



Matematik va kompyuter modellashtirish usullaridan foydalanish asosida neft kon mexanizmi elektr yuritmasining barqarorligini tadqiq etish

Miraziz V. Sagatov^{1, a)}, Volodimir A. Fedorchuk²

^{1a)} DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; informtgu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8369-3866>

² DSc, prof., Kamenec-Podolsk milliy universiteti, Kamenec-Podolsk, 32301, Ukraina; <https://orcid.org/0000-0002-3540-0237>

Dolzarbli: Elektromexanik tizimlar mashinasozlik, energetika, foydali qazilmalarni qazib olish, metallurgiya, transport va boshqa sohalarda keng qo'llaniladi. Elektromexanik tizimlarning ishlashi jarayonida sezilarli darajada elektr energiyasi sarflanishi kuzatilgani sababli, uzoq yillardan buyon ularning energetik xususiyatlarini yaxshilash bo'yicha faol ishlar olib borilmoqda. So'nggi yillarda neftni chuqurlik nasoslari yordamida qazib olishda energiya sarfini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, bir tonna qazib olingan neft uchun elektr energiyasining solishtirma sarfi ortgan. Bu holat neft uskunalarining o'ziga xos ishlash sharoitlari bilan bog'liq. Chuqurlik nasos qurilmalari, ya'ni tebratma dastgohlarning elektr yuritmasi og'ir sharoitlarda ishlaydi. Bu sharoitlar uning validagi momentning keng ko'lamda davriy o'zgarishi hamda past kuchlanishli taqsimlash tarmoqlaridagi kuchlanish tebranishlari bilan belgilanadi. Bunday tebranishlar nafaqat elektr yuritmalarning yuklanish xususiyati tufayli, balki parallel ishlaydigan elektr dvigatellar guruhining o'z-o'zidan ishga tushishi paytida kuchlanishning keskin pasayishi yoki tarmoqdagi qisqa tutashuvlar natijasida ham yuzaga keladi. Shunday qilib, elektromexanik tizimlarni loyihalash, qurish, ish rejimlarini o'rganish, sinovdan o'tkazish va sozlash vazifalari murakkab jarayon hisoblanadi. Ushbu sohada sezilarli yutuqlarga erishilganiga qaramay, bu masalalarni kompyuter modellashtirish yordamida samarali hal yetish usullari va vositalarini yaratish dolzarb muammo bo'lib qolmoqda va hali to'liq yechimini topmagan.

Maqsad: neft kon mexanizmi elektr yuritmasining barqarorligini tadqiq etish uchun matematik va kompyuter modellashtirish usullarini qo'llanishini taxlil qilish va asoslash.

Usullari: matematik va kompyuterli modellashtirish usullari hamda avtomatik boshqaruv nazariyasi elementlari.

Natijalar: Kompyuter modellashtirish dasturiy vositalaridan foydalangan holda matematik modellashtirish usuli qo'llanilib, elektr yuritmaning barqaror ishlashini tadqiq qilish masalasi ko'rib chiqildi. Bu yasa neft qazib olish elektr uskunalarida tashqi magnit o'tkazgichli va tirmoqsimon qutbli rotorga yega bo'lgan kontaktsiz sinxron elektr dvigatellardan foydalanish maqsadga muvofiq ekanligi haqida xulosa chiqarish imkonini berdi.

Kalit so'zlar: matematik va kompyuter modellashtirish; sinxron va asinxron elektr motorlari; neft kon mexanizmi; barqarorlik; tebratma dastgohlar; elektr yuritmasi; chuqurlik nasos qurilmalari.

For citation: Sagatov M.V., Fedorchuk V.A. Study of the stability of the electric drive of the oil field mechanism based on the use of mathematical and computer modeling methods. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 3, pp. 250-258.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17010726>

Received: 7.02.2025
Revised: 18.05.2025
Accepted: 20.07.2025
Published: 23.08.2025

Copyright: © Miraziz V. Sagatov, Volodymyr A. Fedorchuk, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Исследование устойчивости электропривода нефтепромыслового механизма на основе использования методов математического и компьютерного моделирования

Миразиз В. Сагатов^{1, a)}, Володимир А. Федорчук²

^{1a)} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; informtgu@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8369-3866>

² DSc, проф., Каменец-Подольский национальный университет, Каменец-Подольск, 32301, Украина; <https://orcid.org/0000-0002-3540-0237>

