

Для цитирования: Глебский М.А., Егерова И.А. Управление ресурсами вычислительной системы для оптимизации работы функционально связанных компонентов программного приложения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 2 (30). С. 103–109.

RESOURCE MANAGEMENT IN COMPUTING SYSTEMS FOR OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF FUNCTIONALLY RELATED SOFTWARE APPLICATION COMPONENTS

M.A. GLEBSKY, magister, I.A. EGEREVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: mglebskiy@mail.ru

The article addresses the problem of optimal allocation of computational resources - specifically RAM and CPU time – among virtual containers within complex distributed applications. It analyzes key challenges in managing systems composed of numerous interconnected components, including dependency conflicts, competition for network ports, and unbalanced resource consumption. The study demonstrates that traditional resource allocation approaches, which focus on maximizing aggregate performance, prove ineffective under conditions of strong functional interdependence among containers, as they tend to create system bottlenecks. To address this issue, a mathematical model for resource allocation is proposed that incorporates minimum throughput requirements for each component. This approach aims to ensure balanced loading across all system elements and thereby enhance overall system efficiency.

Keywords: virtualization, virtual containers, Docker.

Поступила в редакцию/received: 24.02.2026; после рецензирования/revised: 26.02.2026;
принята/accepted: 02.03.2026

УДК 681.5

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-109-119

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ДАЛЬНЕМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РАЗВИТИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ КОМПРЕССОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА КЛЮЧЕВОГО ПРОТИВОРЕЧИЯ

С.Л. ГОРОБЧЕНКО¹, канд. техн. наук, С.А. МЕШКОВ², канд. техн. наук,
Н.Н. ВЕРНЕР³, канд. техн. наук, С.А. ВОЙНАШ⁴, мл. научн. сотр.,
В.А. СОКОЛОВА¹, канд. техн. наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18,
e-mail: sgorobchenko@yandex.ru

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1,
e-mail: meshkovcergey@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5,
e-mail: wernern@mail.ru

⁴Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6,
e-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

© Горобченко С.Л., Мешков С.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Соколова В.А., 2026

В статье предложен метод долгосрочного прогнозирования развития технических систем (ТС) на основе системного анализа ключевого внутреннего противоречия. В качестве объекта исследования выбрана система «холодильный компрессор». Метод основан на выявлении и отслеживании развертывания основного противоречия между двумя взаимоисключающими требованиями надсистемы – обеспечением производительности (количественная сторона) и созданием давления (качественная сторона). Прослежена эволюция компрессоров от поршневых к ротационным, винтовым, центробежным и осевым, выявлена главная движущая сила развития – рост производительности, достигаемый преимущественно увеличением скорости вращения рабочих органов. Анализ показал, что механический принцип сжатия (объемный и динамический) близок к исчерпанию своих возможностей вследствие физических и конструкционных ограничений. В качестве перспективного направления, следующего за осевыми компрессорами, обоснован переход к принципиально иным, немеханическим методам сжатия, таким как магнитогидродинамический принцип и термоэлектрическое охлаждение, что соответствует общей тенденции перехода рабочего тела с макро- на микроуровень. Сделан вывод, что прогнозирование на основе анализа ключевого противоречия и надсистемных требований позволяет выделить магистральные пути развития и создать достоверные долгосрочные прогнозы.

Ключевые слова: системный подход, дальнейшее прогнозирование, ТС, холодильный компрессор, ключевое противоречие, законы развития ТС, надсистемные требования, производительность, принцип сжатия, поршневой компрессор, винтовой компрессор, центробежный компрессор, осевой компрессор, магнитогидродинамический метод, термоэлектрическое охлаждение, эволюция техники.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема долгосрочного прогнозирования развития технических систем (ТС) сохраняет свою актуальность в условиях ускорения научно-технического прогресса и необходимости стратегического планирования в инженерной деятельности [1]. Несмотря на существование ряда методов прогнозирования, от хорошо освоенного системного оператора до анализа законов развития ТС, часто сохраняется элемент субъективности в выборе ведущей тенденции, что снижает надежность прогнозов, особенно на отдаленную перспективу [2, 3]. В этой связи особый интерес представляют подходы, позволяющие выявить объективную, внутреннюю логику развития системы, определяемую ее фундаментальными свойствами и взаимоотношениями с надсистемой.

