

УДК 004.9:621.01

Параметрический синтез допустимого базового профиля винтовых роторов SRM на основе генетического алгоритма

А. А. Полин¹, В. А. Горелов¹, В. Ж. Куклин¹, А. Ю. Сафронов¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Российская Федерация, p0lin.alex@yandex.com

Аннотация. Описана процедура автоматизации подбора и построения профилей винтовых роторов типа SRM (Svenska Rotor Maskiner). В работе рассматривается классический случай винтовых роторов с постоянным по длине шагом винтовой линии и неизменной формой поперечного сечения профиля от окна всасывания до окна нагнетания. Предложен метод параметрического синтеза базового профиля – исходного профиля, служащего отправной точкой для последующей оптимизации его формы и удовлетворяющего техническому заданию и условиям геометрической допустимости (далее – допустимого базового профиля, или кратко базового профиля) по техническому заданию, в котором поиск девяти проектных параметров выполняется генетическим алгоритмом с контролем геометрической и кинематической допустимости с параллельной оценкой особей. Корректность синтезированной геометрии подтверждается независимым расчётом объёма парной полости двумя методами. На тестовом задании для ступени сжатия попутного нефтяного газа допустимый профиль получен за несколько поколений при наибольшей частной погрешности соответствия техническому заданию около 4,8 %; расхождение объёма по двум методам не превысило 0,5 %. Метод реализован как сквозной автоматизированный цикл с выгрузкой координат профиля для построения в системах CAD.

Ключевые слова: винтовой компрессор, профиль ротора SRM, генетический алгоритм, автоматизированное проектирование, параметрический синтез, допустимость геометрии

1. Введение

Винтовые компрессоры применяются в нефтегазовой, химической, холодильной и энергетической отраслях благодаря компактности, непрерывной подаче и способности работать в широком диапазоне расходов и давлений. Их энергетическая эффективность во многом закладывается на этапе профилирования: форма сопряжённых профилей ведущего и ведомого роторов задаёт характер изменения объёма парной полости, геометрию окон всасывания и нагнетания, длину линий контакта и потенциальные пути перетечек [1, 2]. Поэтому проектирование профиля – самостоятельная инженерная задача, в которой геометрические, кинематические и термодинамические требования приходится согласовывать одновременно.

Традиционно эта задача решается полуручными методами. Базовые параметры роторов подбираются по справочным методикам и опыту конструктора, а изменение объёма рабочей полости определяется графоаналитически [3]. Такой путь оправдан для единичного расчёта, но плохо масштабируется: подбор параметров под новое техническое задание требует множества согласованных пересчётов, зависит от квалификации

исполнителя и слабо приспособлен к быстрой проработке целых линеек профилей.

Современные работы по винтовым компрессорам смещают акцент в сторону численного моделирования и оптимизации [4]. Разработаны трёхмерные модели рабочего процесса [5, 6] и постановки оптимизации профиля по параметрам зацепления [7, 8], а в смежных инженерных задачах хорошо зарекомендовали себя эволюционные и многокритериальные методы поиска [9, 10]. Отдельное направление – методы оптимизации формы и топологии конструкций [11, 12]. Прямой перенос топологической оптимизации на профиль винтового ротора, однако, затруднён: произвольное изменение связности области нарушает сопряжённость пары, поэтому для данной задачи обоснованнее параметризованная оптимизация формы при сохранении допустимости.

При всей проработанности отдельных методов между ними остаётся разрыв. Подбор базовых параметров, построение сопряжённых профилей, расчёт рабочих полостей и подготовка геометрии для CAD обычно выполняются разрозненными средствами и требуют ручного связывания. Единого автоматизированного цикла, который по техническому заданию выдавал бы

геометрически и кинематически допустимый профиль, пригодный для дальнейшего анализа и передачи в CAD, в инженерной практике недостаёт; отечественных программных решений такого рода, по сведениям авторов, не обнаружено.

В настоящей работе предложен метод автоматизированного параметрического синтеза базового профиля винтовых роторов типа SRM по заданным условиям работы компрессора. Поиск проектных параметров выполняется генетическим алгоритмом, в целевую функцию которого встроен контроль допустимости профиля, а корректность построенной геометрии подтверждается независимым расчётом объёма парной полости двумя методами с последующей выгрузкой координат профиля в формат, пригодный для импорта в CAD. Проведенный авторами библиографический и патентный поиск показал, что в открытых научных публикациях, патентной литературе и доступных источниках не выявлено отечественных программных средств для автоматизированного параметрического синтеза профилей винтовых роторов типа SRM в рассматриваемой постановке задачи. В частности, подобные программные решения не упоминаются в современном учебном пособии по компрессорной технике [13]. Это определяет практическую ценность предложенного подхода как основы для создания отечественного инженерного программного обеспечения.