Актуальность: Электромеханические системы широко используются в машиностроении, энергетике, при добыче полезных ископаемых, в металлургии, на транспорте и т.д. Поскольку во время функционирования электромеханических систем наблюдается значительное потребление электроэнергии, в течение многих лет интенсивно ведутся работы по улучшению их энергетических характеристик. Анализ энергопотребления при глубиннонасосной добыче нефти за последние годы показывает рост удельных расходов электроэнергии на 1 тонну добытой нефти. Это связано со спецификой условий работы нефтяного оборудования. Электропривод глубинных насосных установок, т.е. станков-качалок, работает в тяжелых условиях, обусловленных периодическими изменениями момента на его валу в широком диапазоне, а также колебаниям напряжения в низковольтных распределительных сетях. Эти колебания вызваны не только характером нагрузки электроприводов, но и резкими снижениями напряжения при самозапуске группы параллельно работающих электродвигателей или короткими замыканиями в сети. Таким образом, задачи проектирования, построения, исследования режимов, испытания и отладки электромеханических систем являются трудоемкими, а создание методов и средств эффективного их решения с помощью



компьютерного моделирования представляет собой актуальную проблему, решенную далеко не в полной мере, несмотря на значительные достижения в этой области исследований.

Цель: анализ и обоснование использования методов математического и компьютерного моделирования для исследования устойчивости электропривода нефтепромыслового механизма.

Методы: методы математического и компьютерного моделирования и элементы теории автоматического управления.

Результаты: Используя метод математического моделирования с использованием программных средств компьютерного моделирования рассмотрена задача исследования устойчивости работы электропривода, что позволило сделать вывод об использовании в электрооборудовании нефтедобычи бесконтактных синхронных электродвигателей с внешними магнитопроводами и ротором с когтеобразными полюсами.

Ключевые слова: математическое и компьютерное моделирование; синхронные и асинхронные электродвигатели; нефтепромысловый механизм; устойчивость; станки-качалки; электропривод; глубиннонасосные установки.

Study of the stability of the electric drive of the oil field mechanism based on the use of mathematical and computer modeling methods

Miraziz V. Sagatov^{1,a)}, Volodymyr A. Fedorchuk²

^{1,a)} DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; infortgtu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8369-3866>

² DSc, prof., Kamianets-Podilskyi National University, Kamianets-Podilskyi, 32301, Ukraine;
<https://orcid.org/0000-0002-3540-0237>

Relevance: Electromechanical systems are widely used in mechanical engineering, power engineering, mining, metallurgy, transport, etc. Since significant power consumption is observed during the operation of electromechanical systems, intensive work has been carried out for many years to improve their energy characteristics. Analysis of energy consumption in deep-well pumping of oil in recent years shows an increase in specific energy consumption per 1 ton of extracted oil. This is due to the specific operating conditions of oil equipment. The electric drive of deep-well pumping units, i.e. pumping units, operates under difficult conditions due to periodic changes in the torque on its shaft over a wide range, as well as voltage fluctuations in low-voltage distribution networks. These fluctuations are caused not only by the nature of the load of the electric drives, but also by sharp drops in voltage during self-starting of a group of parallel-operating electric motors or short circuits in the network. Thus, the tasks of designing, constructing, studying modes, testing and debugging electromechanical systems are labor-intensive, and the creation of methods and means for their effective solution using computer modeling is a pressing problem that has not been fully solved, despite significant achievements in this area of research.

Aim: analysis and justification of the use of mathematical and computer modeling methods to study the stability of the electric drive of an oil field mechanism.

Methods: methods of mathematical and computer modeling and elements of automatic control theory.

Results: Using the method of mathematical modeling with the use of computer modeling software, the problem of studying the stability of the electric drive was considered, which allowed us to draw a conclusion about the use of contactless synchronous electric motors with external magnetic circuits and a rotor with claw poles in oil production electrical equipment.

Keywords: mathematical and computer modeling; synchronous and asynchronous electric motors; oil field mechanism; stability; pumping units; electric drive; deep-well pumping units.

