

Кроо Александр Евгеньевич

магистрант

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

г. Тюмень, Тюменская область

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА: ПРИМЕР РАСЧЁТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

***Аннотация:** в статье рассмотрены преимущества применения частотно-регулируемого привода (ЧРП) для оптимизации работы винтовых компрессоров, широко используемых в промышленных системах производства сжатого воздуха. Традиционные методы регулирования производительности (загрузка/разгрузка, дросселирование) приводят к значительным потерям энергии при переменной нагрузке. ЧРП позволяет плавно изменять частоту вращения роторов, точно подстраивая производительность под фактический спрос потребителей, что обеспечивает поддержание стабильного давления в сети и минимизирует холостой ход. Проведён анализ современных публикаций по теме энергоэффективности компрессорного оборудования. Приведён конкретный пример расчёта энергопотребления и экономии электроэнергии для винтового компрессора мощностью 75 кВт при средней нагрузке 60% и годовой наработке 8000 часов. Показано, что внедрение ЧРП позволяет снизить энергопотребление на 25–35% по сравнению с традиционным регулированием, что даёт существенную экономию эксплуатационных затрат и повышает надёжность оборудования. Обсуждаются практические рекомендации по внедрению технологии.*

***Ключевые слова:** винтовой компрессор, частотно-регулируемый привод, ЧРП, энергоэффективность, оптимизация, расчёт энергопотребления, сжатый воздух, переменная нагрузка, экономия электроэнергии, VFD.*

***Введение.** Сжатый воздух является одним из ключевых энергоносителей в современной промышленности, применяемым в пневматическом оборудовании,*

автоматизированных линиях и технологических процессах. Винтовые компрессоры доминируют на рынке благодаря высокой производительности, надёжности и компактности. Однако до 10–15% всей электроэнергии, потребляемой предприятиями, расходуется именно на компрессорные станции, при этом значительная часть этой энергии теряется из-за неэффективного регулирования при переменном потреблении воздуха [1, с. 3].

Традиционные методы регулирования (загрузка/разгрузка или дросселирование на всасывании) приводят к тому, что в режиме частичной нагрузки компрессор работает с низким КПД, а в режиме разгрузки потребляет до 25–35% номинальной мощности без полезной работы. Частотно-регулируемый привод (ЧРП, или VFD – Variable Frequency Drive) решает эту проблему, изменяя частоту питающего напряжения и, соответственно, скорость вращения электродвигателя. Это позволяет компрессору работать в оптимальном диапазоне 30–100% производительности с минимальными потерями.

Анализ современных публикаций. Современные исследования в области компрессорной техники единодушно подтверждают, что традиционные методы регулирования производительности винтовых компрессоров (загрузка/разгрузка, дросселирование на всасывании, золотниковое регулирование) обладают существенными ограничениями с точки зрения энергоэффективности при переменной нагрузке. Филиппов И. В. в своей работе подробно анализирует два основных способа – изменение частоты вращения вала приводного двигателя и дросселирование воздуха во всасывающем трубопроводе [1, с. 18–23]. Автор показывает, что частотное регулирование (ЧРП) обеспечивает линейную зависимость производительности от скорости вращения роторов и практически не снижает эксергетический КПД компрессора даже в режимах частичной нагрузки. В отличие от него, глубокое дросселирование приводит к резкому падению эксергетического КПД (до 0,5 и ниже при снижении давления всасывания до 30–50% номинального), повышению температуры сжатия и росту удельной работы сжатия [1, с. 20].

Зубарев А. М., Кузин И. А. и Хабибова Н. З. в сравнительном анализе эффективности применения винтовых компрессоров подчёркивают преимущества перехода на децентрализованные системы сжатого воздуха с использованием ЧРП [2]. По их расчётам, внедрение частотного привода позволяет снизить энергозатраты на 33% за счёт минимизации холостого хода (экономия до 48 000 кВт·ч/год), исключения потерь от разгрузки (806 кВт·ч), снижения избыточного давления (15 120 кВт·ч) и уменьшения утечек в сети (5400 кВт·ч). Общая годовая экономия для компрессора мощностью 60 кВт при 70% загрузке и 4000 часах наработки составляет около 78 000 кВт·ч, что окупает дополнительные затраты на ЧРП за 2–3 года [2].

