

УДК 621.3.078.4

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ПОДАЧИ ДОЛОТА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

О.В. Никулин¹, В.А. Шабанов²

¹ООО «Управляющая компания «Татбурнефт», г. Альметьевск, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа,
Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4288-2473>, oleg309@yandex.ru

Резюме: В статье рассмотрена возможность использования электродвигателя постоянного тока буровой лебедки и ферропорошкового тормоза в качестве активного регулятора подачи долота. Представлена динамическая математическая модель электродвигателя постоянного тока. Описана система управления электроприводом буровой лебедки. Разработана компьютерная модель в среде Simulink электродвигателя постоянного тока, его системы управления, ферропорошкового тормоза и колонны бурильных труб. При этом колонна бурильных труб представлена в виде пружины, жесткость и сила сжатия которой равны жесткости и весу реальной колонны. Приведены результаты моделирования электропривода буровой лебедки в режиме подъема колонны бурильных труб и в режиме подачи долота.

Ключевые слова: математическая модель, электропривод постоянного тока, ферропорошковый тормоз, регулятор подачи долота, колонна бурильных труб, буровая лебедка, Simulink-модель, система управления.

COMPUTER SIMULATION OF A DRILLING BIT FEED RATE REGULATOR COMPRISING OF A DC MOTOR

O.V. Nikulin¹, V.A. Shabanov²

¹Management Company Tatburneft, LLC Almetievsk, Russia

²Ufa state petroleum technological University, Ufa, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4288-2473>, oleg309@yandex.ru

Abstract: This paper considers the possibility of applying a drawworks DC motor and a magnetic powder brake as an active bit feed rate regulator. A dynamic mathematical model of the DC motor is presented. The drawworks electric drive control system is described. A computer simulation model of the DC motor, its control system, the magnetic power brake, and the drill string has been developed with Simulink environment. The drill string is modeled as a spring element with stiffness and compression force being equal to the stiffness and dead weight of an actual drill string. The results from the simulation of a drawworks electric drive operating in a drill string lift mode and in a bit feed mode are presented.

Keywords: simulation model, DC electric drive, magnetic powder brake, drilling bit feed rate regulator, drill string, drawworks, Simulink model, control system

Введение.

Бурение скважин на нефть представляет собой сложный энергоемкий технологический процесс, в основе которого разрушение породы и выполнение спускоподъемных операций. Снижение расхода электроэнергии и повышение скорости проходки скважины во многом зависит от учета особенностей разбуриваемой породы [1–3]. Поэтому в условиях современных требований к качеству строительства скважин много внимания уделяется исследованию процессов бурения и разработке схем управления с целью автоматического поддержания постоянства осевой нагрузки на долото [4–8]. Для ЭП промышленных механизмов все шире применяется частотно-регулируемый электропривод переменного тока [9–11]. Однако в бурении до сих пор широко используется электропривод механизмов буровых установок на постоянном токе. Такие электроприводы имеют широкий диапазон регулирования, высокий КПД и значительно меньше создают помех для питающей электрической сети. Разработке систем управления электроприводов постоянного тока много внимания уделяется как в нашей стране, так и за рубежом [12–16]. В ООО «УК «Татбурнефть» широко используются буровые установки БУ-2000/125ЭП, БУ-2900/175ЭП, электропривод буровых лебедок которых выполнен на основе электродвигателя постоянного тока [17]. Для регулирования скорости спуска колонны бурильных труб (КБТ) используется ферропорошковый тормоз. Тормозной момент при этом выставляется оператором вручную на пульте бурильщика. Так как момент тормоза постоянный, нагрузка на долото также остается постоянной [18]. Автоматическое регулирование скорости спуска в зависимости от веса на крюке не предусмотрено. Такое регулирование является пассивным.

Целью статьи является разработка компьютерной модели активного регулятора подачи долота на основе электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения буровой лебедки и ферропорошкового тормоза.

Методы исследования.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения описывается следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений [19]:

$$\begin{cases} U = E + R \cdot I_a + L \cdot \frac{di}{dt}, \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \\ M = C_M \cdot \Phi_{af} \cdot I_a, \\ E = C_M \cdot \Phi_{af} \cdot \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где U – напряжение на якорной обмотке двигателя; E – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; I_a – ток якоря; Φ_{af} – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; M – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент сопротивления движению; ω – угловая частота вращения вала двигателя; R – активное сопротивление якорной цепи; L – индуктивность якорной цепи; J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки; C_M – конструктивный коэффициент.

