

УДК 681.518.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Энергоэффективное управление группой штанговых глубинных насосных установок

А.А. Накатаев[✉], А.М. Зюзов, К.Е. Нестеров

Уральский Федеральный университет, Россия, г. Екатеринбург

[✉]a.a.nakataev@urfu.ru

Аннотация. Актуальность. Работа электропривода штанговых глубинных насосных установок характеризуется периодическим изменением нагрузки, что в пределах группы независимых электроприводов куста скважин может вызвать значительные колебания мощности в питающей сети. Для снижения пиковых нагрузок в сети, имеющих в таких системах случайный характер, на кусте скважин, оборудованных регулируемым электроприводом штанговых глубинных насосных установок, предлагается организовать синхронизированное управление насосными установками. Рассмотрено несколько подходов к отработке алгоритмов энергоэффективного управления, а также проведения опытно-промышленных испытаний электроприводов технологических машин и механизмов, к которым относится штанговая глубинная насосная установка, таких как компьютерное моделирование, моделирование динамики системы с использованием HIL- и PHIL-симуляторов и другие методы. На заключительном этапе отработки системы управления в представленной работе использован электромеханический испытательный стенд, позволивший апробировать предлагаемый алгоритм управления в лабораторных условиях. **Цель.** Синтез системы энергоэффективного управления группой электроприводов штанговых глубинных насосных установок, обеспечивающей снижение колебаний потребляемой мощности в электрической сети при периодически изменяющейся нагрузке. **Методы.** Математическое и компьютерное моделирование в реальном времени, физическое моделирование на базе испытательного стенда. **Результаты и выводы.** Повышение качества напряжения электросети, к которой подключена группа регулируемых электроприводов штанговых глубинных насосных установок, можно достичь непрерывной регистрацией потребляемой активной мощности каждого электропривода, последующим расчётом оптимальных фаз регистрируемых сигналов каждой установки относительно базовой и корректировкой текущего углового положения вала каждого электропривода для достижения расчётной величины оптимальной фазы потребляемой мощности.

Ключевые слова: электропривод, штанговая глубинная насосная установка, нефтедобыча, испытательный стенд, алгоритмы управления, моделирование нагрузки

Для цитирования: Накатаев А.А., Зюзов А.М., Нестеров К.Е. Энергоэффективное управление группой штанговых глубинных насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 146–153. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718

UDC 556.314.6(282.256.1)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718

Sucker rod pumping unit energy-efficient control

A.A. Nakataev[✉], A.M. Ziuzev, K.E. Nesterov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

[✉]a.a.nakataev@urfu.ru

Abstract. Relevance. The operation of the electric drive of deep-well sucker rod pumping units is characterized by a periodic nature of load changes, which, within a group of independent electric drives of a well cluster, can cause significant power fluctuations in the supply network. To reduce peak loads in the network, which are random in such systems, it is proposed to

organize synchronized control of pumping units at a cluster of wells equipped with an adjustable electric drive of a sucker pump unit. The paper considered several approaches to developing energy-efficient control algorithms, as well as conducting pilot tests of electric drives of technological machines and mechanisms, which include a sucker rod pumping unit, such as computer modeling, modeling of system dynamics using HIL and PHIL simulators and other methods. At the final stage of testing the control system in the presented work, an electromechanical test bench was used, which made it possible to test the proposed control algorithm in laboratory conditions. **Aim.** Synthesis of an energy-efficient control system for a group of electric drives of sucker-rod pumping units, ensuring a reduction in fluctuations in power consumption in the electrical network under periodically changing loads. **Methods.** Mathematical and computer modeling in real time, physical modeling based on a test bench. **Results and conclusions.** Improving the quality of the voltage of the electrical network to which a group of adjustable electric drives of the sucker pump unit is connected can be achieved by continuously recording the active power consumption of each electric drive, subsequent calculation of the optimal phases of the recorded signals of each installation relative to the base one, and adjusting the current angular position of the shaft of each electric drive to achieve the calculated value of the optimal phase of power consumption.

Keywords: electric drive, sucker rod pumping unit, oil production, test bench, control algorithms, load modeling

For citation: Nakataev A.A., Ziuzev A.M., Nesterov K.E. Sucker rod pumping unit energy-efficient control. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 146–153. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718

Введение

В промышленности существует множество электроприводов с периодической нагрузкой, например, системы водоснабжения, состоящие из последовательности насосных станций [1, 2], и станки-качалки для добычи нефти. Условия, в которых работают станки-качалки, можно назвать наиболее тяжелыми по сравнению с условиями других установок с периодической нагрузкой. Отсутствие оператора на рабочем участке и ограниченная мощность питающей сети из-за удаленности объектов нефтедобычи обуславливают повышенные требования к надежности электроприводов. Именно ограничение мощности является одним из важнейших факторов, способных привести к полному останову технологического процесса, что влечёт за собой крупные финансовые потери. Кроме выбора номинальной мощности питающего трансформатора кустовой подстанции необходимо обеспечить равномерность графика мощности, потребляемой всеми установками, для предотвращения возможных просадок напряжения. В системе независимых электроприводов с периодической нагрузкой высока вероятность наложения пиков потребляемой мощности. Опыт компьютерного моделирования показал влияние фазы временных диаграмм мощности отдельных установок на напряжение общей шины питания [3].

