

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «КОМПРЕССОРНАЯ СТУПЕНЬ—ЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД»

А. А. Татевосян¹, С. С. Бусаров¹, А. В. Недовенчаный¹,
И. С. Бусаров¹, А. О. Жуков²

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

В работе проведены испытания тихоходных компрессорных ступеней с линейным магнитоэлектрическим приводом. Разработанная система позволяет измерять мгновенные параметры сжимаемого газа в рабочей камере поршневой ступени, а также снимать рабочие характеристики привода — потребляемый ток, напряжение, мощность. В работе представлены примеры полученных характеристик. В дальнейшем использование измерительной системы предполагается в научных исследованиях по изучению эффективных режимов работы магнитоэлектрического привода и в качестве учебно-лабораторного стенда при реализации учебного процесса.

Ключевые слова: линейный магнитоэлектрический привод, тихоходный длинноходовой компрессорный агрегат, рабочий процесс, экспериментальные исследования.

Введение

В отличие от современных многоступенчатых поршневых компрессорных агрегатов среднее и высокое давление нагнетания в компрессорных агрегатах с линейным приводом на базе тихоходных длинноходовых ступеней может быть обеспечено при сжатии газа в одной ступени [1–4]. В настоящее время получены результаты лабораторно-экспериментальных исследований, подтверждающие возможность повышения давления газа в одной компрессорной ступени в 30...100 раз без превышения допустимых ограничений по величине температуры нагнетания [4, 5]. При этом изменение величины газовой силы за цикл в тихоходной длинноходовой ступени может в 10...30 и более раз превышать этот параметр современных аналогов. Совершенствование динамических характеристик такого агрегата при помощи маховика, как это имеет место в существующих компрессорных агрегатах [6–8], приведет к недопустимому росту веса и габаритных размеров компрессорного агрегата с линейным приводом.

Опираясь на результаты исследования энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин, можно предположить, что для различных конструктивных и режимных параметров компрессорной ступени существуют такие законы перемещения поршня, при которых будет существенно снижено амплитудное изменение мгновенной мощности и среднеинтегральная мощность гидропривода. Вопросы определения энергосберегающих законов движения приводов технологического оборудования рассмотрены Л. С. Понтрягиным, А. А. Фельдбаумом, Н. Н. Красовским, А. Н. Волковым, О. Н. Мацко и др. [6, 7] Предварительные расчеты показали, что закон перемещения поршня может существен-

но влиять и на эффективность рабочего процесса поршневых тихоходных длинноходовых ступеней [6, 7]. 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 гидропривода делает актуальным исследование их взаимосвязи и возможности улучшения энергетических и динамических характеристик одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным гидроприводом.

В настоящей работе рассматривается магнитоэлектрический привод [9, 10]. До настоящего времени изучением таких приводов исследователи занимались теоретически [11–16].

Поэтому актуальной задачей является получение экспериментальных результатов по работе данных приводов с последующей возможностью исследований эффективных режимов работы и эффективных законов движения поршня, для чего необходимо создание испытательных стендов с системой сбора данных.

Магнитная система линейного магнитоэлектрического двигателя представлена на рис. 1 [9–11].

Экспериментальным путем установлено, что статическое электромагнитное усилие, развиваемое двигателем, составляет 2000 Н, что позволяет сжимать газ до 6,0 МПа.

Методика исследования

Объектом исследования является поршневой тихоходный компрессорный агрегат с ЛМЭД (ли-

