

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАБОЙНОЙ БУРОВОЙ МАШИНЫ С ПОГРУЖНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

С. Н. Костарев, Т. Г. Серeda

The development of the automated monitoring system for the operating parameters of a downhole drilling machine with a submersible electric motor

S. N. Kostarev, T. G. Sereda

The development of models for constructing automated control systems for electric drives of oil production mechanisms currently gains great attention for the purposes of improving the safety and productivity of oil production equipment. For transmission of telemetry system (TMS) data, industrial buses are common, for example, Fieldbus, what allows solving the problems of frequency regulation by the electric drive, but complicates the general control system. In this paper, the authors consider using as TMS a borehole cable as a medium for data transmission. The authors have developed simulation models of digital signal transmission. To transmit the information signal, there are various models of modulation: amplitude, phase, frequency, etc. For improving the quality of information transfer, one should use filters, for example the Barker filter, the digital cosine filter, the moving average filter. The Barker filter has the best selectivity, but at the same time, the largest amount of service information. To solve the problem of increasing noise immunity of transmitted data and complicating the filter by the degree of interference, the authors proposed the modulation of the information signal using the operator \oplus (XOR). The conducted experiments on the levels of modulation/noise showed satisfactory results. To solve the tasks of monitoring and controlling the electric drive of the drill, the authors proposed an industrial controller programmed according to the IEC61131-3 standard. The authors developed the relay-contact scheme (RCS) for monitoring the critical parameters of the drive, which affect the safety of the downhole electric motor when drilling wells. Simulation of the operation of the RCS using the operator panel was successful.

Keywords: electric drive; electric motor; microprocessor controller; borehole cable; control and measuring devices; well.

Разработке моделей построения автоматизированных систем управления электроприводом механизмов добычи нефти в настоящее время уделяется большое внимание в целях повышения безопасности и производительности технологического оборудования нефтедобычи. Для передачи данных телеметрической системы (ТМС) широко используются промышленные шины, например Fieldbus, что позволило решать вопросы частотного регулирования электроприводом, но усложнило общую систему управления. В данной работе в качестве ТМС рассматривается применение каротажного кабеля как среды передачи данных. Разработаны имитационные модели передачи цифрового сигнала. Для передачи информационного сигнала существуют различные модели модуляции: амплитудная, фазовая, частотная и др. С целью улучшения качества передачи информации используются фильтры, например фильтр Баркера, цифровой косинус-фильтр, фильтр скользящего среднего. Фильтр Баркера обладает наилучшей избирательностью, но в то же время большим объемом служебной информации. Для решения задачи повышения помехоустойчивости передаваемых данных и усложнения фильтра по степени помех предложена модуляция информационного сигнала с использованием оператора \oplus (исключающее ИЛИ). Проведенные эксперименты по уровням модуляция/шум показали удовлетворительные результаты. Для решения задач мониторинга и управления электроприводом бура предложен промышленный контроллер, программируемый по стандарту IEC61131-3. Разработана релейно-контактная схема (РКС) по мониторингу критических параметров привода, влияющих на безопасность работы забойного электродвигателя при бурении скважин. Поведена симуляция работы РКС с использованием панели оператора.

Ключевые слова: электропривод; электродвигатель; микропроцессорный контроллер; каротажный кабель; контрольно-измерительные приборы; скважина.

Актуальность темы. Проблема эффективности и безопасности нефтедобычи стоит остро во всем мире. Добыча нефти представляет сложный технологический процесс, вопросам автоматизации нефтегазовых технологических процессов посвящены работы [1]. Для передачи показаний от телеметрической системы, которая находится в скважине, используются как кабельные, так и беспроводные каналы передачи информации, в которых с большой долей вероятности передаваемые данные по ним подвержены влиянию помех.

Для реализации математического обеспечения мониторинга и управления при бурении скважины необходима разработка инструментальных средств анализа состояний привода бура.

На исследуемом объекте передаваемой информацией являются давление, ускорение вибрации ротора электробура, тем-

пература пласта, сила тока, потребляемая мощность и другие параметры. При использовании проводного канала возникает большой уровень электромагнитных помех. Использование систем погружной телеметрии позволит значительно увеличить срок службы оборудования.