1. Введение (Introduction)

Среди современных технических средств промышленного, энергетического и транспортного назначения важная роль отводится электромеханическим системам. Уровень компьютеризации современных электромеханических объектов в некоторых отраслях настолько высок, что для эффективного решения комплекса задач управления, контроля и диагностики возникает необходимость создания сложных информационно-коммуникационных систем и, соответственно, обеспечение их безопасности. [1, 2, 3, 4, 5]

В настоящее время в электроприводах глубинных насосных установок используются в основном асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Характер нагрузки на валу глубинных насосных установок влияет на электрические показатели и качество напряжения на контактах асинхронного электродвигателя. Момент на валу асинхронного электродвигателя глубинных насосных установок меняется циклически от значений, близких к моменту холостого хода, к перегрузкам в 1,5 — 1,8 раз больше номинальной нагрузки с частотой 4 — 15 циклов в минуту. Расхождение по фазе и частоте циклической нагрузки для большого количества глубинных насосных установок приводит к тому, что напряжение асинхронного электродвигателя пульсирует по сложному закону, ухудшая энергетические показатели работы асинхронного электродвигателя глубинных насосных установок. Пульсации напряжения достигают до 15% от



номинального значения, а колебания и кратковременные понижения напряжения при коротких замыканиях могут достигать 40% в течении 0,2 — 4 с. В связи с этим, в системах электроснабжения и в электрооборудовании нефтедобычи имеют место повышенные потери электроэнергии, установка электродвигателей завышенных мощностей и другие негативные явления. [6, 7]

Одним из путей снижения потерь электроэнергии на нефтепромыслах является использование в части станков-качалок бесконтактных синхронных электродвигателей с внешним магнитопроводом и ротором с когтеобразными полюсами. Такие электродвигатели, работая с коэффициентом мощности $\cos\varphi$ близким к единице, разгружают нефтепромысловые сети от реактивной мощности снижая величину потерь активной мощности и повышают качество электроснабжения. Для нормальной работы синхронного электродвигателя необходимо обеспечить необходимый запас устойчивости при снижении напряжения питания и циклическом моменте на его валу. Поэтому, при расчетах и проектировании как отдельных узлов, так и всей системы электропривода в целом, необходимо проводить исследование его динамической устойчивости. [8, 9, 10, 11, 12]

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Для решения задачи исследования статической и динамической устойчивости электромеханических систем существует ряд методов. В случае, когда задача исследования устойчивости электропривода решается при одновременном изменении нагрузки, напряжения, тока возбуждения и т.д., одним из эффективных приемов исследования устойчивости работы электроприводов являются методы и средства математического и компьютерного моделирования. [13, 14, 15, 16]

Существующие распространенные программные средства компьютерного моделирования характеризуются определенными возможностями для реализации структурно-ориентированного подхода. В частности, представителем таких средств является пакет MatLab / Simulink. Однако его применение требует значительной предварительной подготовки задачи моделирования, которая заключается в создании соответствующих алгоритмов для дополнения набора функциональных блоков новыми, в том числе альтернативными, позволяющими обеспечить возможность эффективно решать поставленные задачи. Анализ существующих программных средств компьютерного моделирования показывает, что без доработки их трудно применять для решения многих видов конкретных задач. Именно предоставление пользователю возможности использования различных видов математических моделей для структурных элементов моделируемой системы и подбора эффективных алгоритмов для их компьютерной реализации позволит в целом повысить эффективность решения задач моделирования.

Математическое описание синхронного электродвигателя осуществляется системой нелинейных дифференциальных уравнений Парка-Горева, которые с учетом автоматического регулятора тока, механической части и линии электропередач имеет следующий вид (в относительных единицах).

Уравнение равновесия напряжения в контурах статора и ротора

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_d(1+S) + r_s i_d; \\ U_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_q(1+S) + r_s i_q; \end{cases} \quad (1)$$

$$U_B = \frac{d\psi_B}{dt} + r_B i_B; \quad (2)$$

$$-\frac{d\psi_D}{dt} = -r_D i_D; \quad (3)$$

$$-\frac{d\psi_Q}{dt} = -r_Q i_Q, \quad (4)$$

где U_d, U_q — напряжения на контактах электродвигателя по осям d и q , U_B — напряжение возбуждения; δ — электрический угол машины; S — скольжение; $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_D, \Psi_B, \Psi_Q$ — потокосцепления статорных обмоток, обмотки возбуждения и демпферных обмоток соответственно; i_d, i_q — ток статора по осям d и q ; i_B — ток обмотки возбуждения; i_D, i_Q — токи демпферных обмоток; r_s, r_B, r_D, r_Q — величины сопротивления статорной обмотки, обмотки возбуждения и демпферных обмоток.

