

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА ДЛИННОХОДОВОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Татевосян А.А.

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>, karo1@mail.ru

Резюме: В статье предложено решение задачи оптимизации конструкции магнитной системы тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) в составе перспективного к использованию в компрессоростроении линейного привода одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения подвижной части. В качестве критерия оптимальности используется максимум КПД электромеханического преобразователя. Решением задачи оптимизации установлена в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями СДПМ. Приведено обоснование максимально возможного КПД СДПМ для синусоидального и несинусоидального законов движения индуктора. **ЦЕЛЬ:** Получение решения задачи оптимизации конструкции магнитной системы тихоходного СДПМ в составе линейного привода одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения подвижной части, удовлетворяющего критерию максимума КПД электромеханического преобразователя. **МЕТОДЫ:** Использовались методы теории электромеханических преобразователей энергии, теоретической электротехники, математического моделирования, методы оптимизации, вариационного, дифференциального и интегрального исчисления, а также экспериментальные методы. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** Приведены результаты экспериментального исследования разработанного макетного образца тихоходного СДПМ в составе линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** Наибольший КПД СДПМ достигается, когда ток в обмотке якоря изменяется во времени прямо пропорционально скорости движения индуктора. Для обеспечения указанного режима предлагается использовать частотный преобразователь с открытым программным кодом, позволяющий реализовать временную зависимость тока в обмотке якоря в соответствии с заданным законом движения подвижной части. Управление СДПМ осуществляется частотным преобразователем на основе созданных в среде MexBios структурных моделей.

Ключевые слова: тихоходный двигатель возвратно-поступательного движения; постоянные магниты; длинноходовой одноступенчатый компрессор; система управления; частотный преобразователь.

Для цитирования: Татевосян А.А. Оптимизация параметров тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами для линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 148-156. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF QUIET PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR LINEAR DRIVE OF LONG-STROKE SINGLE-STAGE PISTON COMPRESSOR

AA. Tatevosyan

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>, karo1@mail.ru

Abstract: The article proposes a solution to the problem of optimizing the magnetic system design of a low-speed synchronous motor with permanent magnets (PMSM) as a part of a linear drive of a single-stage piston compressor that is promising for use in compressor construction for a given

law of motion of the moving part. The maximum efficiency of the electromechanical converter is used as an optimality criterion. By solving the optimization problem, the relationship between the design parameters and the energy performance of the PMSM was established in an analytical form. The substantiation of the maximum possible efficiency of the PMSM for the sinusoidal and non-sinusoidal laws of motion of the inductor is given. **PURPOSE:** Obtaining a solution to the problem of optimizing the magnetic system design of a low-speed PMSM as a part of a linear drive of a single-stage reciprocating compressor for a given law of motion of the moving part that meets the criterion of maximum efficiency of an electromechanical converter. **METHODS:** The methods of the theory of electromechanical energy converters, theoretical electrical engineering, mathematical modeling, optimization methods, variational, differential and integral calculus, as well as experimental methods are used. **RESULTS:** The results of an experimental study of the developed prototype of a low-speed SDPM as a part of a linear drive of a long-stroke single-stage reciprocating compressor are presented. **CONCLUSION:** The highest efficiency of the PMSM is achieved when the current in the armature winding changes with time in direct proportion to the speed of the inductor. To ensure this mode, it is proposed to use an open-source frequency converter, which makes it possible to implement the time dependence of the current in the armature winding in accordance with the given law of motion of the moving part. The PMSM is controlled by a frequency converter based on structural models created in the MexBios environment.

Keywords: low-speed reciprocating motor, permanent magnets, long-stroke single-stage compressor, control system, frequency converter.

For citation: Tatevosyan AA. Optimization of parameters of quiet permanent magnet synchronous motor for linear drive of long-stroke single-stage piston compressor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):148-156. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.