Группа штанговых глубинных насосных установок (ШГНУ) представляет собой сложный объект для проведения опытно-промышленных испытаний из-за удаленного расположения и ограниченного доступа. Различные методы, такие как испытание на реальном оборудовании [4], моделирование динамики системы с использованием HIL- и PHIL-симуляторов [5, 6], компьютерное моделирование [7] и др. [8–13], предлагается использовать для разработки и проверки алгоритмов такими

электротехническими комплексами. В статье приводятся результаты синтеза системы управления фазовым сдвигом диаграмм мощности группы регулируемых электроприводов ШГНУ, а также даётся оценка возможности отработки системы управления технологическим процессом куста ШГНУ на электромеханическом испытательном стенде, реализующем динамические процессы ШГНУ в определенном масштабе на основе математической модели механизма [14–19].

Разработка регулятора

Основной целью управления фазовым сдвигом диаграмм мощности в группе электроприводов с периодической нагрузкой является снижение колебаний сетевого напряжения за счет уменьшения пиковых нагрузок электрической сети. Для управления работой группы электроприводов предлагается использовать критерий оптимизации (1) [20, 21]. Условием применения критерия является равенство периодов нагрузки установок. Визуальное представление критерия на примере группы из трех электроприводов с гармонической нагрузкой с одинаковым значением периода [3] изображено на рис. 1. Каждой точке на графике соответствует набор параметров относительного положения/пути электропривода. Задачей регулятора является выведение группы электроприводов на расчетные параметры, соответствующие минимуму критерия оптимизации (1), за счет регулирования относительного положения/пути электроприводов. На рис. 2 представлено сравнение графиков среднеквадратичного фазного напряжения общей шины питания при моделировании группы из трех установок [3]. Стоит отметить, что с увеличением количества установок в группе растет их влияние на питающую сеть и на уровень просадки напряжения [3].

$$F(P_3 - P_{cp}) \rightarrow \min_{\phi_i^*}, \quad (1)$$

где $P_3 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2}}{n}$ – эффективная (среднеквадратичная) мощность, потребляемая группой электроприводов; $P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}$ – средняя мощность, потребляемая группой электроприводов; p_i – мгновенная электрическая мощность, потребляемая группой электроприводов; n – количество измеренных значений на периоде сигнала мгновенной электрической мощности электропривода регулируемой установки.

Алгоритм, детектирующий точки максимума заданного графика, предлагается использовать для определения фазы и периода диаграмм мощности.

Данные вычисляются на основании координат этих точек. Алгоритм был реализован с применением программного обеспечения LabVIEW и разработанной динамической библиотеки на языке С и проверен на электромеханическом испытательном стенде [20]. Это также позволило отладить механизм внедрения внешних программ в испытательный стенд. Сначала оцениваются периоды диаграмм мощности каждой установки, после чего длительности периодов T_i сравниваются для выбора установки с наибольшей величиной периода. Эта установка принимается базовой, её период – T_1 .