Цель работы – разработать метод и алгоритмическое обеспечение автоматизированного синтеза допустимых профилей винтовых роторов SRM по техническому заданию. Практическая значимость состоит в снижении влияния человеческого фактора при подборе параметров, ускорении проработки новых линеек профилей и создании основы для отечественного инженерного программного обеспечения проектирования винтовых роторов.

2. Метод автоматизированного синтеза профиля

2.1. Постановка задачи и исходные данные тестового расчета

Исходными данными служит техническое задание на компрессорную ступень. В рассматриваемом тестовом расчёте задавались: давление и температура всасывания 0,103 МПа и 323 К; давление и температура нагнетания 1,55 МПа и 373 К; объёмная производительность 6983 м³/ч; частота вращения ведущего ротора 1500 об/мин;

молярная масса газа 40,91 г/моль, плотность 1,569 кг/м³, показатель адиабаты 1,154 и газовая постоянная 203,2 Дж/(кг·К). По этим данным программа вычисляет массовый расход, внешнюю степень сжатия и показатель политропы и выбирает типоразмер ступени – внешний диаметр D_1 и относительную длину Kl – по номограмме подбора маслозаполненного компрессора [14].

Результатом тестового расчета должен быть вектор варьируемых параметров, который воспроизводит заданный режим работы с приемлемой погрешностью и задаёт геометрически и кинематически допустимый базовый профиль. Совокупность требований к точности воспроизведения режима работы и геометрической реализуемости базового профиля определяет негладкую, частично дискретную допустимую область, для поиска в которой применён генетический алгоритм.

Близость особи к заданному режиму оценивается через частные погрешности. Для каждого контролируемого параметра технического задания частная погрешность – это относительное отклонение расчётного значения от заданного:

$$\delta_i = |y_i - y_i^{T3}| / |y_i^{T3}| \cdot 100\%, \quad (1)$$

где δ_i – частная погрешность по i -му параметру, %; y_i – расчётное значение i -го параметра; y_i^{T3} – значение i -го параметра по техническому заданию; $i = 1, 2, \dots, n$; n – число контролируемых параметров.

Наибольшей частной погрешностью соответствия техническому заданию называется максимальная из них по всем контролируемым параметрам:

$$\varepsilon = \max_i \delta_i, \quad (2)$$

где δ_i – частная погрешность по i -му параметру, %; ε – наибольшая частная погрешность соответствия техническому заданию, %.

Она показывает, насколько от задания отклоняется худший из параметров. По совокупности частных погрешностей с учётом штрафов за нарушение геометро-кинематической допустимости формируется целевая функция, минимизируемая алгоритмом:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \delta_i(x) + \Pi(x), \quad (3)$$

где $F(x)$ – целевая функция особи x ; $\delta_i(x)$ – частные погрешности по (1); n – число контролируемых параметров; $\Pi(x)$ – штрафная составляющая, равная нулю для геометрически и кинематически допустимой особи, добавляющая положительный вклад за каждое нарушенное условие допустимости и принимающая заведомо большое значение при грубой недопустимости.

Значение целевой функции (3) служит мерой приспособленности особи: по нему особи ранжируются и отбираются генетическим алгоритмом, причём меньшему значению отвечает более приспособленная особь (постановка на минимизацию). Поэтому «лучшей» считается особь с меньшим значением целевой функции, а «улучшением» – снижение этого значения от поколения к поколению; наибольшая частная погрешность ϵ по (2) приводится дополнительно как наглядный показатель качества. Все контролируемые параметры технического задания (производительность, степень сжатия, окружная скорость) строго положительны, а их допустимые диапазоны не содержат нуля, поэтому нормирование частной погрешности на заданное значение корректно.

2.2. Кодирование решения

Каждое решение (особь) кодируется вектором из девяти нормированных генов $g_i \in [0, 1]$ ($i = 1, \dots, 9$). Декодирование – линейное отображение каждого гена в свой диапазон из таблицы 1 – превращает гены в варьируемые параметры. По варьируемым параметрам рассчитываются производные геометрические величины (начальные диаметры, внешний диаметр, межосевое расстояние, длина роторов, ход винтовой линии), после чего строится сопряжённый профиль. Нормировка генов к единому отрезку делает работу операторов скрещивания и мутации независимой от физических масштабов варьируемых параметров.

2.3. Диапазоны варьируемых параметров и проверка допустимости

Девять варьируемых параметров изменяются в пределах диапазонов, рекомендованных в литературе по расчёту винтовых компрессоров [1, 2, 5]; приведённые в таблице 1 границы отвечают практике маслозаполненных винтовых компрессоров, на данных по которым основаны эти источники. Эти диапазоны задают границы, в которые декодируются нормированные гены (таблица 1). Поскольку нормированные гены декодируются именно в эти диапазоны, варьируемые параметры всегда остаются в технологически осмысленных пределах.