Введение

Применение линейных электрических двигателей для привода поршневых компрессоров возвратно-поступательного действия является конкурентно способным по отношению к традиционно применяемому приводу гидравлической системы [1–4]. Преимуществом такого технического решения является снятие ограничений по эксплуатации в условиях работы низких температур, а также исключение требований к герметичности гидравлических соединений. Кроме этого, повышенный интерес представляют технические решения привода в отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов, которые снижают КПД, повышают стоимость и уменьшают надежность электротехнического комплекса в целом [5]. Использование электрических тихоходных двигателей возвратно-поступательного движения, в котором подвижная часть жестко связана со штоком компрессора является актуальным направлением в области создания современных высокотехнологичных электротехнических комплексов [6, 7]. В настоящее время одним из актуальных направлений в области компрессорного машиностроения является разработка одноступенчатых длинноходовых компрессорных агрегатов, позволяющих получить средние и высокие значения давлений сжатого газа (до 20 МПа в одной ступени) [8, 9]. Для таких компрессоров представляет интерес разработка оптимальных конструкций тихоходных синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) возвратно-поступательного движения. Линейная зависимость развиваемого тягового усилия от тока в обмотке двигателя, реализация прецизионных цифровых систем управления делают применение СДПМ в качестве электромеханического преобразователя энергии в составе привода длинноходового одноступенчатого компрессора целесообразным и экономически привлекательным. Вместе с тем, многочисленные факторы, а именно: нелинейный характер пневматической системы компрессора в зависимости от степени сжатия газа, неравномерность магнитного поля в воздушном зазоре и другие оказывают влияние на энергетические параметры СДПМ, а многообразие конструктивных схем магнитной системы делают задачу разработки СДПМ во многом исследовательской, подчиненной выполнению жестких требований к выходным показателям компрессорной ступени [10, 11]. Ввиду развития микропроцессорной техники и повышения вычислительной мощности современных компьютеров задачи проектирования машин с постоянными магнитами целесообразно решать в программах, использующих полевые методы расчета магнитного поля [12].

Анализ существующих критериев оптимальности и методов оптимизации применительно к работе тихоходного СДПМ позволил выбрать в качестве критерия оптимальности максимум КПД электромеханического преобразователя при минимуме массы активных материалов. В качестве метода оптимизации применяется вариационный метод отыскания минимума функционала P_r^* , физический смысл которого есть относительные потери, связанные с КПД зависимостью $\eta = (1 + P_r^*)^{-1}$ [13, 14].

Теория

Математическая постановка задачи оптимального управления для ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора сводится к определению $i(t)$, $u(t)$, принадлежащие некоторому классу допустимых функций, доставляющие максимум функционалу имеет вид:

$$\eta_{\partial} = \frac{\frac{\int_0^T C \vartheta(t) i(t) dt}{\int_0^T u(t) i(t) dt}}{\frac{\int_0^T C \vartheta(t) i(t) dt}{\int_0^T [R i^2(t) + C \vartheta(t) i(t)] dt}}; \quad (1)$$

при уравнениях связи

$$u(t) = i(t)R + u_L(t) + e_{\text{я}}(t); \quad u_L(t) = L_{\sigma} \frac{di(t)}{dt}; \quad e_{\text{я}}(t) = C \vartheta(t) \quad (2)$$

$$x(t) = X_0 + \sum_{v=1}^N [X_{vs} \sin(v\omega t) + X_{vc} \cos(v\omega t)]; \quad \vartheta(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (3)$$

ограничениях

$$|u(t)| < U_{\partial}; \quad 0 \leq x(t) \leq 2x_m \quad (4)$$

краевых условиях

$$i(0) = i(T), \quad (5)$$

где R - постоянное активное сопротивление обмотки якоря; L_{σ} - индуктивность рассеяния обмотки якоря; $x(t)$ - линейное перемещение индуктора в установившемся режиме есть несинусоидальная периодическая функция во времени, которую можно аппроксимировать рядом Фурье; x_m - половина хода индуктора (поршня); $e_{\text{я}}(t)$ - противо-ЭДС обмотки якоря, зависящая от скорости $\vartheta(t)$ движения индуктора; $C = B_{cp} \ell_{cp} k W_a$ - постоянная машины; B_{cp} - среднее значение магнитной индукции в межполюсном зазоре; W_a - число активных витков обмотки якоря; ℓ_{cp} - средняя длина витка обмотки якоря; k - коэффициент, учитывающий долю средней длины витка обмотки якоря под полюсами постоянных магнитов; U_{∂} - максимально допустимое напряжение; $\omega = 2\pi f$ - угловая частота; $f = 1/T$ - частота колебаний индуктора.