Существует необходимость в усовершенствовании передачи данных в скважинных телеметрических системах. Известны подходы по передаче данных с помощью каротажного кабеля [2, 3]. Для улучшения распознавания передаваемых данных предлагалась фазовая модуляция последовательности Баркера [4]. Недостатками данных подходов являлись сложность алгоритма обработки и большой объем служебной информации.

Целью настоящей работы являлось исследование модели передачи данных по каротажному кабелю и проведение исследований параметрической модуляции сигнала (длина несущей последовательности/шум) для обеспечения безопасной эксплуатации нефтяных скважин.

На предварительном этапе моделирования рассмотрена телеметрическая система (ТМС), использующаяся на месторождениях, и описана работа основных узлов, которые непосредственно участвуют при передаче данных с использованием каротажного кабеля. В состав ТМС вошли следующие элементы: силовая электрическая система, блок управления, блок погружной телеметрии, программно-аппаратное обеспечение OMRON.

Через наземный трансформатор передается электрическая энергия на питание насоса. Точка соединения в звезде подключается к наземному блоку телеметрии, а фазные концы заведены в бронированный каротажный кабель, который опускается непосредственно в скважину, подавая высокое напряжение на нефтяной электронасос (НЭН). Измерительную информацию, включающую мониторинг и управление от скважинных приборов, предлагается также передавать по каротажному кабелю. Каротажный кабель является тросом с достаточно большим (до нескольких тонн) разрывным усилием, несущим скважинные приборы в химически и механически агрессивной среде скважин.

Изменения потенциала в точке соединения обмоток привода к изменению в нулевой точке трехфазного трансформатора,

Таблица 1. Обозначение входных сигналов (датчиков) и выходных управляющих воздействий.

Входной – X Выходной –Y	Адрес бита в ОЗУ контроллера	Обозначение	Адрес памяти Значение DM		Пояснение
			текущее	max	
<i>Входы контроллера от датчиков</i>					
X0	CIO 201	T	200	210	Измерение температуры обмоток двигателя
X1	CIO 301	P	201	211	Измерение давления окружающей среды
X2	CIO 401	Vx	202	212	Измерение вибрации по оси X
X3	CIO 501	Vy	203	213	Измерение вибрации по оси Y
X4	CIO 601	I	204	214	Сила тока
X5	CIO 801	pH	205	215	Мониторинг pH
X6	CIO 0.06	Z			Термо(влаго)защита насоса
<i>Выходы на управление</i>					
Y0	CI O 100.00		H0.00	H1.00	Включение бура
Y1	CI O 100.01	КП	H0.01	H1.00	Выключение бура

что позволяет наземному блоку регистрировать изменения и тем самым получать кодовую комбинацию, которую можно использовать для формирования цифровых данных.

Погружной блок телеметрии состоит из двух блоков: процессорного блока и блока сопряжения. Функциями погружного блока являются: измерение температуры обмоток двигателя, измерение давления окружающей среды, измерение вибрации по осям X и Y и измерение температуры внутри устройства. В качестве процессорного блока предложено использовать микроконтроллер OMRON. Обозначение входных сигналов (датчиков) и выходных управляющих воздействий показано в табл. 1.

В настоящей работе исследования модели передачи данных проводились с помощью пакета SimPowerSystems (MATLAB/Simulink), а исследования по мониторингу и управлению электробуром – с помощью программного обеспечения OMRON CX-Programmer и CX-Designer [5].

Языком программирования контроллера OMRON CP1L выступала релейно-контактная логика (стандарт IEC61131-3). Мониторинг текущих значений измеряемых параметров и граничного максимального значения фиксировался в ячейках памяти Data Memory. В качестве параметров мониторинга выступали температура обмоток двигателя, давление пород, вибрация, сила тока, термо(влаго)защита насоса. Панель оператора электробурла была спроектирована с использованием CX-Designer (рис. 1).

При превышении допустимых значений на панели оператора загорается красный индикатор и происходит автоматическое выключение бура. Ручное включение/выключение бура происходит на панели управления с помощью кнопок триггерного типа. Фрагмент разработанной релейно-контактной схемы управления аварийным выключением привода бура при превышении потребляемого тока представлен на рис. 2.