Для создания модели необходимо получить передаточные функции, применив к дифференциальным уравнениям (1) преобразование Лапласа для нулевых начальных условий:

$$i(s) = [u(s) - e(s)] \cdot \frac{1}{R + Ls}; \quad (2)$$

$$\omega(s) = [M(s) - M_c(s)] \cdot \frac{1}{J_s}. \quad (3)$$

На рис. 1 показана *Simulink*-модель двигателя постоянного тока, построенная по уравнениям (1) – (3). Входными сигналами являются: напряжение якоря (вход 1), нагрузка (сигнал от датчика веса на крюке на входе 2) и ток возбуждения (вход 3). Значения активного сопротивления ($R=0,008$) и индуктивности ($L=0,0028$) обмотки ДПТ, а также форма магнитной характеристики (зависимость «ток возбуждения – поток») получены системой управления преобразователя постоянного тока *Simoreg DC Master*, установленного на буровой установке, в процессе идентификации (ввода в эксплуатацию). Для формирования магнитной характеристики использован блок одномерной таблицы *Look-UpTable*, задающий в табличной форме функцию одной переменной (блок «магнитная характеристика»).

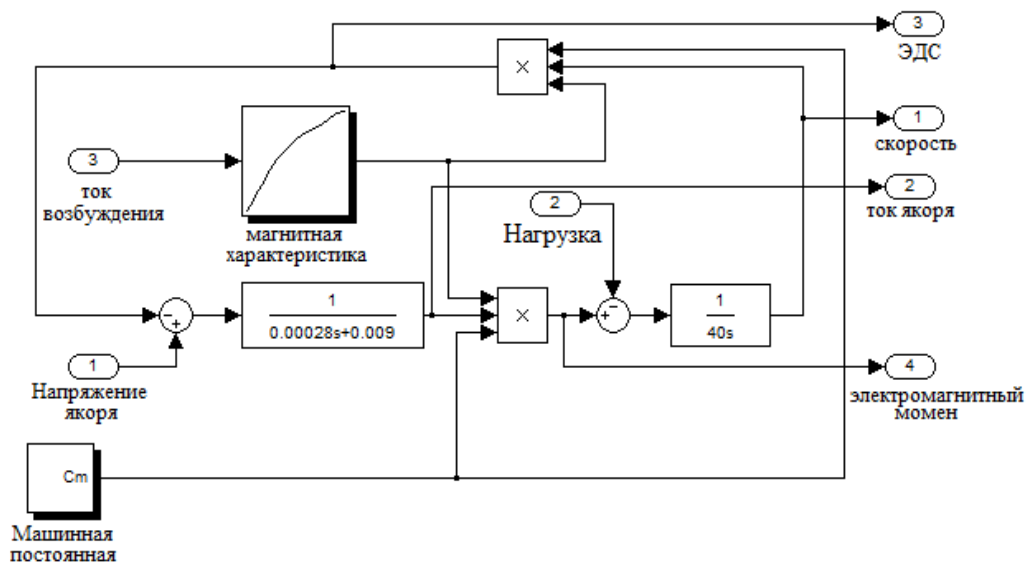


Рис. 1. *Simulink*-модель двигателя постоянного тока

Модель системы управления электроприводом буровой лебедки показана на рис. 2.

В канале управления напряжением якоря (рис. 2, а) предусмотрены пропорциональный регулятор скорости (блок РС) и пропорционально-интегральный регулятор тока якоря (блок РТЯ). В канале управления током возбуждения (рис. 2, б) предусмотрены пропорционально-интегральные регуляторы ЭДС и тока возбуждения двигателя (блоки РЭ и РТВ).

Управление спуском КБТ осуществляется ферропорошковым тормозом. Регулировочная характеристика ферропорошкового тормоза представляет собой зависимость тормозного момента от тока возбуждения. Для моделирования тормоза использован блок *Look-UpTable*, таблично задающий регулировочную характеристику (рис. 3).

Для моделирования КБТ представим колонну в виде пружины, жесткость и сила сжатия которой равны жесткости и весу реальной колонны (рис. 4). Такая модель позволяет упрощенно выразить зависимость между медленными изменениями перемещений, скоростей и усилий в КБТ. При этом не учитываются инерционные усилия, возникающие при перемещении частей колонны, обладающих массой. Модель не учитывает также силы трения колонны о стенки скважины и буровой раствор, что справедливо в тех случаях,

когда бурильные трубы вращаются. При этом основная составляющая сил трения снимается моментом, вращающим КБТ [4].

