



ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В УПРАВЛЕНИИ ПРИВОДАМИ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЙ И ГОРНОЙ ТЕХНИКИ

М.Ю. КРЫЛКОВ, И.Н. ОЛИВЕТСКИЙ*

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Мировые технологии в геолого-разведочном бурении и горном деле в настоящее время быстро меняются. Научный прогресс в этой области плавно смещается в Азию. Он характеризуется главным образом проникновением сетевых технологий в производство. Происходит все более и более глубокое проникновение цифровых технологий в производственные технологии. Общество начало существенно делиться на творческую часть, разрабатывающую (проектирующую) эти цифровые технологии, и людей с образованием бакалавра, то есть способных правильно запускать и контролировать конкретные автоматизированные процессы. Особенно это стало видно с появлением и развитием 4-го поколения автоматизации. Период 2008—2009 годы считается началом цифровой трансформации в жизни человека из-за превращения интернета людей в интернет вещей (англ. Internet of Things, IoT). Такой подход получил название «Индустрия 4.0» или «Промышленный интернет вещей» (IIoT).

Цель. Изучение трансформации в управлении приводами геолого-разведочной и горной техники.

Материалы и методы. Приведены методы и примеры управления геолого-разведочным и горным оборудованием.

Результаты. Рассмотрены основные тенденции трансформации в управлении приводами геолого-разведочной и горной техники.

Заключение. Суть современной цифровой управляющей системы заключается в ее возможности перепрограммирования управляющих контроллеров на основе методов активной и пассивной идентификации многокомпонентных многосвязных объектов управления, выполняемого в режиме реального времени. Для программируемых контроллеров разработан новый язык FCL (Flight Control Language), позволяющий использовать в управлении методы «Нечеткой логики» [5, 8]. Это контроллерный язык нечеткого управления, в котором используется новый тип данных «лингвистическая переменная» — числовая переменная, имеющая имя (давление, скорость вращения, температура и т.д.), с которой связаны лингвистические описания.

Ключевые слова: управление, привод, геологоразведка, цифровая трансформация

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Крылков М.Ю., Оливетский И.Н. Цифровая трансформация в управлении приводами геолого-разведочной и горной техники. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020;63(6):35—45. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-35-45>

Статья поступила в редакцию 21.10.2021

Принята к публикации 17.12.2021

Опубликована 21.02.2022

* Автор, ответственный за переписку

DIGITAL TRANSFORMATIONS IN DRIVE CONTROL TECHNOLOGY FOR EXPLORATION AND MINING EQUIPMENT

MIKHAIL Yu. KRYLKOV, IVAN N. OLIVETSKIY*

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. Technologies applied in geological exploration and mining are undergoing rapid transformations. The scientific progress in this field, which is shifting towards Asia, is characterized by the integration of network and production technologies. The modern society can be conventionally divided into the creative part, i.e. people designing digital technologies, and those operating these technologies. This has become particularly evident with the advancement of the 4th generation of automatics. The period of massive digital transformation started in 2008–2009 with the appearance of the Internet of Things (IoT). This process acquired the term *Industry 4.0* or Industrial Internet of Things (IIoT).

Aim. To study current digital transformations in drive control technology applied in exploration and mining equipment.

Materials and methods. Methods and examples of controlling exploration and mining equipment are presented.

Results. The main trends in the development of drive control technology applied in exploration and mining equipment were examined.

Conclusion. Modern digital control systems are capable of re-programming controllers using an active or passive identification of multicomponent multiloop controlled objects in real time. The new Flight Control Language (FCL) designed for programmable controllers incorporates the methods of fuzzy logic [5,8]. This fuzzy control language uses a new type of data — a linguistic variable, which is a numerical variable with a name, e.g. pressure, rotation speed, temperature, etc., involved in linguistic descriptions.

