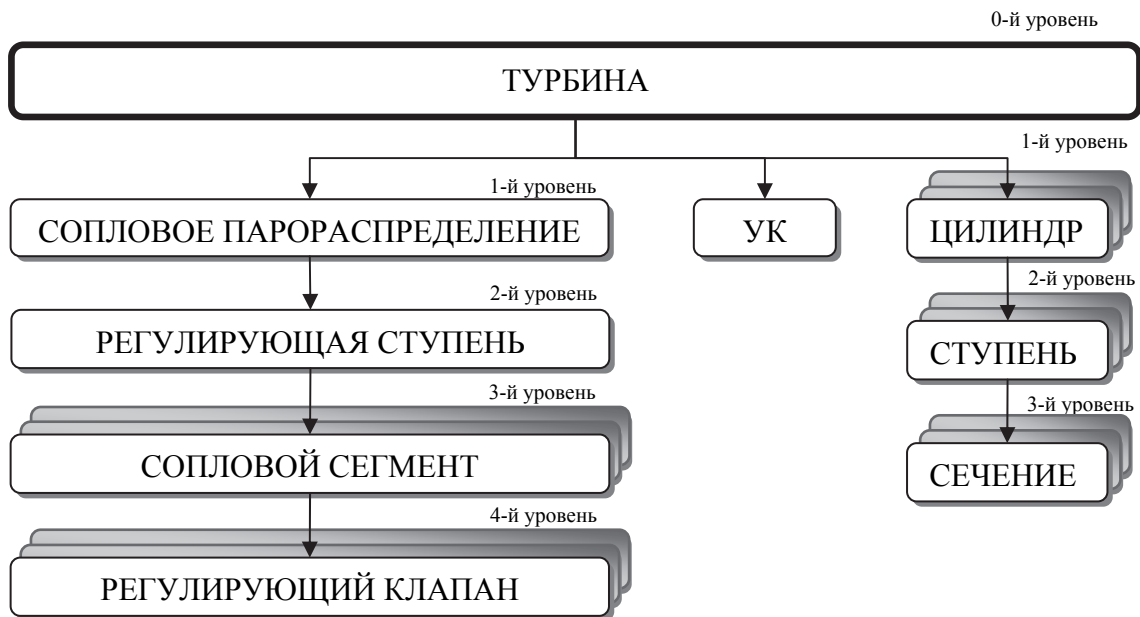


Рис. 2 – Блок-схема проекта

Целевыми функциями здесь соответственно являются: внутренний относительный КПД турбины; абсолютный КПД цикла; термический КПД цикла; мощность турбины. В качестве функционального ограничения выступает расход пара, поступающего в турбину.

Структура информационной модели «СПР», состоит из последующих уровней: «**Регулирующая ступень**», «**Сопловой сегмент**» и «**Регулирующий клапан**». На данном уровне (1-й уровень СПР) оптимизируются параметры регулирующей ступени: средний диаметр и высота рабочей лопатки регулирующей ступени; эффективные углы выхода из сопловой и рабочей решеток; число сопловых и рабочих лопаток. В качестве целевых функций здесь выступают: КПД и мощность регулирующей ступени. Функциональным ограничением является расход пара через регулирующую ступень.

«**Регулирующая ступень**». Оптимизируемыми параметрами являются: хорды сопловых и рабочих лопатки. Критерии качества данного объекта: КПД и мощность ступени; КПД и работа на окружности колеса. В качестве функционального ограничения может использоваться расход пара.

«**Сопловой сегмент**». Оптимизируемыми параметрами данного объекта является количество сопловых каналов в сегменте. Критерии качества данного объекта: мощность и работа сегмента; внутренний КПД сегмента. В качестве функциональных ограничений выступают расход пара через сегмент.

«**Регулирующий клапан**». Оптимизируемым параметром данного объекта является диаметр клапана, а критериями качества – работа и мощность сегмента, внутренний КПД сегмента, давление за клапаном. В качестве функционального ограничения выступает расход через клапан.

