

Усатый А.П.

**ОСТРОВНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ОСЕВЫХ ТУРБИН
С УЧЁТОМ ПЕРЕМЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ**

В задачах оптимального проектирования ПЧ осевых турбин используются различные подходы, методы и алгоритмы оптимизации. Существенный вклад в их развитие внесли отечественные ученые, особенно харьковской школы – ХПИ [1,2,3], ИПМаш [4], а также МЭИ, МВТУ, ЛПИ и др. Подробный анализ развития методов и алгоритмов оптимального проектирования, применяемых в области турбостроения, приведен в работе [5]. В которой четко прослеживается тенденция перехода от методов, использовавшихся на ранних этапах развития теории оптимального проектирования [6] (различные градиентные методы, детерминированные прямые методы типа Хука-Дживса или Нелдера-Мида и др.), к современным методам [7,8], основанным на использовании стохастических множеств, эвристики и различных аналогий (ЛП-поиск, моделируемый отжиг, генетические алгоритмы).

Основной причиной несостоятельности стратегий ориентирующихся на использование лишь традиционных методов, послужил процесс развития и усложнения постановок решаемых задач оптимального проектирования турбомашин. В настоящее время они характеризуются многокритериальностью и полимодальностью целевых функций, в высшей степени большой размерностью векторов управляющих параметров, высокой корреляцией конструктивных и режимных параметров, наличием широкого рода функциональных и параметрических ограничений. Особенно это характерно для задач, связанных с поиском конструкций осевых турбин, предназначенных для работы в широком диапазоне изменения режимных параметров [3].

Естественно, что при решении задач такой сложности, использование лишь классических детерминированных методов оптимизации, даже с учетом их достаточно высокой вычислительной скорости, не позволяет эффективно и в полной мере решить проблемы проектирования проточных частей турбомашин, способных удовлетворять отмеченным выше требованиям. В основном, это связано с тем, что классические алгоритмы обладают рядом существенных недостатков, которые проявляются, в первую очередь, в их достаточно низкой надежности и эффективности в случае полимодальности целевой функции. Кроме того, они предрасположены к накоплению итерационных ошибок вычислений и не способны находить максимально репрезентативные множества допустимых решений на множестве Парето, т.к. не гарантируют равномерного распределения оптимальных точек множества альтернативных, недоминируемых решений в пространствах векторов критериев качества и управляющих (конструктивных) параметров.

Последний недостаток чаще всего проявляется при трансформации задачи многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной оптимизации с использованием скалярной весовой свертки вектора критериев качества, либо переводом ряда критериев качества в ограничения что, к сожалению, использовалось и используется достаточно часто разработчиками подсистем оптимизации турбомашин. В этих случаях решением задачи оптимального проектирования осевой турбины будет ряд конструкций

очень близких друг к другу при потенциально бесконечном множестве Парето, т.е., по сути, будет найдено одно решение вместо ряда альтернативных.

Следовательно, для решения задач оптимального проектирования ПЧ осевых турбин наиболее адекватными будут методы оптимизации, способные находить репрезентативные множества альтернативных оптимальных конструкций, вместо одной или нескольких очень близких решений, а реализующие их алгоритмы должны обладать высокой вычислительной скоростью и, в том числе, способными использовать преимущества компьютеров с многоядерными процессорами. Поэтому разработка именно таких алгоритмов для решения задач оптимального проектирования осевых турбин является на сегодняшний день наиболее актуальной.

В этой связи, перспективным выглядит подход, основанный на совместном использовании как классических, так и современных методов оптимизации, а также их модификаций и различных комбинаций, что созвучно с выводами, сделанными в аналитической статье [9], по работам, использующим ГА для оптимизации ядерных реакторов.

В предлагаемой работе рассматривается подход к совершенствованию подсистемы оптимального проектирования САПР «Турбоагрегат», основанный на использовании методов теории планирования эксперимента, ЛП-поиска, а также модификации островной модели ГА для решения задач оптимального проектирования осевых турбин способных устойчиво и высокоэффективно работать на гамме режимов.

Основным назначением методов теории планирования эксперимента, в данном случае, является приведение описания критериев качества и функциональных ограничений в пространстве конструктивных и режимных параметров к единому универсальному виду – полному квадратичному полиному (формальной макромодели (ФММ) [2]):

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

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

Для всех компонент вектора \vec{q} справедливо соотношение $-1 \leq q_i \leq 1$.