Keywords: control, drive, exploration, digital transformation

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Krylkov M.Yu., Olivetskiy I.N. Digital transformations in drive control technology for exploration and mining equipment. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(6):35—45. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-35-45>

Manuscript received 21 October 2021

Accepted 17 December 2021

Published 21 February 2022

* Corresponding author

Мировые технологии в геолого-разведочном бурении и горном деле в настоящее время быстро меняются. Научный прогресс в этой области плавно смещается в Азию. Он характеризуется главным образом проникновением сетевых технологий в производство. Происходит все более и более глубокое проникновение цифровых технологий в производственные технологии. Общество начало существенно делиться на творческую часть, разрабатывающую

(проектирующую) эти цифровые технологии, и людей с образованием бакалавра, то есть способных правильно запускать и контролировать конкретные автоматизированные процессы. Особенно это стало видно с появлением и развитием 4-го поколения автоматизации [12]. Период 2008—2009 годы считается началом цифровой трансформации в жизни человека из-за превращения интернета людей в интернет вещей (англ. Internet of Things, IoT). Такой подход

получил название «Индустрия 4.0» или «Промышленный интернет вещей» (IoT).

Цифровая трансформация качественно изменяет традиционные производственные технологии, происходит повсеместное создание новых ценностей, внедряется искусственный интеллект, сетевые/полевые устройства сами стали общаться между собой, то есть появился промышленный интернет устройств, умных вещей, роботов и т.п.

Сразу отметим, что цифровая трансформация — это не оптимизация, оптимизация преследует цель выполнения каких-то критериев, а здесь все гораздо шире и глубже. Поясним. Например, в Китае благодаря сетевым цифровым технологиям удалось обуздать коронавирус, не вылететь всем, а именно удалось взять COVID-19 под контроль.

Раньше технический прогресс ознаменовывался изобретением или открытием чего-то, например были изобретены электрогенераторы/электродвигатели, появились линии электропередач, непрерывные металлургические производства, определившие появление и развитие энергетического машиностроительного общества. Изобретение компьютеров привело к информационному обществу.

Сейчас цифровая трансформация — это эволюция, спокойное развитие отраслей, связанное с развитием творческого общества. Происходит переход от информационного к творческому обществу, ориентированному на человеческую сущность людей (прежде всего ориентированному созиданию, созданию новой техники, открытию новых возможностей в технологиях, например, с приходом всеобщей так называемой цифровизации), позволяющую им творить, раздвигая границы возможного. При этом в производство пришли искусственный интеллект и цифровая автоматизация, уже основанная на анализе больших объемов информации, то есть то, что называют «большие данные» или big data. Тут же появляются и новые модели управления производством.

Одной из предпосылок для появления творческого общества («общества 5.0») является истощение недр, нехватка природных ресурсов, человеку приходится глубже проникать в недра земли, разведывать и разрабатывать северные и морские месторождения. Например, в Норильске добыча руд уже осуществляется на глубине более километра, проектируется шахта глубиной два километра.

В Японии «общество 5.0» является долгосрочной стратегией развития для решения

возникающих проблем (снижение конкурентоспособности, старение населения, пандемия, нарушение экологии, нехватка природных и трудовых ресурсов). Японская философия производства Монозукури связана со снижением затрат в рамках действующего производства, в более широком значении означает синтез технологического мастерства, ноу-хау и духа производственной практики Японии. Дух включает в себя искреннее отношение к производству с гордостью, умением и преданностью, а также стремление к инновациям и совершенству. Коротко, Монозукури — это интеллектуальное производство.

Важной особенностью цифровой трансформации в геологоразведке и горном деле является то, что она должна идти снизу: от станков и машин, от их приводов. Она должна идти снизу (от полевой автоматики) и вверх, а не в обратном направлении (рис. 1). Так и происходит у нас, например бурение станком СКБ-7 с сенсорным экраном, на котором установлена SCADA фирмы ИнСАР [5].

Первый верхний уровень включает в себя SCADA-систему и базу данных.

Еще выше — системы управления предприятием по методологиям MES и ERP.

Между нижним уровнем и верхним находится уровень edge computing (уровень периферийных, или граничных, вычислений), иногда его еще называют fog computing (туманные вычисления). В общих чертах под этой технологией подразумевается отдаленный мониторинг и обработка данных непосредственно на IoT-девайсах. Сбор и анализ первичных данных здесь проводится не в централизованной вычислительной среде, а в реальном времени в распределенной вычислительной среде, там, где происходит генерация потоков данных (в программируемом логическом контроллере (ПЛК)). Это дает возможность разгрузить потоки данных, идущие на верхние уровни, от не нужной там информации. Нет необходимости передавать «грязные данные» вверх, туда, где они не нужны, следует с ними оперировать на нижнем распределенном уровне автоматики 4-го поколения.

