

УДК 62–83–523:550.832.07

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЪЕМНИКОВ КОМПЛЕКСОВ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

Чернышев Александр Юрьевич,

канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и электрооборудования
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: ach@tpu.ru

Журиков Сергей Александрович,

зам. директора по геофизической аппаратуре ООО «АСУ-ЭКСПЕРТ»,
Россия, 634061, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 51/1.
E-mail: GurikovSA@asu-expert.ru

Чернышев Игорь Александрович,

канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и электрооборудования
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: chia@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания асинхронных электроприводов подъемников комплексов геофизического исследования скважин.

Цель работы: исследование систем преобразователь частоты – асинхронный двигатель, учитывающих особенности эксплуатации и изменения параметров нагрузки подъемников комплексов геофизического исследования скважин.

Методы исследований основаны на использовании теории автоматического управления и имитационного моделирования в программной среде MatLab Simulink.

Результаты. Разработана методика расчета нагрузки при подъеме геофизического прибора в сухих скважинах и скважинах, заполненных жидкостью или буровым раствором, что позволяет более точно определять мощность электропривода подъемника. Рассчитаны переходные процессы при пуске, торможении электропривода, а также при прихвате геофизического прибора в скважине. Разработаны и исследованы асинхронные электроприводы геофизических подъемников с векторным регулированием скорости. Полученные теоретические исследования подтверждены экспериментально при создании электроприводов подъемников установок геофизического исследования скважин.

Выводы. В скважинах с жидкостью силу тяги при подъеме геофизического прибора необходимо рассчитывать с учетом эффекта вытеснения жидкости геофизическим прибором и каротажным грузонесущим кабелем. Суммарный момент инерции электропривода каротажного подъемника, приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как при перераспределении массы кабеля с барабана в скважину, так и от плотности бурового раствора. Полученные результаты позволяют применять стандартные ПИ-регуляторы скорости асинхронных электроприводов с векторным управлением без ухудшения качества регулирования скорости и момента при любой глубине скважины. При исследовании систем векторного управления необходимо учитывать особенности широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователя частоты, что позволяет получить более достоверные результаты имитационного моделирования и ускорить процесс настройки электроприводов.

Ключевые слова:

Геофизическое исследование скважин, статические нагрузки подъемников, асинхронный электропривод, векторное управление, широтно-импульсная модуляция.

Введение

Лаборатории [1] для выполнения геофизического исследования скважин являются неотъемлемым атрибутом при бурении [2] и эксплуатации газовых [3], нефтяных скважин [4], скважин рудной геологии, а также гидрогеологии при добыче промышленной и питьевой воды. Комплексы для геофизических исследований в скважинах оснащены каротажными подъемниками (рис. 1). В состав современного каротажного подъемника входит: 1 – электрический привод лебедки с асинхронным двигателем и редуктором; 2 – электрический привод кабелеукладчика; 3 – барабан для намотки каротажного грузонесущего кабеля.

Разработка каротажных подъемников, как правило, производится с учетом особенностей предстоящих исследований скважин, в первую



Рис. 1. Каротажный подъемник

Fig. 1. Wireline unit

очередь их глубины и типа скважинного прибора [5]. В этом случае в вариантах изделия габари-

ты и мощность установленного электропривода существенно отличаются. Однако при разработках любых геофизических комплексов они должны соответствовать отраслевой технической инструкции [6]. В данной работе приведена методика определения нагрузки при подъеме геофизического прибора каротажным подъемником в зависимости от глубины исследуемых скважин, их особенностей, параметров барабана и грузонесущего кабеля, исследована возможность применения для каротажных подъемников асинхронных частотно-регулируемых электроприводов.

Расчет нагрузки при подъеме геофизического прибора

Диаметр катушки кабеля на барабан рассчитывается относительно числа слоев $N=1,2,3,\dots$ каротажного грузонесущего кабеля на барабане, начиная с пустого барабана:

$$d_{к.б}(N) = d_б + (2N - 1)d_к,$$

где $d_б$ – диаметр барабана, N ; $d_к$ – диаметр каротажного грузонесущего кабеля, м.