В основе предлагаемого метода лежит диалектический принцип, согласно которому возникновение, существование и развитие любой ТС обусловлены ключевым противоречием, заложенным в нее потребностями надсистемы. Это противоречие является источником самодвижения ТС, а его развертывание и попытки разрешения определяют последовательную смену конструктивных форм и принципов действия [4, 5]. Таким образом, для построения обоснованного прогноза необходимо реконструировать это исходное противоречие, проанализировать историю его развития и выявить момент исчерпания возможностей его разрешения в рамках существующей парадигмы.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026*

Целью данной работы является демонстрация применения системного подхода к дальнему прогнозированию на примере эволюции холодильных компрессоров через призму анализа их ключевого противоречия. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: 1) выявить и сформулировать основное противоречие, лежащее в основе технической системы «компрессор»; 2) проследить историческую цепочку смены типов компрессоров (поршневого, ротационного, винтового, центробежного, осевого) как процесс последовательного разрешения и обострения этого противоречия; 3) определить главную движущую силу развития и показать приближение механического принципа сжатия к физическим пределам; 4) на основе выявленных закономерностей сформулировать прогноз о необходимости перехода к принципиально новым, немеханическим способам создания давления и холода.

Выбор компрессоров в качестве объекта исследования обусловлен их технологической зрелостью, длительной и хорошо документированной историей развития, а также наглядностью проявления в их эволюции общих законов развития ТС [6]. Результаты проведенного анализа позволяют систематизировать знания об эволюции данного класса машин, а также предлагают практический инструмент для прогнозирования траекторий развития других сложных ТС.

В теории прогнозирования развития ТС известны эффективные решения, основанные на применении инструментов системного подхода [7, 8]. Помимо хорошо разработанного аппарата Системного оператора, развиваются общие методологические подходы, а также методы прогнозирования, опирающиеся на отдельные закономерности, например спиралевидный характер развития и выявление особенностей циклических повторений в эволюции ТС [9]. В настоящей работе предлагается метод прогнозирования, базирующийся на выявлении, анализе и прослеживании развертывания основного противоречия, лежащего в основании ТС, что позволяет определить наиболее перспективные направления ее развития [10]. Исходная посылка метода заключается в том, что любая ТС возникает как разрешение некоторого противоречия в потребностях надсистемы; ее существование, эволюция и исчерпание детерминированы наличием и последующим разрешением этого надсистемного противоречия. В процессе развертывания ТС действуют фундаментальные законы диалектики, проявляющиеся в специфических закономерностях развития ТС [11]. В качестве объекта прогнозного анализа в данной работе рассматривается ТС «Компрессор».

ОСНОВНОЕ ПРОТИВОРЕЧИЕ В РАЗВИТИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КОМПРЕССОР»

Компрессор как ТС сформировался на пересечении двух фундаментальных надсистемных требований: обеспечения перемещения рабочей среды и создания требуемого уровня давления. Именно эти две функции, реализуемые различными, несводимыми друг к другу элементами, породили ключевое внутреннее противоречие ТС.

Развертывание данного противоречия выступило движущей силой диверсификации компрессорного оборудования, обусловив многообразие конструктивных форм. Таким образом, производительность и давление, выступая как две качественно различные стороны единой технической функции, задали вектор эволюции компрессора, направленный на удержание и разрешение этого противоречия в рамках одной системы (рис. 1).

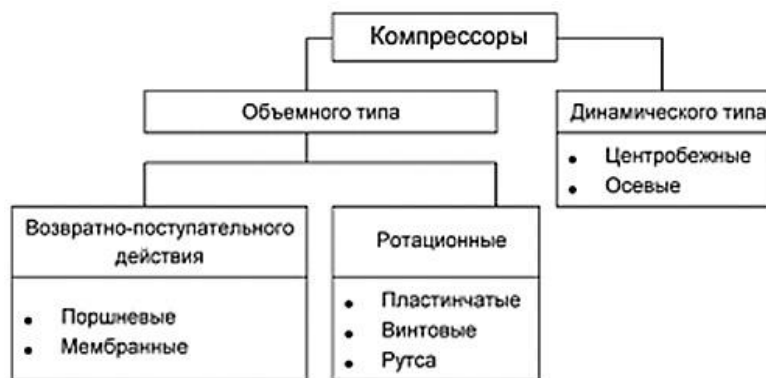


Рис. 1. Структурная схема ТС «Компрессор»