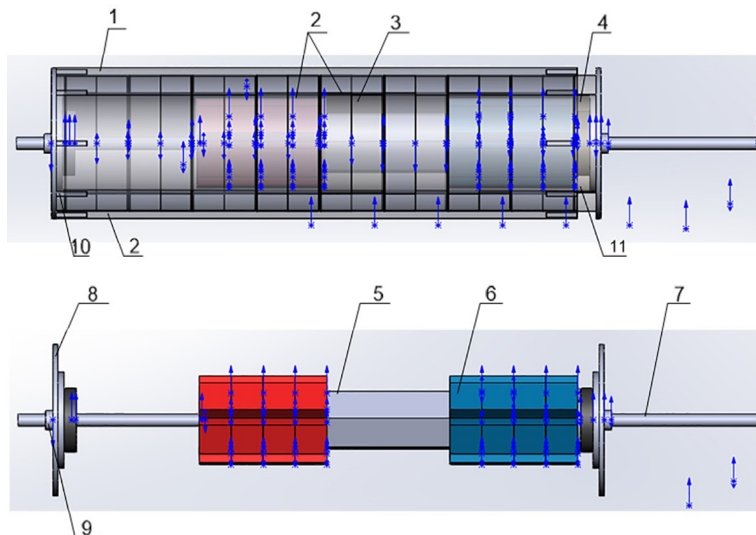


Рис. 1. Конструкция магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя:
 1 — корпус; 2 — внешний магнитопровод; 3 — катушки (секционированная обмотка); 4 — демпфер;
 5 — внутренний магнитопровод; 6 — постоянные магниты;
 7 — шток; 8 — крышки; 9 — подшипник качения (линейного перемещения);
 10 — крепежные элементы; 11 — каркас обмотки

Fig. 1. The design of the magnetic system of a linear magnetoelectric motor:
 1 — housing; 2 — external magnetic circuit; 3 — coils (sectioned winding); 4 — damper;
 5 — internal magnetic circuit; 6 — permanent magnets; 7 — stem; 8 — covers;
 9 — rolling bearing (linear movement); 10 — fasteners; 11 — winding frame

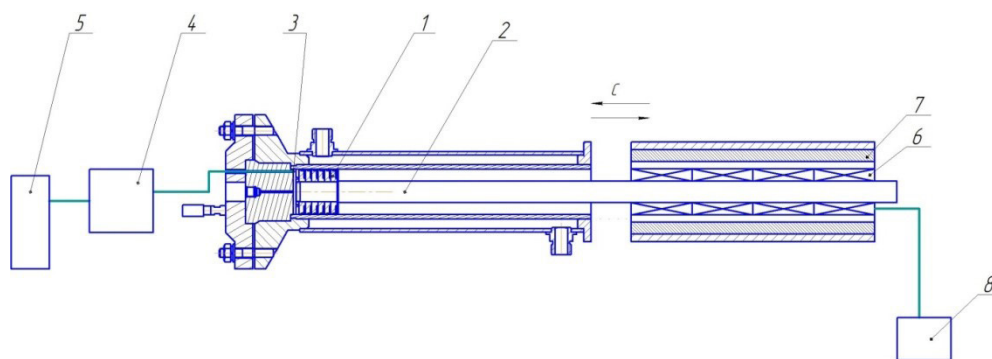


Рис. 2. Функциональная схема стенда: 1 — поршень; 2 — шток; 3 — датчик давления; 4 — усилитель;
 5 — осциллограф 1; 6 — магниты; 7 — катушки; 8 — осциллограф 2

Fig. 3. Functional diagram of the stand: 1 — piston; 2 — rod; 3 — pressure sensor; 4 — amplifier;
 5 — oscilloscope 1; 6 — magnets; 7 — coils; 8 — oscilloscope 2

нейный магнитоэлектрический привод). Функциональным элементом агрегата является тихоходная длинноходовая компрессорная ступень без смазки рабочей камеры [3, 4]. Исполнительным элементом в приводе является шток-якорь, с размещёнными на нём постоянными магнитами (6), движущимися в магнитном поле, создаваемом катушками (7) (рис. 2) [11].

Рассматриваемые рабочие параметры: диаметр цилиндра компрессорной ступени и гидроцилиндра — 0,02 м; ход поршня — 0,2 м; диаметр штока 0,015 м; тип клапанов — тарельчатые; температура всасывания — 290 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — 2 МПа; температура охлаждающей среды — 290 К, охлаждающая среда — вода; физические условия — сжимаемый газ — воздух; время рабочего цикла — 2...4 с.

Фотография стенда с установленной ступенью поршневого компрессора представлена на рис. 3.