Остаточная длина каротажного грузонесущего кабеля, намотанного на барабан

$$L_{к.б}(N) = \pi N(d_б + N^2 d_к),$$

где $w=l_б/d_к$ – число витков кабеля в одном слое катушки; $l_б$ – длина барабана, м.

Сила тяги, создаваемая барабаном для геофизического прибора, находящегося в сухой скважине:

$$F_{тс}(N) = [(L_к - L_{к.б}(N))m_{к.у}]g + m_{г.п}g,$$

где $L_к$ – полная длина каротажного грузонесущего кабеля, м; $m_{к.у}$ – масса удельная каротажного грузонесущего кабеля, кг/м; $m_{г.п}$ – масса геофизического прибора, кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила тяги, создаваемая барабаном для геофизического прибора, находящегося в скважине, заполненной жидкостью или буровым раствором:

$$F_{тв}(N) = [(L_к - L_{к.б}(N))(m_{к.у} - s_к \rho_{с.ж})]g + (m_{г.п} - V_{г.п} \rho_{с.ж})g,$$

где $s_к = \pi d_к^2 / 4$ – площадь поперечного сечения каротажного грузонесущего кабеля, м²; $V_{г.п}$ – объем геофизического прибора, м³; $\rho_{с.ж}$ – плотность скважинной жидкости (бурового раствора), кг/м³.

Так как геофизические исследования в скважинах в основном производятся при подъеме геофизического прибора, то момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, при статической нагрузке:

$$M_c(N) = \frac{F_t(N)d_{к.б}(N)}{2i_n \eta_n},$$

где i_n – общее передаточное число от вала электропривода к барабану катушки каротажного грузонесущего кабеля; η_n – к.п.д. кинематической цепи, учитывающий потери в редукторе, цепной передаче, подшипниках качения и трение в блоках и

каротажном кабеле; $F_t(N)$ – сила тяги, создаваемая барабаном.

На рис. 2 приведены графики момента сопротивления, создаваемого геофизическим прибором в сухой скважине $M_c(N)$ (кривая 1), и момента сопротивления, создаваемого геофизическим прибором в скважине, заполненной буровым раствором (кривая 2 – $\rho_{с.ж}=1000$ кг/м³, кривая 3 – $\rho_{с.ж}=1730$ кг/м³, кривая 4 – $\rho_{с.ж}=2200$ кг/м³), от числа слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане при следующих параметрах: $d_б=0,5$ м; $d_к=0,0102$ м; $l_б=0,96$ м; $L_к=3500$ м; $m_{к.у}=0,422$ кг/м; $V_{г.п}=0,0254$ кг/м³; $m_{г.п}=120$ кг; $i_n=30,735$ о.е.; $\eta_n=0,84$ о.е.

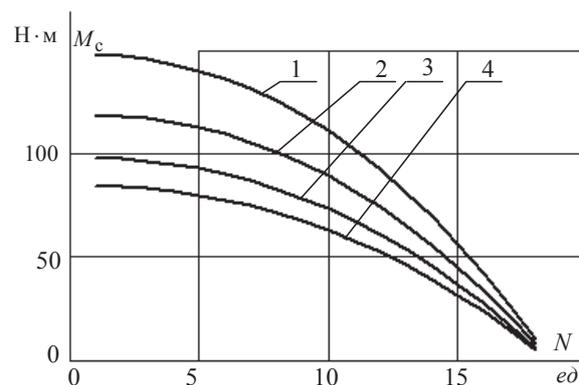


Рис. 2. Зависимость статического момента сопротивления от слоя N каротажного грузонесущего кабеля на барабане

Fig. 2. Resistance static moment dependence on layer N of wireline load-bearing cable on a drum

Анализ полученных зависимостей $M_c(N)$ показывает, что учет особенностей работы геофизического прибора в буровом растворе существенно снижает статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, и, как следствие, установленную мощность двигателя.

Линейная скорость проведения каротажа находится в диапазоне от 50 до 3000 м/час или от $v_{\min}=0,014$ м/с до $v_{\max}=0,83$ м/с и зависит от методов геофизических исследований в скважине. Минимальная или максимальная скорость вращения барабана также зависит от числа слоев кабеля на барабане. Необходимо, чтобы электропривод обеспечивал минимальную скорость подъема, при максимальном числе слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане, и максимальную скорость подъема, при наименьшем числе слоев кабеля.