Уравнение потокосцеплений:



$$\begin{cases} \psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_B + x_{ad} i_D; \\ \psi_B = x_B i_B + x_{ad} i_d + x_{ad} i_D; \\ \psi_D = x_D i_D + x_{ad} i_d + x_{ad} i_B, \end{cases} \quad (5)$$

где x_d, x_q — индуктивные сопротивления демферных обмоток по осям d и q ; x_B — индуктивное сопротивление обмотки возбуждения.

Уравнения регулятора возбуждения:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \quad (6)$$

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad (7)$$

$$U_B = (K_U U + K_I I) K_B r_B, \quad (8)$$

где K_U, K_I — коэффициенты регулирования; I — ток статора; U — напряжение на электродвигателе; K_B — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления.

Уравнение равновесия напряжения линии питания:

$$U_{cd} = U_c \sin \delta; \quad U_{cq} = U_c \cos \delta; \quad (9)$$

$$\begin{cases} U_d = U_{cd} - x_1 \frac{di_d}{dt} - r_1 i_d + x_1 i_q (1 + S); \\ U_q = U_{cq} - x_1 \frac{di_q}{dt} - r_1 i_q + x_1 i_d (1 + S), \end{cases} \quad (10)$$

где U_c — напряжение сети, U_{cd}, U_{cq} — напряжение линии питания по осям d и q ; r_1, x_1 — активное и индуктивное сопротивление линии питания соответственно.

Уравнения электромагнитного момента:

$$M_M = x_q i_q i_d - (x_d i_d + x_{ad} i_B) i_q. \quad (11)$$

Уравнения равновесия моментов на валу двигателя:

$$T_J \frac{dS}{dt} = M_T - M_M; \quad (12)$$

$$S = \frac{d\delta}{dt}; \quad (13)$$

$$M_T = M_{T_{cp}} + M_a \sin(\Omega t + \beta), \quad (14)$$

где T — механическая постоянная времени приводных масс двигателя и нефтепромыслового механизма; M_T — момент сопротивления на валу двигателя; M_a — амплитуда переменной составляющей момента; $M_{T_{cp}}$ — среднее значение момента сопротивления; Ω — угловая частота изменения момента; β — начальная фаза.

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Для удобства, при синтезе модели, проведем некоторые преобразования.

Решив систему уравнений (5), получим выражения для токов:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\psi_d x_B x_D + x_{ad}^2 (\psi_D + \psi_B - \psi_d) - x_{ad} (\psi_D x_B + \psi_B x_D)}{x_d x_B x_D + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2 (x_B + x_d + x_D)}; \\ i_B = \frac{\psi_B x_d x_D + x_{ad}^2 (\psi_d + \psi_D - \psi_B) - x_{ad} (\psi_D x_d + x_D \psi_d)}{x_d x_B x_D + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2 (x_B + x_d + x_D)}; \\ i_D = \frac{x_d x_B \psi_D + x_{ad}^2 (\psi_B + \psi_d - \psi_D) - x_{ad} (x_B \psi_d + \psi_B x_d)}{x_d x_B x_D + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2 (x_B + x_d + x_D)}, \end{cases} \quad (15)$$



$$\begin{cases} i_Q = \frac{\Psi_q x_{aq} - \Psi_Q x_q}{x_{aq}^2 - x_Q x_q}; \\ i_q = \frac{x_{ad} \Psi_Q - x_Q \Psi_q}{x_{aq}^2 - x_Q x_q}. \end{cases} \quad (16)$$

Начальные значения переменных целесообразно задавать в точках перегиба нагрузочной кривой, то есть в точках, где производные угла скольжения и тока демпферных контуров близки к нулевым значениям. Расчет начальных условий при постоянном режиме вычисляется путем решения системы уравнений:

$$U_d = U_c \sin \delta; \quad U_q = U_c \cos \delta; \quad (17)$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \quad (18)$$

$$\begin{cases} i_d = \frac{r_s U_d + x_q (U_q - x_{ad} i_B)}{x_d x_q + r_s^2}; \\ i_q = \frac{r_s (U_q - x_{ad} i_B) - x_d U_d}{x_d x_q + r_s^2}, \end{cases} \quad (19)$$

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad (20)$$

$$i_B = (K_U U + K_I I) K_B, \quad (21)$$

$$\begin{cases} U_{cd} = U_d - r_1 i_d + x_1 i_q; \\ U_{cq} = U_q - r_1 i_q + x_1 i_d, \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_B; \\ \Psi_q = x_q i_q, \end{cases} \quad (23)$$

$$M_M = X_q i_q i_d - (X_d i_d + X_{ad} i_B) i_q, \quad (24)$$

$$M_T = M_M, \quad (25)$$

где начальные значения потокосцепления и потоков демпферных контуров, а также скольжение принимаются равными нулю.

