

УДК 621.3.013:519.6

DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-37-41

А. А. ТАТЕВОСЯН

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ ТИХОХОДНОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ЗАДАННЫЙ ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ ЯКОРЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ МАКСИМУМА КПД

При проектировании линейного магнитоэлектрического привода (ЛМЭП), в состав которого входит синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) и компрессорная ступень, большое внимание уделяется вопросам надежности и экономичности при обеспечении высоких показателей процессов энергопреобразования, протекающих в различных подсистемах. Одним из направлений, повышающих надежность ЛМЭП, является уменьшение количества элементов, входящих в его состав, например, передаточных и преобразовательных механизмов. Однако в этом случае нелинейные процессы всасывания-нагнетания, протекающие в компрессорной ступени, оказывают существенное влияние на работу электромеханического преобразователя. В связи с этим задача повышения энергоэффективности ЛМЭП может решаться различными путями. В статье приведено описание условий управления ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора, полученных из решения задачи оптимизации конструкции магнитной системы СДПМ, при которых достигается максимальный КПД. Установлена взаимосвязь обобщенных параметров привода с конструктивными особенностями исполнения СДПМ.

**Ключевые слова:** линейный магнитоэлектрический двигатель, магнитное поле, магнитная система, тихоходные синхронные магнитоэлектрические машины, тихоходный одноступенчатый поршневой компрессор.

На рабочий процесс энергопреобразования в магнитоэлектрическом приводе возвратно-поступательного движения поршневого компрессора оказывают влияние многочисленные факторы, которые можно при оптимизации конструкции линейного магнитоэлектрического привода (ЛМЭП) выразить через обобщенные параметры источника

питания магнитоэлектрического двигателя и компрессора [1–5].

К ним относятся:

а) для источника питания:

— максимальное значение напряжения на обмотке двигателя, фазовый угол сдвига между законом движения якоря и силой сопротивления

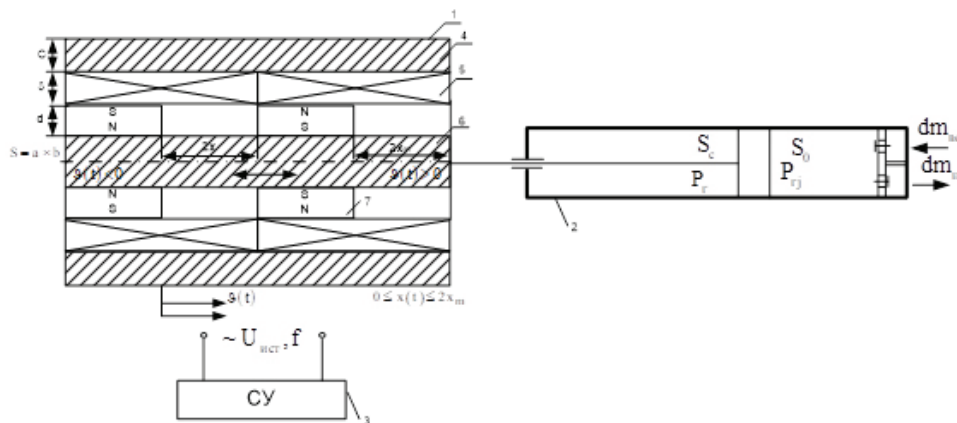


Рис. 1. Магнитная система ЛМЭП с магнитами, намагниченными в осевом направлении:  
1 — ЛМЭД; 2 — поршневая ступень; 3 — система управления, 4 — ярмо;  
5 — секционированная обмотка; 6 — ярко; 7 — постоянные магниты

сжимаемого газа, частота питающего напряжения;

б) для магнитоэлектрического двигателя:

— активное сопротивление и индуктивность обмотки двигателя, индукция в воздушном зазоре, ход якоря;

в) для компрессора:

— среднее значение мощности, передаваемой в механическую систему, ход поршня.

Предварительные расчёты указывают, что закон перемещения поршня может существенно влиять на эффективность рабочего процесса поршневых тихоходных длинноходовых ступеней [6–9]. Однако вопросы синтеза энергосберегающих законов движения и снижения при этом неравномерности изменения мгновенной мощности применительно к компрессорным агрегатам с линейным приводом в доступных источниках информации не рассматривались. Неоднозначная функциональная взаимосвязь между эффективностью рабочего процесса компрессорной ступени, интегральными характеристиками и законом движения штока компрессора делает актуальным исследование их взаимосвязи и возможности улучшения энергетических и динамических характеристик одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным магнитоэлектрическим двигателем. На рис. 1 представлена магнитная система линейного магнитоэлектрического двигателя в составе привода тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора ЛМЭП. Функциональным элементом агрегата является тихоходная длинноходовая компрессорная ступень без смазки рабочей камеры [7, 10].