Для приведенных ранее параметров каротажного подъемника эти условия выполняются при следующих угловых скоростях вращения двигателя: $\omega_{\min}=3,083$ рад/с и $\omega_{\max}=312,12$ рад/с. Диапазон регулирования скорости двигателя $D=\omega_{\max}/\omega_{\min}=312,12/3,083=101,2$, что определяет способ регулирования скорости асинхронного двигателя – векторное управление.

Одновременно с изменением момента сопротивления на валу двигателя изменяется и эквивалентный момент инерции электропривода каротажного подъемника, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = k_{\text{п}} J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{б}}(N)}{i_{\text{п}}^2} + m_{\text{к.г}}(N) \rho^2(N), \quad (1)$$

где $k_{\text{п}}=1,05-1,3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции соединительной муфты и первой шестерни редуктора электропривода; $J_{\text{д}}$ – момент инерции двигателя, кг·м²; $J_{\text{б}}(N)$ – момент инерции барабана с N слоями кабеля, кг·м²;

$$m_{\text{к.г}}(N) = (L_{\text{к}} - L_{\text{к.б}}(N))m_{\text{к.у}} + m_{\text{г.п}}$$

– масса геофизического прибора с кабелем в сухой скважине или

$$m_{\text{к.г}}(N) = (L_{\text{к}} - L_{\text{к.б}}(N))(m_{\text{к.у}} - s_{\text{к}} \rho_{\text{с.ж}}) + (m_{\text{г.п}} - V_{\text{г.п}} \rho_{\text{с.ж}})$$

– масса геофизического прибора с кабелем в скважине, заполненной жидкостью или буровым раствором, кг; $\rho = v(N)/\omega_{\text{дв}}(N)$ – радиус приведения геофизического прибора с кабелем в скважине к валу двигателя, м/рад; $v(N)$ – линейная скорость геофизического прибора в скважине, м/с; $\omega_{\text{дв}}(N)$ – угловая скорость двигателя при N слое кабеля на барабанае, рад/с.

При подъеме геофизического прибора радиус приведения

$$\rho = \frac{v(N)}{\omega_{\text{дв}}(N)} = \frac{\omega_{\text{бар}}(N) \cdot d_{\text{к.б}}(N) / 2}{\omega_{\text{дв}}(N)} = \frac{d_{\text{к.б}}(N)}{2i_{\text{п}}},$$

где $\omega_{\text{бар}}(N)$ – угловая скорость барабана при N слое кабеля на барабанае, рад/с.

Тогда (1) преобразуется к виду:

$$J_{\Sigma} = k_{\text{п}} J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{бп}} + \left[\frac{d_{\text{б}}^2 + d_{\text{кб}}^2(N)}{8} L_{\text{кб}}(N) m_{\text{к.у}} \right]}{i_{\text{п}}^2} + m_{\text{к.г}}(N) \left(\frac{d_{\text{к.б}}(N)}{2i_{\text{п}}} \right)^2. \quad (2)$$

На рис. 3 приведены графики суммарного момента инерции электропривода, приведенного к валу двигателя, для геофизического прибора в сухой скважине $J_{\Sigma}(N)$ (кривая 1) и момента инерции электропривода в скважине, заполненной буровым раствором (кривая 2 – $\rho_{\text{с.ж}}=1000$ кг/м³, кривая 3 – $\rho_{\text{с.ж}}=1730$ кг/м³, кривая 4 – $\rho_{\text{с.ж}}=2200$ кг/м³), от числа слоев N каротажного грузонесущего кабеля на барабанае.

Анализ графиков показывает, что суммарный момент инерции электропривода J_{Σ} , приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как от числа слоев N каротажного грузонесущего кабеля на барабанае, так и от плотности бурового раствора $\rho_{\text{с.ж}}$. Это объясняется, в первую очередь, большим передаточным числом от вала электропривода к барабану намотки каротажного грузонесущего кабеля и малым радиусом приведения поступательно движущихся элементов – геофизического прибора с кабелем в скважине.

