

УДК 621.313.322:681.518.5
DOI 10.17513/snt.40897



CC BY 4.0

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЛИНЕЙНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Гибадуллин Р. Р. ORCID ID 0009-0009-4134-9480, Семин Д. И.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»,
Казань, Российская Федерация, e-mail: ds-sci@yandex.ru*

Применение электрических машин возвратно-поступательного действия совместно с поршневыми двигателями внутреннего сгорания обеспечивает существенное упрощение кинематической схемы энергоустановок и рост их общего коэффициента полезного действия. Однако экстремальные эксплуатационные условия в виде интенсивных вибрационных нагрузок и высоких температур делают невозможным использование традиционных физических датчиков положения для мониторинга параметров подвижных элементов. Цель исследования заключается в создании алгоритма косвенной оценки изменения положения подвижной части синхронного линейного генератора для использования в качестве измерительного ядра системы автоматизированного управления. В основу работы легло математическое моделирование наводимой электродвижущей силы и координатное преобразование Кларка. Алгоритмы вычисления реализованы в программной среде графического проектирования LabVIEW и протестированы на автоматизированном измерительном стенде с системой сбора данных в реальном времени. В ходе анализа полученных данных было проведено сравнение расчетных значений пространственной координаты, вычисленных алгоритмическим путем, с показаниями эталонной физической измерительной системы. Подтверждена высокая точность разработанной методики и доказана устойчивость фазового сдвига расчетного измерительного сигнала к тяжелым температурным воздействиям в рабочей зоне.

Ключевые слова: неразрушающий метод контроля, синхронный линейный генератор, математическое моделирование, электропривод, электромеханика

AUTOMATED MONITORING AND CONTROL SYSTEM FOR A SYNCHRONOUS LINEAR GENERATOR

Gibadullin R. R. ORCID ID 0009-0009-4134-9480, Semin D. I.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Kazan State Power Engineering University”, Kazan, Russian Federation,
e-mail: ds-sci@yandex.ru*

The application of reciprocating electrical machines jointly with piston internal combustion engines provides a substantial simplification of the kinematic scheme of power plants and a growth of their overall efficiency. However, extreme operating conditions in the form of intensive vibration loads and high temperatures make it impossible to use traditional physical position sensors for monitoring the parameters of moving elements. The purpose of the study is to develop an algorithm for indirect estimation of the synchronous linear generator moving part position for use as a measurement core of an automated control system. The work is based on the mathematical modeling of the induced electromotive force and the Clarke coordinate transformation. The calculation algorithms are implemented in the LabVIEW graphical design software environment and tested on an automated measurement test bench with a real-time data acquisition system. In the course of the analysis of the obtained data, a comparison was performed between the calculated values of the spatial coordinate, computed algorithmically, and the readings of a reference physical measurement system. The high accuracy of the developed methodology was confirmed and the stability of the phase shift of the calculated measurement signal to heavy temperature impacts in the operating zone was proven.

Keywords: non-destructive testing method, synchronous linear generator, mathematical modeling, electric drive, electromechanics

Введение

Применение электрических машин возвратно-поступательного действия (ЭМПВД) в современной энергетике и транспортном машиностроении совместно с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) обусловлено упрощением кинематической схемы установок и повышением коэффициента полезного действия (КПД) системы. Вместе с тем возникает задача эффективного управления такой системой для безаварийного функционирования

синхронных линейных генераторов (СЛГ), поскольку, в отличие от вращающихся электрических машин, индуктор линейного генератора имеет жестко ограниченные крайние положения. Выход за рамки рабочего хода неизбежно приводит к механическому повреждению конструктивных элементов и полному останову энергоустановки [1, 2].

Традиционные измерительные системы для контроля линейных перемещений, как правило, базируются на использовании

дискретных контактных или бесконтактных оптических и магнитных датчиков (линейных энкодеров). Однако специфика работы СЛГ в составе поршневых агрегатов характеризуется экстремальными эксплуатационными условиями: высокими частотами колебаний индуктора, интенсивными вибрационными нагрузками, воздействием агрессивных сред и рабочих температур, достигающих 150 °С и более [3, 4].