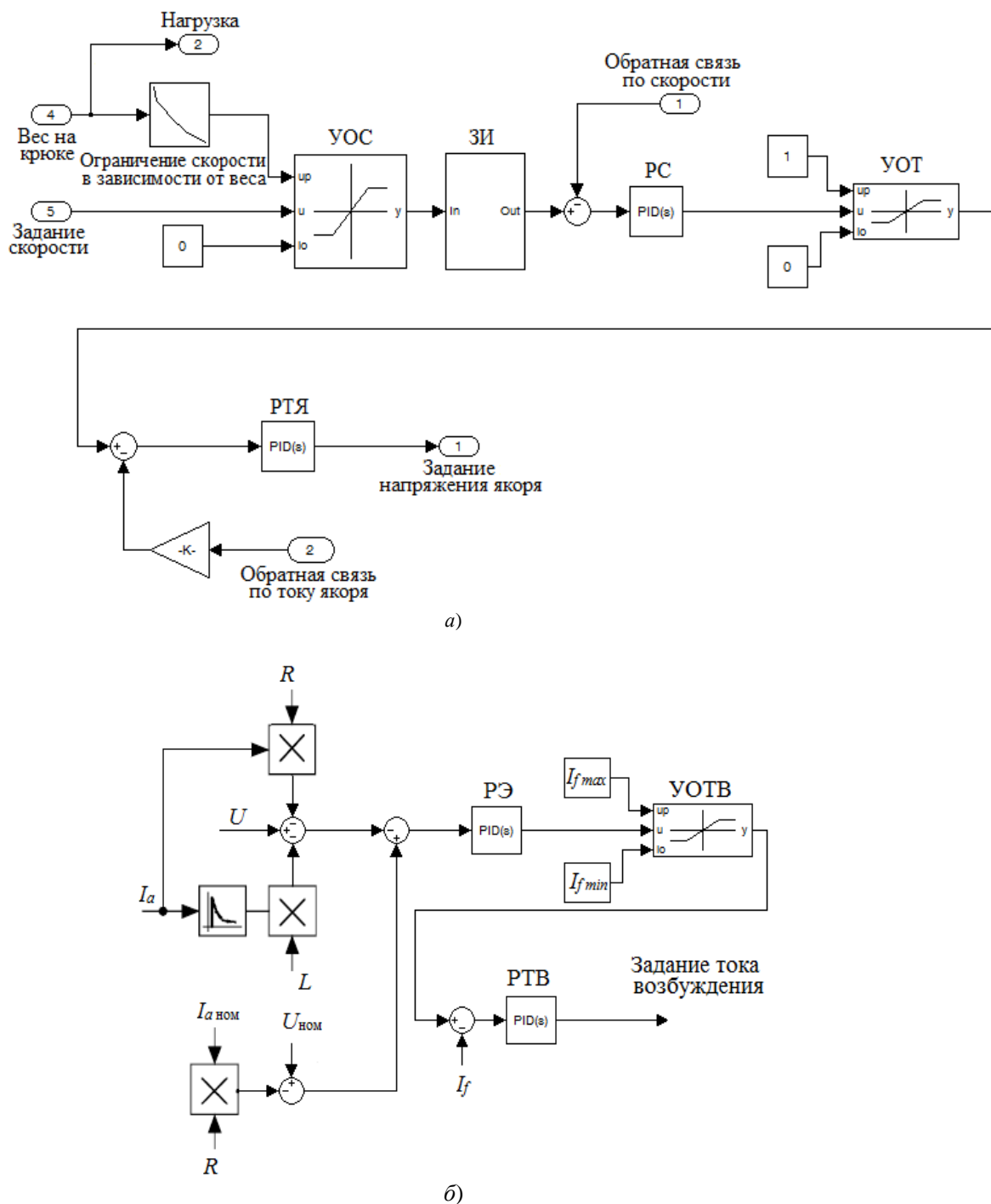


Рис. 2. Модель системы управления:
 а) формирование напряжения якоря; б) формирование тока возбуждения