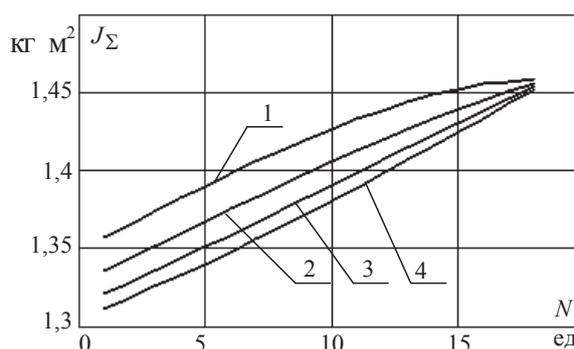


Рис. 3. Зависимость момента инерции электропривода от слоя N каротажного грузонесущего кабеля на барабанае

Fig. 3. Electric drive inertia moment dependence on layer N of wireline load-bearing cable on a drum

Незначительные изменения момента инерции электропривода, приведенного к валу двигателя, позволяют выполнить асинхронный частотно-регулируемый электропривод подъемника с векторным регулированием скорости, а его регулятор скорости – с постоянным коэффициентом усиления.

Моделирование электропривода подъемника

Система управления асинхронным электроприводом с преобразователем частоты, обеспечивающая диапазон регулирования скорости $D \geq 1:100$, может быть построена с модальным [7] или подчиненным [8–10] регулированием. Несмотря на высокое быстродействие электроприводов с модальным регулятором [11], при выполнении электроприводов каротажных подъемников предпочтение следует отдавать системам подчиненного регулирования [12–17], которые обеспечивают простоту настройки регуляторов промышленных электроприводов, особенно при необходимости добавления дополнительного контура регулирования линейной скорости подъемника.

Функциональная схема асинхронного электропривода каротажного подъемника с векторным регулированием скорости приведена на рис. 4.

На функциональной схеме рис. 4 приняты следующие обозначения: M – трехфазный асинхронный двигатель; ПЧ – двухзвенный преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения; РП – регулятор потокосцепления; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ПКП – преобразователь координат прямой; ПКО – преобразователь координат обратный; Б – барабан; МР – мерный ролик; ГП – геофизический прибор; ВР – датчик скорости; ИДП – импульсный датчик положения.

Для исследования электроприводов каротажных подъемников комплексов геофизического исследования скважин в программной среде *MatLab-Simulink* составлена программа имитационного моделирования асинхронных частотно-регу-

лируемых электроприводов с векторным управлением. Программа учитывает широтно-импульсное регулирование напряжение преобразователя частоты. Исследования проведены с асинхронным двигателем типа 5А250М2К, имеющим следующие технические данные: номинальная мощность $P_n=55$ кВт; номинальная частота вращения $n_n=2945$ мин⁻¹; номинальный фазный ток $I_{fn}=98$ А. Параметры схемы замещения асинхронного двигателя определены в соответствии с методикой, изложенной в [18]. Близкие результаты дают вычисления по [19, 20].

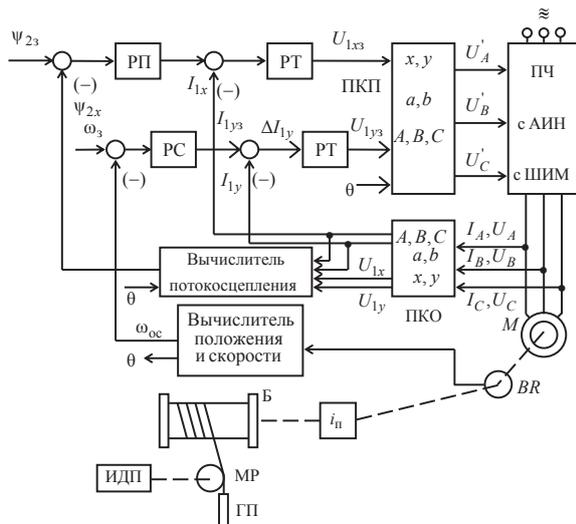


Рис. 4. Функциональная схема асинхронного электропривода каротажного подъемника с векторным регулированием скорости