Часто для повышения универсальности зависимостей (1) в качестве компонент вектора \vec{Q} приходится использовать различные критерии подобия, общепринятые в области турбиностроения. Обеспечение эквивалентных связей между пространством реальных параметров G_X ПЧ осевой турбины ($\vec{X} \in G_X$) и его представлением в пространстве G_Q параметров ФММ ($\vec{Q} \in G_Q$) осуществляется с помощью соответствующих векторов функций прямого преобразования (кодирования) $\vec{Q} = \vec{f}(\vec{X})$ и обратного преобразования (декодирования) $\vec{X} = \vec{f}^{-1}(\vec{Q})$. Использование этих функций обеспечивает эквивалентные взаимные переходы между отмеченными пространствами параметров.

Кроме того, с помощью прямых

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

и обратных

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

нормировочных зависимостей осуществляются эквивалентные операции нормирования и разнормирования, обеспечивающие однозначные связи между параметрами пространства G_Q и соответствующего ему нормированного пространства \bar{G}_q . Таким образом, алгоритмы поисковой оптимизации работают в нормированном пространстве \bar{G}_q и манипулируют соответствующими представлениями конструкций осевых турбин в этом пространстве, используя в качестве функций оценки критериев качества и функциональных ограничений зависимости вида (1). Получаемые в результате оптимального проектирования множества решений в пространстве \bar{G}_q операцией разнормирования переводятся в пространство G_Q , а с помощью вектора функций декодирования - в пространство реальных объектов (параметров) G_X .

План эксперимента составляется для параметров пространства G_Q и посредством функции $f^{-1}(\vec{Q})$ все точки плана переводятся в пространство реальных параметров ПЧ – G_X . Каждая точка плана из пространства G_X рассчитывается с помощью математической модели, отражающей течение реальных физических процессов в ПЧ осевой турбины. По результатам расчета формируются соответствующие векторы наблюдений для критериев качества и функциональных ограничений. Коэффициенты ФММ вычисляются с использованием методов теории планирования эксперимента, соответствующей обработкой полученных векторов наблюдений. Учитывая «экономность» планов эксперимента, а также простой вид зависимости (1), удастся существенным образом упростить и повысить вычислительную эффективность и надежность оптимизационных алгоритмов. В зависимости от особенностей постановки конкретной задачи оптимального проектирования при планировании численных экспериментов и создании ФММ используются трехуровневые планы Бокса и Бенкена [10] либо Рехтшаффнера [11].

ЛП_r-последовательность [12] используется для генерации начальных популяций в ГА, а также для «обучения» лидера популяции, подобно [13].

Не вдаваясь подробно в теорию ГА, отметим лишь, что они основаны на моделировании процесса эволюции с учетом факторов наследования (скрещивания), изменчивости (мутации) и отбора наиболее приспособленных особей (лучших решений). Работа ГА при решении оптимизационных задач начинается с построения некоторого множества (начальной популяции) допустимых решений (особей). Затем с помощью многочисленных случайных изменений компонент вектора управляющих параметров осуществляется целенаправленный поиск более эффективных решений (более приспособленных особей). При этом, чем больше приспособленность особи, тем больше ее вероятность воспроизвести своих потомков (новых решений) при формировании популяций новых поколений [14]. Классическая схема работы ГА приведена на рис. 1.

Существует множество вариантов реализации ГА, отличающихся методами скрещивания, мутации, отбора решений и т.д. [15]. Для решения нашей задачи за основу был взят вариант ГА, реализующий идею миграции и искусственной селекции, т.н. островную модель эволюции [16]. В отличие от обыкновенных ГА здесь реализуется макроэволюция, т.е. создается не одна популяция, а некоторое множество популяций.

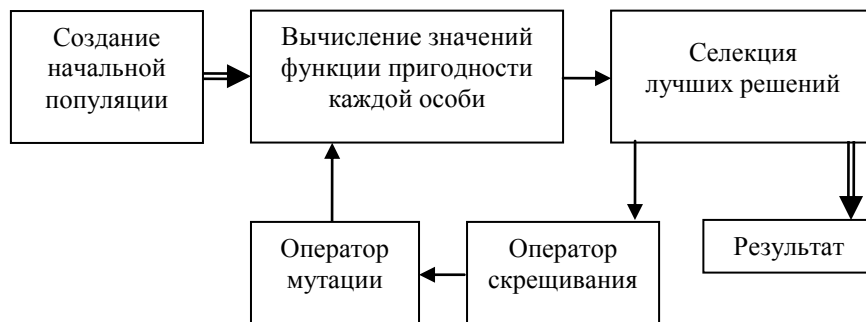


Рисунок 1 – Схема работы генетического алгоритма

В стандартном варианте островной модели генетический поиск осуществляется путем объединения родителей из различных (островных) популяций (рис. 2).