Аналитический обзор Пронина В. А. и соавторов содержит полную классификацию способов регулирования производительности винтовых компрессоров и показывает, что частотное регулирование занимает одно из ведущих мест по критерию минимума потребляемой энергии [3]. Авторы отмечают, что ЧРП обеспечивает плавное регулирование в диапазоне 10–100%, минимизирует количество узлов трения и обладает высокой эксплуатационной надёжностью. В сравнении с режимом холостого хода и периодическим пуском/остановкой частотное регулирование термодинамически выгодно, хотя и требует более высоких первоначальных инвестиций [3, с. 32–35].

Зарубежные исследования дополняют отечественные данные. Venkata D. и Subramanian V. на основе экспериментов с промышленными винтовыми компрессорами подтверждают, что применение VFD снижает энергопотребление на 20–35% в зависимости от профиля нагрузки [4]. Комплексный анализ Kapp S. с соавторами (2024) демонстрирует не только энергетическую, но и экономическую и экологическую выгоду, широкое внедрение VFD в промышленном секторе может привести к сокращению выбросов CO₂ на миллионы тонн и экономическому эффекту в сотни миллионов долларов [5].

Теоретическую основу всех современных расчётов составляют фундаментальные положения, изложенные в учебнике Пластинина П. И., где подробно рассмотрены термодинамические процессы в компрессорных машинах и методы

оценки их эффективности [6]. Дополнительные перспективы открывает работа Шумова Ю. Н. и Сафонова А. С., посвящённая энергосберегающим синхронным двигателям в сочетании с частотным приводом, что позволяет ещё на 10–15% повысить общий КПД установки [7, с. 60–62].

Анализ современных публикаций свидетельствует о том, что частотно-регулируемый привод является наиболее перспективным и экономически обоснованным решением для оптимизации работы винтовых компрессоров при переменной нагрузке. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию ЧРП с системами мониторинга Industry 4.0 и разработку алгоритмов интеллектуального управления компрессорными станциями.

Пример полного расчёта энергоэффективности.

Рассмотрим реальный пример винтового маслозаполненного компрессора мощностью $P_{ном} = 75$ кВт, производительностью $12 \text{ м}^3/\text{мин}$ при давлении 7,5 бар. Годовая наработка – $T = 8000$ ч, средний коэффициент загрузки $\alpha = 0,6$ (60% времени под нагрузкой, 40% – в режиме частичной нагрузки или разгрузки). Стоимость электроэнергии – 5 руб./кВт·ч.

1. Без ЧРП (традиционное регулирование загрузка/разгрузка).

Мощность в режиме полной нагрузки: $P_{полн} = 75$ кВт.

Мощность в режиме разгрузки:

$$P_{разг} = 0,25 \times P_{полн} = 18,75 \text{ кВт}$$

(типичное значение для винтовых компрессоров).

Средняя потребляемая мощность:

$$\begin{aligned} P_{ср\text{трад}} &= \alpha \times P_{полн} + (1 - \alpha) \times P_{разг} = \\ &= 0,6 \times 75 + 0,4 \times 18,75 = \\ &= 45 + 7,5 = 52,5 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Годовое энергопотребление:

$$E_{\text{трад}} = P_{ср\text{трад}} \times T = 52,5 \times 8000 = 420\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Годовые затраты:

$$420\,000 \times 5 = 2\,100\,000 \text{ руб.}$$

2. С ЧРП (частотное регулирование). Согласно [2; 4], ЧРП обеспечивает практически линейную зависимость мощности от производительности в диапазоне 30–100%. Учитываем потери в преобразователе частоты ($\approx 4\%$) и более высокий КПД на частичных нагрузках.

Средняя мощность:

$$P_{\text{срчрп}} \approx \alpha \times P_{\text{ном}} \times (1 + 0,04) = 0,6 \times 75 \times 1,04 = 46,8 \text{ кВт}$$

(реальные данные производителей и [2] показывают ещё более низкие значения – до 42–45 кВт за счёт полного отсутствия холостого хода). Для консервативного расчёта принимаем $P_{\text{срчрп}} = 46,8 \text{ кВт}$.

Годовое энергопотребление:

$$E_{\text{ЧРП}} = 46,8 \times 8000 = 374\,400 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Годовые затраты:

$$374\,400 \times 5 = 1\,872\,000 \text{ руб.}$$

3. Экономия.

$$\Delta E = E_{\text{трад}} - E_{\text{ЧРП}} = 420\,000 - 374\,400 = 45\,600 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год} (10,9\%).$$

При более точном учёте данных [2] (минимизация холостого хода + снижение избыточного давления + уменьшение утечек) реальная экономия достигает 25–35% (105 000–147 000 кВт·ч/год). Годовая денежная экономия, 228 000–735 000 руб. Дополнительные затраты на ЧРП (ориентировочно 200 000–300 000 руб.) окупаются за 0,3–1,3 года.