Функциональная схема стенда приведена на рис. 2. Поршень (1) приводится в движение через шток (2) от штока электромагнитного привода. Датчик давления (3) и датчик температуры используются для определения соответственно давления и температуры сжимаемого газа в рабочей камере. Данные с датчика температуры и датчика давления поступают на цифровой осциллограф 1 (5) через усилитель (4). Напряжение и ток, потребляемые линейным электромагнитным приводом, измеряются с помощью осциллографа 2 (8).

Погрешность измерения мгновенной температуры при использовании бусинкового термистора [17, 18]

$$\delta_0 = \sqrt{\delta_t^2 + \delta_{\epsilon}^2}, \quad (1)$$

где δ_t — погрешность осциллографа, определяемая погрешностью прибора, 3%; δ_{ϵ} — погрешность термометра, определяемая погрешностью прибора, 1%;

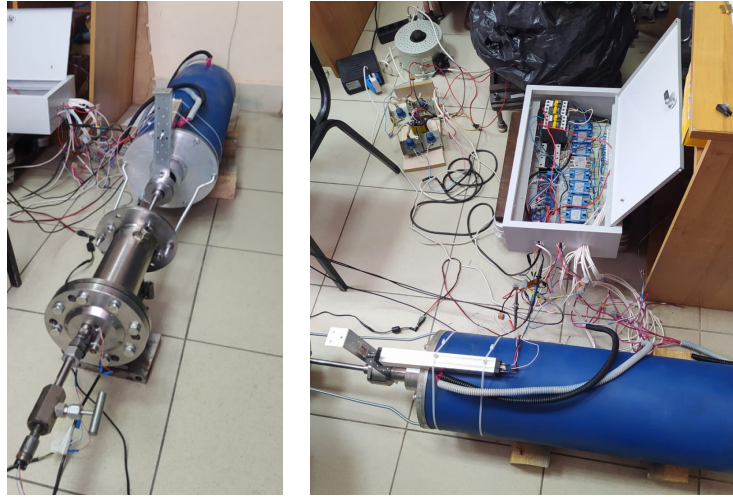


Рис. 3. Фотографии стенда
 Fig. 3. Photos of the stand

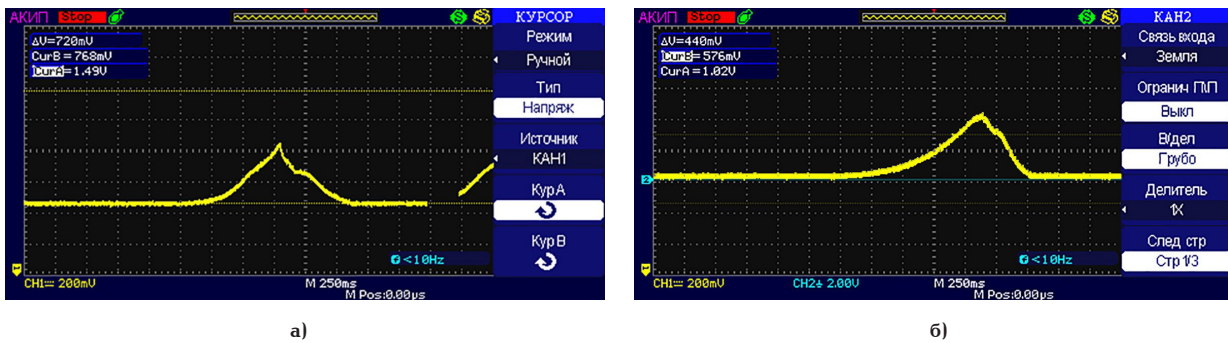


Рис. 4. Экспериментальная диаграмма температуры (а) и давления (б) в рабочей камере поршневой ступени
 Fig. 4. Experimental diagram of temperature (a) and pressure (b) in the working chamber of the piston stage

$$\delta_0 = \sqrt{3^2 + 1^2} = 3,2 \%$$

Определим приборную погрешность при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [11]:

$$\delta_{\text{ДА}} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_{\text{МН}}^2 + \delta_0^2}, \quad (2)$$

где δ_A — относительная погрешность датчика давления, %; $\delta_{\text{МН}}$ — относительная погрешность образцового манометра, %; δ_0 — относительная погрешность осциллографа, %.