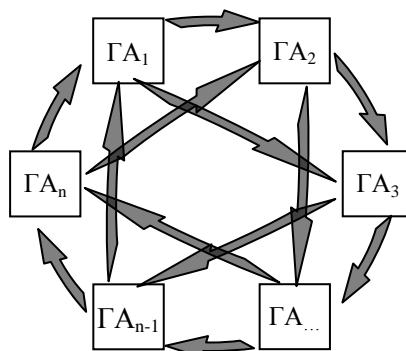


Рисунок 2 – Схема образования новых поколений в стандартном варианте островной модели ГА

В данной модели каждая из популяций (множество допустимых конструкций) совершенствуется отдельно с помощью одного из стандартных ГА, что ассоциируется с эволюционным развитием особей (в нашем случае – конструкций ПЧ осевой турбины) на нескольких изолированных островах (независимых оптимизационных процессах). Через несколько поколений происходит миграция – островные популяции конструкций обмениваются определенным количеством лучших вариантов, что позволяет совместить «достижения» независимых оптимизационных процессов на разных островах для получения наилучшего решения. Следует отметить, что островная модель ГА хорошо приспособлена для реализации многопоточных сценариев вычислений, т.к. островные эволюционные процессы могут моделироваться на отдельных процессорах, что соответствует одному из принципов развития современных оптимизационных алгоритмов.

Первый предлагаемый вариант модификации островной модели ГА для решения задач оптимального проектирования ПЧ осевых турбин с учетом режимов эксплуатации имеет следующие отличительные особенности. Число островов равно числу вероятных режимов эксплуатации. На каждом острове условия решения островной оптимизационной задачи определяются режимными параметрами, значения которых соответствуют конкретному режиму эксплуатации. Т.е. по сути, островная оптимизация кон-

струкції ПЧ здійснюється для одного режиму роботи. Після 3–5 островних поколінь здійснюється селекція особей, призначених для «переселення» на інші острови. При цьому вибираються тільки ті особи (варіанти конструкції), які найбільш ефективно працюють на всій гаммі режимів. Все разом вони утворюють множинство конструкцій, яке на наступній ітерації рішення загальної оптимізаційної задачі буде грати роль нової популяції всіх островних ГА. Таким чином не тільки доповнює оператор мутації і страхує від преждевременної збіжності і попадань в локальні оптимуми, загальної оптимізаційної задачі, але і підтримує загальну стратегію її рішення, що можна побачити при аналізі поведінки «пределных» варіантів можливих конструкцій осевих турбін. Очевидно, що у «худшій» конструкції ПЧ з будь-якої островної популяції достатньо мало шансів забезпечити інтегрально кращі показники при роботі на всіх експлуатаційних режимах. Зрозуміло також, що і «абсолютно краща» конструкція, являючись оптимальною для якого-небудь режиму, теж не зможе забезпечити максимальний рівень інтегральних характеристик, т.к. такі ПЧ характеризуються крутими залежностями критеріїв якості і можуть забезпечити ефективну роботу тільки в достатньо вузькому діапазоні зміни режимних параметрів. Тому рішенням задачі оптимального проектування ПЧ осевої турбіни з урахуванням змінного режиму роботи повинна бути конструкція (множинство альтернативних конструкцій), забезпечуюча, з урахуванням часу функціонування кожного з режимів **максимально можливі** значення критеріїв якості на цих режимах. Отримання такого множинства конструкцій і реалізує описану вище модифікацію островної моделі ГА. Т.к., з однієї сторони, островної ГА направлено на підвищення характеристик ПЧ для конкретного режиму експлуатації, а з іншої – особи нових поколінь островних оптимізаційних задач наслідують варіанти конструкцій, здатних найбільш ефективно працювати при заданому графіку зміни режимних параметрів. Цей процес має як би два критерії якості – один для островних оптимізаційних задач, а інший для міжостровної міграції в загальної оптимізаційної задачі. Схема запропонованої модифікації островної моделі ГА наведена на рис. 3.