Производительность компрессора отражает количественную, а давление — качественную сторону развития ТС; их взаимодействие, опосредованное надсистемными потребностями, обуславливает эволюцию системы, тогда как противоречивость данной взаимосвязи порождает многообразие конструктивных форм. Количественная характеристика производительности раскладывается на две неразделимые составляющие — объемную (организация пространства давления в рабочей полости) и динамическую (скорость движения рабочего органа), каждая из которых вносит вклад в развертывание ТС при разрешении возникающих противоречий. Следуя принципу анализа от простейших форм, в качестве исходной ТС, где наиболее отчетливо проявилось противоречие между объемной и динамической составляющими, рассмотрим поршневой компрессор.

ПОРШНЕВОЙ КОМПРЕССОР

Рассмотрим, как требования, предъявляемые надсистемой компрессоров — холодильными машинами, отразились на развитии поршневых компрессоров. Теоретически производительность поршневых компрессоров ($V_{км}$) можно повысить, увеличивая теоретический объем цилиндров ($V_{цп}$) и число оборотов двигателя (n):

$$V_{км} = V_{цп} \cdot n$$

Роста объемной производительности ($V_{цп}$) можно добиться путем увеличения диаметра цилиндра ($D_{ц}$), хода поршня (S) и увеличением количества цилиндров (Z):

$$V_{цп} = \frac{\pi}{4} D_{ц}^2 S Z$$

Экстенсивное повышение производительности поршневых компрессоров ограничено следующими факторами:

1. Увеличение диаметра цилиндра и хода поршня лимитируется ростом протечек, массогабаритных характеристик и необходимостью снижения скорости поршня из-за возрастания инерционных нагрузок.
2. Нарращивание числа цилиндров ограничено снижением технологичности, усложнением обслуживания и увеличением габаритов.

Достижение предела по данным параметрам обуславливает переход к преимущественному наращиванию частоты вращения, что означает доминирование динамической составляющей производительности над объемной.

Однако интенсификация скоростного режима поршневых компрессоров ограничена резким снижением надежности вследствие роста инерционных сил и износа. Принципиальным ограничением выступает также неудовлетворительная работа клапанов при давлении всасывания ниже $0,2 \text{ кгс/см}^2$. Экономически обоснованный предел производительности таких компрессоров составляет $\approx 120 \text{ кВт}$ при средней скорости поршня 4 м/с . Попытка обойти скоростные ограничения путем наращивания рабочего объема привела к созданию крейцкопфных компрессоров, характеризующихся чрезмерными массогабаритными показателями, что подтверждает неэффективность экстенсивного пути развития (рис. 2).

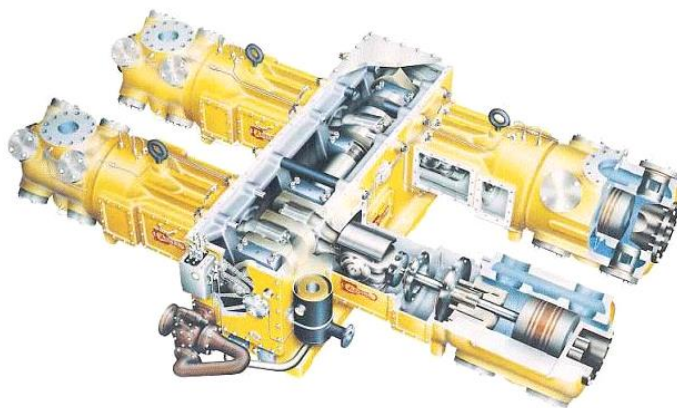


Рис. 2. Схема крейцкопфного компрессора

РОТАЦИОННО-ПОРШНЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Ротационные компрессоры реализуют перенос принципа поршневых машин на микроуровень: ограниченное число цилиндров (2–8) замещено множеством рабочих полостей. Такая архитектура обеспечила повышение частоты вращения ротора при сохранении его уравновешенности, а также исключение всасывающих клапанов, что повысило надежность и снизило гидравлические потери на всасывании.

Преимущества таких компрессоров перед поршневыми наиболее выражены в области низких температур кипения и малых давлений всасывания. При этом в ротационных машинах классический принцип объемного сжатия модифицирован в объемное сжатие, реализуемое при вращательном движении рабочего органа.