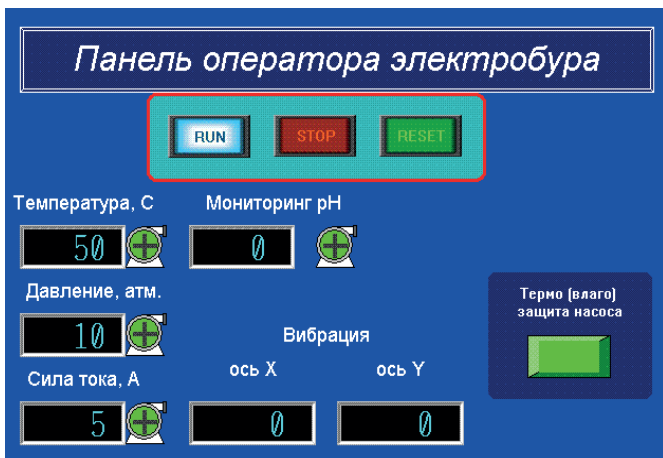


Рисунок 1. Сенсорная панель оператора мониторинга и управления электроприводом бура.

При разработке модели передачи данных предлагалась цифровая передача сигнала с использованием несущего и модулированного сигнала [6, 7]. Исследовалось варьирование различных модуляций с целью фиксации изменения сигнала и определения характера прохождения сигнала через каротажный кабель. Модель представляла собой структуру телеметрической системы. В ней присутствовал источник трехфазного напряжения, в реальности он выступает в роли трехфазного трансформатора питающего электробур. Далее последовательность из RLC моделирует кабель, имеющий активное и реактивное сопротивления R, индуктивность L и емкость C [6, 8, 9].

На рис. 3 представлены результаты исследования модели передачи данных из нефтяной скважины. Верхний график модели показывает имитацию передачи исходного сигнала в блоке погружной телеметрии. Логические уровни напряжений представлены двумя сигналами: уровень 0 соответствует размыканию ключа (на графике желтый меандр), а уровень 1 соответствует замыканию ключа (на графике фиолетовый меандр). На нижнем графике рис. 3 показаны меандры принятого сигнала в наземном блоке управления. Таким образом, показана возможность передачи цифрового сигнала по каротажному кабелю. Следующей задачей являлось определение возможности оценки передаваемой информации при зашумлении канала.

В работе было проведено исследование параметрической модуляции сигнала при моделировании эксперимента (длина несущей последовательности/шум).

Известны типовые виды модуляций: аналоговая, частотная, фазовая и др. При работе в зашумленных линиях передачи используются различные фильтры для выделения полезного сигнала: фильтр скользящего среднего, цифровой косинус-фильтр, полосовые фильтры и др. [10]. В данной работе предложена методика модуляции сигнала, получаемого за счет синхронного наложения информационного двоичного сигнала на несущую

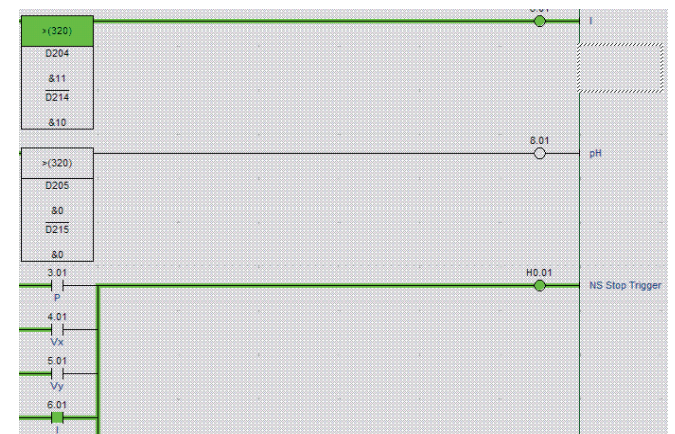


Рисунок 2. Фрагмент релейно-контактной схемы имитации аварийного выключения привода бура при превышении потребляемого тока.

