

УДК 621.313:621.515:620.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ И ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

А.А. Шавазов, И.Б. Илекерова, Ш.Ш. Тураханов

Академия наук Республики Узбекистан, Институт проблем энергетики

Ферганский государственный технический университет

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент 100095, Узбекистан

E-mail: shavazov@inbox.ru; iilekerova@mail.com; sherzodjon962@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20624987>

Аннотация: В данной статье рассматриваются современные методы повышения энергоэффективности электромеханических систем с компрессорами и вентиляторами, работающих в условиях различных технологических режимов. Влияние переменной нагрузки, переходных процессов, режимов неполной загрузки и простоев на энергетические характеристики индукционных электроприводов было проанализировано. Особое внимание уделяется снижению энергетических потерь за счет использования частотно-регулируемого привода, адаптивных алгоритмов управления и интеллектуальных методов регулирования. Рассматриваются современные подходы к динамическому моделированию вентиляторных систем и управлению компрессорными установками для достижения энергоэффективности. Показано, что использование систем оптимизации режимов работы и регулируемых электроприводов может снизить энергопотребление на 20–40 процентов, а иногда и обеспечить более высокие показатели энергосбережения. Рекомендации по повышению эффективности электромеханических систем при переменных технологических условиях были разработаны на основе анализа последних научных исследований.

Ключевые слова: электромеханическая система, индукционный двигатель, энергоэффективность, частотно-регулируемый привод, компрессор, вентилятор, переменные технологические режимы, электропривод.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF COMPRESSOR AND FAN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS UNDER VARIABLE TECHNOLOGICAL MODES

A.A. Shavazov, I.B. Ilekerova, Sh.Sh. Turakhanov

Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Institute of Energy Problems

Fergana State Technical University

Tashkent State Technical University, Tashkent 100095, Uzbekistan

E-mail: shavazov@inbox.ru; iilekerova@mail.com; sherzodjon962@gmail.com

Abstract: This article examines modern methods for increasing the energy efficiency of electromechanical systems with compressors and fans operating under various technological conditions. The influence of variable load, transient processes, partial load modes, and downtime on the energy characteristics of induction electric drives was analyzed. Special attention is paid to reducing energy losses through the use of frequency-controlled drive, adaptive control algorithms, and intelligent control methods. Modern approaches to dynamic modeling of ventilation systems and control of compressor units to achieve energy efficiency are examined. It has been shown that the use of operating mode optimization systems and adjustable electric drives can reduce energy

consumption by 20–40 percent, and sometimes even ensure higher energy savings. Recommendations for increasing the efficiency of electromechanical systems under variable technological conditions have been developed based on the analysis of recent scientific research.

Keywords: electromechanical system, induction motor, energy efficiency, frequency-controlled drive, compressor, fan, variable technological modes, electric drive.

O‘ZGARUVCHAN TEXNOLOGIK REJIMLAR SHAROITIDA KOMPRESSOR VA VENTILYATORLI ELEKTROMEXANIK TIZIMLARING ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH

A.A. Shavazov, I.B. Ilekerova, Sh.Sh. Turaxanov

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Energetika muammolari instituti

Farg‘ona davlat texnika universiteti

Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent 100095, O‘zbekiston

E-mail: shavazov@inbox.ru; iilekerova@mail.com; sherzodjon962@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada turli texnologik sharoitlarda ishlaydigan kompressor va ventilyatorli elektromexanik tizimlarning energiya samaradorligini oshirishning zamonaviy usullari ko‘rib chiqiladi. Asinxron elektr yuritmalarning energetik xarakteristikalariga o‘zgaruvchan yuklama, o‘tish jarayonlari, qisman yuklama rejimlari va to‘xtab turish vaqtlarining ta‘siri tahlil qilindi. Chastotaviy boshqariladigan yuritma, adaptiv boshqarish algoritmlari va intellektual boshqarish usullarini qo‘llash orqali energiya yo‘qotishlarini kamaytirishga alohida e‘tibor qaratilmoqda. Energiya samaradorligiga erishish uchun ventilyatsiya tizimlarini dinamik modellashtirish va kompressor qurilmalarini boshqarishning zamonaviy yondashuvlari ko‘rib chiqilgan. Ish rejimini optimallashtirish tizimlari va rostlanuvchi elektr yuritmalardan foydalanish energiya sarfini 20–40 foizga, ba‘zan esa undan ham ko‘proq tejash mumkinligi ko‘rsatilgan. O‘zgaruvchan texnologik sharoitlarda elektromexanik tizimlarning samaradorligini oshirish bo‘yicha tavsiyalar so‘nggi ilmiy tadqiqotlar tahlili asosida ishlab chiqilgan.