Структура информационной модели «**Цилиндр**», на котором выполняется оптимизация параметров определяющих форму обводов проточной части и влияющих на распределение теплоперепадов между ступенями, состоит из последующих уровней: «**Ступень**» и «**Сечение**». Оптимизируемыми параметрами уровня «**Цилиндр**» являются: величины периферийного и корневого раскрытий и перекрыш; эффективные углы выхода сопловых и рабочих решеток либо углы установок профилей сопловых и

рабочих решеток (если задана геометрия соответствующих профилей) всех цилиндров турбины. Целевые функции данного объекта: КПД цилиндра по мощности; диаграммный КПД цилиндра по заторможенным параметрам; диаграммный КПД цилиндра по статическим параметрам; мощность цилиндра. Функциональные ограничения: полное давление на входе в цилиндр; объемный расход на выходе из цилиндра; расход на входе в цилиндр; осевое усилие на ротор цилиндра.

«Ступень». На данном уровне оптимизируются следующие параметры: числа сопловых и рабочих лопаток; хорды сопловых и рабочих лопатки, либо относительные шаги сопловых и рабочих решеток. Критерии качества данного уровня: мощность ступени; КПД ступени по статическим параметрам; КПД ступени по заторможенным параметрам. Функциональные ограничения: максимальное напряжение в крайней направляющей лопатке; напряжение изгиба на входной кромке; напряжение изгиба на выходной кромке; объем сопловых лопаток; максимальное напряжение в теле диафрагмы; объем тела и обода диафрагмы; максимальное напряжение изгиба; напряжение растяжения; масса рабочих лопаток; частота колебаний вращающейся лопатки.

«Сечение». Оптимизируемыми параметрами являются: радиусы входной кромки сопловых и рабочих профилей; углы заострения входной и выходной кромок; углы отгиба выходных кромок сопловых и рабочих профилей. В качестве целевых функций выступают коэффициенты скорости сопловых и рабочих решеток. Функциональными ограничениями на данном уровне являются площадь профиля и напряжение в сечении.

Предложенная структура решения оптимизационной задачи реализована таким образом, что можно решить задачу оптимизации как целого объекта (мощная паровая турбина) так и отдельных её частей (СПР, ЦВД, ЦСД, ЦНД, отдельная ступень, отдельная лопатка и т.д.).

На рис. 3 представлено окно формирования оптимизационной задачи для наивысшего уровня «Турбина».

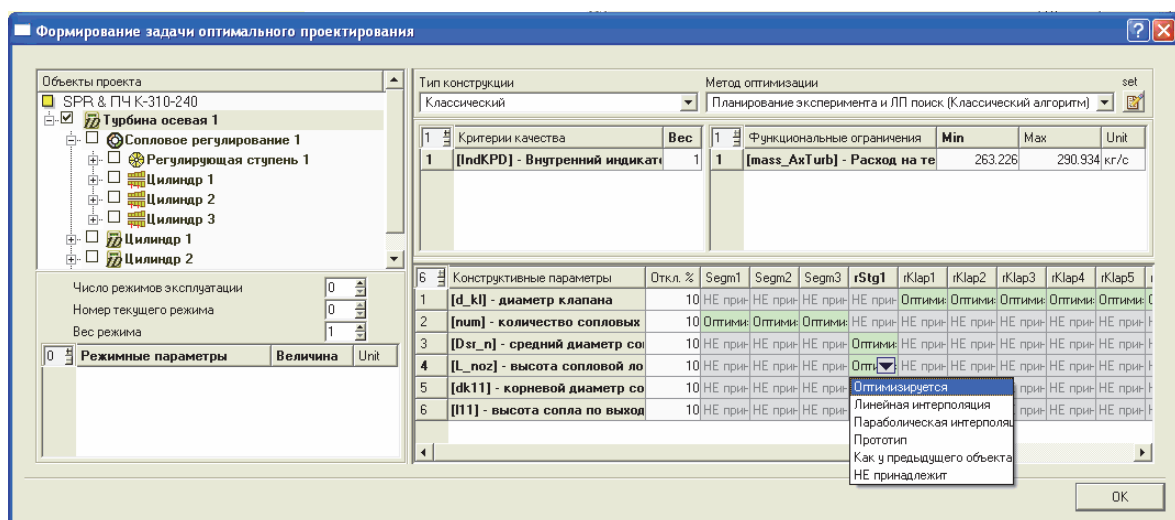


Рис. 3 – Диалоговое окно формирования оптимизационной задачи паровой турбины

В левой части рисунка изображена структура проекта. При выделении интересующего уровня в остальной части окна появляется возможность задания требуемых оптимизируемых параметров, функциональных ограничений, критериев качества, задания режимных параметров, типа конструкции и метода оптимизации.