Fig. 4. Circuit diagram of induction electric drive of the wireline elevator with velocity vector control

На рис. 5 приведены графики переходных процессов скорости двигателя ω и его электромагнитного момента M для подъема геофизического прибора и его остановки. График отражает цикл работы каротажного подъемника:

- плавный пуск на малую скорость подъема геофизического прибора для выбора зазоров в кинематике электропривода и натяжения каротажного грузонесущего кабеля;
- плавный переход на рабочую скорость, определяемую типом прибора геофизического исследования скважин;
- равномерное движение геофизического прибора в скважине;
- плавное торможение барабана лебедки при приближении геофизического прибора к устью скважины или башмаку обсадной колонны во избежание соскальзывания грузонесущего кабеля с мерного ролика и его дальнейшего обрыва;
- подход к устью скважины с малой скоростью;
- плавное торможение, останов электропривода и его отключение с наложением механического тормоза на вал двигателя.

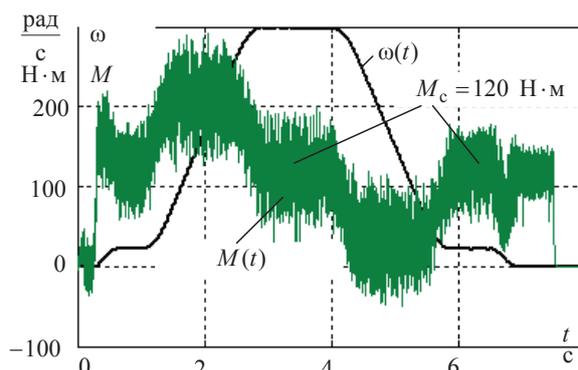


Рис. 5. Графики переходных процессов скорости двигателя ω подъемника и его электромагнитного момента M при стандартном цикле работы подъемника

Fig. 5. Curves of transients of the elevator motor velocity ω and its electromagnetic torque M at standard cycle of the elevator operation

Пульсации электромагнитного момента M на графиках переходных процессов (рис. 5) объясняются широтно-импульсным регулированием напряжения преобразователя частоты. Колебания скорости электродвигателя, являющегося инерционным звеном второго порядка, на частоте работы ШИМ 5 кГц практически отсутствуют.

На рис. 6 приведены результаты моделирования прихвата геофизического прибора в скважине.

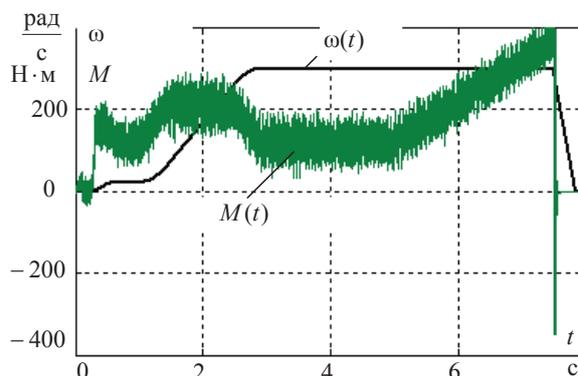


Рис. 6. Графики переходных процессов в электроприводе подъемника при заклинивании геофизического прибора в скважине

Fig. 6. Curves of transients in the elevator electric drive at geophysical tool seizure in a borehole

При движении геофизического прибора в скважине возможно его заклинивание (прихват кабеля или прибора). Прихват геофизического прибора является нежелательным, но штатным режимом работы каротажного подъемника. В этом случае подъем необходимо немедленно остановить. Иногда кабель с геофизическим прибором удается освободить, однако во всех случаях заклинивание геофизического прибора в скважине не должно приводить к выходу из строя электропривода подъемника комплекса геофизического исследования скважин. В подавляющем большинстве случаев тор-

мозной момент на электроприводе подъемника растет постепенно по мере вытягивания каротажного грузонесущего кабеля, как показано на рис. 6. В регулируемом электроприводе останов подъема геофизического прибора происходит автоматически при достижении электромагнитным моментом асинхронного двигателя допустимого значения момента стопорения.