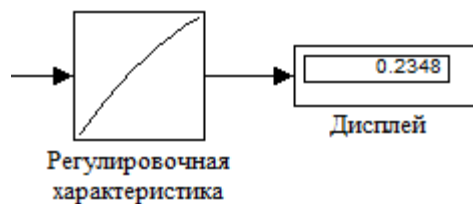


Рис. 3. Модель функционирования ферропорошкового тормоза

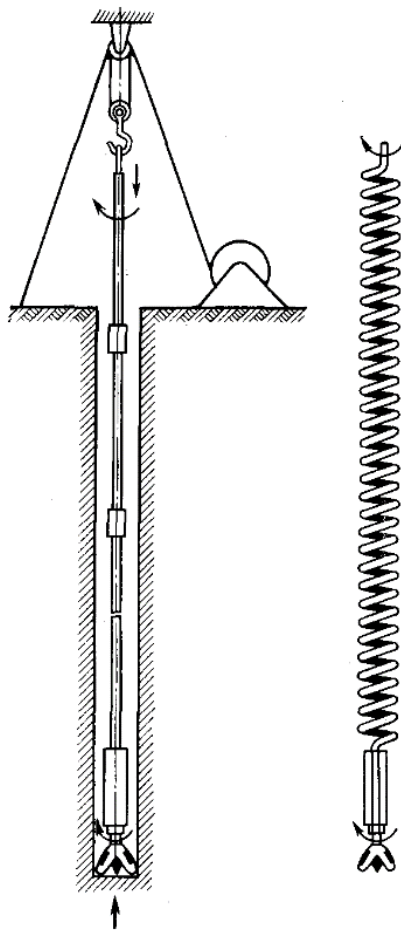


Рис. 4. Схема колонны бурильных труб

Для разработки модели КБТ воспользуемся приложением *Simscape* пакета *Matlab*, позволяющим построить имитационно-физическую модель механической системы с линейным перемещением. При построении модели средствами *Simscape* отпадает необходимость построения математической модели. На рис. 5 показана модель колонны бурильных труб, в которую входят следующие блоки: *TranslationalSpring* – пружина, моделирующая поступательное движение; *IdealForceSource* – идеальный источник усилия; *IdealForceSensor* – идеальный датчик силы; *Simulink-PSConverter* и *PS-SimulinkConverter* – блоки преобразования сигнала *Simulink* в «физический» и наоборот. Блок «*Step*» – моделирует колебания осевой нагрузки.

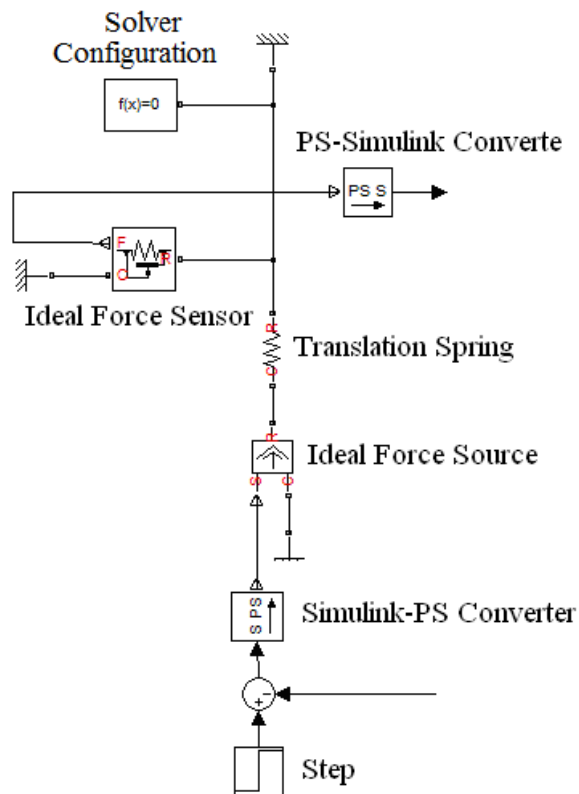


Рис. 5. Модель колонны бурильных труб

Модель работает следующим образом. При возникновении чрезмерного усилия на нижнюю часть КБТ сигнал с датчика веса (с блока *PS-SimulinkConverter* на рис. 5) поступает в систему управления электродвигателем постоянного тока (на вход 4 на рис. 2), который приподнимает КБТ до тех пор, пока не будет достигнуто равенство заданного и фактического веса.

Модели на рис. 1, 2 и 5 позволяют создать модель электротехнического комплекса буровой лебедки с электроприводом постоянного тока (рис. 6). Модель ДПТ по рис. 1 на рис. 6 обозначена *DCModel*. Модель системы управления по рис. 2 на рис. 6 обозначена *ControlSistem*. Модель ферропорошкового тормоза на рис. 6 обозначена *adjusting characteristic*. Такая модель обеспечивает управление буровой лебедкой и в режиме подъема КБТ, и в режиме регулятора подачи долота. Переключение режимов осуществляется при помощи блоков *ManualSwitch*.