В таких условиях применение стандартных датчиков становится невозможным из-за термической деградации их элементов, нарушения углов позиционирования и ограничений по габаритным размерам измерительной зоны [5]. В связи с этим возникает необходимость в отказе от физических датчиков положения и переходе к альтернативным, косвенным методам неразрушающего контроля параметров движения, использующим в качестве информативного параметра внутренние электрические характеристики самой машины [6, 7].

Возможным решением становится разработка алгоритма для автоматизированной системы управления (АСУ) СЛГ.

Цель исследования – разработка алгоритма косвенной оценки изменения положения подвижной части синхронного линейного генератора для использования в качестве измерительного ядра системы автоматизированного управления.

Материалы и методы исследования

В основу разрабатываемого косвенного метода контроля положен принцип извлечения информации о кинематических параметрах индуктора из формы и частотно-амплитудных характеристик генерируемой электродвижущей силы (ЭДС) в обмотке статора [8]. В отличие от вращающихся электрических машин, где частота напряжения жестко привязана к угловой скорости ротора, форма сигнала напряжения синхронного линейного генератора (СЛГ) имеет сложный, нестационарный гармонический характер [9].

Для математического обоснования метода принято, что координата $x(t)$ и мгновенная скорость $v(t)$ колеблющегося индуктора за период (T) с амплитудой хода (A) описываются гармоническими функциями:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t), v(t) = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega t), (1)$$

где $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$.

Первая гармоника магнитной индукции возбуждения B_1 на поверхности статора с полюсным шагом τ определяется пространственной координатой. При подстановке в нее закона синусоидального перемещения

индуктора (1), нестационарная зависимость индукции от времени принимает вид

$$B_{1\sin} = B_{1m} \cdot \cos\left(A \frac{\pi}{\tau} \sin(\omega t)\right), (2)$$

где B_{1m} – максимальное значение магнитной индукции первой гармоники, Тл.

Интегрируя функцию магнитной индукции по активной длине контура статора l_{cm} , определим мгновенное значение результирующего потокоцепления ψ_1 в обмотке:

$$\psi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \tau \cdot l_{cm} \cdot B_{1m} \cos\left(A \frac{\pi}{\tau} \cdot \sin(\omega t)\right), (3)$$

На основании закона электромагнитной индукции Фарадея путем дифференцирования потокоцепления (3) по времени определено мгновенное значение фазной ЭДС e_ϕ , наводимой в обмотке статора с числом витков w_ϕ :

$$e_\phi = E_{1m\phi} \cdot \sin\left(\frac{\pi A}{\tau} \sin(\omega t)\right) \cdot \cos(\omega t), (4)$$

Амплитудное значение фазной ЭДС, В:

$$E_{1m\phi} = 4\pi f B_{1m} A l_{cm} w_\phi. (5)$$

Полученное математическое описание доказывает закономерность между параметрами движения индуктора и сигналом напряжения статора. Таким образом, определение этой закономерности может лежать в основе алгоритма автоматизированной системы мониторинга и управления СЛГ.

Для непрерывного вычисления текущей координаты индуктора $x(t)$ применяется программный продукт *LabVIEW*. Алгоритм *LabVIEW* переводит реальные многофазные электрические величины в математическую плоскость электрического угла. Поскольку индуктор совершает возвратно-поступательное движение вдоль дискретно расположенных полюсов с шагом τ , его линейное перемещение физически эквивалентно изменению фазы результирующего магнитного поля – электрическому углу положения индуктора λ [10].

Прямое определение угла λ по мгновенным значениям трехфазных ЭДС затруднено. Сигналы имеют нестационарный характер в крайних положениях движения индуктора [11, 12]. Для упрощения вычислительного алгоритма целесообразно перейти от трехфазной статической системы координат к двухфазной декартовой системе. Отображение пространственного обобщенного вектора тока статора I_s в неподвижной декартовой системе координат $\alpha-\beta$, совмещенной с трехфазными осями A, B, C , представлено на рис. 1 [13, 14].