Выводы

1. В скважинах с жидкостью силу тяги при подъеме геофизического прибора необходимо рассчитывать с учетом эффекта вытеснения жидкости геофизическим прибором и каротажным грузонесущим кабелем, что позволяет в скважинах с обсадными колоннами, где маловероятно заклинивание прибора, значительно снизить мощность установленного двигателя электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модуль индукционного каротажа для телесистемы с электромагнитным каналом связи / Р.С. Мухамадиев, А.Г. Гайван, В.Т. Перелыгин, В.П. Чупров, А.П. Потапов, В.Г. Судничников // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2013. – Вып. 10 (232). – С. 216–223.
2. Еремин В.Н., Волканин Ю.М., Тарасов А.В. Аппаратурно-методическое обеспечение электромагнитного каротажа в процессе бурения // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2013. – Вып. 4 (226). – С. 62–69.
3. Исследование влияния положения и размера технологической каверны на показания импульсного нейтронного каротажа в обсаженной газовой скважине / И.В. Бабкин, А.Н. Малев, А.П. Тимошенко, А.А. Семьяков // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2012. – Вып. 11 (221). – С. 189–195.
4. Комплекс устьевого оборудования для геофизических исследований и работ в действующих газовых и нефтяных скважинах / В.Ю. Хатьков, С.А. Венско, А.Я. Апанян, Б.М. Кочергинский, М.Л. Михин // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2014. – Вып. 1 (235). – С. 95–106.
5. Бурдо Г.Б., Стрельников Ю.А., Болотов А.Н. Изучение трения в узлах геофизических приборов при исследовании скважин // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во АИС, 2013. – Вып. 10 (232). – С. 216–223.
6. РД 153–39.0–072–01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. Введ. 01.07.2001. – М.: Минэнерго России, 2001. – 271 с.
7. Мазуров В.М., Фам Ван Нгуен. Модальные регуляторы для промышленных объектов с запаздыванием // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 11. – С. 19–22.
8. Martin J., Nyoman Wahyu Satiawan I. A simple multi-level space vector modulation algorithm for five-phase open-end winding drives. *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2013, April. – V. 90. – P. 74–85.
9. Open-loop neuro-fuzzy speed estimator applied to vector and scalar induction motor drives / F. Lima, W. Kaiser, I. Nunes da Silva, Azauri A.A. de Oliveira Jr. // *Applied Soft Computing*. – 2014, August. – V. 21. – P. 469–480.
10. Reza S.M.F.S., Didarul Islam Md., Saad Mekhile A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014, September. – V. 37. – P. 919–932.
11. Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Модальное управление асинхронным электроприводом // *Известия Том-*

2. Установлено, что суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, незначительно изменяется как от числа слоев каротажного грузонесущего кабеля на барабане, так и от плотности бурового раствора. Полученные результаты позволяют применять стандартные ПИ-регуляторы скорости асинхронных электроприводов с векторным управлением без ухудшения качества регулирования скорости и момента при любой глубине геофизического исследования скважин.
3. При исследовании систем векторного управления необходимо учитывать особенности широтно-импульсного регулирования напряжения преобразователя частоты, что позволяет получить более достоверные результаты имитационного моделирования и ускорить процесс настройки электроприводов.

- ского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 69–75.
12. A new natural gamma radiation measurement system for marine sediment and rock analysis / M.A. Vasiliev, P. Blum, G. Chubarian, R. Olsen, C. Bennight, T. Cobine, D. Fackler, M. Hastedt, D. Houpt, Z. Mateo, Y.B. Vasilieva // *Journal of Applied Geophysics*. – 2011, November. – V. 75. – Iss. 3. – P. 455–463.
13. Orłowska-Kowalska T., Tarchala G., Dybkowski M. Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2014, April. – V. 98. – P. 31–45.
14. Improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: Theory and experiment / Gouichiche Abdelmadjid, Boucherit Seghir Mohamed, Tadjine Mohamed, Safa Ahmed, Messlem Youcef // *Electric Power Systems Research*. – 2013, November. – V. 104. – P. 129–137.
15. Vaez-Zadeh S., Jalali E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives // *Energy Conversion and Management*. – 2007, December. – V. 48. – Iss. 12. – P. 3095–3101.
16. A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives / Sutikno Tole, Rumi Nik, Idris Nik, Jidin Auzani // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014, April. – V. 32. – P. 548–558.
17. Arun Dominic, Thanga Raj Chelliah. Analysis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes // *ISA Transactions*. – 2014, September. – V. 53. – Iss. 5. – P. 1680–1694.
18. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 269–272.
19. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 321. – № 5. – С. 101–108.
20. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Метод идентификации параметров асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2013. – № 8 (79). – С. 178–185.