На этом уровне техническая система компрессора практически объединила две альтернативные системы: микропоршни, отражающие в целом объемный принцип сжатия, и динамический ротор за счет появления скоростей вращения, ранее недостижимых в рамках объемного принципа сжатия, реализованного в поршневых компрессорах.

В ходе внутреннего саморазвития технической системы проявилось фундаментальное противоречие: усиление динамических характеристик системы потребовало трансформации самого принципа объемного сжатия. Неравномерность развития подсистем могла быть преодолена лишь путем динамизации объемного принципа, что подразумевало устранение недостатков ротационных компрессоров, производных от возвратно-поступательного движения.

Разрешение данного противоречия реализовано в винтовых компрессорах, обеспечивших существенное повышение частоты вращения ротора при снижении инерционных нагрузок.

Движущей силой перехода выступили физические противоречия, а именно несовместимость поступательного движения пластин с вращательным высокоскоростным движением ротора, приводящая к заклиниванию. Данный случай иллюстрирует общую закономерность: исчерпание ресурсов развития ТС и переход к новым системам (актуализация надсистемных потребностей) наиболее часто инициируется именно физическими, а не техническими противоречиями.

ВИНТОВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Широкое применение винтового компрессора (рис. 3), захват им ключевых позиций в холодильных компрессорах отразились в нарастающем выпуске таких компрессоров в развитых странах и появлении большого количества патентов на них.

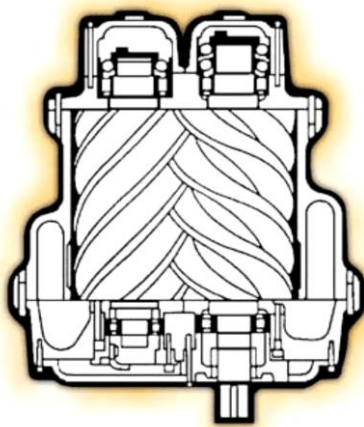


Рис. 3. Схема принципа работы винтового компрессора

Объемная производительность винтового компрессора рассчитывается по формуле

$$V_T = K_{ио} W_0 z_1 n_1 = K_{ио} z_1 \left(\frac{L}{D_1} \right) (f_{1n} + f_{2n}) \frac{D_1^3}{D_1^2} n_1.$$

Так же как и для рассмотренных выше агрегатов, рост производительности винтового компрессора может достигаться в большей степени за счет единственной динамической составляющей – скорости вращения роторов. Другие элементы: полезный объем полости всасывания, увеличение длины, коэффициент использования площади и прочие – в своем влиянии весьма ограничены.

Для всех типов машин объемного сжатия увеличение числа рабочих полостей (цилиндров, пластин) и частоты вращения сверх оптимального предела неизменно приводило к деградации объемно-энергетических характеристик. При снижении плотности всасываемого пара падение коэффициента подачи приобретает лавинообразный характер. Таким образом, экстенсивные методы (увеличение рабочего объема и частоты вращения) исчерпали свой потенциал для достижения требуемой производительности при минимизации потерь и габаритов.

Указанные ограничения обусловили переход к динамическому принципу сжатия, основанному на непрерывной передаче энергии потоку путем повышения его кинетической энергии при обтекании лопаток рабочего колеса. Примечательно, что данный принцип вызревал в недрах объемного сжатия: эволюция прослеживается от поршне-

вых машин к ротационным и, наконец, к осевым компрессорам, где линия сжатия совпадает с направлением потока, при сохранении сущности механического сжатия.

Проведенный анализ выявляет приоритет надсистемных требований как движущей силы развития. Обнаружена прямая корреляция между требованиями надсистемы к росту производительности и доминированием динамической составляющей (частоты вращения, числа циклов) над объемной (геометрической производительностью). Несмотря на диалектическую обусловленность развития внутренними противоречиями ТС, глубинная детерминанта эволюции лежит в надсистемных потребностях. Именно они инициировали переход от объемного сжатия к динамическому, позволивший разрешить неустранимые в рамках объемного принципа проблемы вибраций, массогабаритных характеристик и энергоэффективности.