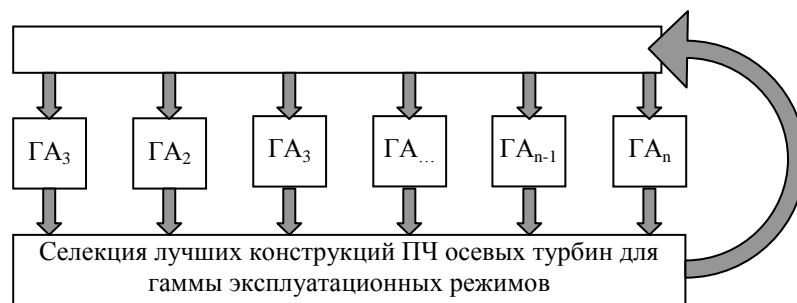


Рисунок 3 – Схема образования новых поколений в модифицированной островной модели ГА

Кроме того, перед миграцией, наилучшие варианты конструкций каждого острова, из списка «переселяемых», проходят этап «обучения» лидера [13]. Т.е. осуществляется попытка найти в достаточно локальной области вокруг лучшего островного решения конструкцию ПЧ, обладающую более высокими интегральными характеристиками. Для чего, вместо градиентного метода, в нашем случае используется ЛП-поиск. И если удастся найти такие ПЧ, то они также включаются в процесс миграции. Количество островных «переселяемых» вариантов конструкций пропорционально времени функционирования режима, что с использованием вероятностного подхода к выбору роди-

телей для скрещивания при генерации новых конструкций ПЧ отражается на частоте репродуктивности особей, полученных с того или иного острова. Это автоматически обеспечивает вероятностный учет влияния (вес) каждой островной популяции (режима эксплуатации) на решение общей оптимизационной задачи. Таким образом, в каждое новое поколение конструкций будут включаться ПЧ, являющиеся наследниками родителей, принадлежащих множествам лучших решений для каждого из режимов эксплуатации и обладающих наилучшими интегральными показателями за весь период работы на всех режимах. При скрещивании (модификации) отобранных родителей (конструкций ПЧ) в процессе генерации новых поколений используется алгоритм кроссовера с вещественным кодированием (BLX- α) [17]. Особенность данного алгоритма в том, что он допускает возможность выхода значений параметров потомков за границы значений этих параметров у родителей на величину $\Delta\alpha$, при этом родители генерируют одного потомка, характеризующегося вектором \vec{q}_3 , компоненты, которого являются

случайными числами из соответствующих интервалов $\left[\vec{d}_{\min} - \vec{\Delta}\alpha, \vec{d}_{\max} + \vec{\Delta}\alpha \right]$, где

$\vec{d}_{\max} = \max(\vec{q}_1, \vec{q}_2)$, $\vec{d}_{\min} = \min(\vec{q}_1, \vec{q}_2)$, $\vec{\Delta} = \vec{d}_{\max} - \vec{d}_{\min}$, а \vec{q}_1 и \vec{q}_2 – векторы нормированных параметров родительских конструкций ПЧ. Для случайного изменения значений конструктивных параметров применяется ряд общеизвестных операторов мутации [15].

По окончании работы ГА из последних островных популяций ПЧ осевых турбин осуществляется выбор конструкций наиболее приспособленных для работы с заданным графиком изменения нагрузки. В конечном счете, формируется множество конструкций, отвечающих требованиям поставленной задачи оптимального проектирования. Соответствующая ранжировка показателей их интегральной эффективности, а также специальная процедура селекции обеспечивают нахождение репрезентативного множества необходимых решений на множестве Парето. В формализованном виде описанный процесс оптимизации приводится ниже.