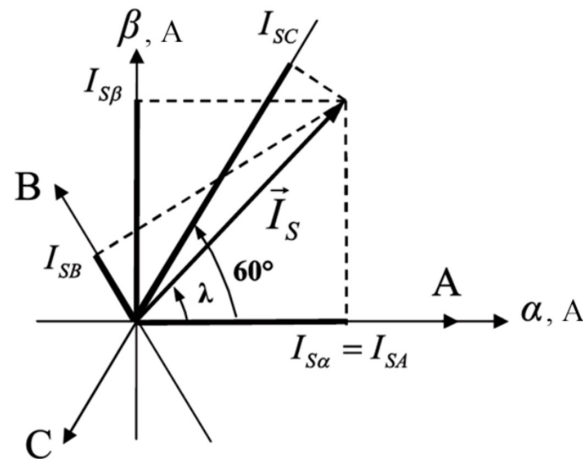


Рис. 1. Вектор тока в неподвижной декартовой системе координат
Примечание: составлен авторами на основе источника [15, с. 28, 39]

Как видно из данной пространственной диаграммы, ось α ортогональной системы координат совмещена с осью реальной фазы A статора СЛГ, в результате чего проекция обобщенного вектора на данную ось тождественно равна мгновенному значению тока этой фазы ($I_{s\alpha} = I_{sA}$). Оси двух других фаз – B и C – пространственно смещены относительно оси α на углы 120° и 240° соответственно согласно конструктивному исполнению трехфазной обмотки статора.

Из рис. 1 возможно записать

$$\begin{cases} -I_{sc} = I_s \cos(60^\circ - \lambda) = I_s \left(\frac{1}{2} \cos \lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \lambda \right); \\ I_{sb} = I_s \cos(120^\circ - \lambda) = I_s \left(-\frac{1}{2} \cos \lambda + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \lambda \right). \end{cases} \quad (6)$$

Преобразуя систему уравнений и после определения проекций обобщенного вектора на оси α и β ($I_{s\alpha}$ и $I_{s\beta}$), угол λ определяем следующим образом:

$$\lambda = \arctg \frac{I_{s\beta}}{I_{s\alpha}}. \quad (7)$$

Для практической реализации предложенного бесконтактного метода контроля и экспериментальной верификации разработанного математического алгоритма (1)–(6) на базе Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ) был спроектирован и изготовлен специализированный автоматизированный контрольно-измерительный стенд. Данный аппаратно-программный комплекс (АПК) позволяет с высокой точностью исследовать статические и динамические характеристики ЭМВПД мощностью до 10 кВт с максимальным ходом индуктора до 75 мм.

На рис. 2 изображен аппаратный состав разработанного экспериментального стенда.

Исследуемая ЭМВПД является основным элементом силовой части стенда. Вращательное движение преобразуется в возвратно-поступательное с помощью связки из гидромотора и кривошипно-шатунного механизма. Гидроцилиндр выполняет роль гидравлического тормоза для имитации различных профилей нагрузки. Для верификации устойчивости бесконтактного метода контроля к сложным температурным условиям эксплуатации, корпус электрической машины оснащен нагревательным и охлаждающим элементами. Данные узлы позволяют осуществлять принудительное изменение температуры активных зон статора в диапазоне до 150°C .

Информационно-измерительное ядро АПК построено на базе модульного измерительного шасси NI CompactRIO. Шасси функционирует под управлением программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Использование ПЛИС позволяет осуществлять опрос каналов ввода-вывода в режиме реального времени и минимизирует задержки сигнала.