ТУРБОКОМПРЕССОРЫ

Турбокомпрессоры обеспечили качественный скачок в развитии компрессоростроения: расход рабочего тела (газа, хладагента) возрос практически на порядок по сравнению с машинами объемного принципа действия, а окружные скорости достигли 250...300 м/с. Турбокомпрессоры надежны и долговечны, а также не нуждаются в массивных фундаментах, что создало предпосылки для широкого их внедрения.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Впервые холодильные машины с центробежными компрессорами появились в 1922 г., когда фирма Carrier (США) начала выпускать машины этого типа, работавшие на дихлорметане и дихлорэтилене. В 1926 г. фирмой «Броун-Бовери» были построены аммиачные холодильные машины с центробежными компрессорами. С 1930-х гг. в них применяют преимущественно фреоны, которые являются тяжелыми веществами, поэтому числа Маха значительно выше, чем в газовых компрессорах. При этом в одной ступени достигается высокая степень повышения давления – до 3,3 и сильно уменьшается объем сжимаемых паров.

Производительность центробежного компрессора определяется соотношением

$$V_T = G \cdot V_1, \quad (1)$$

где G – расход через центробежные компрессоры; V_1 – удельный объем всасываемых газов.

Из формулы (1) следует, что при неизменном всасываемом удельном объеме производительность холодильной машины может быть увеличена только при росте расхода. Расход увеличивается только при росте удельной работы ступени центробежного компрессора, которую можно вычислить по формуле

$$L_{ст} = (C_{u_2} u_2 - C_{u_1} u_1)(1 + \beta_{прот} + \beta_{тр}). \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что для достижения эффективной работы ступени следует максимально снизить потери трения и протечек:

$$G = \frac{\pi D_2 b_2 t_2 u_2 \varphi r_2}{\vartheta_2}. \quad (3)$$

Здесь снова видим тенденцию к тому, что достижение больших показателей производительности и степени сжатия осуществляется только увеличением скорости.

Тогда больше кинетической энергии будет переходить в потенциальную. Но из вышеприведенных соображений видно, что этот путь отрицательно влияет на другие характеристики центробежные компрессоры. Для решения данной задачи впервые в компрессорных установках стали появляться системы мультипликаторов и специальных приводов, резко усложнивших компрессор.

Это противоречие: «необходимо повышать скорость для увеличения расхода и степени сжатия и в то же время нельзя повышать скорость» – уже не может быть кардинально разрешено незначительными усовершенствованиями (такими как изменение угла входа и выхода, изменение формы, рабочего колеса и т.д.), поэтому снова потребовалось принципиально новое решение проблемы.

Из-за высокой сложности компрессоров, требующих большой степени повышения давления, возникла необходимость в увеличении числа ступеней без увеличения габаритов и массы компрессора. Основному изменению должны были подвергнуться именно ступени, а не компрессор в целом.

ОСЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Как и в случае перехода от поршневых компрессоров к ротационным, появление осевых компрессоров представляет собой перенос динамического принципа сжатия на микроуровень – последовательное сжатие в ступенях малого размера. Данное решение обеспечило повышение частоты вращения ротора и, благодаря прямоточному расположению ступеней, позволило наращивать их число на одном валу без увеличения габаритов.

В настоящее время осевые компрессоры применяются преимущественно при больших объемных расходах рабочего тела (например, в транспортировке газа в газовых холодильных машинах). Преодоление таких ограничений, как вибрация роторов и осаждение пылегазовых частиц в межлопаточных каналах (снижающие КПД до 10 %), создает предпосылки для эффективного замещения центробежных компрессоров в газоперекачивающих агрегатах.

Производительность осевых компрессоров зависит от множества расчетных показателей. В связи с громоздкостью формулы она не приводится. Наиболее важными показателями являются:

коэффициент расхода. Для определенной используемой ступени его рост ограничен понижением значений КПД и колеблется в пределах 0,4...0,5 при максимальном КПД;

относительный диаметр у корневого сечения лопатки ступени. Как правило, принимается равным 0,6;

рост производительности. Достигается в основном ускорением движения потока путем увеличения окружной скорости.

Прирост производительности компрессора утратил внутреннюю обусловленность и перешел в зависимость от внешних подсистем. Увеличение скорости вращения ротора, ранее выступавшее универсальным фактором интенсификации для всех типов сжатия, перестало давать соразмерный прирост производительности, но привело к существенному усложнению привода и сопутствующего оборудования.