Основные результаты.

На рис. 7 показаны результаты моделирования в режиме подъема КБТ. На интервале времени от 2 до 10 с момент нагрузки составлял 0,4 от номинального значения (рис. 7, в), частота вращения 95 рад/с (рис. 7, а), ток якоря 900 А (рис. 7, б). На интервалах времени 30–40 с и 60–70 с момент нагрузки был равен 0,6 и 0,8 соответственно. При этом скорость изменялась так, что ток нагрузки оставался неизменным. Результаты моделирования показывают сохранение постоянства мощности на валу ДПТ буровой лебедки по мере увеличения веса на крюке в процессе подъема колонны. На рис. 8 показаны результаты моделирования в режиме бурения (в режиме подачи долота).

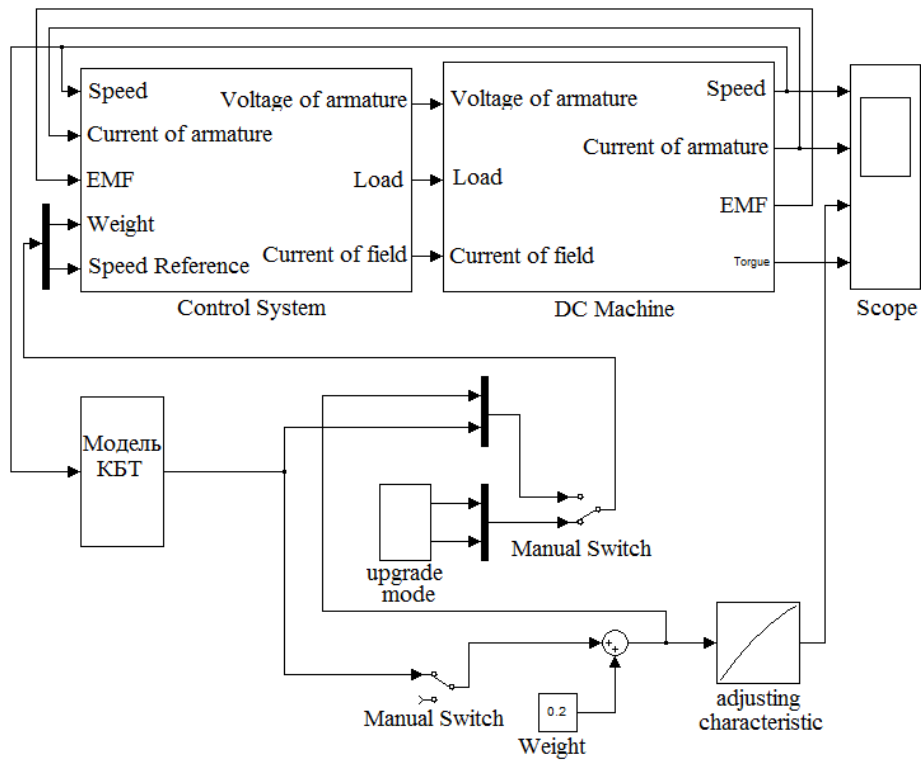


Рис. 6. Модель электропривода буровой лебедки в режиме подъема КБТ и в режиме регулятора подачи долота