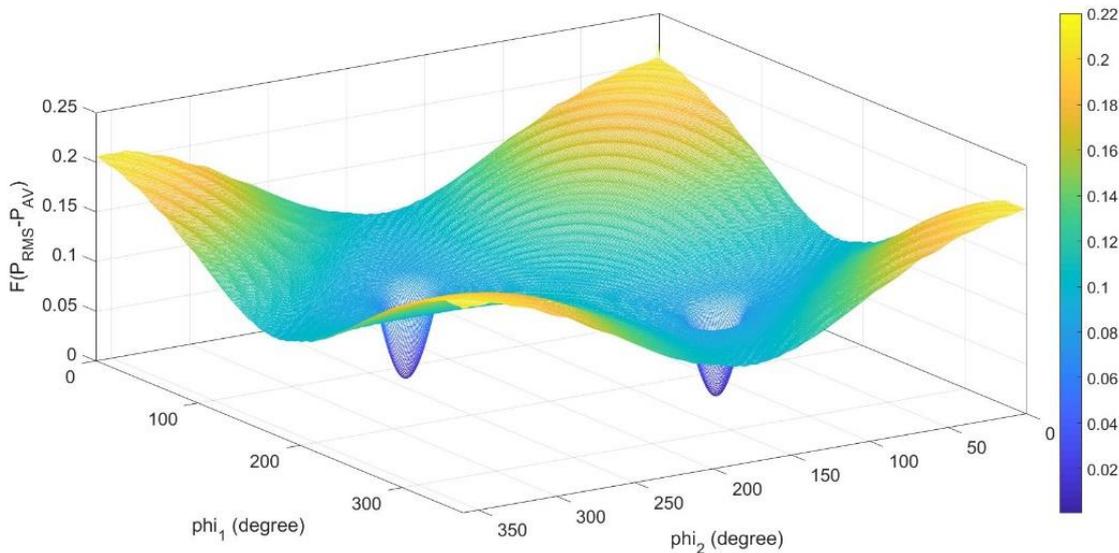


Рис. 1. Визуальное представление критерия оптимизации
Fig. 1. Visual representation of optimization criterion

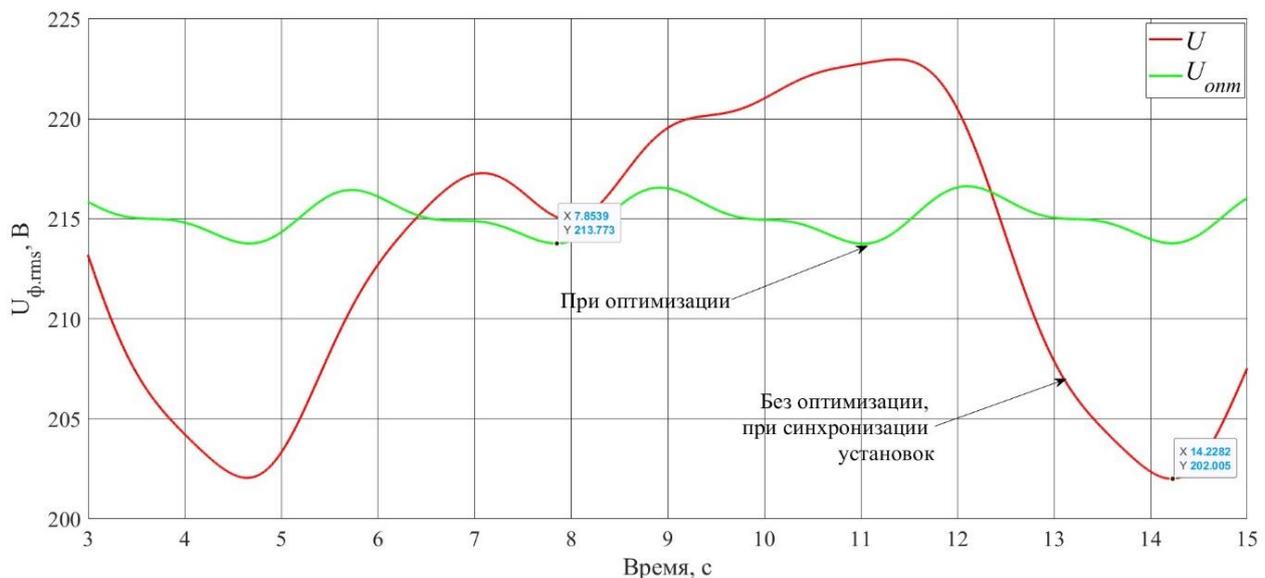


Рис. 2. Сравнение минимальных значений напряжения при оптимизации работы установок и без оптимизации
Fig. 2. Comparison of minimum voltage values when optimizing plant operation and without optimization

На основании длительности периода текущей и базовой установки – T_i и T_1 соответственно, формируется задание на корректировку скорости каждого электропривода (2), (3).

$$\omega_{к.с.i} = \frac{T_i}{T_1}, \quad (2)$$

где T_i – длительность периода сигнала мгновенной электрической мощности электропривода регулируемой установки; T_1 – длительность периода сигнала мгновенной электрической мощности электропривода базовой установки.

Задание на скорость каждого из электроприводов ω_i^{**} определяется по выражению:

$$\omega_i^{**} = \omega_i^* + \omega_{к.с.i}, \quad (3)$$

где ω_i^* – текущее задание скорости электропривода.

После выравнивания периодов всех установок в группе происходит расчет оптимальной фазы каждой установки (1).