Tayanch so‘zlar: elektromexanik tizim, asinxron motor, energiya tejamkorligi, chastota bilan boshqariladigan yuritma, kompressor, ventilyator, o‘zgaruvchan texnologik rejimlar, elektr yuritma.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема энергоэффективности электромеханических систем становится особенно важной в наши дни из-за цифровизации промышленности и повышения требований к рациональному использованию энергетических ресурсов. Компрессорные и вентиляторные установки с индукционными электроприводами потребляют значительную часть промышленной электрической энергии [1]. На производство сжатого воздуха расходуется значительная доля электроэнергии — в среднем около 20 %, а на отдельных предприятиях этот показатель может достигать 90 % общего энергопотребления технологического производства. В металлургической отрасли на системы сжатого воздуха приходится примерно 5–10 % потребляемой электроэнергии, в машиностроении — до 20 %, а в горнодобывающей промышленности — до 30 %. [6]. Эффективность холодильных установок и тепловых насосных систем во многом определяется работой компрессора, являющегося их ключевым элементом. В связи с этим особое значение имеет разработка точных и удобных моделей, позволяющих анализировать и прогнозировать характеристики компрессоров [1]. В настоящее время исследователями во всем мире активно изучаются

различные подходы к моделированию компрессорных систем. Наиболее распространёнными являются три основных метода: модели, основанные на геометрических и физических закономерностях, эмпирические и полуэмпирические методы [3,10]. Электромеханические системы с индукционными двигателями широко используются в системах вентиляции, охлаждения, пневматического транспорта, компрессорных станциях и технологических комплексах различного назначения. Тем не менее, изменение нагрузки, переходные процессы, частые пуски и остановки, а также работа оборудования в режиме неполной загрузки вызывают значительные энергетические потери, при работе таких систем в условиях изменяющихся технологических режимов.

Значения скольжения, электромагнитного момента, мощности и коэффициента полезного действия системы изменяются в результате переменных технологических режимов, которые непосредственно влияют на энергетические характеристики электропривода. В результате увеличиваются тепловые нагрузки, потери энергии в обмотках двигателя и общая эффективность работы оборудования.

Применение современных регулируемых электроприводов с частотным и векторным управлением является одним из наиболее перспективных способов решения этой проблемы [2]. Эти электроприводы позволяют адаптировать параметры работы двигателя к текущим условиям технологического процесса. Интеллектуальные методы управления повышают надёжность оборудования, обеспечивают устойчивость работы системы и значительно снижают потери энергии.

Целью этой статьи является изучение современных подходов к повышению энергоэффективности электромеханических систем, включая компрессорные и вентиляторные системы в условиях различных технологических режимов. Для достижения цели, были сформулированы следующие задачи: изучить, как изменения режимов влияют на энергетические характеристики электроприводов;

изучить современные подходы к управлению индукционными двигателями; проанализировать возможность использования частотно-регулируемого привода; рассмотреть методы оптимизации работы компрессорных и вентиляторных систем; определить перспективные направления повышения энергоэффективности..

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа индукционного двигателя в составе электромеханической системы описывается рядом фундаментальных зависимостей, характеризующих режимы работы двигателя. Режимы функционирования индукционного двигателя формируются под воздействием изменений частоты питания, скольжения и нагрузки, что приводит к соответствующим изменениям электромагнитного момента, мощности и коэффициента полезного действия, тем самым определяя уровень энергоэффективности электромеханической системы. Основные формулы:

Синхронная скорость вращения определяется выражением:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

определяет максимальную скорость двигателя

(f) — частота питающей сети;

(p) — число пар полюсов.

Одним из ключевых параметров режима работы является скольжение:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

(n_1) — синхронная скорость;

(n) — скорость ротора.

Скольжение непосредственно влияет на энергетические потери и определяет степень отклонения режима работы двигателя от синхронного состояния.

Электромагнитный момент двигателя определяется выражением:

$$M = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_2'}{\omega_1 \cdot [(R_2'/S)^2 + X^2]}$$

момент зависит от скольжения, при изменении режима → меняется момент

(U) — напряжение питания;

(R_2') — приведенное сопротивление ротора;

(X) — реактивное сопротивление;

(ω_1) — синхронная угловая скорость.

Коэффициент полезного действия системы определяется отношением полезной мощности к потребляемой:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}$$

Изменение скольжения в условиях переменной нагрузки приводит к увеличению тепловых потерь и снижению эффективности системы. Переходные режимы, а также частые пуски и остановки приносят наибольшие потери.

Последние научные исследования были посвящены использованию частотно-регулируемых приводов, интеллектуальных систем управления и методов динамического моделирования компрессорных и вентиляторных систем для анализа современных методов повышения энергоэффективности.