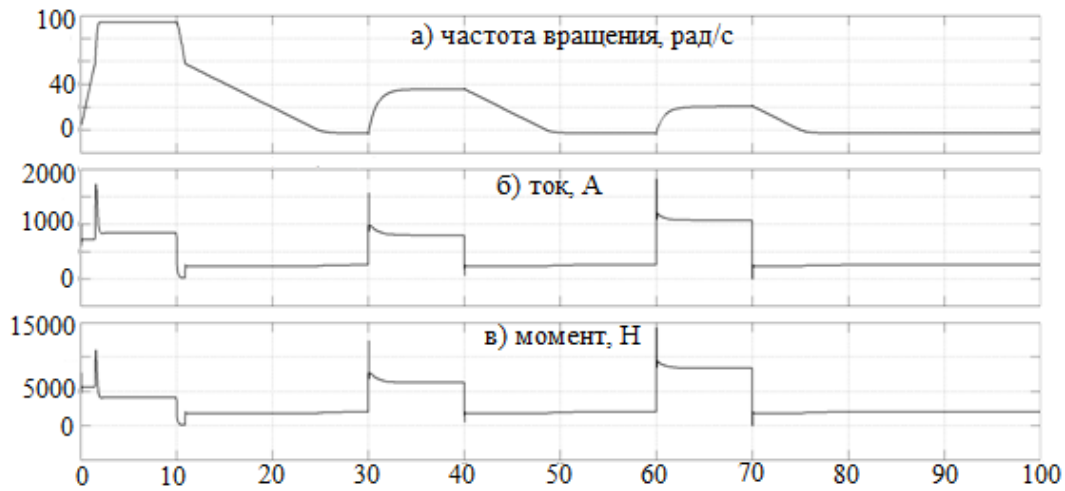


Рис. 7. Результаты моделирования в режиме подъема

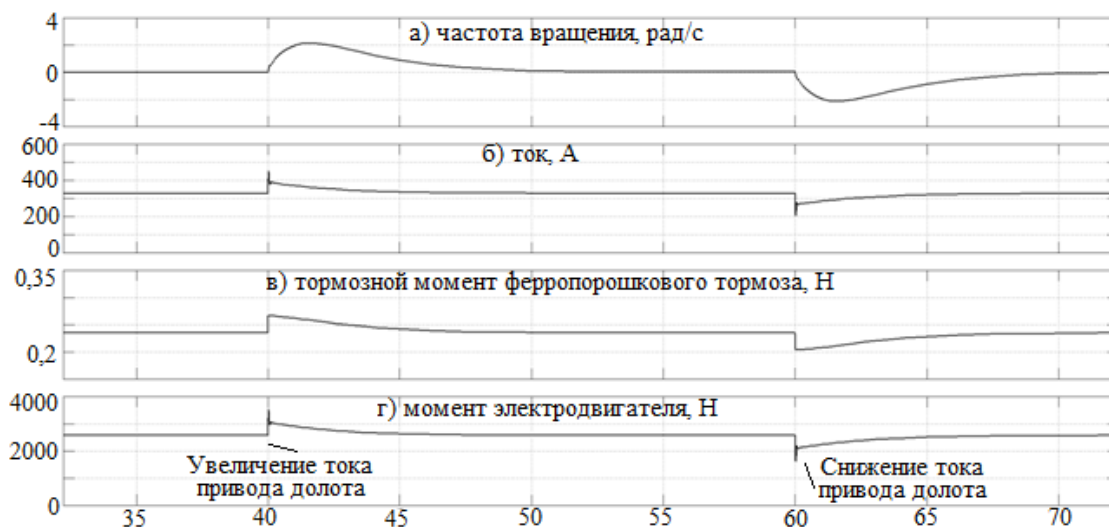


Рис. 8. Результаты моделирования в режиме подачи долота

На интервале времени 0–40 с частота вращения электродвигателя лебедки равна нулю. Опускание КБТ происходит при постоянном тормозном моменте ферропорошкового тормоза без участия электродвигателя буровой лебедки. На 40-й секунде происходит увеличение нагрузки на долото (вследствие увеличения твердости разбуриваемой породы), а на 60-й – ее снижение (уменьшение твердости породы) (изменение тока привода долота на рис. 8, б). При этом совместно с ферропорошковым тормозом (рис. 8, в) в управлении подачей долота участвует двигатель лебедки. При увеличении твердости породы двигатель лебедки начинает вращаться в сторону подъема и приподнимает КБТ (рис. 8, а), уменьшая тем самым осевое давление на забой, а при снижении твердости породы ускоряет опускание КБТ. Такое (активное) участие двигателя лебедки в управлении опусканием КБТ снижает время перехода к новому установившемуся режиму бурения с заданным весом на крюке. При этом увеличивается средняя скорость проходки скважины и сокращаются энергозатраты на процесс бурения.

Выводы.

В качестве активного регулятора подачи долота предложено использовать электродвигатель постоянного тока буровой лебедки и ферропорошковый тормоз.

Разработана компьютерная модель электротехнического комплекса буровой лебедки в составе: ДПТ, КБТ, ферропорошковый тормоз и система управления, позволяющая проводить исследование работы электропривода как в режиме подъема, так и в режиме опускания КБТ. Показано, что при использовании активного регулятора в режиме подъема КБТ сохраняется постоянство мощности на валу двигателя буровой лебедки. Показано, что в процессе бурения при увеличении твердости породы двигатель лебедки приподнимает КБТ, уменьшая при этом осевое давление на забой, а при снижении твердости породы ускоряет опускание КБТ. Такое активное участие двигателя лебедки в процессе бурения увеличивает скорость проходки скважины и сокращает время на ее строительство.