Задача оптимизации конструкций магнитных систем в ЛМЭП связана с учетом особенностей рабочего процесса электротехнических комплексов, в которых они применяются в качестве электро-механических преобразователей. В [11] показано, что предельной возможный КПД возможен при удовлетворении условия тождественности законов изменения тока в обмотке двигателя и скорости движения ротора во времени, то есть  $i(t) \equiv \dot{\vartheta}(t)$ .

Задание в математической модели ЛМЭП закона движения якоря во времени в качестве начального приближения, руководствуясь итерационной процедурой метода Шварца [12], ведет к упрощению анализа электромагнитных и механических процессов и решению уравнений динамики электрической части привода независимо от процессов в механи-

ческой части. Зададим закон перемещения подвижных частей ЛМЭП в виде

$$x(t) = x_m [1 - \cos(\omega t)], \quad (1)$$

где  $x_m$  — половина хода перемещения подвижной части,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  — угловая частота колебаний,  $T$  — период колебаний.

Для целей электропривода поршневого компрессора синусоидальный закон движения поршня является наиболее предпочтительным, так как теоретически исключает удары поршня о стенки цилиндра [13].

С учетом выражения (1) динамическая сила в уравнении движения подвижных частей будет

$$m_g \frac{d\dot{\vartheta}}{dt} = F_{\text{эп}} = m_g x_m \omega^2 \cos(\omega t). \quad (2)$$

Выражение развиваемого электромагнитного усилия ЛМЭП

$$F_{\text{эм}} = c I_m \sin(\omega t). \quad (3)$$

Выражение силы сопротивления сжимаемого газа в длинноходовой компрессорной ступени без смазки рабочей камеры

$$F_n = 99 N_{\text{атм}} \beta \frac{\pi d^2}{4} \sin(\omega t + \omega t_k), \quad (4)$$

где  $x_m$  — половина хода якоря,  $m_g$  — масса подвижной части ЛМЭП, кг;  $c = B_{\text{cp}} \ell_{\text{cp}} k W_a$  — постоянная синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), Тл·м;  $N_{\text{атм}} = 10^5$  Па — атмосферное давление;  $\omega t_k$  — угол управления, рад.

После подстановки (2)–(4) в уравнение динамики  $m_g \frac{d\dot{\vartheta}}{dt} = F_{\text{эм}} - F_n$  получим

$$c I_m \sin(\omega t) - m_g x_m \omega^2 \cos(\omega t) = F'_n \sin(\omega t + \omega t_k), \quad (5)$$

где  $F'_n = 99 N_{\text{атм}} \beta \frac{\pi d^2}{4}$ .

Для определения амплитуды тока  $I_m$  и угла  $\omega t_k$  воспользуемся следующими соотношениями:

$$I_m = \frac{\sqrt{F_n'^2 - (m_g x_m \omega^2)^2}}{c}, \quad (6)$$

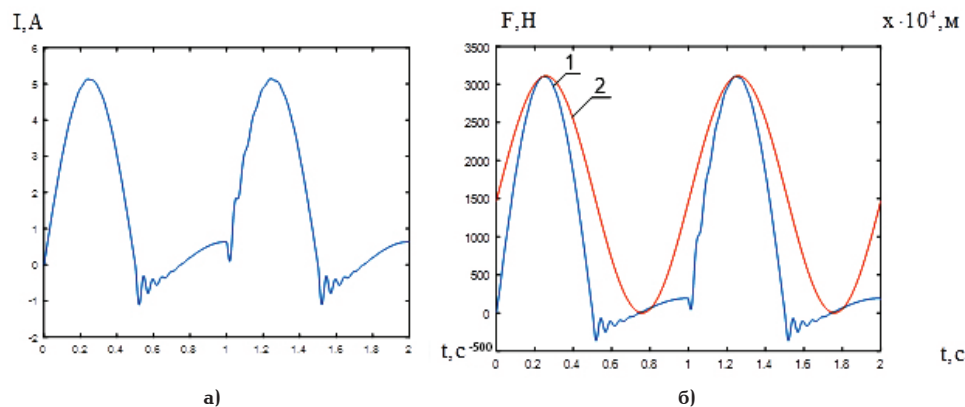


Рис. 2. Динамические характеристики установившегося режима ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора: а) ток в обмотке ЛМЭД, А; б): 1 — сила сопротивления сжатию газа в ступени, Н; 2 — развиваемое электромагнитное усилие, Н