Также из рис. 3 видно, что для варьируемых параметров в выпадающем меню можно выбрать необходимое условие, определяющее статус оптимизируемого параметра.

Благодаря иерархическому представлению информационных моделей объектов проектирования в ЕИИП удалось организовать рекурсивное взаимодействие между локальными (уровневыми) оптимизационными задачами. Использование принципа рекурсии [6] позволило применить одну и ту же процедуру оптимизации для всех уровней объекта. Универсальность данного метода позволяет в процессе формирования постановок уровневых оптимизационных задач включать/выключать в оптимизационный процесс различные параметры из соответствующих иерархических уровней информационных моделей объектов оптимального проектирования.

Используемые оптимизационные методы

Для организации эффективного информационного обмена процесс оптимального проектирования реализован с использованием рекурсивного обхода уровней оптимизации как было указано ранее. С помощью методов теории планирования эксперимента (ТПЭ) на каждом уровне рекурсии создаются соответствующие формальные макромодели (ФММ) целевых функций и функциональных ограничений. Причем, процесс рекурсии организован таким образом, что состояние вектора конструктивных параметров объекта проектирования вышестоящего уровня в каждой точке численного эксперимента этого уровня зависит не только от значений компонент вектора его ФММ, но и от результатов решения оптимизационных задач низлежащего уровня. Следовательно, создаваемая на вышестоящем уровне ФММ целевой функции включает в себя лучшие решения всех низлежащих уровней [8].

В качестве метода поисковой оптимизации в разработанной оптимизационной подсистеме используются псевдослучайные последовательности чисел ЛПт [10]. На оптимизационных уровнях при поиске оптимальных решений для каждой точки из множества точек ЛПт последовательности осуществляется расчет ФММ функциональных ограничений. Следовательно, для точек удовлетворяющих этим ограничениям выполняется расчет ФММ критериев качества.

Разработанный оптимизационный алгоритм позволяет решать и многокритериальные задачи, используя свертку векторного критерия качества, которая осуществляется по следующей зависимости

$$\|Y(\vec{x}_k, \vec{x}_p)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_i Y_i(\vec{x}_k, \vec{x}_p))^2},$$

где \vec{x}_k, \vec{x}_p – векторы конструктивных и режимных параметров, соответственно, которые вместе определяют проектное решение; μ_i – весовой коэффициент i -ого критерия качества $Y_i(\vec{x}_k, \vec{x}_p)$.

Применяя свертку критериев по предложенному методу при решении оптимизационных задач для различных сочетаний весовых коэффициентов, находим точки, наиболее удаленные от начала координат, получая, таким образом, множество недоминируемых решений, соответствующих Парето-фронт.

Выводы

1) Подключение новых объектов оптимизации в сложную иерархическую структуру проекта существенно расширяет возможности при проектировании и модернизации паровых турбин. Позволяет с большей точностью оценить

эффективность турбоустановки в целом, найти оптимальное решение при одновременном рассмотрении системы регулирования (система клапанов), регулирующей ступени, уравнивательной камеры и остальной проточной части (ЦВД, ЦСД и ЦНД).