Поступила 05.11.2014 г.

UDC 62–83–523:550.832.07

ELECTRIC DRIVE OF ELEVATORS FOR BOREHOLE GEOPHYSICAL SURVEY COMPLEX

Aleksandr Yu. Chernishev,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ach@tpu.ru

Sergey A. Zhurikov,

ASU-EXPERT, 51/1, Krasnoarmeyskaya street, Tomsk, 634061, Russia.
E-mail: GurikovSA@asu-expert.ru

Igor A. Chernishev,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: chia@tpu.ru

Relevance of the research is caused by the necessity of developing an elevator induction motor electric drive for borehole geophysical survey complexes.

The main aim of the study is to develop and research the frequency converter – induction motor systems, which take into account operation features and changes in the load parameters of elevators for borehole geophysical survey complexes.

Methods of research are based on application of automatic control theory and simulation in Matlab Simulink.

The results. The authors have developed the technique of load calculation while lifting geophysical device in dry boreholes and boreholes filled with fluid or drilling mud. This allows determining more precisely the elevator electric drive capacity. Transient processes at starting and braking of electric drive and when geophysical device weld tool is in a borehole, are calculated. The authors developed and studied induction motor electric drives of geophysical elevator with speed vector control. The theoretical investigations are confirmed experimentally when developing the elevators of borehole geophysical research units.

Conclusions. In boreholes with liquid the traction force at geophysical device lifting should be calculated taking into account fluid displacement by the device and wireline carrying cable. The total moment of inertia back to the motor shaft of electric drive of wireline elevator varies slightly both at cable weight redistribution from a drum to the well and at drilling mud density. It allows the use of standard PI speed controllers in induction motor drive systems with vector control without quality deterioration of speed and torque control at any depth of boreholes. When studying vector control systems it is important to consider the PWM voltage regulation of frequency converter, that allows obtaining more reliable results of imitating modelling and speeding up the electric drive setting.

Key words:

Geophysical exploration of boreholes, static loads of winch hoists, induction motor drive, vector control, pulse-width modulation.