По варьируемым параметрам рассчитаны производные геометрические величины: начальные диаметры роторов, внешний диаметр и межосевое расстояние. В отличие от варьируемых параметров, которые по построению лежат в своих диапазонах, производные величины при неудачном сочетании генов могут выйти за физические допустимые пределы, поэтому каждая из них

дополнительно проверяется. Если рассчитанное значение не укладывается в свой диапазон – например, внешний диаметр превышает предельный для выбранного типоразмера или нарушается условие сопряжённости начальных диаметров, – особь признаётся недопустимой и получает заведомо большое значение целевой функции, фактически исключая её из дальнейшего поиска.

Таблица 1. Диапазоны варьируемых параметров

Параметр	Обозн.	Диапазон
Изотермический КПД	$\eta_{из}$	0,60–0,80
Коэффициент подачи	λ	0,85–0,92
Окружная скорость ведущего ротора, м/с	u_1	20–55
Механический КПД	$\eta_{мех}$	0,90–0,96
Коэффициент качества профиля ведущего ротора	χ_1	0,30–0,50
Коэффициент качества профиля ведомого ротора	χ_2	0,40–0,60
Отн. высота головки зуба ведущего ротора	ξ_1	0,55–0,65
Отн. высота головки зуба ведомого ротора	ξ_2	0,060–0,065
Угол закрутки ведущего ротора, град	τ_1	260–320

2.4. Операторы и адаптивная настройка алгоритма

Алгоритм реализован средствами библиотеки DEAP [15]. Начальная популяция из 300 особей формируется случайно в пределах диапазонов варьируемых параметров (таблица 1). На каждом поколении выполняется цикл «отбор – скрещивание – мутация – формирование нового поколения».

Отбор родителей проводится турнирной селекцией с размером турнира 5: из случайно выбранных пяти особей в родители проходит лучшая. Поскольку недопустимые особи получают заведомо большое значение целевой функции за счет штрафной составляющей по (3), в турнире они практически всегда уступают допустимым и почти допустимым решениям и не проходят в родители. Тем самым селекция автоматически вытесняет недопустимые особи из размножения, не удаляя их из популяции жёстко: ограничения учитываются методом штрафов непосредственно через целевую функцию. Скрещивание, смешивающее (BLX- α) с $\alpha = 0,5$: гены потомка выбираются из интервала, расширенного за пределы родительских значений. Мутация – полиномиальная с контролем границ; её резкость задаётся параметром распределения η , а доля изменяемых генов – вероятностью мутации. Применяется элитизм: 10 % лучших особей (не менее пяти) копируются в следующее

поколение без изменений, что гарантирует, что лучшее найденное решение не ухудшается между поколениями.

Настройки алгоритма изменяются по ходу поиска по линейному расписанию в зависимости от относительного прогресса. Вероятность скрещивания снижается с 0,7 примерно до 0,49, вероятность мутации – с 0,4 до нижнего предела 0,1, а параметр η полиномиальной мутации – с 50 до 25. Смысл расписания – сместить баланс от широкого исследования пространства решений на ранних поколениях к уточнению найденных решений на поздних. Чтобы поиск не терял перспективные решения у границы допустимой области, отдельно отслеживаются лучшее допустимое и лучшее почти допустимое решение. Предусмотрена ранняя остановка по стагнации.

2.5. Параллельная реализация и вычислительный конвейер

Оценка приспособленности – вычисление значения целевой функции (3) для особи – наиболее затратная операция: для каждой особи строится сопряжённый профиль и выполняется геометрический анализ рабочих полостей по углу поворота. Поэтому особи поколения оцениваются параллельно: расчёт распределяется по процессам с числом рабочих, равным меньшему из 10 и числа логических процессоров системы, $p = \min(10, N_{\text{лог}})$. Эксперименты проводились на персональной рабочей станции с процессором AMD Ryzen 5 5600H (6 физических ядер, 12 логических процессоров), 32 ГБ оперативной памяти, под управлением Windows 10; для этой конфигурации $p = 10$. Это серийный персональный компьютер общего назначения; все вычисления выполнялись на центральном процессоре, графические ускорители и иные специализированные вычислительные модули не использовались. Для расчётной нагрузки, ограниченной производительностью процессора, ускорение близко к линейному до числа физических ядер, а при большем числе процессов дополнительный выигрыш даёт одновременная многopotочность (SMT), но уже с убывающей отдачей. Верхняя граница в 10 процессов (из 12 логических) выбрана как компромисс между временем прогона и нагрузкой на процессор: она существенно сокращает время оценки популяции из 300 особей и при этом оставляет часть логических процессоров свободными, благодаря чему рабочая станция сохраняет отзывчивость в течение всего расчёта. Библиотека DEAP поддерживает распараллеливание и на многопроцессорных установках и кластерах через MPI, однако в настоящей работе оно не

применялось; перенос оценки особей на кластер с MPI рассматривается как направление дальнейшего сокращения времени расчёта. Метод оформлен как сквозной автоматизированный цикл (рис. 1): техническое задание → генетический поиск параметров → построение профилей и корпусов → анализ полостей и окон → проверка корректности → выгрузка координат профиля для импорта в CAD. Внутренняя логика генетического поиска показана на рис. 2.