2) Реализация в едином интегрированном информационном пространстве САПР «Турбоагрегат» новых уровней оптимизации открыла возможность получения оптимальной конструкции мощной паровой турбины, предназначенной для работы в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Список литературы: 1. *Бойко, А. В.* Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко и др. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с. – ISBN 966-593-228-4. 2. *Самойлович, Г. С.* Переменные и переходные режимы в паровых турбинах [Текст] / Г. С. Самойлович, Б. М. Трояновский. – М.: Энергоиздат, 1982. – 494 с. 3. *Капинос, В.М.* Переменный режим работы паровых турбин [Текст] / В. М. Капинос, А. В. Гаркуша. – Харьков: Выща шк. Изд-во при ХГУ, 1989. – 173 с. 4. *Demeulenaere Alain.* Application of multipoint optimization to the design of turbomachinery blades [Текст] / Alain Demeulenaere, Alban Ligout, Charles Hirsch // *Proceedings of ASME Turbo Expo.* – 2004. – GT2004-53110. 5. A precise full-dimensional design system for multistage steam turbines part I: philosophy and architecture of the system [Текст] / Hongde Jiang, Keping Xu [at alias] // *Proceedings of ASME Turbo Expo.* – 2007. – GT2007-27195. 6. *Усатый, А. П.* Всережимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве: дис. ... д-р техн. наук: 05.05.16; защищена 23.04.2013; утв. 04.07.2013 / Усатый Александр Павлович. – Х., 2012. – 418 с. – Библиогр.: С. 359–376. 7. *Бойко, А. В.* Разработка информационной среды и средств динамического управления информационными моделями данных сложных технических объектов применительно к САПР «Турбоагрегат» [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, А. П. Усатый // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»:* Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – № 5. – С. 36–42. 8. *Руденко, А. С.* Многопараметрическая оптимизация проточных частей осевых турбин с учетом режимов эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.16; защищена 17.05.2012; утв. 26.09.2012 / Руденко Алексей Сергеевич. – Х., 2011. – 151 с. – Библиогр.: С. 128–137. 9. Численные исследования эффективности уравнивательной камеры за регулирующей ступенью на разных режимах работы [Текст] / А. В. Бойко, А. П. Усатый, Е. П. Авдеева // *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.* – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 1(1044). – С. 6–11. – Бібліогр.: 4 назв. –ISSN 2078-774X. 10. *Соболь, И. М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 110 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bojko, A. V., et al. *Ajerodinamicheskij raschet i optimal'noe proektirovanie protochnoj chasti turbomashin.* Kharkov: NTU "HPI", 2002. ISBN 966-593-228-4. Print. 2. Samojlovich, G. S., and B. M. Trojanovskij. *Peremennye i perehodnye rezhimy v parovyh turbinah.* Moscow: Jenergoizdat, 1982. Print. 3. Kapinos, V. M., and A. V. Garkusha. *Peremennyj rezhim raboty parovyh turbin.* Kharkov: Vyshsha shk. Izd-vo pri HGU, 1989. Print. 4. Demeulenaere, A., A. Ligout and C. Hirsch. "Application of multipoint optimization to the design of turbomachinery blades". *Proceedings of ASME Turbo Expo* No. GT2004-53110 (2004). Print. 5. Hongde Jiang, et al. "A precise full-dimensional design system for multistage steam turbines part I: philosophy and architecture of the system." *Proceedings of ASME Turbo Expo* GT2007-27195 (2007). Print. 6. Usatyj, A. P. *Vserezhimnaja mnogoparametricheskaja mnogokriterial'naja optimizacija protochnoj chasti turbin v integrirovannom informacionnom prostranstve: dis. ... d-ra tehn. nauk.* Kharkov, 2012. Print. 7. Bojko, A. V., Ju. N. Govorushhenko and A. P. Usatyj. "Razrabotka informacionnoj sredy i sredstv dinamicheskogo upravlenija informacionnymi modeljami dannyh slozhnyh tehniceskikh ob#ektov primenitel'no k SAPR "Turboagregat". *Jenergeticheskie i teplotehniceskije processy i oborudovanie. Vestnik NTU "HPI".* No. 5. Kharkov: NTU "HPI", 2006. 36–42. Print. 8. Rudenko, A. S. *Mnogoparametricheskaja optimizacija protochnyh chastej osevyh turbin s uchetom rezhimov jekspluatacii: dis. ... kand. tehn. nauk.* Kharkov, 2011. Print. 9. Bojko, A. V., A. P. Usatyj and E. P. Avdeeva. "Chislennye issledovanija jeffektivnosti uravnitel'noj kamery za regulirujushhej stupen'ju na raznyh rezhimah raboty". *Visnyk NTU "HPI". Serija: Energetychni ta teplotehniczni procesy j ustatkuvannja.* No. 1(1044). Kharkiv: NTU "HPI", 2014. 6–11. ISSN 2078-774X. Print. 10. Sobol', I. M., and R. B. Statnikov. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami.* Moscow: Nauka, 1981. Print.

Поступила (received) 25.02.2014