Исходя из уравнений (1)–(4), (6)–(16), получаем структурную схему модели электропривода, которая изображена на рис. 1, где нумерация структурных блоков соответствует нумерации справа от точки реализуемых ими зависимостей. Аналогично из системы уравнений (17)–(25) получаем структурную схему блока вычисления начальных условий, изображенную на рис. 2.

Для электропривода на основе синхронного двигателя СМ-72-4 параметры уравнений имеют следующие значения: $r_s = 0,035$; $r_D = r_Q = 0,041$; $r_B = 0,009$; $x_q = 0,61$; $x_d = 1,12$; $x_{ad} = x_{aq} = 1,01$; $x_B = 0,042$; $x_Q = 0,053$; $x_D = 1,3$; $K_B = 1$; $T_j = 4$.

Исследования проводились для трех случаев удаленности от точки электропитания, то есть для трех значений сопротивления линии электропередачи ($r_\ell = 0$; $r_\ell = r_s$; $r_\ell = 2r_s$), и в каждом случае для трех значений частоты смены тормозного момента на валу ($\Omega_1 = 0,15$ Гц; $\Omega_2 = 0,25$ Гц; $\Omega_3 = 0,35$ Гц).

Запас устойчивости определяется выражением:

$$K = \frac{M_k - M_p}{M_p},$$

где M_k и M_p соответственно критическое и номинальное значение момента на валу электродвигателя.

Для нахождения границы устойчивости применялся метод режима постепенного нагружения, которое может осуществляться путем изменения как одного из параметров, так и одновременным изменением нескольких из них.