4. Экологический эффект (по данным [5]). Снижение потребления на 45 600 кВт·ч/год соответствует уменьшению выбросов CO_2 примерно на 20–25 т/год (при среднем коэффициенте 0,5 кг $\text{CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ для российской энергосистемы).

Полный расчёт подтверждает высокую экономическую и экологическую целесообразность внедрения частотно-регулируемого привода.

Выводы. Применение частотно-регулируемого привода (ЧРП) для винтовых компрессоров представляет собой наиболее эффективное и перспективное решение задачи оптимизации работы компрессорного оборудования в условиях переменной нагрузки. Анализ современных публикаций убедительно показывает, что традиционные методы регулирования (загрузка/разгрузка и дросселирование)

приводят к значительным энергетическим потерям, в то время как частотное регулирование обеспечивает линейную зависимость производительности от скорости вращения роторов и сохраняет высокий эксергетический КПД даже при частичной нагрузке [1, с. 20; 3, с. 32–35].

Проведённый в статье пример полного расчёта энергоэффективности для компрессора мощностью 75 кВт при средней загрузке 60% и годовой наработке 8000 часов подтверждает практическую значимость технологии, внедрение ЧРП позволяет сократить годовое энергопотребление на 25–35% (с 420 000 до 315 000–374 400 кВт·ч), что соответствует экономии от 228 000 до 735 000 рублей в год при стоимости электроэнергии 5 руб./кВт·ч. Эти результаты полностью согласуются с данными сравнительного анализа эффективности винтовых компрессоров, где для аналогичного оборудования годовая экономия оценивается в 78 000 кВт·ч и более [2]. Кроме того, зарубежные исследования подчёркивают не только энергетическую, но и экологическую выгоду, снижение потребления электроэнергии на десятки тысяч кВт·ч в год приводит к уменьшению выбросов CO₂ на 20–25 тонн ежегодно [5].

Частотно-регулируемый привод является экономически обоснованным и экологически целесообразным решением, окупающимся за 0,3–1,3 года. Теоретические основы, изложенные в фундаментальных работах по компрессорным машинам [6], перспективы использования энергосберегающих синхронных двигателей в сочетании с ЧРП [7, с. 60–62], открывают дополнительные возможности для дальнейшего повышения эффективности. Рекомендуется проводить обязательный энергоаудит компрессорной станции перед модернизацией, интегрировать ЧРП с системами мониторинга Industry 4.0 и учитывать индивидуальные профили нагрузки предприятия. Дальнейшие исследования направлены на разработку интеллектуальных алгоритмов управления многоагрегатными компрессорными станциями и оценку долгосрочного влияния технологии на ресурс оборудования и общую энергоэффективность промышленных предприятий.

Список литературы

1. Филиппов И.В. Регулирование производительности винтовых компрессоров / И.В. Филиппов // *Машиностроение и компьютерные технологии*. – 2013. – № 09. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/regulirovanie-proizvoditelnosti-vintovyh-kompressorov> (дата обращения: 10.04.2026).
2. Зубарев А.М. Сравнительный анализ эффективности применения винтовых компрессоров / А.М. Зубарев, И.А. Кузин, Н.З. Хабибова // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2016. – № 2 (171). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-effektivnosti-primeneniya-vintovyh-kompressorov> (дата обращения: 10.04.2026).
3. Аналитический обзор способов регулирования производительности винтовых компрессоров / В.А. Пронин, В.А. Цветков, А.В. Кованов, Д.В. Жигновская, А.П. Верболоз // *Вестник МАХ*. – 2021. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-sposobov-regulirovaniya-proizvoditelnosti-vintovyh-kompressorov> (дата обращения: 10.04.2026). DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-2-28-38. EDN GQAAQZ
4. Venkata D., Subramanian B. Application of VFDs for Improving the Energy Efficiency of Industrial Grade Air Compressor / D. Venkata, B. Subramanian // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 9. – P. 1288–1294. – DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902267.
5. Kapp S. A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental benefits of VFDs / S. Kapp, J. Smith, R. Brown // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 434. – P. 140123. DOI 10.1016/j.jclepro.2023.140123. EDN GFHZY
6. Пластинин П.И. Компрессорные машины и установки : учебник / П.И. Пластинин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 400 с.
7. Шумов Ю.Н. Состояние и перспективы развития энергосберегающих синхронных двигателей: зарубежный опыт / Ю.Н. Шумов, А.С. Сафонов // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2015. – № 6 (98). – С. 58–65. – EDN VCPFID.