КРИЗИС МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА СЖАТИЯ

Проблема усложнения привода разрешается переходом к газо- или паротурбинному приводу вместо электрического, что обеспечивает компактность, но одновременно усиливает зависимость компрессора от приводной системы, интегрируя его в метасистему «турбина – компрессор», вследствие чего эволюция компрессора в значительной мере детерминируется траекторией развития данной метасистемы.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026*

Подобное решение оправдано лишь для автономных компрессорных станций; в холодильной технике компрессор, выступая подсистемой холодильной машины, подчиняется ее внутренним закономерностям, что делает сопряжение разнонаправленных тенденций развития в едином агрегате затруднительным. Более фундаментальное ограничение, не зависящее от компрессора, обусловлено пределом прочности конструкционных материалов: современные легированные стали допускают окружные скорости до 300 м/с, титановые сплавы – до 450 м/с, однако данная проблема носит общетехнический характер и неразрешима в рамках компрессоростроения.

Внешним ограничением выступает также нецелесообразность превышения скорости звука рабочим телом (число Маха), что определяется газодинамическими свойствами среды. Следовательно, интенсификация скоростных режимов ротора не приводит к качественному улучшению характеристик компрессора, а лишь увеличивает внешние по отношению к нему ограничения.

Ведущую роль в смене «формаций» компрессоров играет рост производительности. Конструкции, не удовлетворяющие требованиям роста производительности, отбрасываются, или же их развитие замедляется. На их место приходят более совершенные конструкции.

Основным направлением повышения производительности всех видов компрессоров является увеличение окружной скорости или количества оборотов вала компрессора. Для динамического принципа сжатия даже повышение коэффициента сжатия в отдельно взятой ступени достигается повышением скорости вращения. Лопатка компрессора становится той «клеткой», которая органично объединяет разделенные ранее объемный и динамический принципы роста производительности.

Увеличение степени повышения давления и рост КПД, взятые отдельно, являются тенденциями совершенствования компрессоров в рамках каждого отдельного принципа сжатия и представляют собой дополнительное направление совершенствования по отношению к главной движущей силе развития компрессоров, определяемой надсистемными требованиями, – росту производительности. Как правило, рост степени сжатия достигается увеличением числа ступеней, т.е. экстенсивным ростом, сопровождаемым значительным увеличением габаритов и массы компрессора.

На основании проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы.

1. Принцип компримирования, основанный на механическом объемном или динамическом сжатии, в своем развитии приближается к исчерпанию. Конструктивное многообразие в рамках каждого из указанных принципов обеспечивало эволюцию компрессоростроения; дальнейшее совершенствование вихревых, спиральных и ротационных конструкций будет способствовать повышению технического уровня компрессоров в пределах существующей ветви сжатия. Однако сам принцип сжатия ограничен как фундаментальными физическими закономерностями, лежащими в его основе, так и технологическими пределами применяемых материалов.

2. Главной движущей силой в развитии компрессоров является рост производительности.

Все приведенные рассуждения можно объединить в одну схему, обобщающую тенденции развития компрессоров от более низкого уровня к более высокому, с более динамичными принципами работы.

Основой схемы является переход от объемного принципа сжатия к динамическому с одновременным переходом рабочих органов от макроуровня к микроуровню. Максимальную эффективность в видимой перспективе будут занимать рабочие тела в виде ионизированных частиц газа в магнитогидродинамических

установках. Необходимость переходов от одного принципа работы к другому вытекает из приведенного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методологии, ориентированной на анализ эволюции требований со стороны надсистемы по отношению к рассматриваемой технической системе, позволяет верифицировать актуальные и перспективные целевые функции последней. На примере компрессорного оборудования продемонстрировано, что данный подход дает возможность дифференцировать стохастические и малозначимые флуктуации рыночной или технологической конъюнктуры от детерминированных направлений развития технических систем.