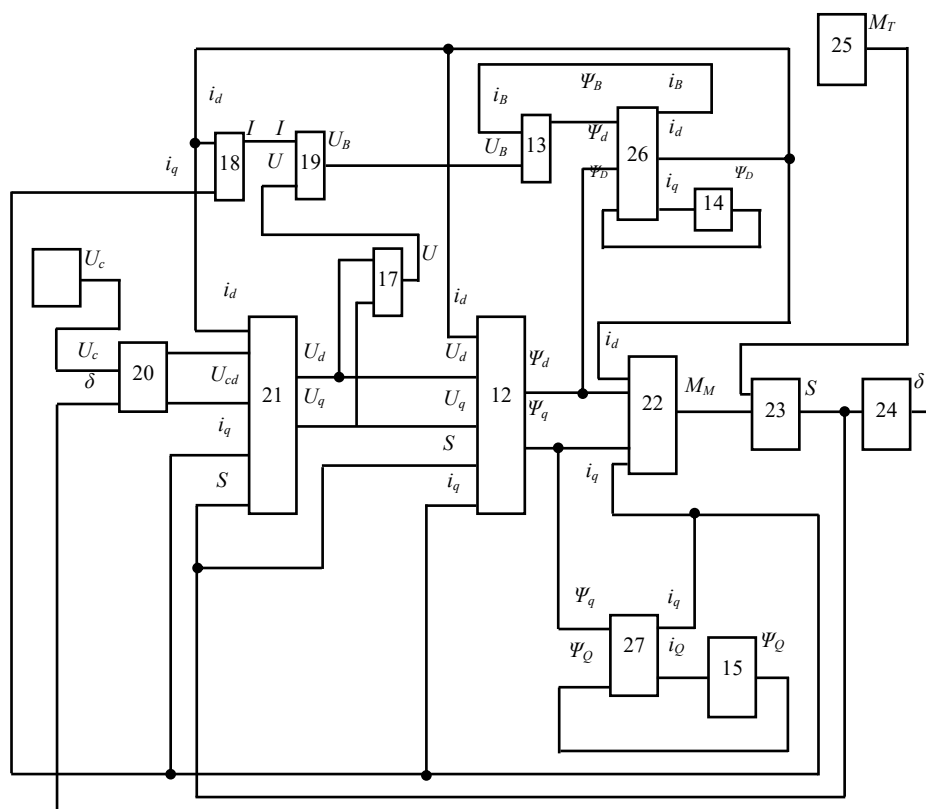


Рис. 1. Simulink-модель электропривода

Fig. 1. Simulink model of electric drive

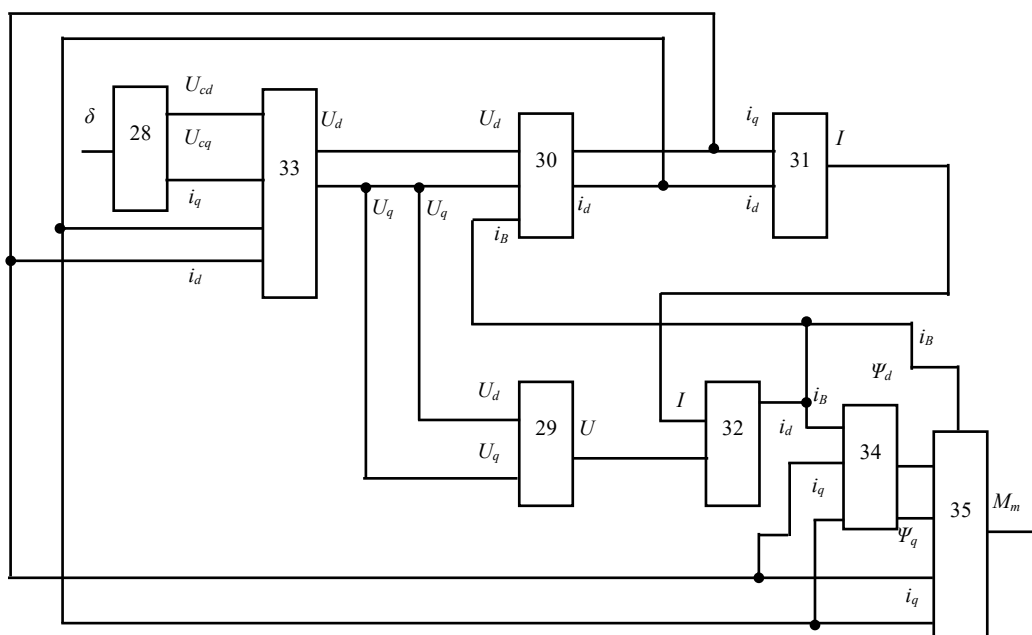


Рис. 2. Simulink-модель блока вычисления начальных условий.

Fig. 2. Simulink model of the initial condition calculation block.

Исследования показали, что запас устойчивости синхронного двигателя снижается с ростом частоты изменения момента на его валу, а также по мере удаления двигателя от центра питания. Однако, даже для быстроходных станков-качалок ($\Omega = 0,35$ Гц) в случае удаленного двигателя $r_f = 2r_s$ и при 20% пульсациях напряжения с частотой, близкой к Ω запас устойчивости составляет 0,15. На рис. 3 представлены результаты моделирования синхронного электродвигателя при кратковременном 30% снижении (0,5 с) напряжения питания сети.

Также было проведено исследование зависимости точности воспроизведения основных свойств объекта от внесения в модель упрощающих изменений, например, если пренебрегать влиянием демпферных обмоток электродвигателя, то точность модели снижается на 9,9%.