$$\omega t_k = \pi + \arctg\left(-\frac{m_g X_m \omega^2}{c I_m}\right)$$

или

$$\omega t_k = \pi + \arctg\left(-\frac{1}{\sqrt{k_0 - 1}}\right), \quad (7)$$

$$\text{где } k_0 = 99 \frac{N_{амм} \beta \frac{\pi d^2}{4}}{m_g X_m \omega^2}.$$

Результаты расчета динамических характеристик ЛМЭП приведены на рис. 2.

Сдвиг фаз между  $F_n = F_n(t)$  и  $F_{эм} = F_{эм}(t)$  обусловлено наличием динамической силы  $F_{гун} = F_{гун}(t)$ .

Как правило, поршневой компрессор используется для поддержания давления в магистрали при помощи специального промежуточного звена — ресивера [14]. Ресивер представляет собой емкость, давление газа в котором регулируется системой впускным и выпускным клапанами. При достижении заданного давления поршневой компрессор отключается, при понижении давления в ресивере компрессор включается, нагнетая газ в емкость ресивера.

Таким образом, возможны режимы работы СДПМ, в которых поршень совершает неполное перемещение, выдавливая газ в ресивер, при этом давление в последнем достигает необходимого значения.

Для достижения оптимального режима работы ЛМЭП, при котором удельные потери будут минимальны, необходимо чтобы временные зависимости тока и скорости движения подвижных частей совпадали по фазе. Для этого рассчитаем угол  $\theta$  начальной фазы напряжения:

$$\theta = \arctg \frac{I_m \omega L}{I_m R + c X_m \omega}. \quad (8)$$

При помощи разработанной имитационной модели определим зависимость подаваемого напряжения на обмотку СДПМ от коэффициента загрузки ЛМЭП при применении ресивера (рис. 3).

Отсутствие учета корректировки начальной фазы напряжения  $\theta$  приводит к увеличению времени переходного процесса, при котором достигается оптимальный закон движения подвижной части:  $i(t) \equiv \vartheta(t)$ .