Литература

1. Моцохейн Б.И., Пафенов Б.М., Шпилевой В.А. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 1999. 263 с.
2. Шабанов В.А., Никулин О.В. Сокращение числа используемых втулок буровых насосов при регулируемом электроприводе // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование

предприятий: сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции: в 2 т. Т. 1. Уфа: УГНТУ, 2009. – С. 20–24.

3. Шабанов В.А., Никулин О.В. Оценка эффективности частотно-регулируемого привода буровых насосов в Азнакаевском УБР ООО «Татнефть - Бурение» // Энергетика Татарстана. 2008. №1(9). С. 74–81.

4. Никулин О.В., Шабанов В.А. Об особенностях эксплуатации электрооборудования и системы автоматизации системы верхнего привода // ROGTEC. 2016. №45. С. 61–76.

5. Шабанов В.А., Никулин О.В. Система автоматического регулирования электроприводов буровых насосов // Энергетика Татарстана. 2008. №3. С. 48–52.

6. Абрамов Б.И., Коган А.И., Пономарев В.М., Шевырева Н.Ю., Шевырев Ю.В., Фашиленко В.Н. Активные выпрямители как универсальное средство повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь, 3-7 октября 2016 г. Пермь: Пермский национальный политехнический университет, 2016. С. 372–376.

7. Абрамов Б.И., Симонов А.В., Ташлицкий М.М. Комплексная система автоматизированного дистанционного управления технологическими процессами визуализации нефтебуровой установки // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 Саранск. Том 2. Саранск: Мордовский университет, 2014. С. 372–376.

8. Абрамов Б.И., Кожиков О.И., Шиленков В.А., Васильев В.К., Таран Д.А., Кириллов В.Е. Создание современных электротехнических комплексов для управления наземных и морских буровых установок. // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: Издательство Мордовского университета. Том 2. 2014. С.150–154.

9. Козярук А.Е. Эффективный промышленный электропривод сегодня // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь, 3-7 октября 2016 г. Пермь: Пермский национальный политехнический университет, 2016. С. 56–58.

10. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Основные тенденции развития автоматизированного электропривода // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь, 3-7 октября 2016 г. Пермь: Пермский национальный политехнический университет, 2016. С. 81–83.

11. Beliaev D., Weinger A. Advanced models for simulation and control of electric drives. - Applied Simulation and Modeling, IASTED International Conference. - September 4-7, 2001, Marbella, Spain. - pp. 218-223.

12. Bose, Bimal K. Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR, 2002. - p. 711.

13. Ruben Tapia, Julio S. Roses, Omar Aguilar, Alejandro Templos. On-Line SpeedControl of the Shunt-Connectead DC Motor ViaNeurpcontroller. The 7-th IET international conference on Power Electronics, Machines and Drives. 8-10 April 2014, Midland Hotel, Manchester. UK. (2014).

14. Francisco Beltran-Carbajal, Antonio Favela-Contreras, Antonio Valderrabano-Gonzalez, Julio Cesar Rosas-Caro, "Output feedback control for robust tracking of position trajectories for DC electric motors", Electric Power Systems Research, volume 107, pp. 183-189, (2014).

15. R. Morales, J.A. Somolinos, H. Sira-Ramírez, "Control of a DC motor using algebraic derivative estimation with real time experiments", Measurement, volume 47, pp. 401-417, (2014).

16. Комазенко М.А., Ромащенко А.И., Кучер Е.С. Синтез астатических систем управления электроприводом постоянного тока с компенсацией возмущений // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь, 3-7 октября 2016 г. Пермь: Пермский национальный политехнический университет, 2016. С. 170–173.

17. Техническое описание и инструкция по эксплуатации "Устройство комплектное управления главными электроприводами установки БУ-2900/200 ЭП" от 2001 № ЕИЛА.657162.015 ТО // ООО «Электропром».

18. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМКПресс, 2008. 288 с.

Авторы публикации

Никулин Олег Викторович – канд. техн. наук, ведущий инженер-энергетик ООО «УК «Татбурнефть». E-mail: oleg309@yandex.ru.

Шабанов Виталий Алексеевич – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование промышленных предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ).