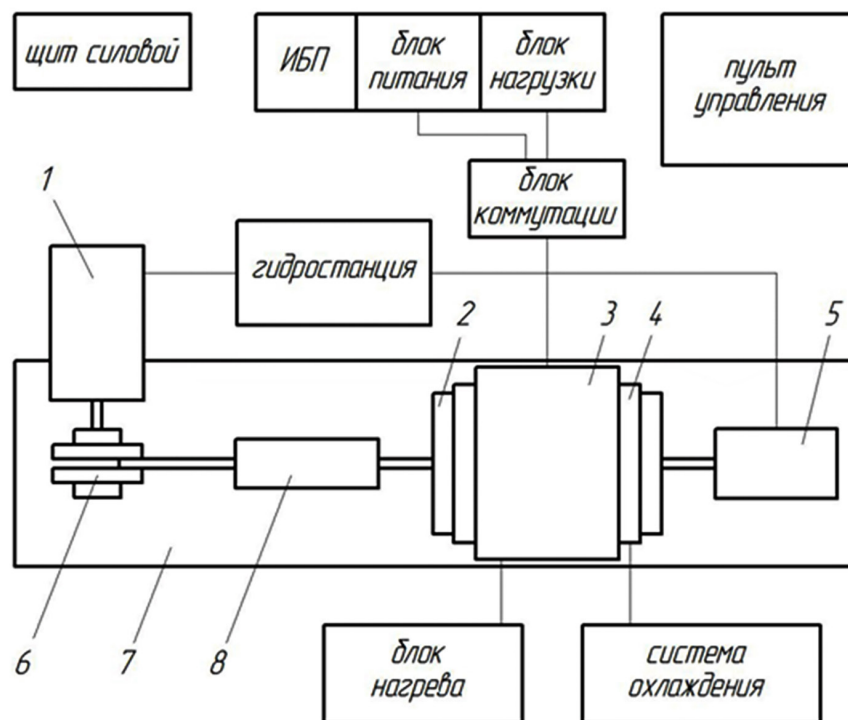


Рис. 2. Устройство стенда: 1 – гидромотор SCM-047 W-N-DL4-L35-S3G; 2 – возвратно-поступательная электрическая машина (основные узлы: статор PS10-70x400U-BL, слайдер PL10-28x690/640, PF10-70x430-FC, контроллер E1400-GP-QN-0S); 3 – нагревательный элемент; 4 – охлаждающий элемент; 5 – гидроцилиндр СНТ/40/28/150/FA00BUC00000Y1Q100R10/0; 6 – кривошипно-шатунный механизм; 7 – стол испытательный; 8 – система направляющих
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для регистрации мгновенных значений фазных ЭДС и токов в составе АПК применен специализированный 4-канальный модуль аналогового ввода С-серии NI 9215, позволяющий за счет одновременной выборки каналов исключить фазовый сдвиг между измеряемыми величинами при последующем вычислении пространственных координат.

Для регистрации значений линейных напряжений на статорных обмотках СЛГ применен 8-канальный модуль аналогового ввода С-серии NI 9221, который позволяет подключать выводы фаз исследуемой электрической машины напрямую.

Мониторинг теплового состояния машины при работе под нагрузкой реализован через каналы аналогового ввода. Они обеспечивают непрерывную регистрацию температурных параметров обмоток статора.

Оцифровка первичных данных реализуется на базе АЦП последовательно-го приближения.

Программное обеспечение АПК реализовано в графической среде проектирования LabVIEW (рис. 3). Разработанный виртуальный прибор на ПЛИС-уровне осуществляет

первичную фильтрацию высокочастотных шумов и синхронизацию потоков данных. На RT-уровне контроллера в режиме реального времени выполняется математическое преобразование Кларка и мгновенное вычисление текущего электрического угла λ по формуле (7) с последующим пересчетом в линейную координату $x(t)$.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные исследования разработанного бесконтактного метода контроля параметров движения, проведенные на базе созданного АПК при различных частотах колебаний и профилях гидравлической нагрузки, позволили получить реальные динамические характеристики синхронной измерительной машины.

Для оценки точности разработанного алгоритма бесконтактного контроля было произведено сопоставление координат, рассчитанных виртуальным прибором LabVIEW, с физическими показаниями эталонного датчика перемещений. На рис. 4 представлен полученный график расхождения экспериментальных данных.