Прогнозирование, базирующееся на исследовании динамики потребностей надсистемы, выступает в качестве фундаментальной основы для проектирования перспективных моделей технических систем в долгосрочном горизонте планирования. Устойчивость и достоверность прогноза при этом обеспечиваются за счет комплексного учета требований множества надсистемных образований, в контур которых интегрирована исследуемая техническая система.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лу Л. Анализ, диагностика и стратегическое прогнозирование развития систем: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 226 с.
2. Братченко Н.Ю. Анализ методов прогнозирования параметров сложных технических систем // *Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета*. 2012. № 4 (33). С. 19–21.
3. Пушкарев С.А. Анализ методов инженерного прогнозирования развития технических систем // *Вестник КИГИТ*. 2009. № 1 (8). С. 99–107.
4. Бочков А.П. Моделирование развития технических систем: учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого, 1992. 106 с.
5. Бочков А.П. Элементы качественного описания и прогнозирования развития технических систем. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 1995. 72 с.
6. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Способы анализа и сужения прогнозной области развития систем энергетики // *Системные исследования в энергетике: методология и результаты*. М.: АО «Издательский дом МЭИ», 2018. С. 127–134.
7. Ключников В.Ю., Клементьев С.А. Методология комплексного прогнозирования технологического развития сложных технических систем // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. 2018. № 2 (23). С. 53–61.
8. Панфилов В., Андреев С., Яковлев В., Бычков Е. Научно-техническое прогнозирование направления развития холодильных технологий и техники // *Морское оборудование и технологии*. 2020. № 1 (22). С. 14–20.
9. Поляков П.С. Метод формирования структуры, определения основных проектных параметров и анализа эффективности парокompрессионных холодильных систем: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011. 150 с.
10. Володин В.И. Комплексный подход к расчету параметров компрессионной холодильной машины // *Холодильная техника*. 1998. № 2. С. 8–10.
11. Капустин И.В., Кулаев Е.В., Швецов И.И., Грицай А.И. Анализ неисправностей и отказов компрессоров холодильного оборудования. *Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК*: Сб. науч. статей. Ставрополь: АГРУС, 2023. С. 93–96.

Для цитирования: Горобченко С.Л., Мешков С.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Соколова В.А. Системный подход к дальнему прогнозированию развития холодильных компрессоров с использованием анализа ключевого противоречия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 2 (30). С. 109–119.

A SYSTEMATIC APPROACH TO LONG-TERM FORECASTING OF REFRIGERATION COMPRESSORS USING KEY CONTRADICTION ANALYSIS

S.L. GOROBCHENKO¹, Cand. Sc., S.A. MESHKOV², Cand. Sc.,
N.N. WERNER³, Cand. Sc., S.A. VOINASH⁴, Junior Researcher,
V.A. SOKOLOVA¹, Cand. Sc.

¹Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
18, Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, 191186, e-mail: sgorobchenko@yandex.ru

²Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov,
1, 1-ya Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, e-mail: meshkovsergey@mail.ru

³Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov,
5, Institutsky Lane, Saint Petersburg, 194021, e-mail: wernern@mail.ru

⁴Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of the Altai State Technical University
named after I.I. Polzunov,
2/6, Traktornaya Street, Rubtsovsk, 658207, e-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

This article proposes a method for long-term forecasting of technical systems development based on a systems analysis of a key internal contradiction. The refrigeration compressor system is chosen as the object of study. The method is based on identifying and tracking the development of the fundamental contradiction between two mutually exclusive requirements of the supersystem – ensuring productivity (quantitative) and creating pressure (qualitative). The evolution of compressors is traced, from piston to rotary, screw, centrifugal, and axial, identifying the main driving force behind their development – increased productivity, achieved primarily by increasing the rotational speed of the working parts. The analysis revealed that the mechanical principle of compression (volumetric and dynamic) is close to exhausting its capabilities, running up against physical and design limitations. A transition to fundamentally different, non-mechanical compression methods, such as magnetohydrodynamic and thermoelectric cooling, is justified as a promising direction following axial compressors. This corresponds to the general trend of working fluid transition from the macro- to the micro-level. It is concluded that forecasting based on the analysis of the key contradiction and supra-system requirements allows us to identify key development paths and create reliable long-term forecasts.

Keywords: systems approach, long-term forecasting, technical system, refrigeration compressor, key contradiction, laws of technical system evolution, supra-system requirements, performance, compression principle, piston compressor, screw compressor, centrifugal compressor, axial compressor, magnetohydrodynamic method, thermoelectric cooling, technological evolution.

Поступила в редакцию/received: 24.02.2026; после рецензирования/revised: 26.02.2026;
принята/accepted: 02.03.2026