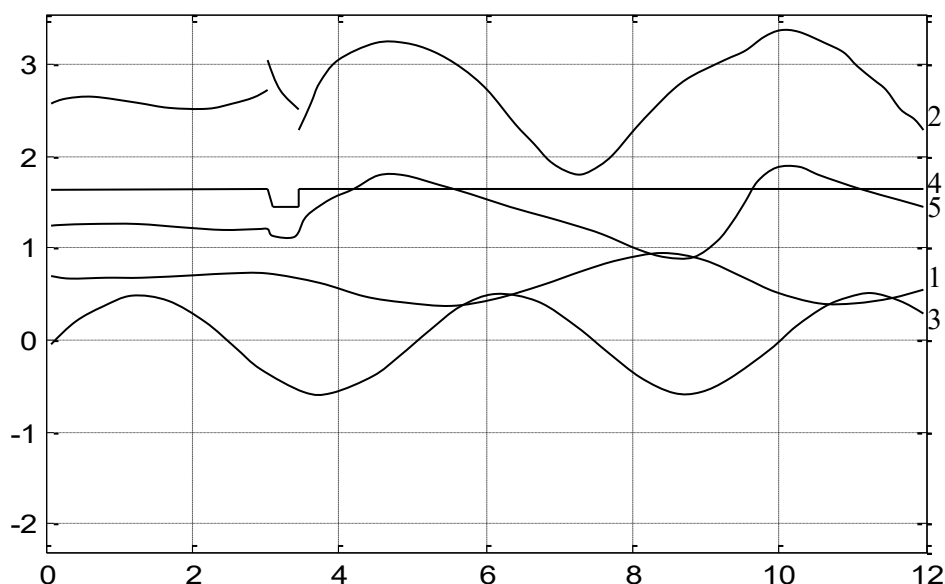


Рис. 3. Изменение параметров синхронного электродвигателя при кратковременном снижении напряжения питания сети (1 – δ ; 2 – I ; 3 – M_T ; 4 – U_c ; 5 – i_q)

Fig. 3. Changing the parameters of a synchronous electric motor during a short-term decrease in the supply voltage of the network (1 – δ ; 2 – I ; 3 – M_T ; 4 – U_c ; 5 – i_q)

4. Заключение (Conclusion)

Таким образом на основе алгоритмов моделирования и программных средств решена задача исследования устойчивости электропривода нефтепромыслового механизма. Результаты исследований подтверждают целесообразность использования в электроприводах глубинных насосных установок бесконтактных синхронных электродвигателей с внешними магнитопроводами и ротором с когтеобразными полюсами.

Реализация методов, рассмотренных в работе, позволяет решать практически важные задачи в области анализа и проектирования управляемых электромеханических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ф.Верлань, М.В. Сагатов, У.С.Файзуллаев. Анализ и контроль точности процесса моделирования сложных электромеханических систем. Технические науки и инновация 1/2019 32-38 стр.
2. Моделирование электромеханических систем: Учебник / А. П. Черный, А. В. Луговой, Г. Ю. Сисюк, Д. И. Родькин и др. - Кременчуг, 2001. - 376 с.
3. А.Ф.Верлань, Сагатов М.В. Методы математического и компьютерного моделирования электромеханических объектов на основе интегральных уравнений. Сборник научных статей международной научно-практической конференции по теме «Применение современных информационно коммуникационных технологий в проведении реформ в новом Узбекистане». 27-29 октябрь, 2021 год Андижан, Узбекистан, стр 15-17.
4. V.A. Fedorchuk, F.M. Sagatova. Method for simplification of mathematical models of electro-mechanical systems. International scientific and technical conference "Topical issues of energy efficiency of automated electro-mechanical and electrotechnological systems", May 25-26, 2023, 70-73 pp.
5. Бенькович Е. С. Практическое моделирование сложных динамических систем / Е. С. Бенькович, Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков — СПб. : БХВ, 2001. — 401 с.
6. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации / [М. П. Белов, О. И. Зементов, А. Е. Козярук и др.] ; под ред. В. А. Новикова, Л. М. Чернигова. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 368 с.
7. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. — Екатеринбург. : УРО РАН, 2000. — 654 с.
8. М.В. Сагатов, О.А.Сытник. Вопросы использования временного метода исследования линейных воспроизводящих систем для оценки динамических свойств приборов магнитоэлектрических систем. Проблемы энерго-и ресурсосбережения, 4(4) 2024, 164–175. <https://energy.i-edu.uz/index.php/journal/article/view/119>



9. Абубакиров В.Ф. Буровое оборудование : Справочник : В 2 т. — Т 2. Буровой инструмент / [В. Ф. Абубакиров, Ю. Г. Буримов, А. Н. Гноевых и др.]. — М. : Недра, 2003. — 494 с.
10. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.—Л. : Высш. шк., 1985. — 536 с.
11. Sagatov M.V., Anatoliyovych, F.V Issues of Modeling Drilling Rigs and the Drilling Process. In: Aliev, R.A., et al. 12th World Conference “Intelligent System for Industrial Automation” (WCIS-2022). WCIS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 912. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_39
12. Сагатов М.В. Задача моделирования буровой установки. РИСКИ, ВЫЗОВЫ И ПРОБЛЕМЫ XXI ВЕКА В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РАЦИОНАЛЬНОГО И БЕЗОПАСНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ. Международная научно-техническая конференция – Ташкент, ТашГТУ, 2022 г., 218-222 стр
13. Верлань А.Ф. Методы компьютерного моделирования. А.Ф. Верлань и др. К.:Наук. Думка, 1992, 256 с.
14. Giurgiutiu V. Micromechanics: Modeling, Analysis, and Design with MATLAB : second edition / V.Giurgiutiu, S. E. Lyshevski. — Boca Raton - London - New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. — 950 p.
15. Marghitsu D. B. Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB / D. B. Marghitsu. — London : Springer-Verlag London Limited, 2009. — 480 p.
16. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / М.: Физматлит, 2005. 320 с.