Отыскание оптимальной функции тока $i(t)$ в функционале (1) можно найти из условия минимума относительных потерь P_r^* . Поскольку $P_r^* = \frac{P_r}{P_{\text{мех}}}$ есть число, устанавливающее отношение электрических потерь P_r в двигателе к мощности $P_{\text{мех}}$, передаваемой в механическую подсистему, то введем его под знак интеграла

$$\frac{1}{T} \int_0^T [P_r^* C \vartheta(t) i(t) - R i^2(t)] dt = 0. \quad (6)$$

Важное практическое значение имеет решение задачи расчета эксплуатационных характеристик СДПМ при несинусоидальном ходе движения поршня тихоходной поршневой компрессорной ступени.

Используя уравнения (6), можно записать

$$P_r^* C i(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) - i^2(\omega t_k) R = 0 \quad (7)$$

Определим экстремум $\frac{dP_r^*}{d(\omega t_k)} = 0$

$$P_r^* [Ci'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) + Ci(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k)] - 2i(\omega t_k) i'(\omega t_k) R = 0 \quad (8)$$

откуда

$$P_r^* = \frac{2i(\omega t_k) i'(\omega t_k) R}{C [i'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) + i(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k)]}. \quad (9)$$

После подстановки выражения (9) в (7) получим уравнение для определения корня ωt_k

$$i'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) - i(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k) = 0 \quad (10)$$

Решение уравнения (10) удовлетворяет условию резонанса механической системы ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, при котором электромагнитное усилие $F = Ci(t)$, действующее на поршень, опережает ход поршня компрессора на 90 эл. градусов, т.е. $i(t) = K\vartheta(t)$, где $K = const$.

Примем, что закон движения индуктора во времени является несинусоидальным и его можно разложить в ряд Фурье с конечным числом слагаемых, т.е.

$$x(t) = \sum_{v=1}^N [x_{vs} \sin(v\omega t) + x_{vc} \cos(v\omega t)] + x_0. \quad (11)$$

После подстановки выражений $i(\omega t_k) = K\dot{x}(\omega t_k) = K\vartheta(\omega t_k)$ и $i'(\omega t_k) = K\omega\ddot{x}(\omega t_k)$ в (9), получим

$$P_{r \min}^* = \frac{2K^2 \omega ABR}{2CK\omega AB}, \quad (12)$$

$$\text{где } A = \sum_{v=1}^n [\vartheta_{vs} \cos(v\omega t_k) - \vartheta_{vc} \sin(v\omega t_k)], \quad B = \sum_{v=1}^n [-\vartheta_{vs} v \sin(v\omega t_k) - \vartheta_{vc} v \cos(v\omega t_k)].$$

Сокращая одинаковые сомножители в числителе и знаменателе дроби (12), минимально возможные относительные потери

$$P_{r \min}^* = \frac{KR}{C}. \quad (13)$$

Среднее значение механической мощности, поступающей в компрессор

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{T} \int_0^T Ci(t) \vartheta(t) dt = \frac{1}{2} CK \sum_{v=1}^N [\vartheta_{vs}^2 + \vartheta_{vc}^2] = CK\vartheta^2 \quad (14)$$

где ϑ - среднеквадратичное (действующее) значение скорости движения индуктора.

Для синусоидального закона движения ротора $x(t) = x_m(1 - \cos(\omega t))$ среднее значение механической мощности $P_{\text{мех}} = CK\vartheta^2 = \frac{1}{2} I_m C x_m \omega$. Выполним подстановку выражения для

коэффициента $K = \frac{I_m x_m \omega}{2\vartheta^2}$ в формулу (13) и расчетных соотношений для постоянной машины, активного сопротивления обмотки и амплитуды тока, получим в явном виде минимально возможные относительные потери соответственно для несинусоидального и синусоидального закона движения индуктора СДПМ

$$P_{r \min}^* = \frac{\gamma_{np}^{-1} J_{\partial}}{\sqrt{2} B_{cp} k \vartheta^2}, \quad P_{r \min}^* = \frac{\sqrt{2} \gamma_{np}^{-1} J_{\partial}}{B_{cp} k x_m \omega}, \quad (15)$$