После определения значений текущей фазы φ_i и оптимальной фазы φ_i^* для каждой установки происходит формирование сигнала на корректировку фазы $\Delta\varphi_i^*$ с дальнейшим пересчетом в сигнал коррекции текущего углового положения вала электропривода $\Delta\theta_i^*$ (4)–(7).

$$\Delta\theta_i^* = \Delta\varphi_i^* \cdot \frac{T_i}{2\pi} \cdot \omega_i^{**}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_i^*$ – задание на коррекцию фазы:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_i^* = \varphi_i^* - \varphi_i & \text{при } \varphi_i^* \geq \varphi_i; \\ \Delta\varphi_i^* = 2\pi + (\varphi_i^* - \varphi_i) & \text{при } \varphi_i^* < \varphi_i; \\ \Delta\varphi_i^* = 0 & \text{при } \varphi_i^* \cdot (1 + (1 - k_{\varphi, \text{доп}})) \\ & \text{и } \varphi < \varphi^* \cdot k_{\varphi, \text{доп}}, \end{cases} \quad (5)$$

φ_i – текущая фаза регистрируемого сигнала мгновенной электрической мощности; $k_{\varphi, \text{доп}}$ – коэффициент, вводящий диапазон нечувствительности регулятора к несоответствию $\Delta\varphi_i^*$ и φ_i^* .

$$\begin{cases} t_i = \frac{\Delta\theta_i^*}{\omega_i^{***}} & \text{при } \Delta\theta_i^* \geq \theta_{кр.i}; \\ t_i = \sqrt{\frac{\Delta\theta_i^*}{\varepsilon_{зи.i}}} & \text{при } \Delta\theta_i^* < \theta_{кр.i}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\varepsilon_{зи.i}$ – темп задатчика интенсивности скорости электропривода каждой установки; $\theta_{кр.i} = \Delta\omega_{пр.i} \cdot t_{кр.i}$ – минимальное задание на корректировку положения, при котором во время регулирования будет достигнуто значение $\Delta\omega_{пр.i}$ с заданным темпом $\varepsilon_{зи.i}$, где $t_{кр.i} = \frac{\Delta\omega_{пр.i}}{\varepsilon_{зи.i}}$.

$$\omega_i^{***} = \omega_i^{**} + \Delta\omega_{пр.i}, \quad (7)$$

где ω_i^{***} – сигнал задания скорости после дополнительной коррекции.

Моделирование работы регулятора

С помощью программы Matlab/Simulink проводилась оценка эффективности работы регулятора. Использовалась модель группы электроприводов, где каждый электропривод испытывал нагрузку гармонического вида [3, 21]. Моделировалась работа электроприводов с системами управления на основе «П» и «ПИ» регуляторов скорости.

В итоге был использован «ПИ» регулятор, так как он менее чувствителен к колебаниям скорости электропривода.

На рис. 3 представлен процесс регулирования группы ШГНУ, синим цветом обозначен базовый электропривод, зеленым – испытуемый. В качестве задания фазы использовано значение π .