При создании ФММ (1) критериев качества и функциональных ограничений компоненты вектора \vec{Q} формируют из параметров пространства G_Q , соответствующих конструктивным и режимным параметрам пространства G_X . В нормированном виде он имеет следующий вид $\vec{q} = \{\vec{x}_c, \vec{x}_r\}$, где \vec{x}_c и \vec{x}_r – вектора, эквивалентные конструктивным и режимным параметрам ПЧ осевой турбины соответственно. Полученные ФММ предварительно также нормируются относительно их значений в центре плана эксперимента. Проще говоря, все коэффициенты каждой ФММ делятся на соответствующий им коэффициент A_0 . Это позволяет привести описание всех критериев качества к безразмерному виду и обеспечить сопоставимость их значений, не смотря на различие их физических сущностей и несопоставимость их ненормированных реальных значений в пространстве параметров G_X . Нормирование ФММ локализует область значений критериев качества в диапазоне близком к единице. А в центре плана эксперимента все критерии качества равны единице. С учетом этого функция приспособленности (цели) островных оптимизационных задач будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{is}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) &= \sum_{k=1}^{N_k} \mu_k \left(\bar{Y}_k(\bar{x}_c, \bar{x}_r) \right)^2, \\ \bar{x}_c \in C, \quad \bar{x}_r \in R, \quad [C, R] &\in \bar{G}_Q, \quad \bar{v}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) \in V, \\ -1 \leq C \leq 1, \quad -1 \leq R \leq 1, \quad 0 \leq |V| &\leq N_V < \infty, \end{aligned} \quad (2)$$

где \bar{F}_{is} – функция приспособленности островной модели ГА; N_k – количество критериев качества; μ_k – вес критерия качества; \bar{Y}_k – нормированное значение критерия качества; C, R – множества, эквивалентные конструктивным и режимным параметрам соответственно; \bar{v}, V – вектор значений и множество функциональных ограничений соответственно; N_V – границы множества функциональных ограничений.

Процесс оптимального проектирования ПЧ осевых турбин осуществляется следующим образом. Параметры каждой конструкции островных популяций предварительно проверяются на соответствие параметрическим и функциональным ограничениям. Для всех конструкций, удовлетворившим ограничениям, вычисляются соответствующие им значения функции $\bar{F}_{is}(\bar{x}_c, \bar{x}_r)$. Затем конструкции ПЧ ранжируются в порядке убывания значений этой функции. Таким образом, в начале списка будут находиться лучшие (наиболее приспособленные) конструкции осевых турбин, предназначенные для работы на одном конкретном режиме. Если веса (μ_k) критериев качества будут равны, то с учетом использования нормированных ФММ критериев качества, с большой долей вероятности, можно утверждать, что расположенные в первой части отранжированного списка конструкции ПЧ осевых турбин будут максимально приближены к множеству Парето либо принадлежать этому множеству. Это обусловлено тем, что в N_k – мерном **нормированном** пространстве критериев качества каждый вариант конструкции ПЧ, характеризуется соответствующей точкой, расстояние которой до центра координат *пропорционально значению функции* $\bar{F}_{is}(\bar{x}_c, \bar{x}_r)$. Таким образом, в первой половине отранжированного списка будут находиться не только наиболее удачные конструкций ПЧ с точки зрения уровня критериев качества, но и конструкции, соответствующие точкам наиболее удаленным от центра координат в пространстве критериев качества, что может служить одним из признаков приближения или принадлежности их к множеству Парето. Геометрическая интерпретация вышесказанного для двухкомпонентного вектора критериев качества приведена на рис. 4.

Как видно из рис. 4., точки наиболее удаленные от центра координат расположены в зоне аппроксимации Парето.

Если постановки островных оптимизационных задач предполагают наличие различных весов (μ_k) критериев качества, то алгоритм селекции дополняется процедурой повышения репрезентативности отбираемых конструкций. Данная процедура предусматривает выбор лучших конструкций в каждом из (N_d) равномерно расположенных диапазонов вдоль оси каждой компоненты вектора критериев качества. Повторяющиеся точки не учитываются. Использование такого оператора селекции позволяет найти удачные альтернативные конструкции, равномерно расположенные вдоль осей координат, соответствующих компонентам вектора критериев качества и одновременно принадлежащих множеству Парето.