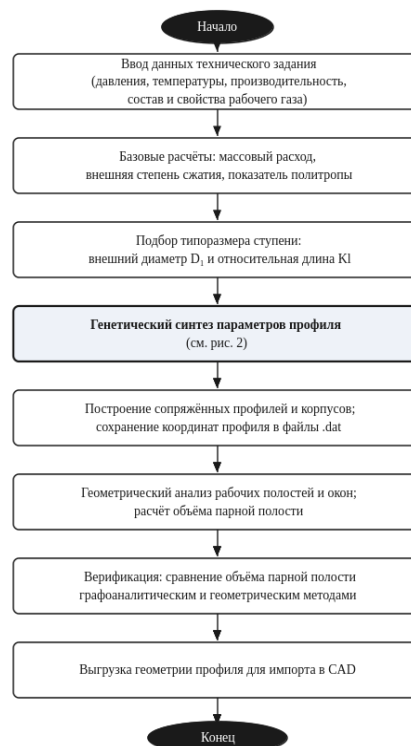


Рис. 1. Процессная схема автоматизированного синтеза профиля

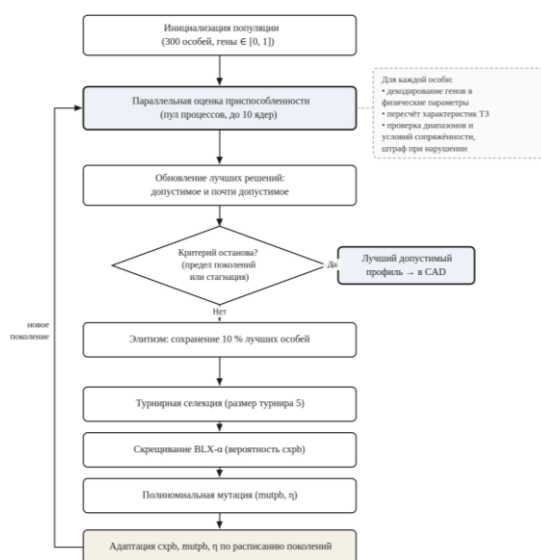


Рис. 2. Цикл работы генетического алгоритма

3. Вычислительный эксперимент

3.1. Условия эксперимента

Метод проверен на синтезе профиля ступени для сжатия попутного нефтяного газа по техническому заданию из раздела 2.1. По введённым данным программа рассчитала массовый расход 10 956,33 кг/ч, внешнюю степень сжатия 15,05 и показатель политропы 1,06, после чего выбрала типоразмер ступени: внешний диаметр $D_1 = 510$ мм и относительную длину $Kl = 1,3$. Генетический поиск выполнялся при популяции 300 особей; оценка особей распараллеливалась на 10 рабочих процессах. Полное время прогона составило около одного часа.

3.2. Сходимость алгоритма

Динамика поиска приведена в таблице 2 и на рис. 3а–3в. Уже в начальной популяции присутствовало почти допустимое решение с наибольшей частной погрешностью 12,3 %, не удовлетворявшее, однако, всем условиям допустимости. По мере смены поколений суммарная погрешность лучшего решения монотонно снижалась ($158,9 \rightarrow 95,9 \rightarrow 56,6 \rightarrow 12,5$), и на пятом поколении был найден первый полностью допустимый профиль с наибольшей частной погрешностью 4,76 %. Наиболее резкое улучшение приходится на четвёртое и пятое поколения, когда удачные комбинации генов закрепляются отбором и элитизмом и быстро распространяются по популяции.

не удовлетворявшее, однако, всем условиям допустимости. По мере смены поколений суммарная погрешность лучшего решения монотонно снижалась ($158,9 \rightarrow 95,9 \rightarrow 56,6 \rightarrow 12,5$), и на пятом поколении был найден первый полностью допустимый профиль с наибольшей частной погрешностью 4,76 %. Наиболее резкое улучшение приходится на четвёртое и пятое поколения, когда удачные комбинации генов закрепляются отбором и элитизмом и быстро распространяются по популяции.