где J_{∂} - максимально допустимая плотность тока; $\vartheta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1}^N [\vartheta_{vs}^2 + \vartheta_{vc}^2]}$ - действующее

значение скорости индуктора, выраженное в относительных единицах; $\bar{g}_{vs} = \frac{g_{vs}}{x_m \omega} = \frac{g_{vc}}{x_m}$,

$\bar{g}_{vs} = \frac{g_{vs}}{x_m \omega} = \frac{v g_{vc}}{x_m}$, $\bar{g}_{vc} = \frac{g_{vc}}{x_m \omega} = \frac{v g_{vs}}{x_m}$ - относительные значения соответственно

амплитуд синусной и косинусной ν -ой гармоники скорости ротора;
 $\gamma_{np} = 56 \cdot 10^6 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ – удельная электропроводность меди.

Анализ выражения (15) определяет пути достижения максимально возможного КПД СДПМ в зависимости от закона движения индуктора во времени. На рисунке 1 приведены некоторые характерные законы $x(t)$ и $\dot{x}(t)$ движения индуктора, которые можно аппроксимировать конечным числом (не менее трех) членов ряда Фурье, обеспечивающие заданную производительность компрессора. На рисунке 1 видно, что при использовании известных временных зависимостей кривая 1 близка к линейному закону $x(t)$ перемещения индуктора (поршня) от нуля до $2x_m$ за время прямого и от $2x_m$ до нуля обратного циклов работы компрессора, кривая 2 – близка к линейному закону скорости движения индуктора во времени при перемещении поршня от нуля до $2x_m$ и обратно, кривая 3 соответствует синусоидальному закону скорости движения индуктора во времени; кривая 4 – близка к предлагаемому закону скорости движения индуктора, учитывающего время разгона и торможения поршня в окрестностях мертвых точек и смещение максимальной нагрузки в сторону окончания времени рабочего цикла при $P_{мех} = \text{const}$ и $x_m = \text{const}$, $f = 1 \text{ Гц}$
 $J_D = 3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, $B_{cp} = 0,5 \text{ Тл}$, $x_m = 0,1 \text{ м}$, $k = 0,85$.

Введение в выражение (14) плотности материала обмоточного провода $\gamma_{обм}$ позволяет вывести формулу для расчета необходимой массы активной части витков обмотки СДПМ, работающего с максимально возможным значением КПД, обеспечивающим заданное среднее значение механической мощности $P_{мех}$, поступающей в компрессор, или выраженную через максимальное значение электромагнитной силы, определяющей величину давления сжимаемого газа

$$m_{обм.акт} = \frac{\sqrt{2} P_{мех} \gamma_{обм}}{B_{cp} J_D k x_m \omega} = \frac{F_{эм.мах} \gamma_{обм}}{\sqrt{2} B_{cp} J_D k} \quad (16)$$

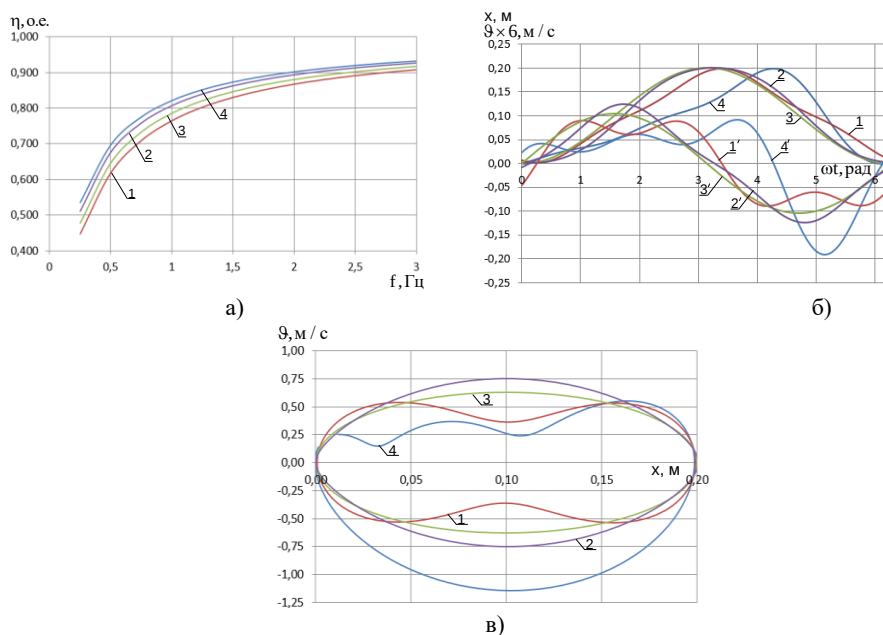


Рис.1. Энергетические характеристики и варианты закона движения индуктора

Fig.1. Energy characteristics and various motion laws of inductor

Удельное максимальное электромагнитное усилие СДПМ на штоке компрессора в длительном режиме будет