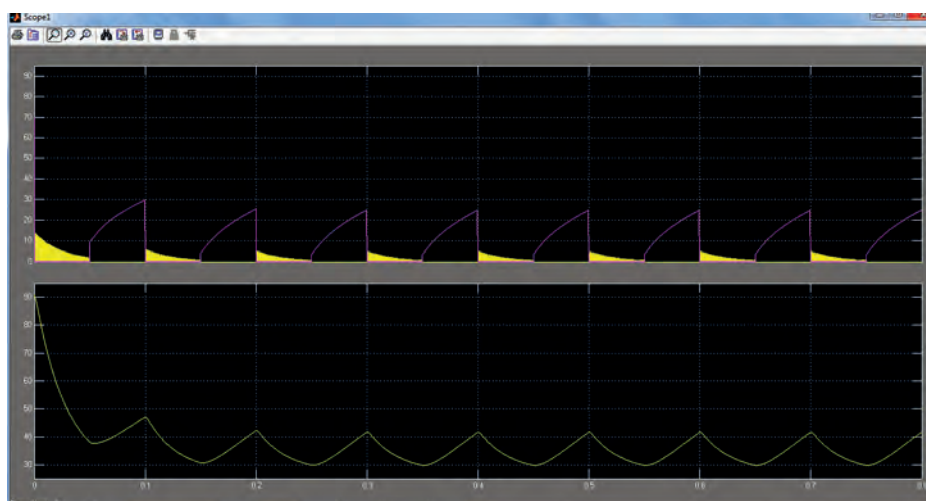


Рисунок 3. Результаты эксперимента по моделированию передачи/приема логических сигналов: верхний график модели показывает имитацию передачи исходного сигнала в блоке погружной телеметрии; на нижнем графике показаны меандры принятого сигнала в наземном блоке управления.

кодированную последовательность с использованием инверсного оператора сложения по модулю 2 (рис. 4). Длина несущей последовательности кодировалась от 4 до 7 бит.

Выбор длины несущей последовательности L определялся по трем параметрам: количеству кодировки информации n , качеству распознавания информационного сигнала k и зашумленности линии sh (количество измененных битов) $L = f(n, k, sh)$.

В табл. 2 приведен пример кодировки информационных сигналов при $L = 4$, т. е. при $L = 4$ можно закодировать $2^4 = 16$ сигналов.

Таблица 2. Пример кодировки информационных сигналов при $L = 4$.

№	Кодировка	Измеряемый параметр
1	0000	Температура
2	0001	Давление
3	0010	Вибрация
...
16	1111	Сопротивление изоляции

Устойчивость к зашумлению оценивалась распознаванием модулированного сигнала. Алгоритм распознавания заключался в наложении маски модулированного сигнала на зашумленный с использованием корреляционного анализа парных значений булевых переменных. Результаты эксперимента по определению зависимости длины несущей последовательности/шум приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты зависимости по распознаванию информационного сигнала (длина несущей последовательности/шум).

Длина L , бит	Шум sh , бит	Коэффициент корреляции	Уровень распознавания
4	1	0,75	Хороший
4	2	0,5	Неудовлетворительный
6	2	0,67	Удовлетворительный
7	3	0,57	Удовлетворительный

Результаты поставленных экспериментов показывают, что при использовании параметризованного модулированного сигнала с коэффициентом корреляции более 0,5 достигается



Рисунок 4. Схема модуляции сигнала: \oplus – оператор суммы по модулю 2; $\&$ – оператор логического умножения (конъюнктор).

удовлетворительный прием/передача информации с использованием каротажного кабеля при нефтедобыче.

Заключение

Исходя из представленной модели, с помощью модуля Simulink SimPower Systems была создана виртуальную модель среды передачи данных системы погружной телеметрии. Для подавления помех цифрового сигнала был разработан и исследован фильтр на основе модуляции сигнала с использованием оператора XOR. Данная модель может быть использована в дальнейшем при постановке экспериментов для распознавания передаваемых сигналов из скважины. Для мониторинга и управления приводом электробурора разработано программное обеспечение для программирования контроллера OMRON.