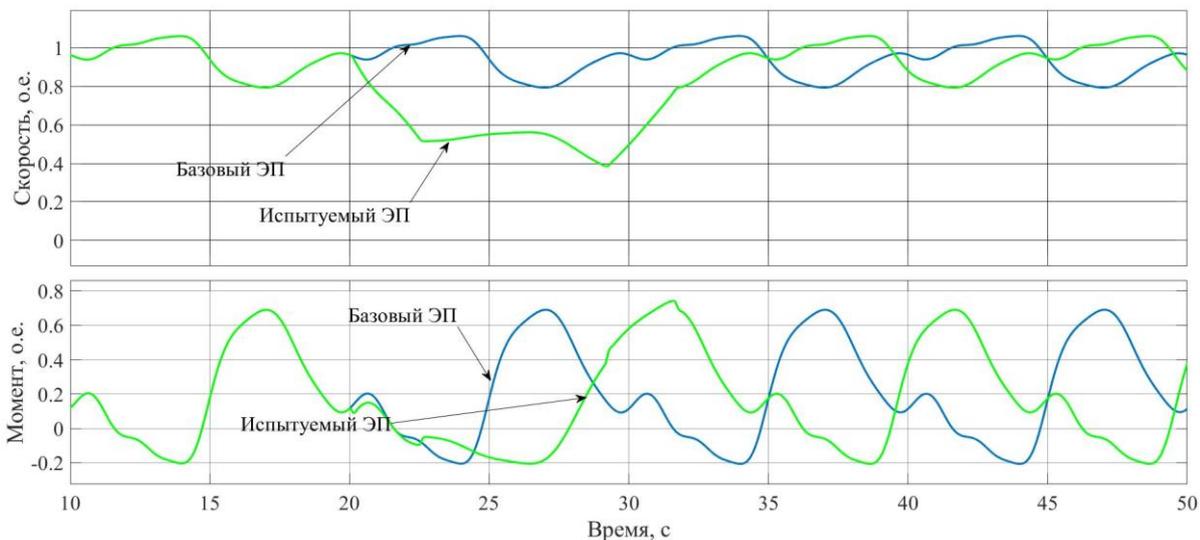


Рис. 3. Процесс регулирования штанговых глубинных насосных установок

Fig. 3. Deep-well sucker rod pumping units regulation

ПК + PCI6221 + LabVIEW

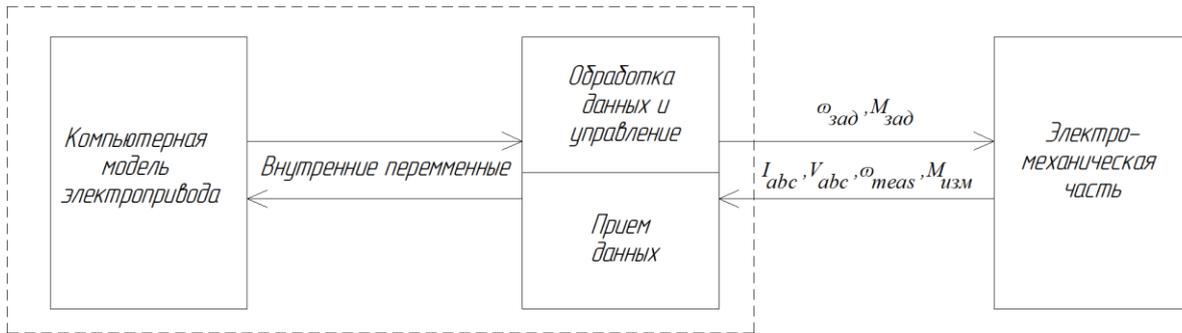


Рис. 4. Структура испытательного стенда

Fig. 4. Test bench structure

Описание испытательного стенда

Электромеханический испытательный стенд, состоящий из преобразователей частоты, электромашинного агрегата, измерительных средств, используемых для анализа электромеханических переменных объекта и системы управления, описан в [20]. На рис. 4 представлена структурная схема испытательного стенда

Здесь $I_{abc}, V_{abc}, \omega_{зад}, M_{зад}$ – измеренные значения тока, напряжения для каждой фазы, скорости и момента, $\omega_{зад}, M_{зад}$ – задание скорости и момента.

Испытательный стенд имеет сравнимый с реальным электроприводом штанговой глубинной насосной установки масштаб мощности – на реальных объектах нефтедобычи используются двигатели мощностью 30 кВт, в составе испытательного стенда применён двигатель мощностью 1,5 кВт. Процесс работы электропривода испытательного стенда регистрируется с помощью датчиков тока, напряжения на входе и выходе преобразователя частоты, датчиков скорости и момента на валу

электродвигателя. Всё это позволяет проводить синтез и отладку системы управления.

Для демонстрации возможности отработки системы управления на испытательном стенде рассмотрено решение задачи синхронизации работы группы электроприводов ШГНУ [3], [19, 20]. В предыдущем разделе представлена система управления, в реальном времени регистрирующая активную мощность всех установок в группе и на основе этих данных контролирующая фазовый сдвиг диаграмм мощности относительно базовой. В качестве базовой, как уже было сказано, выбирается установка, имеющая наибольшую длительность периода в группе.

Испытание работы регулятора

Для оценки возможности построения предлагаемой системы управления группой электроприводов с периодической нагрузкой на испытательном стенде в программе LabVIEW реализована структурная схема регулятора (рис. 5), а также схема управления нагрузочным двигателем.

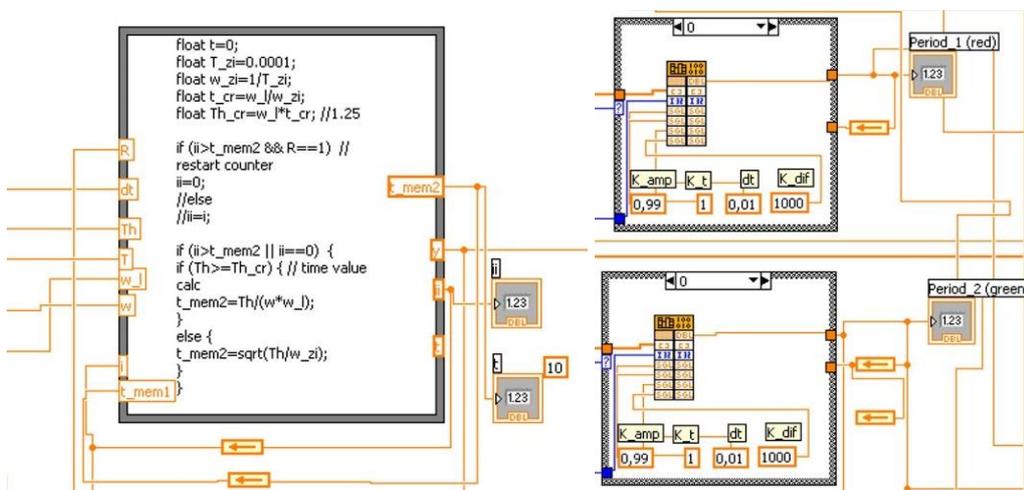


Рис. 5. Структурная схема регуляторов положения (слева) и вычислителя периода (справа), реализованных в программе LabVIEW