Таблица 2. Динамика эволюции лучшего решения по поколениям

Поколение	Статус	Сумм. погр.	Макс. частн. погр., %
0	почти допуст.	158,9	12,28
1	почти допуст.	158,9	12,28
2	почти допуст.	95,9	9,05
3	почти допуст.	56,6	6,60
4	почти допуст.	12,5	5,15
5	допустимое	8,96	4,76

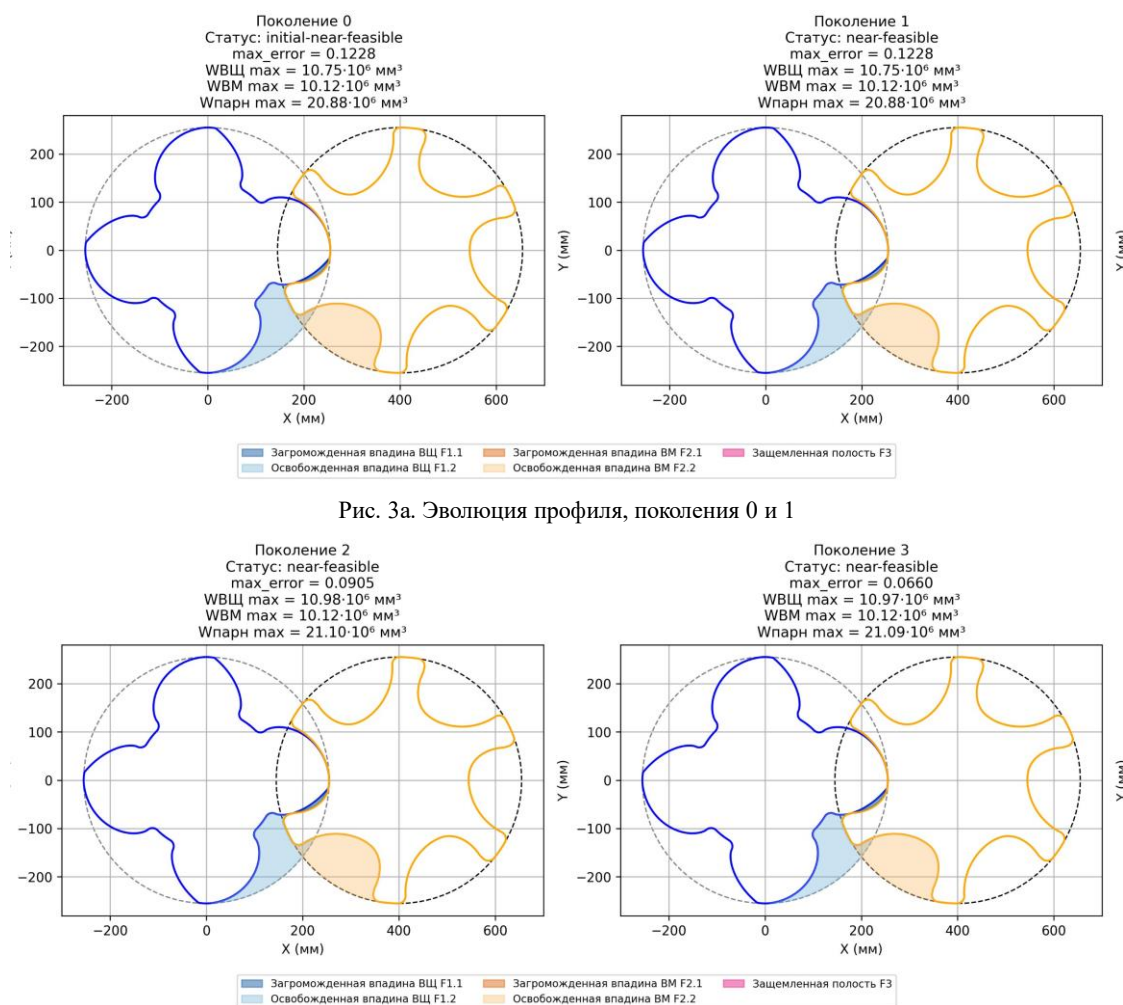


Рис. 3а. Эволюция профиля, поколения 0 и 1

Рис. 3б. Эволюция профиля, поколения 2 и 3

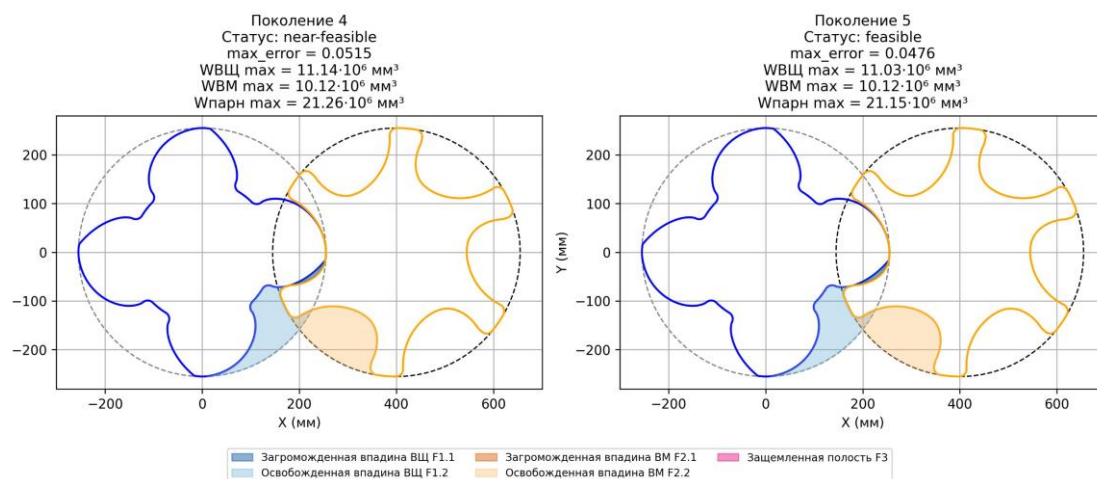
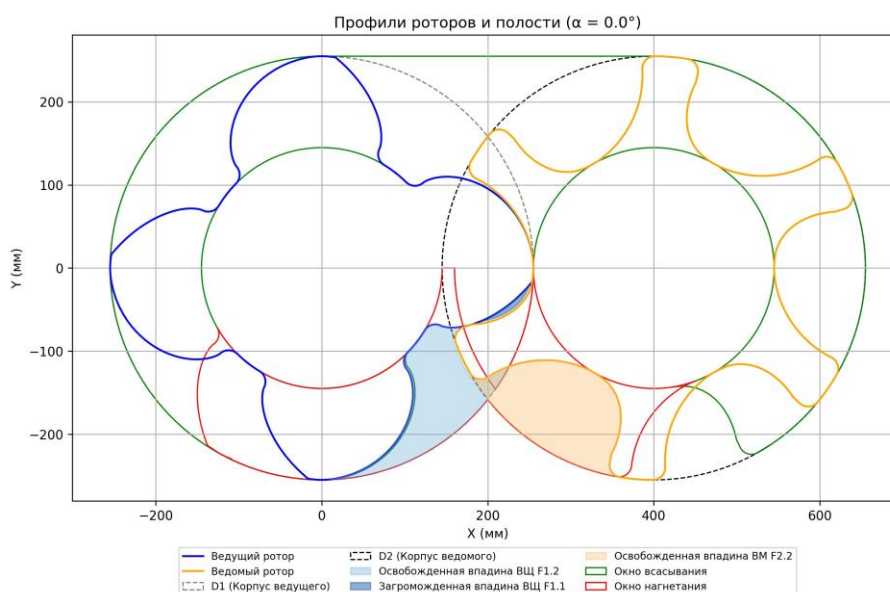


Рис. 3в. Эволюция профиля, поколения 4 и 5

3.3. Синтезированный профиль

Найденное допустимое решение задаёт сопряжённую пару роторов с числами зубьев $z_1 = 4$ и $z_2 = 6$, внешним диаметром $D_1 = D_2 = 510$ мм, межосевым расстоянием $A = 400$ мм и длиной роторов $L = 663$ мм; рассчитанная объёмная производительность совпадает с заданной с точностью долей процента. Помимо профилей, программа автоматически

строит окна всасывания и нагнетания, угловые размеры которых определяются по результатам анализа изменения объёма рабочих полостей. Профили роторов, образованные ими рабочие полости и построенные окна всасывания и нагнетания при нулевом угле поворота показаны на рис. 4. Координаты точек профиля автоматически сохраняются в файлы формата .dat, по которым строится кривая профиля в CAD-системе.

Рис. 4. Профили роторов, рабочие полости и окна всасывания и нагнетания при $\alpha = 0^\circ$

3.4. Самопроверка результата

Корректность построенной геометрии подтверждается независимым расчётом объёма парной полости двумя методами – графоаналитическим и геометрическим (рис. 5). Начальный рабочий объём, полученный геометрическим методом ($21\,151\,902\text{ мм}^3$), отличается от значения графоаналитического

метода ($21\,048\,038\text{ мм}^3$) на $0,49\%$, а от теоретического максимального объёма – на $1,67\%$. Согласованность полученных независимых оценок подтверждает геометрическую непротиворечивость синтезированного профиля. Заданная геометрическая степень сжатия $4,50$ достигается при угле нагнетания $253,35^\circ$ (расчётное значение составляет $4,47$).