ЛИТЕРАТУРА

1. Принцип построения автоматизированной системы управления электроприводом механизмов добычи нефти / Э. Р. Енекеева [и др.] // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 116–125.
2. Мамлеев Т. С., Давыдов А. В. Импульсная пропускная способность каротажных кабелей // Изв. УГГГА. Сер. Геология и геофизика. 2002. Вып. 15. С. 155–166.
3. Способ передачи информации по каротажному кабелю: пат. 2455697 Рос. Федерация. № 2009128729/08; заявл. 27.07.09; опубл. 10.07.12, Бюл. № 19. 11 с.
4. Волынская А. В., Калинин П. М. Новые помехоустойчивые сигналы для интеллектуального канала телемеханики // Фундаментальные исследования. 2012. № 11 (Ч. 4). С. 922–926.
5. Костарев С. Н., Серeda Т. Г. Разработка системы управления доступом в шахту на базе промышленного контроллера OMRON // Изв. УГТУ. 2016. № 1 (41). С. 88–93.
6. Сиберт У. М. Цепи, сигналы, системы. М.: Мир, 1988. Ч. 2. 360 с.
7. Сильвинская К. А., Голышко З. Н. Расчет фазовых и амплитудных корректоров: справочник. М.: Связь, 1980. 104 с.
8. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 2000. 462 с.
9. Шаронов А. А., Володин В. Д., Кариев И. Р., Решетов Р. С., Полевщиков И. С. Моделирование передачи данных через трехфазный каротажный кабель средствами MATLAB Simulink // Молодой ученый. 2015. № 6 (86). С. 64–67.
10. Brackett P. O., Sedra A. S. Active Compensation for high frequency effects in op-amp circuit s with applications to active RC filters // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1976. Vol. 23, no. 2. P. 68–72.

REFERENCES

1. Enekeeva E. R. et al. 2013. *Printsijp postroeniya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya elektroprivodom mekhanizmov dobychi nefiti* [The principle of constructing an automated control system for electric drives of oil production mechanisms]. *Vestnik PNIPIU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining], no. 7, pp. 116–125.
2. Mamleev T. S., Davydov A. V. 2002. *Impul'snaya propusknaya sposobnost' karotazhnykh kabeley* [Pulse throughput of borehole cables]. *Izv. UGGGA. Ser. Geologiya i geofizika* [News of the Ural State Mining University. Series Geology and Geophysics], no. 15, pp. 155–166.

3. Sposob peredachi informatsii po karotazhnomu kabelyu: pat. 2455697 Ros. Federatsiya. № 2009128729/08; zayavl. 27.07.09; opubl. 10.07.12, Byul. № 19 [Method for transmitting information over a borehole cable: Patent 2455697 Russian Federation. No. 2009128729/08; Claimed 27.07.09; Published 10.07.12, Bul. no. 19], 11 p.
4. Volynskaya A. V., Kalinin P. M. 2012, *Novye pomexoustoychivyye signaly dlya intellektual'nogo kanala telemekhaniki* [New noise-proof signals for the intelligent telemechanics channel]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], no. 11, pt. 4, pp. 922–926.
5. Kostarev S. N., Sereda T. G. 2016, *Razrabotka sistemy upravleniya dostupom v shakhtu na baze promyshlennogo kontrollera OMRON* [Development of the access control system in the mine on the basis of the industrial OMPON controller]. *Izv. UGGU* [News of the Ural State Mining University], no. 1(41), pp. 88–93.
6. Sibert U. M. 1988, *Tsepi, signaly, sistemy* [Chains, signals, systems], Moscow, pt. 2, 360 p.
7. Sil'vinskaya K. A., Golyshko Z. N. 1980, *Raschet fazovykh i amplitudnykh korektorov: spravochnik* [Calculation of phase and amplitude correctors: a reference book], Moscow, 104 p.
8. Baskakov S. I. 2000, *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio circuits and signals], Moscow, 462 p.
9. Sharonov A. A., Volodin V. D., Kariev I. R., Reshetov R. S., Polevshchikov I. S. 2015, *Modelirovanie peredachi dannykh cherez trekhfaznyy karotazhnyy kabel' sredstvami MATLAB Simulink* [Simulation of data transfer via a three-phase borehole cable using the MATLAB Simulink]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], no. 6(86), pp. 64–67.
10. Brackett P. O., Sedra A. S. 1976, Active Compensation for high frequency effects in op-amp circuit s with applications to active RC filters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 68–72.

Сергей Николаевич Костарев,
iums@dom.raid.ru

Татьяна Геннадьевна Серед,
stg41@mail.ru

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
Россия, Пермь, Комсомольский просп., 29

Sergey Nikolaevich Kostarev,
iums@dom.raid.ru

Tat'yana Gennad'evna Sereda,
stg41@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University
Perm, Russia