Fig. 5. Block diagram of a position controller (left) and a period calculator (right), implemented in the LabVIEW program

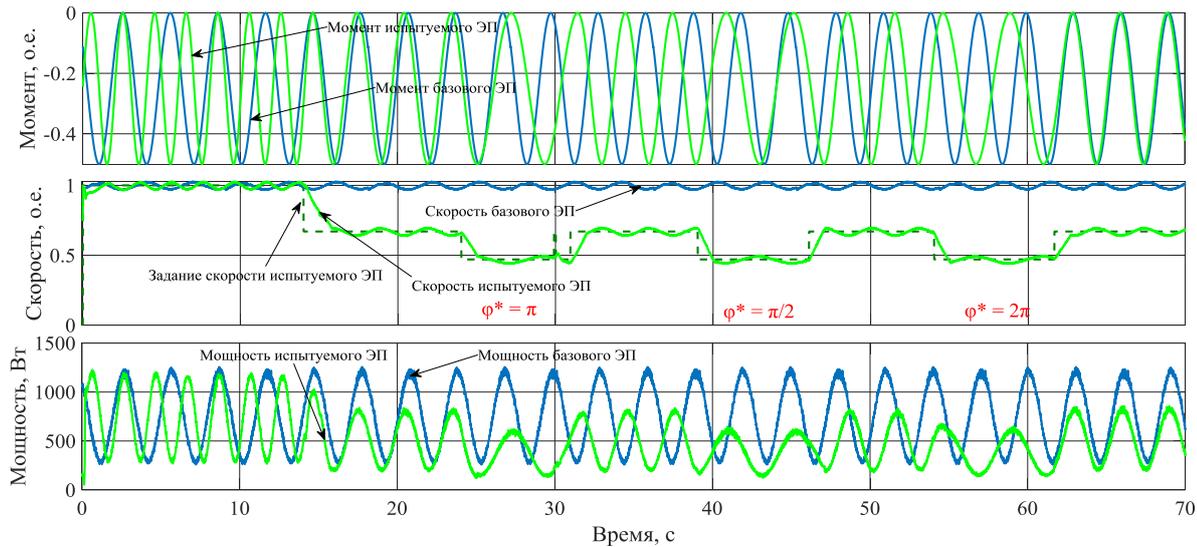


Рис. 6. Графики момента, скорости и мощности при испытании работы регулятора
Fig. 6. Graphs of torque, speed and power when testing the operation of the regulator

В качестве базового электропривода был использован предварительно записанный массив данных работы стенда с гармонической функцией нагрузки с периодом 3 с. Для регулируемого периода была задана начальная длительность периода, равная 2 с. Разница в длительностях периодов обусловлена необходимостью оценки работоспособности блоков определения и регулирования периода. Блок вычисления оптимального фазового сдвига может быть вынесен за границы локальной системы управления, поэтому его работа на испытательном стенде не оценивалась. Для проверки работы блоков вычисления и регулирования фазы и положения в канал управления фазовым сдвигом подавались значения π , $\pi/2$ и 2π . На рис. 6 представлены графики момента и скорости установки при испытании работы регулятора, а также графики мощности.

Как видно из рис. 6, система управления синхронизацией электроприводов работает корректно, с определенным уровнем погрешности, которую можно учесть при рассмотрении дополнительных физических процессов, происходящих в составляющих элементах, а также при использовании двукратно интегрирующего регулятора скорости. На рис. 6 длительность периода базовой установки превышала длительность периода регулируемой в 1,5 раза для большей наглядности. В реальных условиях влияние регулирования на графики мощности будет не таким явным.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило возможность построения системы энергоэффективного управления группой электроприводов ШГНУ, обеспечивающей снижение влияния периодически изменяющейся нагрузки на питающую электрическую сеть путём корректировки текущего углового положения вала каждого электропривода, для достижения расчётной величины оптимальной фазы потребляемой мощности.

На лабораторном стенде проведено испытание системы управления, реализованной в программе LabVIEW с применением собственных динамических библиотек, результаты которого могут быть использованы для расширения функций интеллектуальных станций управления ШГНУ.