REFERENCES

1. Makhamadiev R.S., Gayvan A.G., Perelygin V.T., Chuprov V.P., Potapov A.P., Sudnichnikov V.G. Modul induktsionnogo karotazha dlya telesistemy s elektromagnitnym kanalom svyazi [An induction logging module for telecommunication system with an electromagnetic communication channel]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2013, vol. 221, no. 11, pp. 216–223.
2. Eremin V.N., Volkanin Yu. M., Tarasov A.V. Apparato-metodicheskoe obespechenie elektromagnitnogo karotazha v protsesse bureniya [Tool-and-method support for electromagnetic logging while drilling]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2013, vol. 226, no. 4, pp. 62–69.
3. Babkin I.V., Malev A.N., Timoshenko A.P. Semyakov A.A. Issledovanie vliyaniya polozheniya i razmera tekhnologicheskoy kaverny na pokozaniya impulsnogo neytronnogo karotazha v obsazhennoy gazovoy skvazhine [Investigation on the effect of technological cavern position and size on pulse neutron log readings in the cased gas well]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2012, vol. 221, no. 11, pp. 189–195.
4. Khatkov V.Yu., Vensko S.A., Apanin A.Yu., Kocherginsky B.M., Mikin M.L. Kompleks ustevogo oborudovaniya dlya geofizicheskikh issledovaniy i robot v deystvuyushchikh gazovykh i neftyanykh skvazhinakh [Wellhead equipment set for well-logging and operations in producing oil and gas wells]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2014, vol. 235, no. 1, pp. 95–106.
5. Burdo G.B., Strelnikov Yu.A., Bolotov A.N. Izuchenie treniya v uzlakh geofizicheskikh priborov pri issledovanii skvazhin [Investigation on friction in assemblies of geophysical tools in well logging]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Karotazhnik – Scientific-technical herald Karotazhnik*, 2011, vol. 207, no. 9, pp. 84–89.
6. RD 153–39.0–072–01. *Tekhnicheskaya instruktsiya po provedeniyu geofizicheskikh issledovaniy i robot priborami na kabele v neftyanykh i gazovykh skvazhinakh* [Technical Instructions for geophysical research and work by cable device in oil and gas boreholes]. Introduced 01.07.2001. Moscow, Ministry of energetic of Russia, 2001. 271 p.
7. Mazurov V.M., Fam Van Nguen. Modalnye regulatory dlya promyshlennykh obektov s zapazdyvaniem [Modal controllers for industrial facilities with delay]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2006, no. 11, pp. 19–22.
8. Martin J., Nyoman Wahyu Satiawan I. A simple multi-level space vector modulation algorithm for five-phase open-end winding drives. *Mathematics and Computers in Simulation*, April 2013, vol. 90, pp. 74–85.
9. Lima F., Kaiser W., Nunes da Silva I., Azauri A.A. de Oliveira Jr. Open-loop neuro-fuzzy speed estimator applied to vector and scalar induction motor drives. *Applied Soft Computing*, August 2014, vol. 21, pp. 469–480.
10. Reza C.M.F.S., Didarul Islam Md., Saad Mekhile. A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, September 2014, vol. 37, pp. 919–932.
11. Korotkov M.F., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A. Modalnoe upravlenie asinkhronnym elektroprivodom [Modal control of

- asynchronous electric drive]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014. vol. 324, no. 4, pp. 69–75.
12. Vasiliev M.A., Blum P., Chubarian G., Olsen R., Bennight C., Cobine T., Fackler D., Hastedt M., Houpt D., Mateo Z., Vasilieva Y.B. A new natural gamma radiation measurement system for marine sediment and rock analysis. *Journal of Applied Geophysics*, November 2011, vol. 75, Iss. 3, pp. 455–463.
 13. Orłowska-Kowalska T., Tarchala G., Dybkowski M. Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive. *Mathematics and Computers in Simulation*, April 2014, vol. 98, pp. 31–45.
 14. Gouichiche Abdelmadjid, Boucherit Seghir Mohamed, Tadjine Mohamed, Safa Ahmed, Messlem Youcef. An improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: Theory and experiment. *Electric Power Systems Research*, November 2013, vol. 104, pp. 129–137.
 15. Vaez-Zadeh S., Jalali E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives. *Energy Conversion and Management*, December 2007, vol. 48, Iss. 12, pp. 3095–3101.
 16. Sutikno Tole, Rumzi Nik, Idris Nik, Jidin Auzani. A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, April 2014, vol. 32, pp. 548–558
 17. Arun Dominic, Thanga Raj Chelliah. Analysis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes. *ISA Transactions*, September 2014, vol. 53, Iss. 5, pp. 1680–1694.
 18. Chernishev A.Yu., Chernishev I.A. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po kataloghnym dannym [Determination of induction motor drive parameters according to the catalog]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of the International scientific conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2007. pp. 269–272.
 19. Bolovin E. V., Glazyrin A. S. Identifikatsiya parametrov asinkhronnykh elektrodvigatelyey s nepodvizhnym korotkozamknutym rotorom na osnove raznostnykh skhem [Induction motor with squirrel cage rotor drives parameters identification using finite difference method]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. vol. 321, no. 5, pp. 101–108.
 20. Glazyrin A.S., Bolovin E.V. Metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh elektrodvigatelyey s korotkozamknutym rotorom na osnove raznostnykh skhem [Method of induction motor with squirrel cage rotor drives parameters identification based on finite difference method]. *Bulletin of the Irkutsk Technical University*, 2013, no. 8 (79), pp. 178–185.

Received: 05 November 2014.