Относительная погрешность датчика давления по паспорту $\delta_A = 1,4\%$. Относительная погрешность образцового манометра $\delta_{\text{МН}} = 1,5\%$. Относительная погрешность для осциллографа определяется паспортом $\delta_0 = 3\%$. В данном случае приборная погрешность является общей погрешностью, поскольку методика измерения напряжения при выполнении эксперимента и при проведении тарировки совершенно одинаковы. Также не учитывалось влияние случайных факторов. Их можно будет исключить, если некоторые значения, полученные при экспериментальном измерении, будут выпадать из общей системы. Тогда общая погрешность датчика давления равна:

$$\delta_{\text{ДА}} = \sqrt{3^2 + 1,5^2 + 1,4^2} = 3,63 \%$$

Погрешность измерения тока и напряжения обусловлена погрешностью цифрового осциллографа и по паспорту составляет — 3%.

Результаты

При проведении испытаний были получены диаграммы изменения давления и температуры в рабочей камере поршневой ступени (рис. 4).

Представленные результаты показали возможность получения давления газа в тихоходном агрегате на базе тихоходных ступеней с линейным магнитоэлектрическим приводом до 6 МПа. На рис. 4 показан пример одного из возможных режимов работы. Давление нагнетания достигает 1 МПа при максимальной температуре газа 331 К и времени цикла 2 с. Видно, что при движении от верхней мертвой точки к нижней наблюдается рыбок в движении, что связано с работой привода.

Полярность выпрямленного напряжения, подаваемого на обмотку двигателя, определяется в зависимости от сигнала, получаемого от датчика перемещения LTM 200. При прямом ходе (в процессе нагнетания) и при обратном ходе (в процессе

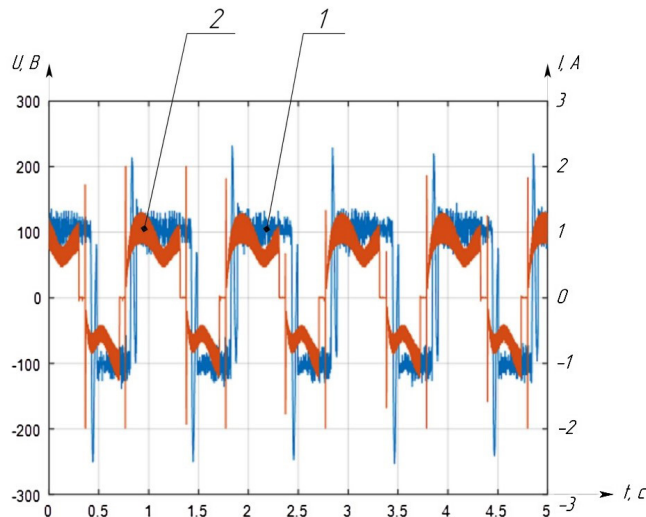


Рис. 5. Результаты экспериментального испытания СДПМ при частоте 0,3 Гц: ток в обмотке двигателя (2); напряжение на зажимах двигателя (1)
 Fig. 5. Results of experimental testing of PMSM at a frequency of 0,3 Hz: current in the motor winding (2); voltage at motor terminals (1)