Например, для определения главных факторов, влияющих на показатели производственного процесса, используется линейный многомерный статистический анализ данных, точнее, так называемый «метод вкладов» факторов/параметров в уравнение множественной регрессии [6,8]. Более того, здесь с помощью линейного многомерного регрессионного анализа возможно получить в реальном масштабе времени передаточные



Рис. 1. На нижнем (полевом) уровне находятся датчики, ПЛК и приводы экскаватора
Fig. 1. The lower (field) level contains sensors, PLCs and excavator drives



функции, например для экстремального управления приводами буровых установок при бурении скважины уже за части одного оборота бурового снаряда [12, 13], о чем пойдет речь ниже в этой статье.

С другой стороны, для применения методов искусственного интеллекта по распознаванию в реальном времени действующих на буровой снаряд технологических и геологических возмущений (их законов изменения) требуется хранить поступающие с датчиков данные для обучения САУ. При этом предполагается, что буровая система будет устойчива на отдельных отрезках времени, так как бессмысленно оценивать неустойчивые процессы. Хотя при бурении удары о стенки скважины бурового снаряда (рис. 2) периодически меняют его фазовые картины движения, при этом делая из неустойчивой системы в малом устойчивую систему в большом.

Поясним, откуда возникают эти возмущающие воздействия. На движение колонны буровых труб оказывают влияние реакции со стороны стенок скважины.

При этом данные воздействия могут быть непрерывными в виде трения скольжения и качения, а также и кратковременно действующими, ударными (рис. 2). При значительной глубине скважины в колонне буровых труб различают два участка: сжатый и растянутый (рис. 26). Ось колонны буровых труб при бурении принимает форму пространственной кривой переменной кривизны [8]. При вращении колонны могут возникать прямые и обратные прецессии [6, 8, 17].

Равномерное вращение искривленного бурового снаряда в криволинейной скважине невозможно, это, например, было показано при моделировании буровой колонны как стержня Коссера в статье [4, 15]. На вращение колонны буровых труб накладываются изгибно-крутильные волны. Описать математически такие сложные процессы, происходящие в колонне, непросто, да и решение таких уравнений (в частных производных) не всегда возможно, не говоря даже об определенности этих решений [7].

Определение структуры и параметров по наблюдениям (экспериментальным данным) принято называть идентификацией.

Если описывать передачу управления дифференциальным уравнением

$$A(p)y = B(p)x, \quad (1)$$

где $A(p) = a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + 1$;
 $B(p) = b_l p^l + b_{l-1} p^{l-1} + \dots + b_1 p + b_0$;

$p^r \xrightarrow{\Delta} \frac{d^r}{dt^r}$, m — порядок уравнения из физических соображений $m \geq 1$, то связь между переменными на входе и выходе может быть найдена с помощью интеграла Дюамеля. Интеграл Дюамеля (интеграл свертки) выражается формулой

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) w(t - \tau) d\tau = \int_0^t w(\tau) x(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $x(t)$, $y(t)$ — входной и выходной сигналы; $w(\tau)$ — импульсная переходная (весовая) функция