Функция приспособленности общей оптимизационной задачи в этом варианте модификации островной модели выглядит следующим образом:

$$\bar{F}_{\text{glob}}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) = \sum_{r=1}^{N_r} (\bar{F}_{\text{is}}(\bar{x}_c, \bar{x}_r))^2 \quad (3)$$

Предложенный вид целевой функции позволяет учесть специфическую особенность задачи оптимального проектирования осевых турбин, предназначенных для работы на переменных режимах. С одной стороны, данная функция несет в себе информацию о суммарной эффективности конструкции на всех режимах эксплуатации, а с другой стороны она подчеркивает наличие Паретовских признаков конкурентного влияния режимов эксплуатации на итоговый результат. В данном случае критерии качества даже одной физической сущности, но определяемые для разных режимов функционирования осевой турбины, являются конкурентными критериями в общей оптимизационной задаче и расширяют размерность пространства критериев при поиске Паретовского множества решений. Данная особенность отражает основной Паретовский принцип –

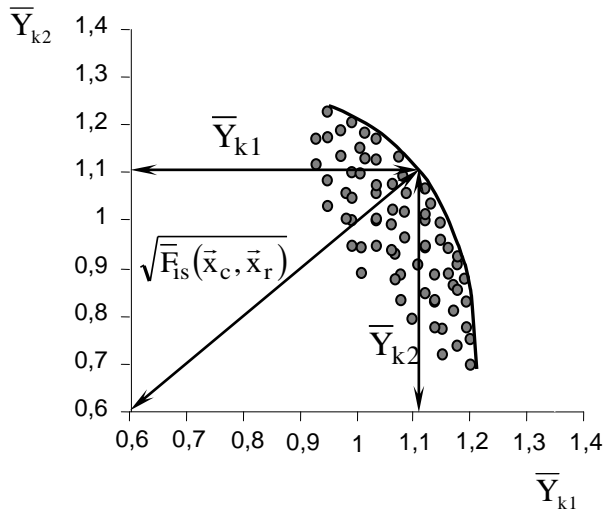


Рисунок 4 – К определению расстояния от центра координат до точек Парето

конструкция не может иметь максимально высокие значения критериев качества на всех режимах эксплуатации. Улучшая показатели ПЧ для одного режима, приходится в какой-то степени жертвовать аналогичными показателями работы на других режимах. Таким образом, «превратив» режимы эксплуатации в аналоги конкурентных критериев качества и, используя описанные выше принципы селекции, мы получаем принципиальную возможность нахождения репрезентативного множества недоминируемых конструктивных решений ПЧ осевых турбин, принадлежащих множеству Парето и способных наиболее эффективно работать на заданном графике изменения режимных параметров.

Второй вариант модификации островной модели ГА основан на дальнейшем развитии идеи конкурентности «режимных» критериев качества. Очевидно, что для каждого из режимов, можно найти свою оптимальную конструкцию ПЧ осевой турбины, способную наиболее эффективно работать на конкретном режиме эксплуатации (рис. 5, кривые 1...4). Огибающая (кривая 5) этих решений является той идеальной характеристикой, которой должна была бы обладать оптимальная всережимная конструкция ПЧ осевой турбины. К сожалению, не существует даже теоретических решений касательно конструкций осевых турбин, обеспечивающих такие эксплуатационные характеристики.

Вместе с тем, используя оптимальные конструкции ПЧ для каждого из вероятных режимов эксплуатации в качестве некоего идеала, можно сформулировать задачу оптимального проектирования осевой турбины с учетом режимов ее работы как задачу обеспечения минимального отклонения характеристик проектируемой турбины от максимальных значений, соответствующих характеристик ПЧ, оптимальных для каждого из режимов.

Вместе с тем, используя оптимальные конструкции ПЧ для каждого из вероятных режимов эксплуатации в качестве некоего идеала, можно сформулировать задачу оптимального проектирования осевой турбины с учетом режимов ее работы как задачу обеспечения минимального отклонения характеристик проектируемой турбины от максимальных значений, соответствующих характеристик ПЧ, оптимальных для каждого из режимов.

Вместе с тем, используя оптимальные конструкции ПЧ для каждого из вероятных режимов эксплуатации в качестве некоего идеала, можно сформулировать задачу оптимального проектирования осевой турбины с учетом режимов ее работы как задачу обеспечения минимального отклонения характеристик проектируемой турбины от максимальных значений, соответствующих характеристик ПЧ, оптимальных для каждого из режимов.