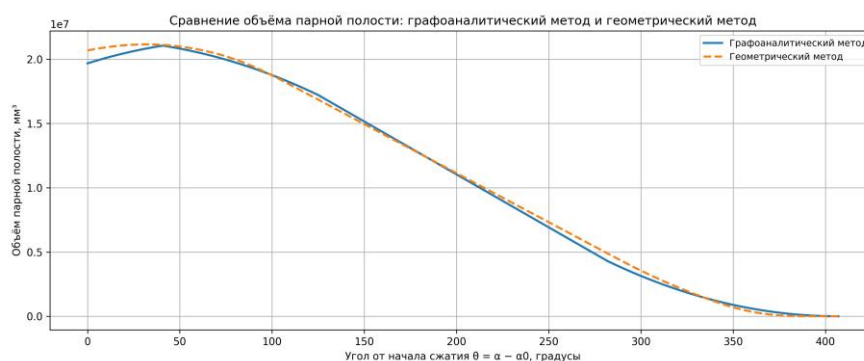


Рис. 5. Сравнение объёма парной полости: графоаналитический и геометрический методы

4. Обсуждение

Результаты эксперимента подтверждают, что предложенный подход позволяет получать базовый профиль автоматически и воспроизводимо. Поиск, начавшись с почти допустимых решений, за несколько поколений выходит в область, где одновременно удовлетворяются требования технического задания и условия геометро-кинематической допустимости, а наибольшая частная погрешность снижается до уровня, приемлемого для предварительного проектирования.

Главное достоинство метода — перевод трудоёмкого полуручного подбора параметров в управляемый автоматизированный цикл. Это снижает влияние квалификации и субъективных решений исполнителя на результат, ускоряет проработку вариантов и позволяет за один прогон получать согласованный набор геометрии вместе со средствами её проверки. Раздельное отслеживание допустимых и почти допустимых решений и адаптивное расписание операторов удерживают поиск у границы допустимой области и повышают шанс найти рабочее решение при жёстких ограничениях.

Метод имеет естественные границы применимости. Поскольку метод оперирует только геометрией и кинематикой профиля и не моделирует рабочую среду, наличие или отсутствие впрыска масла на сам алгоритм синтеза не влияет — он одинаково применим кмаслозаполненным компрессорам и к машинам сухого сжатия. Привязка к типу компрессора возникает лишь через числовые диапазоны варьируемых параметров (таблица 1), которые в настоящей работе взяты из источников по маслозаполненным винтовым компрессорам [1, 2, 5]. Для машин сухого сжатия, отличающихся, в частности, повышенными окружными скоростями и меньшими степенями повышения давления в ступени, эти диапазоны следует заменить на характерные для данного класса; методика и алгоритм при этом остаются

прежними. На текущем этапе целевая функция оценивает соответствие техническому заданию и геометрическую допустимость, но не физическую эффективность: КПД, перетечки, энергопотребление и шумовые характеристики напрямую не оптимизируются. Модель остаётся геометрической и не учитывает термогазодинамику рабочего процесса; вычислительная стоимость одного синтеза составляет около часа на указанной рабочей станции. Поэтому полученный профиль следует рассматривать как обоснованное начальное приближение для последующего анализа.

Развитие работы видится в переходе от синтеза базового профиля к многокритериальной оптимизации его формы по физическим показателям с привлечением суррогатных моделей [16] и верификацией методами вычислительной гидрогазодинамики и конечных элементов. Проведенный библиографический и патентный поиск показал, что в открытых научных публикациях, патентной литературе и доступных источниках не выявлено отечественных программных средств, предназначенных для автоматизированного параметрического синтеза профилей винтовых роторов типа SRM в рассматриваемой постановке задачи, что определяет практическую ценность предложенного подхода как основы для инженерного программного обеспечения.

5. Заключение

Предложены метод и алгоритмическое обеспечение автоматизированного параметрического синтеза допустимых профилей винтовых роторов типа SRM по техническому заданию. Поиск проектных параметров выполняется генетическим алгоритмом с встроенным контролем геометро-кинематической допустимости, раздельным отслеживанием допустимых и почти допустимых решений, адаптивной настройкой

операторов и параллельной оценкой особенностей; построенная геометрия проверяется независимым расчётом объёма парной полости двумя методами и выгружается в формат, пригодный для импорта в CAD.

На тестовом задании для ступени сжатия попутного нефтяного газа допустимый профиль получен за несколько поколений при наибольшей частной погрешности соответствия заданию около 4,8 %, а расхождение объёма парной полости по двум методам не превысило 0,5 %. Тем самым подтверждена работоспособность метода как сквозного автоматизированного цикла.

Практическая значимость работы состоит в снижении влияния человеческого фактора при подборе параметров, ускорении проработки новых профилей и создании основы для отечественного инженерного программного обеспечения проектирования винтовых роторов.

Дальнейшая работа будет направлена на многокритериальную оптимизацию формы профиля по физическим критериям.

Основные представленные результаты были получены в рамках подготовки диссертационной работы Полина А.А.