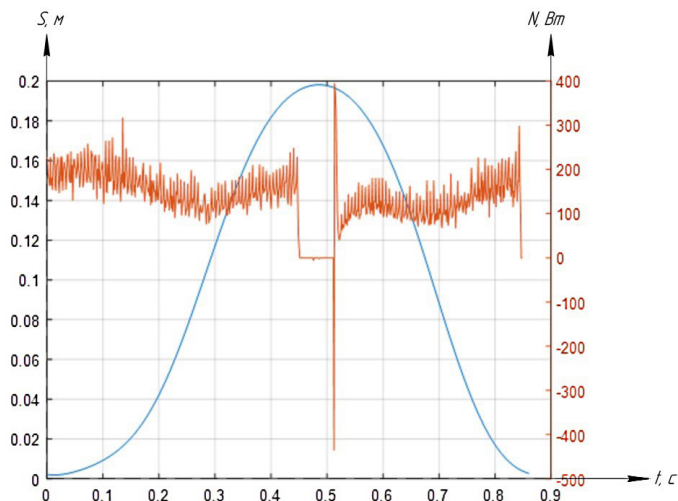


Рис. 6. Экспериментальные зависимости электрической мощности, Вт; ход индуктора, м
 Fig. 6. Experimental dependences of electrical power, W; inductor stroke, m

всасывания) полярность напряжения меняется на противоположную.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя установлены электролитические конденсаторы емкостью 100 мкФ. Для уменьшения импульса перенапряжения при переключении контакторов КМИ 22511 параллельно обмотке СДПМ установлены конденсаторы на напряжение 2 кВ емкостью 200 мкФ.

Электрические измерения: измерение тока и напряжения производится цифровым usb-осциллографом (рис. 5).

Полученные экспериментальные данные по изменению электрической мощности от хода представлены на рис. 6.

Данные, полученные на экспериментальном стенде, могут быть использованы для уточнения параметров математической модели поршневого компрессора.

Полученные экспериментальные данные в дальнейшем можно использовать для анализа работы магнитоэлектрического привода и улучшения его энергетических характеристик.

Выводы

Разработанный экспериментальный стенд с системой сбора данных позволяет измерять параметры рабочего процесса поршневой тихоходной компрессорной ступени, такие как давление и тем-

пература в рабочей камере. Также возможно определение параметров работы линейного магнитоэлектрического двигателя.

В дальнейшем планируется использовать созданный стенд для модернизации тихоходного агрегата с линейным магнитоэлектрическим двигателем, изучением и поиском эффективных режимов работы привода и определения влияния на характеристики поршневой тихоходной ступени.

Список источников

1. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

2. Фотин Б. С. [и др.]. Поршневые компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1987. 372 с.

3. 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. DOI: 10.18721/JEST.24408.

4. 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 (7–8). P. 453–458. DOI: 10.1007/S10556-017-0362-2.

5. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В. Экспериментальная оценка эффективности рабочих процессов тихоходных длинноходовых поршневых компрессорных ступеней при сжатии различных газов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 8. С. 27–29.

6. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Силков М. В. Анализ влияния закона регулирования линейного гидропривода на энергетические и динамические характеристики одноступенчатого компрессорного агрегата // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 11 (716). С. 26–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-26-35.

7. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Титов Д. С., Бусаров И. С., Аистов И. П. Исследование влияния закона перемещения поршня на энергетические и динамические характеристики одноступенчатого компрессорного агрегата при сжатии различных газов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. Р. 250–256.

8. Юша В. Л., Бусаров С. С. Определение показателей полнотропы схематизированных рабочих процессов воздушных поршневых тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 1. С. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22.

9. Пат. № 2707559 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14 (2006.01). Линейная магнитоэлектрическая машина / Татевосян А. А., Сиромаха С. С., Бусаров С. С. № 2019117544; заявл. 06.06.2019; опубл. 28.11.19, Бюл. № 34. 12 с.

10. Пат. № 2720882 Российская Федерация, МПК Н 02 К 41/03 (2006.01). Электротехнический комплекс поршневого компрессора на основе линейной магнитоэлектрической машины / Татевосян А. А., Бусаров С. С., Сиромаха С. С. № 2019127825; заявл. 04.09.2019; опубл. 13.05.20, Бюл. № 14. 12 с.

11. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Tatevosyan A. A. Comparative Analysis of the Magnetoelectric Drive with Linear Drives of Low-Speed Single-Stage Piston Units // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. P. 030066-1–030066-8. DOI: 10.1063/5.0027290.

12. Буг Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая школа, 1990. 416 с.