Влияние переменных технологических режимов на энергетические потери

Одной из основных причин снижения энергоэффективности электромеханических систем являются переменные технологические режимы. Когда изменяется нагрузка, двигатель начинает работать в режиме, отличающемся от номинального, что приводит к большему потреблению реактивной мощности и большим потерям энергии.

Работа оборудования при неполной загрузке является особенно проблемным режимом. В таких ситуациях двигатель потребляет значительную часть мощности, но полезная нагрузка уменьшается. Это приводит к увеличению удельных энергозатрат и снижению коэффициента полезного действия.

Высокие пусковые токи и значительные тепловые потери сопровождают переходные процессы при пуске и останове двигателя. Частые пуски сокращают срок службы оборудования и увеличивают риск аварий.

Таблица 1. Влияние переменных режимов на энергетические потери

Технологический режим	Характеристика режима	Влияние на энергетические потери
Переменная нагрузка	Изменение нагрузки в процессе работы	Рост потерь в меди и стали
Переходные процессы	Частые пуски и остановки	Увеличение тепловых потерь
Неполная загрузка	Работа двигателя ниже номинальной мощности	Снижение КПД
Режим простоя	Работа без полезной нагрузки	Потери холостого хода
Переменная скорость	Изменение частоты вращения	Дополнительные динамические потери

Согласно исследованиям Dinolova и др. [1], эффективность индукционных электроприводов существенно зависит от режима эксплуатации и степени согласования мощности двигателя с реальной нагрузкой.

Частотно-регулируемый привод как средство повышения энергоэффективности. ЧРП является одним из наиболее эффективных методов повышения энергоэффективности. ЧРП позволяет изменять скорость вращения двигателя в соответствии с требованиями технологического процесса.

Как показали Turkeri и Kiselychnyk [2], использование динамического моделирования и частотного регулирования вентиляторных систем значительно снижает энергопотребление и улучшает динамические характеристики системы.

В исследовании, проведенном Чэном и соавторами [3], рассматривалась эффективность компрессоров с переменной частотой вращения. Результаты показали, что использование частотно-регулируемого управления снижает потребляемую мощность и повышает эффективность компрессорной системы при различных условиях всасывания.

Векторное управление повышает точность регулирования скорости и момента двигателя. Современные системы управления могут оптимизировать режим работы электропривода и адаптироваться к изменению нагрузки.

Интеллектуальные методы управления электроприводами. Исследования энергоэффективности электромеханических систем в настоящее время направлены на разработку интеллектуальных методов управления, основанных на адаптивных алгоритмах, нечеткой логике и методах оптимизации.

Применение интеллектуальных систем управления позволяет: минимизировать потери энергии; прогнозировать изменение нагрузки; оптимизировать режимы работы оборудования; повышать устойчивость системы; уменьшать механический износ.

Исследования [4,5] показывают, что применение интегрированных методов оптимизации компрессорных систем может значительно снизить энергопотребление, перераспределяя нагрузку между несколькими компрессорами.

Интеллектуальное управление режимами простоя и переходными процессами обеспечивает дополнительные возможности энергосбережения. Система может

автоматически переключать оборудование в энергосберегающий режим, что снижает потребление электроэнергии во время технологических пауз.

В работе Abdiazizov и др. [6] рассматриваются методы повышения эффективности компрессорных установок на основе совершенствования системы охлаждения, что позволяет дополнительно уменьшить энергетические потери.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный анализ научных исследований показал, что применение современных методов регулирования позволяет существенно повысить энергоэффективность электромеханических систем.

Пример расчёта энергоэффективности системы. Для оценки эффективности частотно-регулируемого привода рассмотрим вентиляторную систему с асинхронным двигателем мощностью 55 кВт.

Расчет мощности выполняется по формуле: $P = P_n \times (n/n_n)^3$

При нагрузке 60 % расчетная мощность составит: $P = 55 \times (0.6)^3 = 11.88$ кВт.

С учетом механических и электрических потерь фактическое энергопотребление составило около 24 кВт.