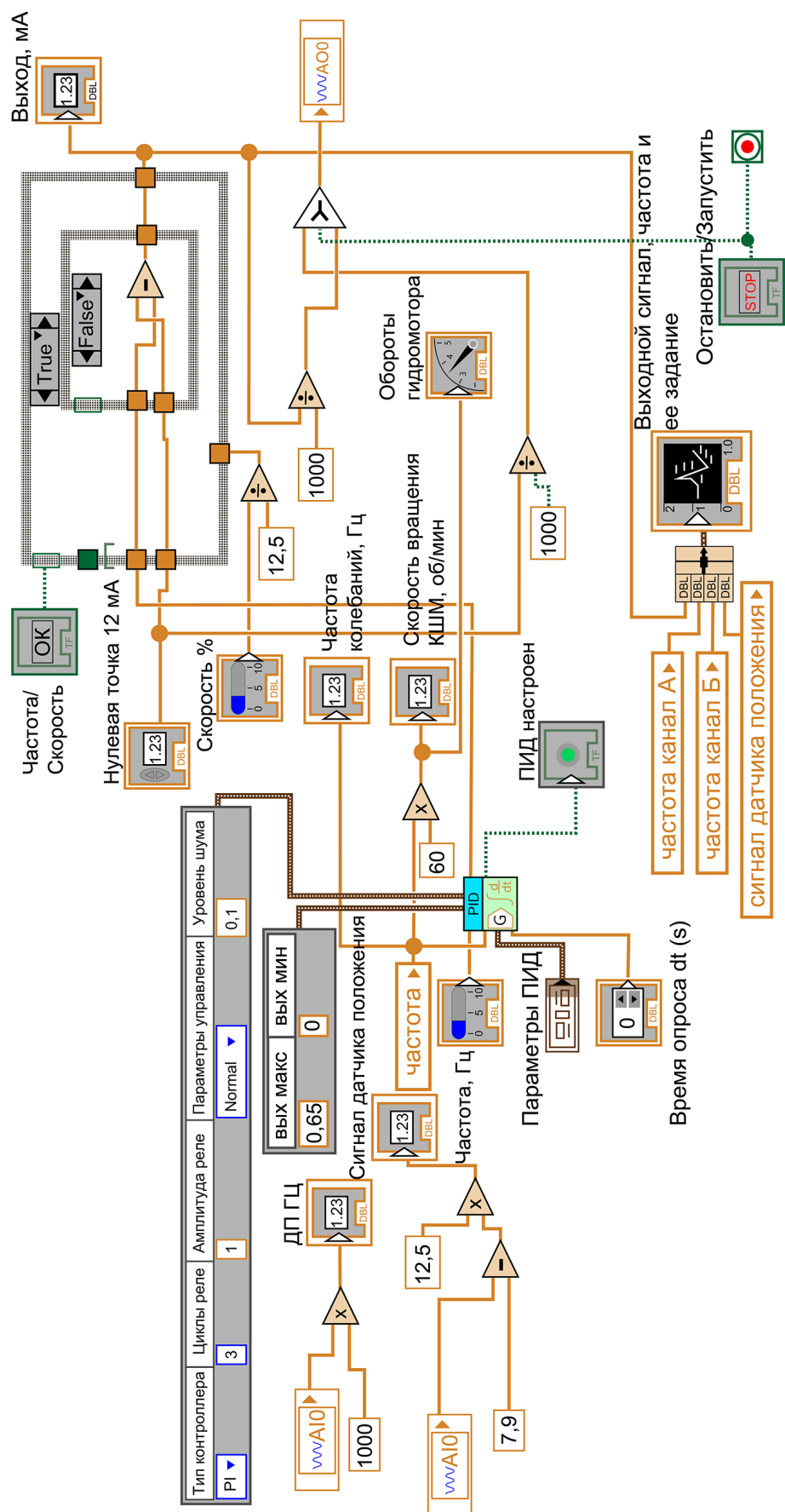


Рис. 3. Блок-диаграмма управления контрольно-измерительным стендом
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