13. Cui F., Sun Z., Xu W. [et al.]. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures // China Electrotechnical Society Transactions on Electrical Machines and Systems. 2020. Vol. 4 (2). P. 142–150. DOI: 10.30941/CESTEMS.2020.00019.

14. Ang S., Rong-ming C., Hui-xing Z. Research on the iterative learning control method for linear motor driven compressor // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073792.

15. Abdalla I. I., Ibrahim T., Bin Mohd Nor N. Development and optimization of a moving-magnet tubular linear permanent magnet motor for use in a reciprocating compressor of household refrigerators // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. Vol. 77. P. 263–270. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.11.020.

16. Neyman L. A., Neyman V. Y., A. S. Shabanov. Simulation of processes in an electromagnetic converter with energy loss in the massive magnetic core // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2016. P. 522–525. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538791.

17. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Ленинград: Наука, 1985. 112 с.

18. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. Москва: Наука, 1970. 104 с.

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника», декан энергетического института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

БУСАРОВ Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4141-3733

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Адрес для переписки: lonewolf_rus88@mail.ru

БУСАРОВ Игорь Сергеевич, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5775-5330

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

ЖУКОВ Александр Олегович, доктор технических наук, профессор АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 7482-2741

AuthorID (РИНЦ): 667117

ORCID: 0000-0002-5122-3752

ResearcherID: C-2231-2014

Для цитирования

Татевосян А. А., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Жуков А. О. Экспериментальная оценка характеристик системы «компрессорная ступень – линейный магнитоэлектрический привод» // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 2. С. 59–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-59-65.

Статья поступила в редакцию 05.03.2021 г.

© А. А. Татевосян, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, И. С. Бусаров, А. О. Жуков

EXPERIMENTAL EVALUATION OF SYSTEM CHARACTERISTICS «COMPRESSOR STAGE—LINEAR MAGNETOELECTRIC DRIVE»

A. A. Tatevosyan¹, S. S. Busarov¹, A. V. Nedovenchany¹,
I. S. Busarov¹, A. O. Zhukov²

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, 111250

In this work, tests of low-speed compressor stages with a linear magnetolectric drive are carried out. The developed system makes it possible to measure the instantaneous parameters of the compressed gas in the working chamber of the piston stage, as well as to take the operating characteristics of the drive — consumed current, voltage, power. The work presents examples of the obtained characteristics. In the future, the use of the measuring system is assumed in scientific research on the study of effective modes of operation of the magnetolectric drive and as a teaching and laboratory stand in the implementation of the educational process.

Keywords: linear magnetolectric drive, low-speed long-stroke compressor unit, workflow, experimental research.