REFERENCES

1. A.F. Verlan, M.V. Sagatov, U.S. Fayzullaev. Analysis and accuracy control of the modeling process of complex electromechanical systems. Technical sciences and innovation 1/2019 32-38 pp. *(in Russian)*
2. Modeling of electromechanical systems: Textbook / A.P. Cherny, A.V. Lugovoy, G.Yu. Sisyuk, D.I. Rodkin et al. - Kremenchug, 2001. - 376 p. *(in Russian)*
3. A.F. Verlan, M.V. Sagatov. Methods of mathematical and computer modeling of electromechanical objects based on integral equations. Collection of scientific articles of the international scientific and practical conference on the topic "Application of modern information and communication technologies in implementing reforms in the new Uzbekistan." October 27-29, 2021 Andijan, Uzbekistan, pp. 15-17. *(in Russian)*
4. V.A. Fedorchuk, F.M. Sagatova. Method for simplification of mathematical models of electromechanical systems. International scientific and technical conference "Topical issues of energy efficiency of automated electro-mechanical and electrotechnological systems", May 25-26, 2023, 70-73 pp.
5. Benkovich E.S. Practical modeling of complex dynamic systems / E.S. Benkovich, Yu.B. Kolesov, Yu.B. Senichenkov - St. Petersburg: BHV, 2001. - 401 p. *(in Russian)*
6. Engineering of electric drives and automation systems / [M.P. Belov, O.I. Zementov, A.E. Kozyaruk et al.]; edited by V.A. Novikov, L.M. Chernigov. — М. : Publishing Center "Academy", 2006. — 368 p. *(in Russian)*
7. Shreiner R. T. Mathematical Modeling of AC Electric Drives with Semiconductor Frequency Converters / R. T. Shreiner. — Ekaterinburg. : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. — 654 p. *(in Russian)*
8. M. V. Sagatov, O. A. Sytnik. Issues of Using the Time Method for Studying Linear Reproducing Systems to Assess the Dynamic Properties of Magnetolectric System Devices. Problems of energy and resource saving, 4(4) 2024, 164–175. <https://energy.i-edu.uz/index.php/journal/article/view/119> *(in Russian)*
9. Abubakirov V.F. Drilling equipment: Handbook: In 2 volumes. — Volume 2. Drilling tool / [V.F. Abubakirov, Yu.G. Burimov, A.N. Gnoevykh, et al.]. — Moscow: Nedra, 2003. — 494 p. *(in Russian)*
10. Venikov V.A. Transient electromechanical processes in electrical systems. — Moscow—Leningrad: Higher. school, 1985. — 536 p. *(in Russian)*
11. Sagatov M.V., Anatoliyovych, F.V Issues of Modeling Drilling Rigs and the Drilling Process. In: Aliev, R.A., et al. 12th World Conference “Intelligent System for Industrial Automation” (WCIS-2022). WCIS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 912. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_39
12. Sagatov M.V. The problem of modeling a drilling rig. RISKS, CHALLENGES AND PROBLEMS OF THE XXI CENTURY IN DIGITAL TRANSFORMATION OF RATIONAL AND SAFE SUBSOIL MANAGEMENT. International Scientific and Technical Conference - Tashkent, TashSTU, 2022, pp. 218-222. *(in Russian)*
13. Verlan A.F. Methods of computer modeling. A.F. Verlan et al. K.: Nauk. Dum-ka, 1992, 256 p. *(in Russian)*



14. Giurgiutiu V. Micromechatronics: Modeling, Analysis, and Design with MATLAB : second edition / V.Giurgiutiu, S. E. Lyshevski. — Boca Raton - London - New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. — 950 p.
15. Marghitu D. B. Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB / D. B. Marghitu. — London : Springer-Verlag London Limited, 2009. — 480 p.
16. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples / Moscow: Fizmatlit, 2005. 320 p. (*in Russian*)