$$F_{эм.уд.мах} = \frac{J_D (1 - F_{\delta}^*)}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{max} k_s}{\gamma_m \gamma_{обм}}} \quad (17)$$

где F_{δ}^* – магнитное значение намагничивающей силы обмотки, приходящейся на одну пару полюсов, $(BH)_{\max} = \frac{B_r H_c}{4}$ – максимальная магнитная энергия ПМ.

Эксперимент

Экспериментальный макетный образец ЛМЭД для тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора представлен на рисунке 2. Исследование статических характеристик СДПМ позволяет сделать вывод о возможности его применения в составе линейного привода поршневого компрессора, рассчитанного на усилие 2000 Н [15]. В настоящее время вопросу управления СДПМ уделяется повышенное внимание [5, 16].



Рис. 2. Макетный образец тихоходного СДПМ для привода поршневого компрессора

Fig. 2. Mock-up model of PMSM for the piston compressor

На рисунке 3 представлены варианты функциональных схем системы управления СДПМ: а – от источника выпрямленного напряжения; б – от управляемого частотного преобразователя с применением широтно-импульсной модуляции. Цифрами обозначены: 1 – тихоходный СДПМ, 2 – компрессорная ступень, 3 – система управления, 4 – внешний магнитопровод, 5 – обмотка СДПМ, 6 – внутренний магнитопровод, 7 – постоянные магниты, 8 – датчик давления, 9 – датчик температуры, 10 – усилитель, 11 – цифровой осциллограф.

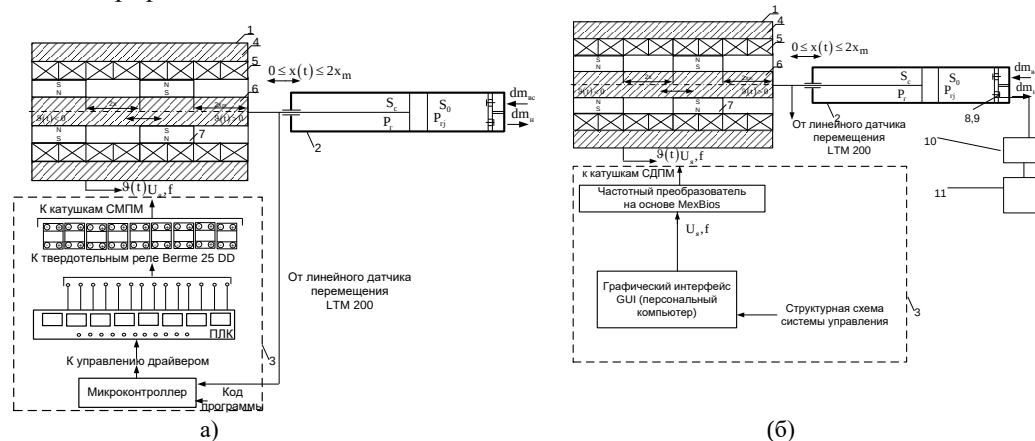


Рис. 3. Варианты функциональных схем управления СДПМ систем

Fig.3. Various functional diagrams of the PMSM control system

На рисунке 4 приведены результаты экспериментальных испытаний СДПМ в составе привода поршневого компрессора: а – осциллограмма рабочего процесса длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора (максимальное давление 1.2 МПа, питание СДПМ осуществляется от источника выпрямленного напряжения) и б – осциллограмма, полученная при открытом выпускном клапане компрессора (питание СДПМ осуществляется от частотного преобразователя с открытым программным кодом под управлением программного обеспечения MexBios). На рисунке 4 цифрами обозначены: 1 – временная зависимость тока, 2 – закон движения хода индуктора, 3 – закон изменения скорости перемещения индуктора.