Parametric synthesis of admissible basic SRM screw-rotor profile based on a genetic algorithm

A. A. Polin, V. A. Gorelov, V. Zh. Kuklin, A. Yu. Safronov

Abstract. The automation of selecting and constructing SRM (Svenska Rotor Maskiner) screw-rotor profiles is considered. The study deals with the classical case of screw rotors having a constant helix lead along the rotor length and an unchanged cross-sectional profile from the suction port to the discharge port. A method is proposed for the parametric synthesis of a base profile, i.e., an initial profile serving as the starting point for its subsequent shape optimization and satisfying the technical specification and the conditions of geometric feasibility (hereinafter referred to as an admissible base profile, or simply a base profile). The search over nine design parameters is performed by a genetic algorithm with built-in control of geometric and kinematic feasibility and parallel evaluation of individuals. The correctness of the synthesized geometry is confirmed by an independent computation of the paired-cavity volume by two methods. For a test specification of an associated-petroleum-gas compression stage, a base profile was obtained within several generations with a maximum partial error of specification matching of about 4.8%; the discrepancy between the two volume-computation methods did not exceed 0.5%. The method is implemented as an end-to-end automated pipeline with export of profile coordinates for construction in CAD systems.

Keywords: screw compressor, SRM rotor profile, genetic algorithm, automated design, parametric synthesis, geometric feasibility

Литература

1. И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчёт и проектирование. Казань, ФЭН, 2000.
2. L. Rinder. Schraubenverdichter. Wien, New York, Springer-Verlag, 1979.
3. А.В. Братусь, И.В. Автономова. Метод определения объёма парной полости винтового компрессора. «Известия высших учебных заведений. Машиностроение», 2015, № 7, 69–77. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-7-11-19. URL: <https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/1183/1183.pdf> (дата обращения: 14.05.2026).
4. Y. Li, X. Zhao, S. Liu, C. Wang, S. Shen, Y. Guo. Review and prospects of numerical simulation research on internal flow and performance optimization of twin-screw compressors. "Energies", V. 18 (2025), № 10, 2608. DOI: 10.3390/en18102608. URL: <https://doi.org/10.3390/en18102608> (дата обращения: 14.05.2026).
5. N. Stosic, I.K. Smith, A. Kovacevic. Screw Compressors: Mathematical Modelling and Performance Calculation. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005.
6. F. Kaufmann, L. Irrgang, C. Schiffler, H. Spliethoff. Fast and accurate modelling of twin-screw compressors: a generalised low-order approach. "Applied Thermal Engineering", V. 257 (2024), 124238. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124238> (дата обращения: 14.05.2026).
7. K. Ilie, A. Subic. Parametric modelling of helical rotors for efficient design of twin-screw

superchargers. "Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science", V. 221 (2007), № 2, 267–272. DOI: 10.1243/0954406JMES421FT. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/0954406JMES421FT> (дата обращения: 14.05.2026).

8. A. Aydın, T. Engin, A. Kovacevic. Design optimisation of a screw compressor with a focus on rotor depth: a CFD approach. "International Journal of Refrigeration", V. 170 (2025), 385–397. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.12.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.12.001> (дата обращения: 14.05.2026).

9. D.E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, Addison-Wesley, 1989.

10. D.W. Zingg, M. Nemec, T.H. Pulliam. A comparative evaluation of genetic and gradient-based algorithms applied to aerodynamic optimization. "European Journal of Computational Mechanics", V. 17 (2008), № 1–2, 103–126. DOI: 10.3166/remn.17.103-126. URL: <https://doi.org/10.3166/remn.17.103-126> (дата обращения: 14.05.2026).

11. M.P. Bendsoe, O. Sigmund. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications. Berlin, Heidelberg, Springer, 2003.

12. G. Allaire, F. Jouve, A.-M. Toader. A level-set method for shape optimization. "Comptes Rendus Mathématique", V. 334 (2002), № 12, 1125–1130. DOI: 10.1016/S1631-073X(02)02412-3. URL: [https://doi.org/10.1016/S1631-073X\(02\)02412-3](https://doi.org/10.1016/S1631-073X(02)02412-3) (дата обращения: 14.05.2026).

13. И.В. Автономова. Компрессорные станции и установки газового комплекса: учебное пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. 200 с. ISBN 978-5-7038-6566-8.

14. I.M. Arbon. The Design and Application of Rotary Twin-shaft Compressors in the Oil and Gas Process Industry. London, Mechanical Engineering Publications, 1994.

15. F.-A. Fortin, F.-M. De Rainville, M.-A. Gardner, M. Parizeau, C. Gagne. DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy. "Journal of Machine Learning Research", V. 13 (2012), 2171–2175. URL: <https://www.jmlr.org/papers/v13/fortin12a.html> (дата обращения: 14.05.2026).

16. J.A. Manson, T.W. Chamberlain, R.A. Bourne. MVMOO: Mixed variable multi-objective optimisation. "Journal of Global Optimization", V. 80 (2021), 865–886. DOI: 10.1007/s10898-021-01052-9. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10898-021-01052-9> (дата обращения: 14.05.2026).

Поступила в редакцию / Received: 15.06.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 28.06.2026.

Принята к печати / Accepted: 01.07.2026.