Таблица 2. Расчёт энергопотребления вентиляторной системы без ЧРП и с ЧРП

Нагрузка (%)	Без ЧРП (кВт)	С ЧРП (кВт)
100	55	55
80	52	38
60	49	24
40	46	14

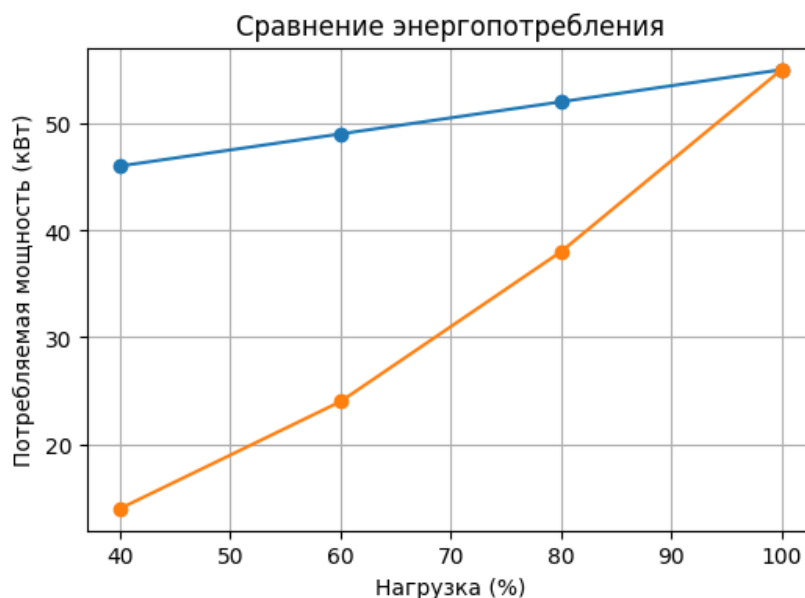


Рисунок 1. Сравнение энергопотребления вентиляторной системы без ЧРП и с ЧРП.

Результаты показывают, что применение частотно-регулируемого привода позволяет значительно снизить энергопотребление при работе системы в условиях переменной нагрузки.

Таблица 3. Эффективность современных методов повышения энергоэффективности

Метод повышения эффективности	Полученный эффект
Частотно-регулируемый привод	Снижение энергопотребления на 20–40 %
Векторное управление	Повышение точности регулирования
Интеллектуальное управление	Снижение потерь в переходных режимах
Оптимизация компрессорных систем	Снижение энергозатрат на 15–30 %
Управление режимами простоя	Экономия энергии до 40 %

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ литературных источников показывает, что наиболее высокий эффект достигается при комплексном применении частотного регулирования, интеллектуальных алгоритмов управления и оптимизации технологических режимов.

Установлено, что в условиях переменной нагрузки применение регулируемого электропривода позволяет существенно снизить скольжение двигателя, уменьшить тепловые потери и повысить коэффициент полезного действия системы.

Дополнительный эффект достигается за счет сокращения времени работы оборудования в режимах неполной загрузки и холостого хода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, повышение энергоэффективности компрессорных и вентиляторных электромеханических систем в условиях переменных технологических режимов является важной научно-технической задачей.

Проведенный анализ показал, что основными причинами снижения энергоэффективности являются переменная нагрузка, переходные процессы, работа оборудования в режиме неполной загрузки и значительные потери энергии в периоды простоя.

Наиболее эффективным направлением повышения энергоэффективности является применение частотно-регулируемых и векторно-управляемых электроприводов, обеспечивающих адаптацию параметров работы двигателя к текущим условиям технологического процесса.

Внедрение интеллектуальных методов управления позволяет дополнительно снизить энергетические потери, повысить устойчивость работы системы и обеспечить оптимизацию режимов эксплуатации оборудования.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комплексных адаптивных систем управления, ориентированных на минимизацию энергетических потерь в режиме реального времени.

Список литературы

1. Dinolova P., Ruseva V., Dinolov O. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations // Energies. – 2023. – Vol. 16(20). – 7136.
2. Turkeri C., Kiselychnyk O. Dynamical Modelling of a Centrifugal Fan Driven by an Induction Motor and Experimental Validation // Energies. – 2023. – Vol. 16(18). – 6658.

3. Cheng Z., Tao L., Huang L., Yu Z. Modeling and Experimental Verification of the Electrical Efficiency for Variable-Frequency Rolling Piston Compressor under Variable Suction Conditions // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13(24). – 12992.
4. Exergy analysis of pressure reduction, back pressure and intermittent air supply configuration of utilization/expansion stage in compressed air systems // *Energy*. – 2023. – Vol. 285. – 129419.
5. Load sharing energy savings methodology for systems with multiple centrifugal compressors // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 433. – 139630.
6. Abduazizov N., Juraev R., Xatamova D. Improving the efficiency of mine compressor units based on the improvement of their cooling system // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 417.
7. Pretorius J.P., Van der Spuy S.J. Enhancing Axial Flow Fan Performance in Air-Cooled Condensers // *arXiv*. – 2023.
8. Fernando, M.T.-O.; Navarro-Peris, E.; Barceló-Ruescas, F.; González-Maciá, J. Semi-empirical model of scroll compressors and its extension to describe vapor-injection compressors. Model description and experimental validation. *Int. J. Refrig.* 2019, 106, 308–326.
9. Byrne, P.; Ghouali, R.; Miriel, J. Scroll compressor modeling for heat pumps using hydrocarbons as refrigerants. *Int. J. Refrig.* 2014, 41, 1–13. [CrossRef]