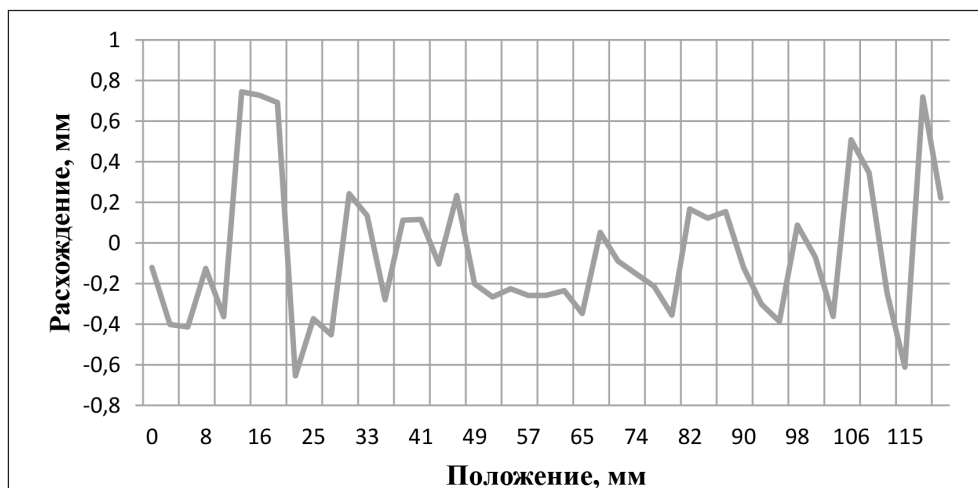


Рис. 4. График расхождения экспериментальных данных
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