References

1. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).
2. Fotin B. S. [et al.]. Porshnevyye kompressory [Piston compressors]. Leningrad, 1987. 372 p. (In Russ.).
3. Yusha V. L., Busarov S. S. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Prospects for creating low-flow compressor units with medium and highpressuresbased on unified low-speed long-stroke stages] // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408. (In Russ.).
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure SingleStage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7–8). P. 453–458. DOI: 10.1007/S10556-017-0362-2. (In Engl.).
5. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V. Eksperimental'naya otsenka effektivnosti rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri szhatii razlichnykh gazov [Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke low-speed reciprocating compressor stages at compression of different gases] / *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. Khimicheskoe i neftegazovoe Mashinostroyeniye*. 2018. No. P. C. 27–29. (In Russ.).
6. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Silkov M. V. Analiz vliyaniya zakona regulirovaniya lineynogo gidroprivoda na energeticheskiye i dinamicheskiye kharakteristiki odnostupenchatogo kompressornogo agregata [An analysis of the influence of the linear hydraulic drive regulation law on the energy and dynamic characteristics of a single-stage compressor unit] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2019. No. 11 (716). P. 26–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-26-35. (In Russ.).
7. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Titov D. S., Busarov I. S., Aistov I. P. Issledovaniye vliyaniya zakona pere-meshcheniya porshnya na energeticheskiye i dinamicheskiye kharakteristiki odnostupenchatogo kompressornogo agregata pri szhatii razlichnykh gazov [Studies of the influence of the law of piston movement on the energy and dynamic characteristics of a single-stage compressor unit during compression of various gases] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2019. No. 12. P. 250–256. (In Russ.).
8. Yusha V. L., Busarov S. S. Opredeleniye pokazateley politropy skhematizirovannykh rabochikh protsessov vozdushnykh porshnevnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney [Determination of polytropic indicators of schematized working processes of air piston slow-moving long-stroke compressor stages] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22. (In Russ.).
9. Patent 2707559 Russian Federation, IPC H 02 K 21/14 (2006.01). Lineynaya magnitoelektricheskaya mashina [Linear magnetolectric machine] / Tatevosyan A. A., Siromakha S. S., Busarov S. S. No. 2019117544. (In Russ.).
10. Patent 2720882 Russian Federation, IPC H 02 K 41/03 (2006.01). Elektrotehnicheskiy kompleks porshnevoogo kompressora na osnove lineynoy magnitoelektricheskoy mashiny [Electrotechnical complex of piston compressor based on linear magnetolectric machine] / Tatevosyan A. A., Siromakha S. S., Busarov S. S. No. 2019127825. (In Russ.).
11. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Tatevosyan A. A. Comparative Analysis of the Magnetolectric Drive with Linear Drives of Low-Speed Single-Stage Piston Units // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285. P. 030066-1–030066-8. DOI: 10.1063/5.0027290. (In Engl.).
12. But D. A. Beskontaknyye elektricheskiye mashiny [Contactless electrical machines]. Moscow, 1990. 416 p. (In Russ.).
13. Cui F., Sun Z., Xu W. [et al.]. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with dif-

ferent structures // China Electrotechnical Society Transactions on Electrical Machines and Systems. 2020. Vol. 4 (2). P. 142–150. DOI: 10.30941/CESTEMS.2020.00019. (In Engl.).

14. Ang S., Rong-ming C., Hui-xing Z. Research on the iterative learning control method for linear motor driven compressor // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073792. (In Engl.).

15. Abdalla I. I., Ibrahim T., Bin Mohd Nor N. Development and optimization of a moving-magnet tubular linear permanent magnet motor for use in a reciprocating compressor of household refrigerators // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. Vol. 77. P. 263–270. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.11.020. (In Engl.).

16. Neyman L. A., Neyman V. Y., A. S. Shabanov. Simulation of processes in an electromagnetic converter with energy loss in the massive magnetic core // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2016. P. 522–525. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538791. (In Engl.).

17. Zaydel A. N. Pogreshnosti izmereniya fizicheskikh velichin [Errors of measurement of physical quantities]. Leningrad, 1985. 112 p. (In Russ.).

18. Kassandrova O. N., Lebedev V. V. Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya [Processing of observation results]. Moscow, 1970. 104 p. (In Russ.).

TATEVOSYAN Andrey Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Equipment Department, Dean of Energy Institute, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, Russia.

SPIN-code: 6456-8370

AuthorID (RSCI): 163175

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

Correspondence address: karo1@mail.ru

BUSAROV Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, OmSTU, Omsk, Russia.

SPIN-code: 4141-3733

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Correspondence address: habr86@mail.ru

NEDOVENCHANY Aleksey Vasilievich, Graduate Student, Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, OmSTU, Omsk, Russia.

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Correspondence address: lonewolf_rus88@mail.ru

BUSAROV Igor Sergeevich, Graduate Student, Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, OmSTU, Omsk, Russia.

AuthorID (RSCI): 966534

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

ZHUKOV Alexander Olegovich, Doctor of Technical Sciences, The «United Rocket and Space Corporation» Joint Stock Company, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia.

SPIN-code: 7482-2741

AuthorID (RSCI): 667117

For citations

Tatevosyan A. A., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Zhukov A. O. Experimental evaluation of system characteristics «compressor stage – linear magnetoelectric drive» // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 59–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-59-65.

Received March 5, 2021.

© A. A. Tatevosyan, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany,

I. S. Busarov, A. O. Zhukov