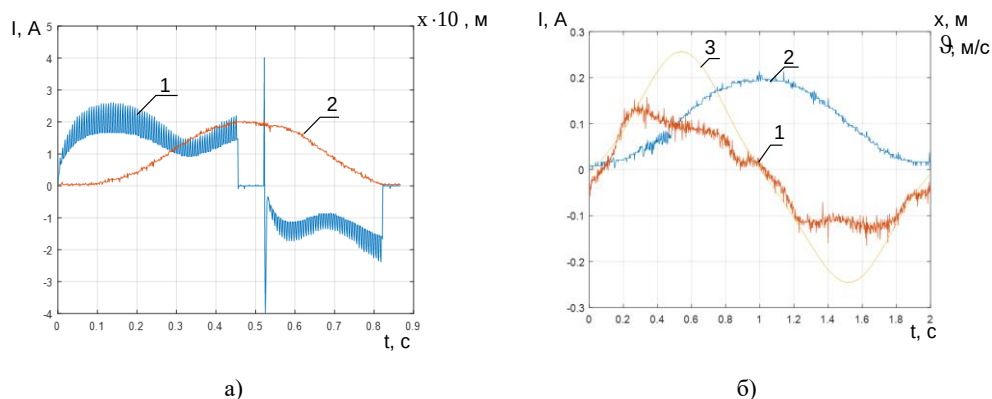


Рис. 4. Результаты испытаний ЛМЭП

Fig. 4. The linear driver test results

Установленная решением задачи оптимизация аналитическая взаимосвязь обобщенных параметров ЛМЭП обеспечивающая максимум КПД электромеханического преобразователя позволяет определить относительные потери в подсистемах ЛМЭП $P_{r\min}^* = 0,218$ о.е. и максимально возможный КПД для предложенной конструкции $\eta_{d,\max} = 0,821$ о.е. (при синусоидальном законе движения индуктора).

Выводы

1. На основе решения задачи оптимизации конструкции магнитной системы СДПМ установлена в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы привода, позволяющая получить максимальный КПД электромеханического преобразователя при заданном законе движения подвижной части.
2. Проведенные исследования разработанного макетного образца и системы управления на основе частотного преобразователя с открытым программным кодом позволяют учесть закон движения в теории проектирования СДПМ для линейного электропривода.
3. Исследовано влияние закона движения индуктора на максимум КПД СДПМ. Предложен оптимальный закон скорости движения индуктора во времени, учитывающий время разгона и торможения поршня в окрестностях мертвых точек и смещение максимальной нагрузки в сторону окончания времени рабочего цикла длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора.
4. Одним из подходов к заданию закона движения индуктора является применение частотного преобразователя с открытым программным кодом. Разработка настраиваемых моделей в среде *MexBios* позволяет реализовать алгоритмы пуска СДПМ, снижения пусковых токов, уменьшения времени выхода на установившийся режим.

Литература

1. Yusha VL, Busarov SS, Gromov AYU. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and petroleum engineering. 2017. Chemical and Petroleum Engineering, 53(7–8).
2. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Т.1. Теория и расчет. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2006. 456 с.
3. Huang Y. Hydraulic System Design of Hydraulic Actuators for Large Butterfly Valves // J. Eng. Sci. Technol. Rev. 2014. V 7. pp. 150–155.
4. Петров Т.И., Сафин А.Р. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2 (50). С. 100-108.
5. Ang S., Rong-ming C., Hui-xing Z. Research on the iterative learning control method for linear motor driven compressor // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011, pp. 1–4.
6. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 38-48.

7. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. И87 Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с.
8. Юша В.Л., Бусаров С.С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 80–89.
9. Бусаров С.С., Васильев В.К., Бусаров И.С., и др. Параметрический анализ рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней на базе верифицированной методики расчета // Омский научный вестник №4 (154). Омск, 2017 С.40-44.
10. Cui F., Sun Z., Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures // CES Trans. Electr. Mach. Syst. 2020. V. 4. №2. pp. 142–150, 2020.
11. Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyi A.V., Tatevosyan A.A., Comparative Analysis of the Magnetolectric Drive with Linear Drives of Low-Speed Single-Stage Piston Units AIP Conference Proceedings 2285, 030066-2020. p/030066-1-030066-8.: <https://doi.org/10.1063/5.0027290>.
12. Пахомин С.А., Пахомин Л.С. Оптимизационное проектирование вентильных машин с постоянными магнитами на пакета FEMM // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 6. С. 26-31.
13. Татевосян А.А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения // Омский научный вестник. 2019. №4 (166). С.48-51.
14. Ряшенцев, Н.П., Ковалев, Ю.З. Динамика электромагнитных импульсных систем. Новосибирск: Наука, 1974. 186 с.
15. Tatevosyan A.A., Polyakov, D.A., Kholmov, M.A. Characteristics research of a permanent magnet linear synchronous motor driving piston compressor // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021.
16. Poltschak F.A high efficient linear motor for compressor applications // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014, pp. 1356–1361.

Автор публикации

Татевосян Андрей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет.

References

1. Yusha VL, Busarov SS, Gromov AYU. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units. *Shemical and petroleum engineering*. 2017. Chemical and Petroleum Engineering, 53(7–8). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>.
2. Plastinin, P.I. *Porshnevyye kompressory*. Pt.1. Teoriya i raschet. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Kolos, 2006. 456 p.
3. Huang Y, Liu C, Bamed S. Hy draulic System Design of Hydraulic Actuators for Large Butterfly Valves. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 2014;7:150–155, Sep. 2014.
4. Petrov TI, Safin AR. Razrabotka i realizatsiya stenda dlya podtverzhdeniya effektivnosti topologicheskoi optimizatsii rotora sinkhronnykh dvigatelei s postoyannymi magnitami. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2021;13(2:(50):100-108.
5. Ang S, Rong-ming C, Hui-xing Z. *Research on the iterative learning control method for linear motor driven compressor*. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011. pp. 1–4.
6. Safin AR. Razrabotka matematicheskoi modeli avtonomnogo istochnika elektrosnabzheniya s svobodno-porshnevym dvigatelem na baze sinkhronnoi elektricheskoi mashiny vozvratno-postupatel'nogo deistviya s postoyannymi magnitami/ A.R. Safin, I.V. Ivshin, E.I. Gracheva, T.I. Petrov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(1):38-48.
7. Ismagilov FR, Gerasin AA, Khairullin IKh, et al. И87 Elektromekhanicheskie sistemy s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami. M.: Mashinostroenie, 2014. 267 p.

8. Yusha VL, Busarov SS. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupenei. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU*. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2018;24(4):80–89. doi: 10.18721/JEST.24408.

9. Busarov SS, Vasil'ev VK, Busarov IS, et al. Parametricheskii analiz rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupenei na baze verifitsirovannoi metodiki rascheta. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2017;4 (154):40-44.

10. Cui F, Sun Z, Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* 2020;4(2):142–150.

11. Yusha VL, Busarov SS, Nedovenchanyi AV, Tatevosyan AA. Comparative Analysis of the Magnetolectric Drive with Linear Drives of Low-Speed Single-Stage Piston Units. *AIP Conference Proceedings* 2285, 030066-2020-p/030066-1-030066-8. Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1063/5.0027290>.

12. Pakhomin SA. Optimizatsionnoe proektirovanie ventil'nykh mashin s postoyannymi magnitami na osnove paketa FEMM/S.A. Pakhomin, L.S. Pakhomin. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2018;61(6):26-31.

13. Tatevosyan AA. Reshenie zadachi optimal'nogo upravleniya magnitoelektricheskogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2019;4 (166):48-51.

14. Ryashentsev NP, Kovalev YuZ. Dinamika elektromagnitnykh impul'snykh sistem. Novosibirsk: Nauka. 1974. 186 p.

15. Tatevosyan AA, Polyakov DA, Kholmov MA. Characteristics research of a permanent magnet linear synchronous motor driving piston compressor. *Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021*. doi 10.1109/REEPE51337.2021.9387980.

16. Poltschak F. A high efficient linear motor for compressor applications. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014, pp. 1356–1361.

Authors of the publication

Andrey A. Tatevosyan – Omsk State Technical University, Omsk, Russia.

Получено

13.12.2021 г.

Отредактировано

17.12.2021 г.

Принято

26.12.2021 г.