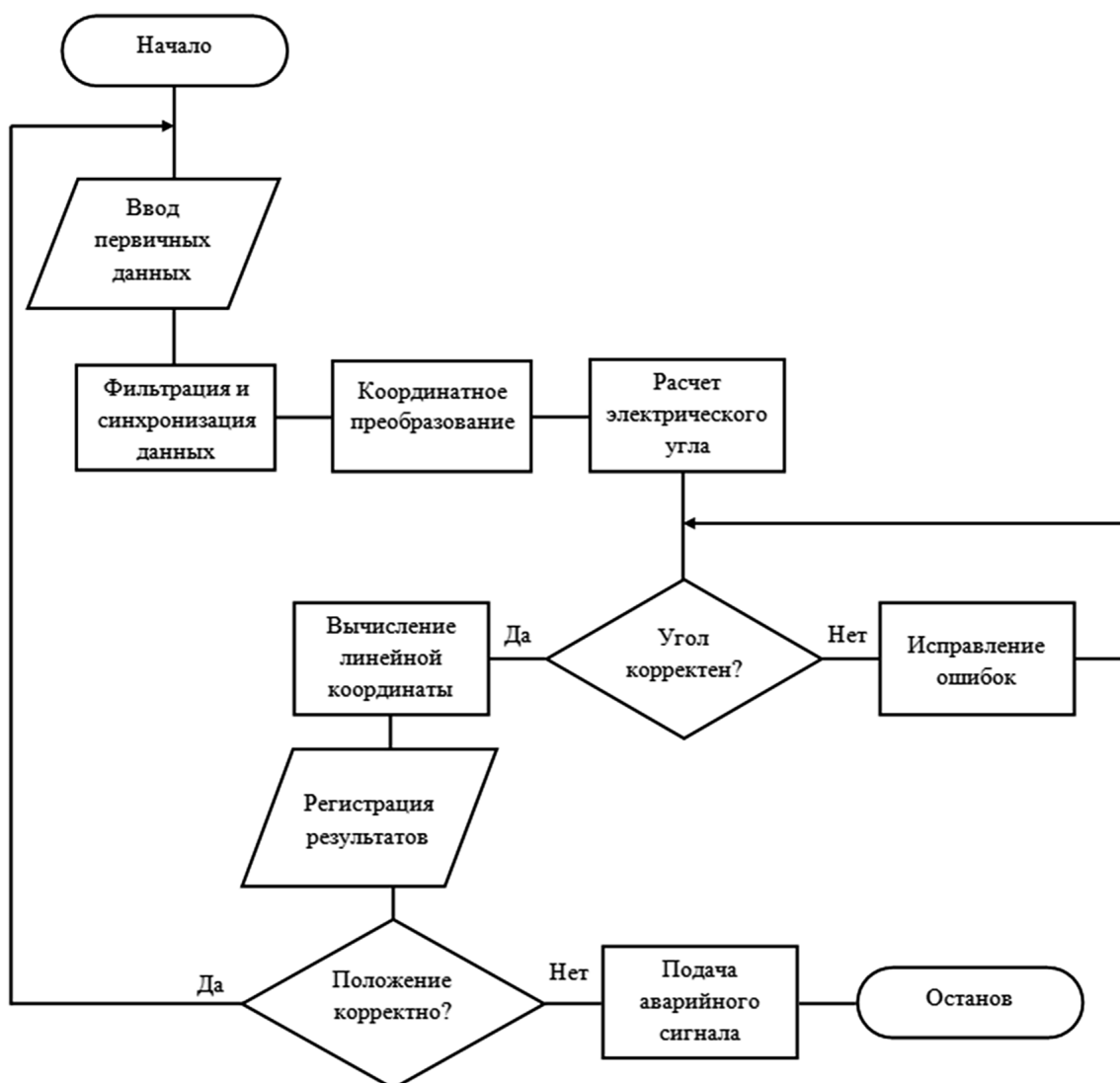


Рис. 5. Блок-схема разработанного алгоритма
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Анализ кривой (рис. 4) показывает, что абсолютная величина расхождения значений положения индуктора на всем исследуемом диапазоне перемещений носит знакопеременный пульсирующий характер. Максимальная величина абсолютной погрешности не превышает 0,75 мм.

Таким образом, сравнение экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод об адекватности предложенного метода.

Разработанный алгоритм косвенной оценки изменения положения подвижной части СЛГ представлен на рис. 5.

Заключение

Предложенная физико-математическая модель изменения мгновенных значений фазной ЭДС статора СЛГ при возвратно-поступательном синусоидальном законе движения подвижной части доказывает связь между формой нестационарного гармонического электрического сигнала и кинематикой индуктора машины. Это делает возможным реализовать измерительный алгоритм на основе преобразования Кларка в среде графического проектирования LabVIEW. Переход от реальной трехфазной системы статора к ортогональным декартовым осям позволяет измерительному комплексу в режиме реального времени вычислять электрический угол положения λ . Такое решение выступает в качестве эффективного измерительного ядра автоматизированной системы мониторинга и управления СЛГ.

Для практической верификации предложенного подхода был создан и успешно апробирован автоматизированный контрольно-измерительный стенд на базе платформы NI CompactRIO с модулями скоростного аналогового и тензометрического ввода. Экспериментальные испытания подтвердили высокую точность разработанного метода, поскольку максимальное абсолютное расхождение с эталонным физическим датчиком перемещений во всех режимах не превысило 0,75 мм.

Описанные выше факты формируют практическую значимость работы. Достигнутый уровень точности дает возможность интегрировать разработанный алгоритм в контур автоматизированной системы управления СЛГ для обеспечения его безаварийной работы и исключения механических повреждений элементов конструкции.

Кроме того, разработанный алгоритм позволяет исключить чувствительные к перегреву физические датчики из высокотем-

пературной зоны приводного комплекса, что, в свою очередь, повышает общую эксплуатационную надежность измерительных контуров электрических машин возвратно-поступательного действия и оптимизирует информационную структуру АСУ, снижая избыточность интерфейсов сбора данных.