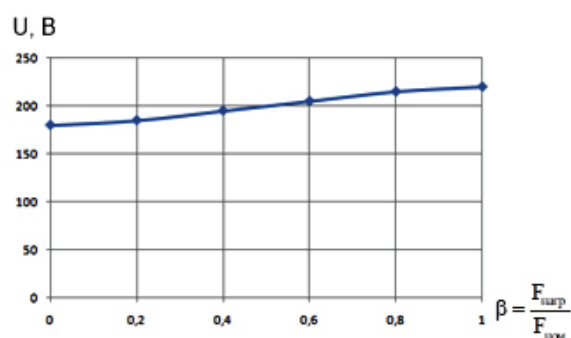


Рис. 3. Зависимость напряжения  $U(t)$  от коэффициента загрузки

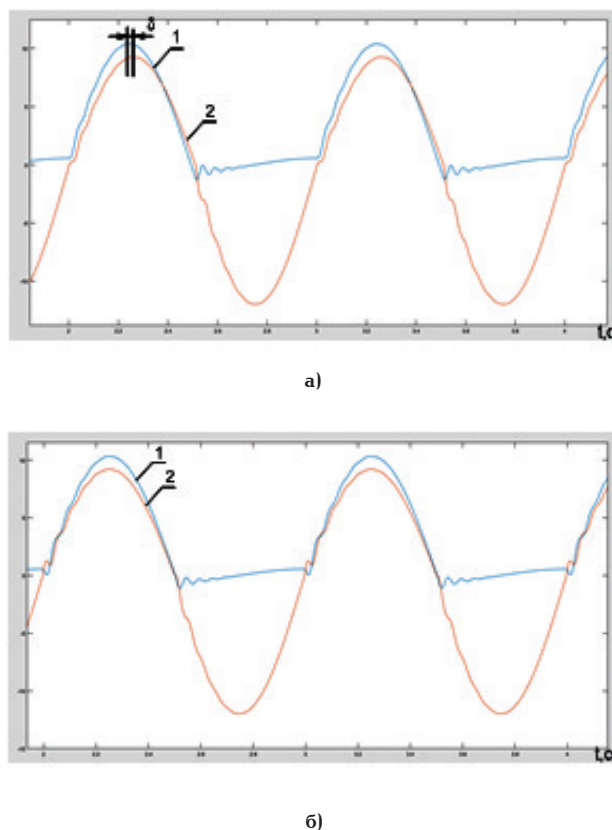


Рис. 4. Закон изменения тока  $i(t)$  (1) и скорости якоря  $\vartheta(t) \times 20$  (2) без задания системой управления начальной фазы  $\theta$  напряжения (а) и с корректировкой на угол  $\theta$  (б)

Таблица 1

## Параметры СДПМ

Параметр СДПМ	Значение
Активное сопротивление обмотки, Ом	4
Индуктивность обмотки, Гн	0,12
Среднее значение индукции в зазоре, Тл	0,4
Число ампер-витков активной части обмотки	2200
Масса якоря, кг	45
Ход якоря, м	0,2
Частота питающего напряжения, Гц	1
Диаметр поршня, м	0,02
Закон изменения напряжения: $U = U_m \sin(\omega t + \theta)$ , где $U_m = 180$ В, $\theta = 0,0338$ рад	
Закон изменения нагрузки: $F_n = F_{nm} \sin(\omega t + \omega t_k)$ , $F_{nm} = 3110$ Н, $\omega t_k = 0,0572$ рад	

На рис. 4 приведены временные зависимости тока в обмотке со скоростью перемещения якоря без учета угла  $\theta$ , а также при компенсации системой управления силы реакции компрессорной ступени.

При синусоидальном законе изменения нагрузки (4) минимально возможные относительные потери СДПМ, а значит, предельный максимум КПД двигателя

$$\eta_{g_{\max}} = (1 + P_{r_{\min}})^{-1}, \quad (9)$$

где  $P_{r_{\min}} = \frac{RI_m}{C x_m \omega}$ .

Таким образом, система управления должна обеспечить синусоидальный ход движения якоря, при котором возможны минимальные относительные потери в СДПМ.

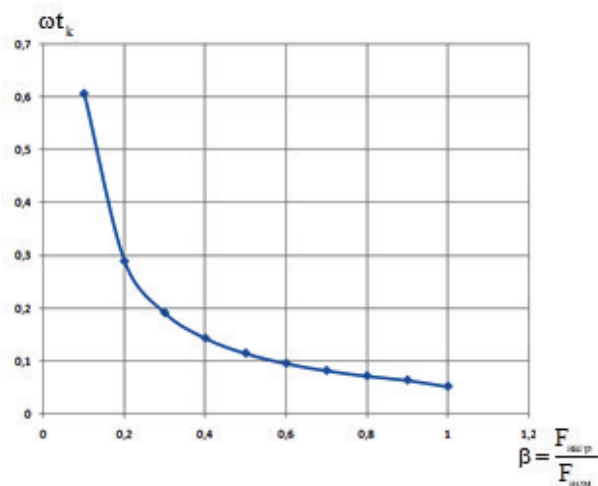
В качестве примера рассмотрим СДПМ с параметрами, представленными в табл. 1.

Зависимость фазового угла между тяговым электромагнитным усилием и ходом якоря, а также зависимость КПД СДПМ от коэффициента загрузки приведена на рис. 5.

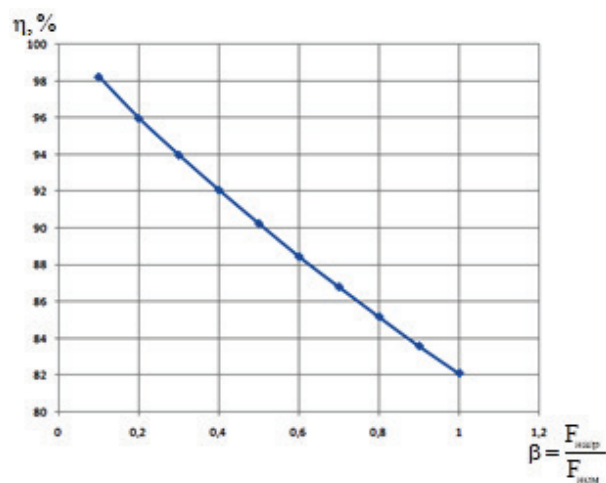
Фазовый сдвиг динамических характеристик ЛМЭП тихоходного длинноходового поршневого компрессора приведен на рис. 6.