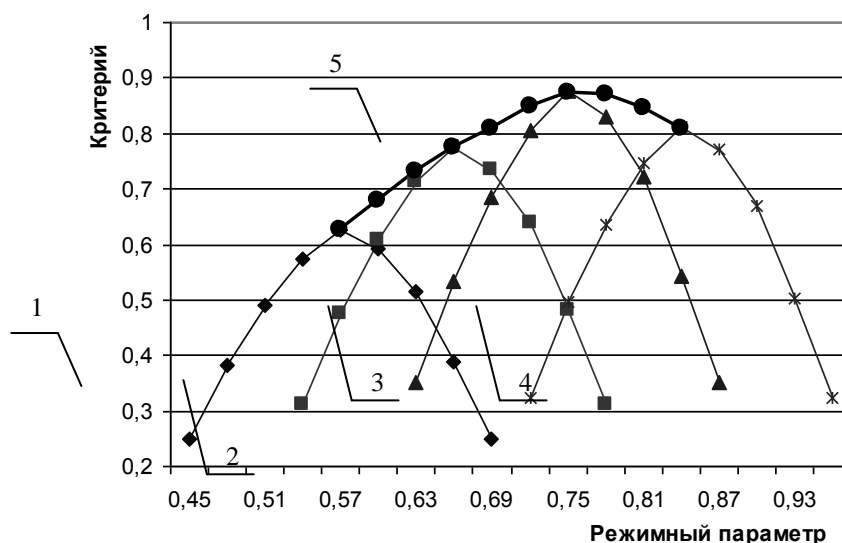


Рисунок 5 – Залежності критерія якості від режимного параметра для 4-х оптимальних конструкцій ПЧ

Функція, описуюча відхилення критеріїв якості проектуваної конструкції ПЧ від оптимальної, приймається рівною різниці довжин їх векторів критеріїв якості в просторі параметрів \bar{G}_Q :

$$\Delta \bar{F}_{is} = \sum_{k=1}^{Nk} \mu_k \left(\bar{Y}_k^{opt}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) \right)^2 - \sum_{k=1}^{Nk} \mu_k \left(\bar{Y}_k^{design}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) \right)^2, \quad (4)$$

$$\bar{x}_c \in C, \quad \bar{x}_r \in R, \quad [C, R] \in \bar{G}_Q, \quad \bar{v}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) \in V,$$

$$-1 \leq C \leq 1, \quad -1 \leq R \leq 1, \quad 0 \leq |V| \leq N_V < \infty,$$

де \bar{Y}_k^{opt} – значення критерія якості оптимальної островної конструкції ПЧ; \bar{Y}_k^{design} – значення критерія якості проектуваної конструкції ПЧ.

А глобальна цільова функція, з урахуванням режимів експлуатації, відповідно відображає положення проектуваної конструкції в просторі компонент вектора конкурентних «режимних» критеріїв якості:

$$\bar{F}_{glob}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) = - \sum_{r=1}^{Nr} \left(\Delta \bar{F}_{is}(\bar{x}_c, \bar{x}_r) \right)^2. \quad (5)$$

Отличительной особенностью данной модификации островной модели ГА является то, что задачи оптимального проектирования ПЧ осевых турбин для каждого из режимов эксплуатации решаются один раз и используются для определения соответствующих значений $\bar{Y}_k^{opt}(\bar{x}_c, \bar{x}_r)$. В дальнейшем эти значения применяются при оценке отклонения проектуемой ПЧ осевой турбины от лучших (оптимальных) островных («режимных») решений в общей оптимизационной задаче (4).

Применение описанных выше операторов скрещивания и селекции с различными комбинациями операторов мутации, позволяет находить репрезентативное множе-

ство конструкций ПЧ осевой турбины, обеспечивающих наилучшие приближения показателей эффективности к соответствующим им оптимальным значениям «режимных конструкций». Следует отметить, что в качестве значений $\bar{Y}_k^{opt}(\bar{x}_c, \bar{x}_r)$ могут выступать и соответствующие величины, указанные в техническом задании на проектирование ПЧ осевой турбины.

Таким образом, предложенные алгоритмы оптимизации, использующие модификации островной модели ГА отвечают современным требованиям и позволяют эффективно решать задачи оптимального проектирования ПЧ осевых турбин с учетом переменного графика эксплуатационных нагрузок.

Выводы

1. Предложена методика совершенствования подсистемы оптимального проектирования осевых турбин, учитывающая современные тенденции развития методов и алгоритмов оптимизации и основанная на комбинированном использовании традиционных алгоритмов в сочетании с методами планирования эксперимента и модификациями генетического алгоритма.

2. Рассмотрено два варианта модификации островной модели генетического алгоритма для решения задач оптимального проектирования проточной части осевых турбин с учетом переменности эксплуатационных нагрузок.