Испытания системы управления, поддерживающей оптимальное фазовое соотношение диаграмм мощности электроприводов в группе, показали наличие ошибки при регулировании, которая может быть устранена при использовании двукратно интегрирующего регулятора скорости.

В дальнейшем планируется исследовать работу предлагаемой системы синхронизации в составе группы электроприводов ШГНУ с общим звеном постоянного тока для раскрытия потенциала генераторного режима установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gevorgov L., Kirpichnikova I. Model of solar photovoltaic water pumping system for domestic application // 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED). – Moscow, Russia, 2021. – P. 1–5.
2. Operation modes investigation of cascade pump unit using refining hydraulic network model / M. Pechenik, S. Burian, I. Khudia, M. Pushkar, V. Teriaev // IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, Ukraine, 2022. – P. 249–252.
3. Method of power optimization of a group of independent electric drives with periodic load / A. Ziuzev, A. Nakataev, A. Sesekin, D. Sashchenko, K. Nesterov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). – Yekaterinburg, Russia, 2021. – P. 1–4.

4. Langbauer C., Diengsleder-Lambauer K., Lieschnegg M. Downhole dynamometer sensors for sucker rod pumps // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 21. – № 6. – P. 8543–8552.
5. Asynchronous electric drive power-hardware-in-the-loop system / M. Mudrov, A. Ziuzev, K. Nesterov, S. Valtchev // *17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. – Yekaterinburg, Russia, 2018. – P. 1–5.
6. A modular signal processing platform for grid and motor control, HIL and PHIL applications / B. Schmitz-Rode, L. Stefanski, R. Schwendemann, S. Decker, S. Mersche, P. Kiehle, P. Himmelmann, A. Liske, M. Hiller // *International Power Electronics Conference. ECCE Asia*. – Himeji, Japan, 2022. – P. 1817–1824.
7. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies // *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. – Pitesti, Romania, 2018. – P. 1–8.
8. Rzayev Y., Aliyev M., Rezvan M., Khakimyanov M. Electric energy saving calculation method in the management of sucker-rod pumping units by frequency converters // *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. – Ufa, Russia, 2020. – P. 1–5.
9. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. Technological parameters influence on energy intensity of oil wells pumps // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – Moscow, Russia, 2018. – P. 1–4.
10. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive / N. Ladygin, D.D. Bogachenko, V.V. Kholin, N.A. Ladygin // *27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*. – Moscow, Russia, 2020. – P. 1–4.
11. Yashin A., Khakimyanov M. Wattmeter cards analysis of oil-producing pumps electric drives // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. – Magnitogorsk, Russia, 2021. – P. 455–460.
12. Shafikov M., Khakimyanov M. Assessment of reliability of the electric submersible pump variable frequency drive // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – Sochi, Russia, 2020. – P. 1–5.
13. Yashin A., Konev A., Khakimyanov M. Power supply of the sucker rod pump unit electric drive using renewable energy sources // *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. – Ufa, Russia, 2021. – P. 43–46.
14. Research test results of low voltage electric traction drive for commercial electric vehicle / K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko, R.V. Mironov, B.N. Sidorov, N.S. Volkov // *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. – Moscow, Russia, 2022. – P. 1–6.
15. Review of efficiency measurement standards for wind turbines on nacelle test benches: based on small-scale test benches for electrical machines / N. Yogal, C. Lehrmann, H. Zhang, Z. Song, P. Weidinger, R. Kumme // *24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. – Gyeongju, Republic of Korea, 2021. – P. 48–53.
16. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives // *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. – St. Petersburg, Russia, 2020. – P. 1–5.
17. Model of laboratory test bench setup for testing electrical machines / V. Burenin, J. Zarembo, A. Žiravecka, L. Ribickis // *IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. – Riga, Latvia, 2020. – P. 1–5.
18. Popescu L., Craiu O., Melcescu L. Analyzing the torque transfer between two in-wheel motors of an electric vehicle // *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. – Bucharest, Romania, 2023. – P. 1–6.
19. Concept of the test bench for electrical vehicle propulsion drive data acquisition / A. Rassölkin, V. Rjabtšikov, T. Vaimann, A. Kallaste, V. Kuts // *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. – St. Petersburg, Russia, 2020. – P. 1–8.
20. Способ регулирования потребляемой мгновенной мощности группой электроприводов штанговых глубинных насосных установок: пат. Рос. Федерация № 2797340, С1; заявл. 01.06.2022; опубл. 02.06.2023, Бюл. № 16.
21. Influence of an electric drive with periodic load on voltage quality / A. Ziuzev, A. Nakataev, S. Shelyug, V. Ippolitov // *28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. – Moscow, Russia, 2021. – P. 1–5.