References

1. Motsohein B.I., Pafenov B.M., Shpilevoi V.A. Electric Drives, Electric Equipment and Drill Rig Power Supply. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 1999. - 263 с.
2. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Decrease of the quantity of mud pump liners when using variable speed drive. Electrotechnology, electric drives and electric equipment at the enterprises: collected research papers of the II All Russia scientific research conference: Essays in 2 volumes. Volume 1. — Ufa: Ufa State Oil Technical University, 2009. - С. 20-24.
3. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Assessment of efficiency of variable-frequency electric drive for mud pumps in Aznakayevisky Drilling Directorate of JSC "Tatneft-Burenie" // Energy industry of Tatarstan, - 2008. - №1(9). - С. 74-81.
4. Nikulin O.V., Shabanov V.A. On special characteristics of the operation of electric equipment and automation systems of top drive // ROGTEC. - 2016. - №45. - С. 61-76.
5. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Automatic control system of electric drives for mud pumps // Energy industry of Tatarstan. - 2008. - №3. - С. 48-52.
6. Abramov B.I., Kogan A.I., Ponomarev V.M., Shevyreva N.Y., Shevyrev Y.V., Fashchilenko V.N. Active front ends as generalized facilities of electric power quality improvement in the systems of power supply for drilling rigs with variable-frequency electric drive // Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automatic Electric Drives AED-2016. Perm, October 3–7, 2016. — Perm: Perm National Polytechnic University, 2016. - С. 372-376.
7. Abramov B.I., Simonov A.V., Tashlitsky M.M. A Complex System for Automated Remote Control of Visualization Processes at Drill Rigs // Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automatic Electric Drives, Saransk, 2014. Volume 2. – Saransk: Mordovian State University, 2014. - С. 372-376.
8. Abramov B.I., Kozhakov O.I., Shilenkov V.A., Vasiliev V.K., Taran D.A., Kirillov V.E. Development of Modern Electrical Engineering Control Systems for Onshore and Offshore Drill Rigs // Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automatic Electric Drives, Saransk, 2014. Mordovian University Publishing House. Volume 2. 2014. С.150-154.
9. Kozyaruk A.E. Efficient Industrial Electric Drives Today // Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automatic Electric Drives AED-2016. Perm, October 3–7, 2016. — Perm: Perm National Polytechnic University, 2016. - С. 56-58.
10. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. Main trends in development of automated electric drives // Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automatic Electric Drives AED-2016. Perm, October 3–7, 2016. — Perm: Perm National Polytechnic University, 2016. - С. 81-83.
11. Beliaev D., Weinger A. Advanced models for simulation and control of electric drives. - Applied Simulation and Modeling, IASTED International Conference. - September 4-7, 2001, Marbella, Spain. - pp. 218-223.
12. Bose, Bimal K. Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR, 2002. - p. 711.

13. Ruben Tapia, Julio S. Roses, Omar Aguilar, Alejandro Templos. On-Line SpeedControl of the Shunt-Connectead DC Motor ViaNeurpcontroller. The 7-th IET international conference on Power Electronics, Machines and Drives. 8-10 April 2014, Midland Hotel, Manchester. UK. (2014).

14. Francisco Beltran-Carbajal, Antonio Favela-Contreras, Antonio Valderrabano-Gonzalez, Julio Cesar Rosas-Caro, "Output feedback control for robust tracking of position trajectories for DC electric motors", Electric Power Systems Research, volume 107, pp. 183-189, (2014).

15. R. Morales, J.A. Somolinos, H. Sira-Ramirez, "Control of a DC motor using algebraic derivative estimation with real time experiments", Measurement, volume 47, pp. 401-417, (2014).

16. Komazenko M.A., Romashchenko A.I., Kucher E.S. Synthesis of astatic systems of control of DC electric motors with disturbance-variable compensation // Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automatic Electric Drives AED-2016. Perm, October 3–7, 2016. — Perm: Perm National Polytechnic University, 2016. - С. 170-173.

17. Technical description and Operating Manual for "Complete Apparatus for Control of Electric drives of drill rig BU-2900/200 EP" of 2001 No. EILA.657162.015 TO // JSC "Electroprom".

18. Chernykh I.V. Simulation of electric technical devices in MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: DMK-Press, 2008. - 288 с.

Authors of the publication

Nikulin V. Oleg- cand. sci. (techn.), Chief Power Engineer of Management Company Tatburneft, LLC Almetievsk. E-mail: oleg309@yandex.ru.

Shabanov A. Vitaliy - cand. sci. (techn.), associate professor, Head of Department "Electrotechnique and Electrical Equipment of Enterprises", Ufa state petroleum technological University (USPTU).

Поступила в редакцию

20 февраля 2017 г.