3. Отмечено наличие Паретовских признаков конкурентности островных критериев качества даже одной физической сущности в общей задаче оптимального проектирования с учетом режимов эксплуатации.

4. Показаны особенности постановок островных задач и общей задачи оптимизации.

4. Описаны подход к формированию функций приспособленности островных и общей оптимизационных задач, а также соответствующие им операторы селекции лучших решений.

5. Использование предлагаемых модификаций островной модели генетического алгоритма позволяет находить репрезентативные множества альтернативных недоминируемых конструкций ПЧ осевых турбин, способных эффективно работать в условиях переменности режимов эксплуатации.

Литература

1. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н. и др. Аэродинамический расчёт и оптимальное проектирование проточной части осевых турбин. – Монография. Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.

2. Усатый А.П. Оптимизация ЦВД мощных паровых турбин. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1988. – 187 с.

3. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П., Руденко А.С. Многоуровневая оптимизация параметров проточной части осевых турбин с учётом переменного режима работы // Сб. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование.– Харьков:НТУ «ХПИ».– 2007.– №2. С. 26–30.

4. Шубенко-Шубин Л.А., Стоянов Ф.А. Автоматизированное проектирование лопаточных аппаратов тепловых турбин. Л.: Машиностроение, 1984. – 236 с.

5. Бойко А.В., Говорушенко Ю.Н., Усатий А.П. Оптимальное проектирование проточных частей осевых турбомашин - современное состояние // Сб. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, Харьков, НТУ «ХПИ» 2005. С. 14–21.
6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
7. Harvey, N.W., Rose, M.G., Taylor, M.D., Shahpar, S. and Gregory-Smith, D.G. 2000, "Nonaxisymmetric Turbine Endwall Design, Part I–3D Linear Design system", Journal of Turbomachinery, 122, number 2, pp. 286–294.
8. Akira Oyama, Meng, Sing Liou, Shigeru Obayashi Transonic axial-flow blade shape optimization Using evolutionary algorithm and three-dimensional navier-stokes solver. AIAA 2002–5642
9. Неклюдов И.М., Клепиков В.Ф., Корда В.Ю., Шепелев А.Г. и др. Эволюционные компьютерные технологии: наукометрическое исследование. Вопросы атомной науки и техники. 2005. №5. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (88), С. 121–127.
10. Box E.P., Behnken D.W. Some new three-level Design for the Study of Quantitative Variables. – Technometrics. 1960. № 4. P. 455–475.
11. Rechtschaffner R.L. Saturated fractions of $2n$ and $3n$ factorial designs. – Technometrics. 1967. № 9. P. 569–575.
12. Соболев И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб. – М.: Наука, 1985. – 32 с.
13. Паклин Н.Б., Сенилов М.А., Тененев В.А. Интеллектуальные модели на основе гибридного генетического алгоритма с градиентным обучением лидера // Искусственный интеллект. – Донецк: Наука і освіта. 2004. № 4. С. 159–168.
14. Цой Ю.Р. О поисковых особенностях эволюционных алгоритмов. 2006 – <http://www.qai.narod.ru/>.
15. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие/ под редакцией Тарасевича И.Ю. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет» – 2007. – 87 с.
16. Курейчик В.М., Родзин С.И. Эволюционные алгоритмы: генетическое программирование. Обзор / Известия РАН. ТиСУ. 2002. №1. С. 127–137.
17. Herrera F., Lozano M., Sanchez A.M. Hybrid Crossover Operators for Real-Coded Genetic Algorithms: An Experimental Study // Soft Comput. 2005. №9(4). P. 280–298.

УДК 621.165

Усатий О.П.

**ОСТРІВНА МОДЕЛЬ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ
В ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ ОСЬОВИХ ТУРБІН
З УРАХУВАННЯМ ЗМІННОГО РЕЖИМУ РАБОТИ**

В статті розглянуті 2 варіанти модифікації острівної моделі генетичного алгоритму (ГА) в задачах оптимального проектування осьових турбін, працюючих зі змінними графіками експлуатаційних загрузок. Проаналізовані особливості запропонованих модифікацій острівної моделі ГА, а також можливі схеми вистроювання алгоритмів при пошуку оптимальних конструкцій проточних частин (ПЧ) осьових турбін.