Информация об авторах

Анатолий Михайлович Зюзов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Энергетический институт, Уральский Федеральный университет, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, a.m.zuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Антон Андреевич Накатаев, аспирант, инженер кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Энергетический институт, Уральский Федеральный университет, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, a.a.nakataev@urfu.ru

Константин Евгеньевич Нестеров, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Энергетический институт, Уральский Федеральный университет, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, k.e.nesterov@urfu.ru

Поступила в редакцию: 27.05.2024

Поступила после рецензирования: 11.06.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Gevorkov L., Kirpichnikova I. Model of solar photovoltaic water pumping system for domestic application. *28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. Moscow, Russia, 2021. pp. 1–5.
2. Pechenik M., Burian S., Khudia I., Pushkar M., Teriaiev V. Operation modes investigation of cascade pump unit using refining hydraulic network model. *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2022. pp. 249–252.
3. Ziuzev A., Nakataev A., Sesekin A., Sashchenko D., Nesterov K. Method of power optimization of a group of independent electric drives with periodic load. *XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. Yekaterinburg, Russia, 2021. pp. 1–4.
4. Langbauer C., Diengsleder-Lambauer K., Lieschnegg M. Downhole dynamometer sensors for sucker rod pumps. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 8543–8552.
5. Mudrov M., Ziuzev A., Nesterov K., Valtchev S. Asynchronous electric drive power-hardware-in-the-loop system. *17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. Yekaterinburg, Russia, 2018. pp. 1–5.
6. Schmitz-Rode B., Stefanski L., Schwendemann R., Decker S., Mersche S., Kiehle P., Himmelmann P., Liske A., Hiller M. A modular signal processing platform for grid and motor control, HIL and PHIL applications. *International Power Electronics Conference. ECCE Asia*. Himeji, Japan, 2022. pp. 1817–1824.
7. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies. *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. Pitesti, Romania, 2018. pp. 1–8.
8. Rzayev Y., Aliyev M., Rezvan M., Khakimyanov M. Electric energy saving calculation method in the management of sucker-rod pumping units by frequency converters. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2020. pp. 1–5.
9. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. Technological parameters influence on energy intensity of oil wells pumps. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, 2018. pp. 1–4.
10. Ladygin N., Bogachenko D.D., Kholin V.V., Ladygin N.A. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive. *27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*. Moscow, Russia, 2020. pp. 1–4.
11. Yashin A., Khakimyanov M. Wattmeter cards analysis of oil-producing pumps electric drives. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, Russia, 2021. pp. 455–460.
12. Shafikov M., Khakimyanov M. Assessment of reliability of the electric submersible pump variable frequency drive. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia, 2020. pp. 1–5.
13. Yashin A., Konev A., Khakimyanov M. Power supply of the sucker rod pump unit electric drive using renewable energy sources. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2021. pp. 43–46.
14. Sidorov M., Grishchenko A.G., Mironov R.V., Sidorov B.N., Volkov N.S. Research test results of low voltage electric traction drive for commercial electric vehicle. *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. Moscow, Russia, 2022. pp. 1–6.
15. Yogal N., Lehrmann C., Zhang H., Song Z., Weidinger P., Kumme R. Review of efficiency measurement standards for wind turbines on nacelle test benches: based on small-scale test benches for electrical machines. *24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Gyeongju, Republic of Korea, 2021. pp. 48–53.
16. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives. *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. St. Petersburg, Russia, 2020. pp. 1–5.
17. Burenin V., Zaremba J., Žiravecka A., Ribickis L. Model of laboratory test bench setup for testing electrical machines. *IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga, Latvia, 2020. pp. 1–5.
18. Popescu L., Craiu O., Melcescu L. Analyzing the torque transfer between two in-wheel motors of an electric vehicle. *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania, 2023. pp. 1–6.
19. Rassölkin A., Rjabtšikov V., Vaimann T., Kallaste A., Kuts V. Concept of the test bench for electrical vehicle propulsion drive data acquisition. *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. St. Petersburg, Russia, 2020. pp. 1–8.
20. Ziuzev A.M., Nakataev A.A. *Method for regulating instantaneous power consumption by a group of electric drives of sucker rod pumping units*. Patent RF, no. 2797340, 2022.
21. Ziuzev A., Nakataev A., Shelyug S., Ippolitov V. Influence of an electric drive with periodic load on voltage quality. *28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. Moscow, Russia, 2021. pp. 1–5.

Information about the authors

Anatoliy M. Ziuzev, Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, a.m.zyuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Anton A. Nakataev, Postgraduate Student, Engineer, Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, a.a.nakataev@urfu.ru

Konstantin E. Nesterov, Cand. Sc., Associate Professor, Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, k.e.nesterov@urfu.ru

Received: 27.05.2024

Revised: 11.06.2024

Accepted: 19.03.2025