Список литературы

1. Raheem A. T., Aziz A. R. A., Zulkifli S. A., Rahem A. T., Ayandotun W. B. A review of free piston engine control literature – Taxonomy and techniques // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61. Is. 10. P. 7877–7916. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822000291> (дата обращения: 15.06.2026). DOI: 10.1016/j.aej.2022.01.027.
2. Yuan C., Jing Y., He Y. Coupled dynamic effect of combustion variation on gas exchange stability of a free piston linear engine // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 173. Art. 115201. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119383838> (дата обращения: 15.06.2026). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115201.
3. Hassan A., Torres-Perez A., Kaczmarczyk S., Picton P. Active vibration control for a free piston Stirling engine generator using a voice coil actuator // *MM Science Journal*. 2015. Vol. 2015. Is. 01. P. 547–554. URL: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/march-2015/articles/active-vibration-control-for-a-free-piston-stirling-engine-generator-using-a-voice-coil-actuator> (дата обращения: 24.07.2026). DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201503.
4. Liu W., Feng H., Li J., Jia B. Electromagnetic-Thermal Characteristics Analysis of a Tubular Permanent Magnet Linear Generator for Free-Piston Engines // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Is. 5. Art. 1900. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/5/1900> (дата обращения: 24.07.2026). DOI: 10.3390/app14051900.
5. Khan M. A., Sun J., Li B., Przybysz A., Kosel J. Magnetic sensors – A review and recent technologies // *Engineering Research Express*. 2021. Vol. 3. Is. 2. Art. 022005. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/ac0838> (дата обращения: 26.07.2026). DOI: 10.1088/2631-8695/ac0838.
6. Yang F., Feng H., Jia B., Zhang Z. A Novel Sensorless Position Sensing for Free-Piston Engine Generation Using Observation Coil // *Proceedings of 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. 2024. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10583561> (дата обращения: 26.07.2026). DOI: 10.1109/CIEEC60922.2024.10583561.
7. Summa J., König N., Nienhaus M., Grasso E. Sensorless Control of a Two-Phase Linear PMSM exploiting PWM-Induced Current Ripples // *2023 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*. 2023. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10261389> (дата обращения: 26.07.2026). DOI: 10.1109/SLED57582.2023.10261389.
8. Paul S., Chang J. A New Approach to Detect Mover Position in Linear Motors Using Magnetic Sensors // *Sensors*. 2015. Vol. 15. Is. 10. P. 26694–26708. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/10/26694> (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.3390/s151026694.
9. Polinder H., Damen M., Gardner F. Linear PM Generator System for Wave Energy Conversion in the AWS // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2004. Vol. 19. Is. 3. P. 583–589. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1325298> (дата обращения: 26.06.2026). DOI: 10.1109/TEC.2004.827717.
10. Wei Y., Zuo Z., Jia B., Zhang Z., Feng H., Liang K. Performance Characteristic of Permanent Magnet Linear Generator for Energy Conversion with Renewable Fuels on Free-Piston Engines // *International Journal of Energy Research*. 2024. Vol. 2024. Art. 2459846. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/>

doi/full/10.1155/2024/2459846 (дата обращения: 24.07.2026). DOI: 10.1155/2024/2459846.

11. Zhang J., Tang Y., Yu F. Position Sensorless Control System of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Based on Sliding Mode Observer with an Improved Phase-Locked Loop // *Energy Engineering*. 2021. Vol. 118. Is. 4. P. 1083–1094. URL: <https://www.techscience.com/energy/v118n4/42631> (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.32604/EE.2021.014482.

12. Chen Z., Tomita M., Doki S., Okuma S. An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2003. Vol. 50. Is. 2. P. 288–295. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1191804> (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.1109/TIE.2003.809391.

13. Vijayapriya R., Raja P., Selvan M. P. Enhanced method of rotor speed and position estimation of permanent magnet synchronous Machine based on stator SRF-PLL // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2017. Vol. 20. Is. 5. P. 1450–1459. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098617308716> (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.1016/j.jestch.2017.09.004.

14. Janiszewski D. Sensorless PMSM Speed Control Using an FPGA-Implemented Unscented Kalman Filter // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. Is. 11. Art. 5429. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/16/11/5429> (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.3390/app16115429.

15. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с. ISBN 5-7691-1111-9.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Финансирование осуществлялось: за счёт гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Financing: The financing was carried out within the framework of a grant provided by the Tatarstan Academy of Sciences to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support development plans for human resources potential in terms of stimulating their scientific and pedagogical workers to defend doctoral dissertations and perform scientific research work.