Установленная решением задачи оптимизация аналитическая взаимосвязь обобщенных параметров ЛМЭП, обеспечивающая максимум КПД электромеханического преобразователя, позволяет определить относительные потери в подсистемах ЛМЭП  $P_{r_{\min}} = 0,2182$  и максимально возможный КПД для предложенной конструкции  $\eta_{g_{\max}} = 82,1$  %.

В результате исследования получено выражение для определения оптимального угла сдвига фаз между силой сопротивления сжимаемого газа в длинноходовой компрессорной ступени без смазки рабочей камеры и скоростью движения подвижных частей, а также начальной фазы питающего напряжения, которые позволяют достигнуть максимально возможный КПД СДПМ в линейном приводе возвратно-поступательного движения.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость фазового угла сдвига между силой сопротивления сжимаемого газа и током в обмотке (а) и КПД (б) от коэффициента загрузки ЛМЭП

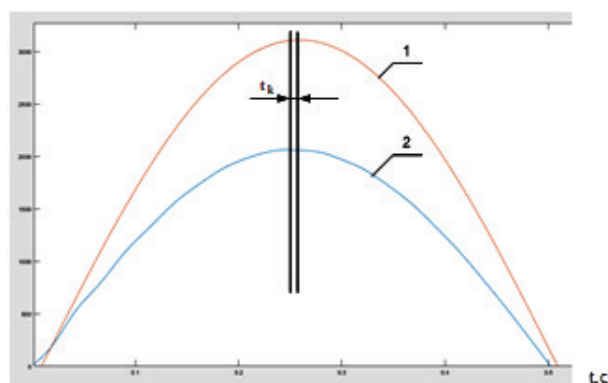


Рис. 6. Временной сдвиг между силой сопротивления сжимаемого газа  $F_n(t)$ , Н (1) и током в обмотке  $i(t) \times 200$ , А (2)

## Библиографический список

1. Дмитриев Д. О., Курбатов П. А. Методы анализа динамических характеристик магнитоэлектрических линейных приводов // Электротехника. 1998. № 1. С. 13–17.
2. Ковалев Ю. З., Татевосян А. С., Татевосян А. А. Исследование процессов энергопреобразования в электромаг-

нитном приводе на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД // Омский научный вестник. 2002. № 18. С. 118–122.

3. Татевосян А. А., Татевосян А. С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического института. 2014. Т. 325, № 4. С. 121–132.

4. Хитерер М. Я., Овчинников И. Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: Корона Принт, 2004. 357 с. ISBN 5-7931-0306-6.

5. Tatevosyan A. A., Kovalev V. Z. Mathematical Modeling of the Linear Drive for Research Viscoelastic Properties of Elastomer // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601426.

6. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В. Оценка взаимосвязи между законом перемещения поршня тихоходной длинноходной ступени и характеристиками привода компрессорного агрегата // Компрессорная техника и пневматика. 2018. № 2. С. 11–15.

7. Бусаров С. С., Юша В. Л. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходных ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.

8. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53, Issue 7–8. P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2.

9. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V. Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under the changing ratio of the piston forward and backward stroke time // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007, Issue 1. P. 030057-1–030057-6. DOI: 10.1063/1.5051919.

10. Пат. 2707559 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14 (2006.01). Линейная магнитоэлектрическая машина / Та-

тевосян А. А., Сиромаха С. С., Бусаров С. С. № 2019117544; заявл. 06.06.19; опубл. 28.11.19, Бюл. № 34.

11. Татевосян А. А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 48–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-48-51.

12. Канторович Л. В., Крылов В. И. Приближенные методы высшего анализа. М.: Физматгиз, 1962. 708 с.

13. Ряшенцев Н. П., Ковалев Ю. З. Динамика электромагнитных импульсных систем. Новосибирск: Наука, 1974. 187 с.

14. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 2-е изд., перераб. и доп. М.: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

**ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника», декан энергетического института.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

#### Для цитирования

Татевосян А. А. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в магнитоэлектрическом приводе тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 37–41. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-37-41.

Статья поступила в редакцию 16.03.2020 г.

© А. А. Татевосян