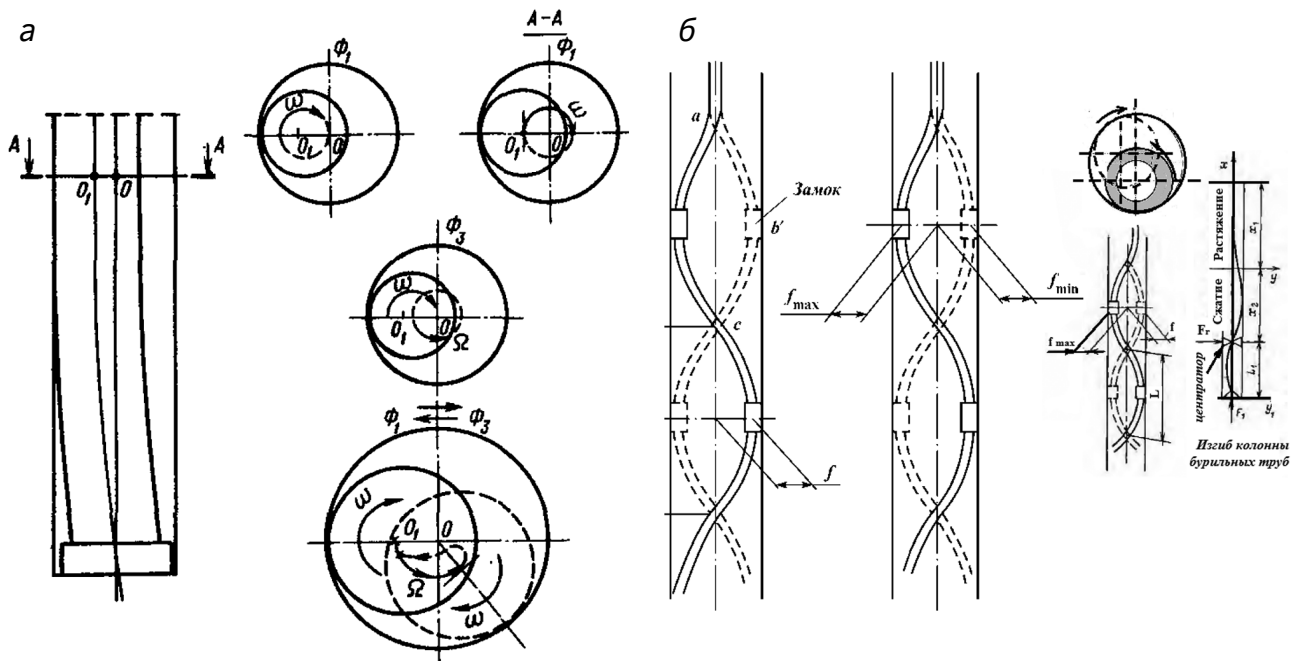


Рис. 2. Взаимодействие колонны буровых труб со стенками скважины: а) примеры форм движения (Φ_1, Φ_2, Φ_3) участка бурового снаряда в некотором произвольном сечении скважины (В.П. Зиненко [11]); б) аномальный износ поперечного сечения трубы (А.Е. Сароян [12])

Fig. 2. Interaction of the string of drill pipes with the borehole walls: а) examples of forms of movement (Φ_1, Φ_2, Φ_3) of a section of a drill string in a certain arbitrary section of the borehole (V.P. Zinenko [11]); б) abnormal wear of the pipe cross-section (А.Е. Saroyan [12])

(ИПФ) объекта, т.е. сигнал $y(t)$ на выходе объекта, если входной сигнал $x(t)$ представляет собой дельта-функцию вида

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, t > 0; \\ \infty, & \text{при } t = 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Выполнив преобразование Лапласа над интегралом свертки (2), получим уравнение связи между изображениями сигналов: $Y(p) = W(p)X(p)$, где $X(p)$ и $Y(p)$ — изображения входного и выходного сигналов; $W(p)$ — изображение ИПФ, которое называется передаточной функцией.

Передаточная функция может быть найдена также и из уравнения (1) с помощью простого преобразования $W(p) = B(p)/A(p)$, где p — комплексная переменная.

Определение оригиналов осуществляется с помощью обратного преобразования Лапласа — Фурье:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} X(p)e^{pt} dp.$$

Итак, в бурении стоит задача по наблюдаемым входным и выходным переменным определить уравнение связи (1) или переходную функцию колонны буровых труб. С помощью небольшого бурового эксперимента, меняя частоту вращения и осевую нагрузку, возможно для каждой конкретной ситуации (она меняется с увеличением длины скважины) получить график или таблицу чисел, определяющих значения сигналов на входе и выходе. Аппроксимировав аналитическим выражением полученные реализации, можно построить дифференциальное уравнение заданной типовой структуры.

При буровом эксперименте можно использовать известные ступенчатые, импульсные и гармонические входные сигналы. Последние образуются при изменении вписываемости вращающихся отдельных (искривленных) участков буровой колонны в профиль скважины с собственным искривлением (рис. 2). Очевидно, что мы имеем дело с периодической функцией от времени с периодом обратно пропорциональным скорости вращения бурового снаряда. Другими словами, она зависит от режима бурения, кривизны профиля скважины

в конкретном месте рассмотрения, конструкций скважины и бурового снаряда.

Однако при значительной длине скважины ударно прерывистый характер работы бурового снаряда в скважине не позволяет получить полные переходные функции. Отследить реакцию колонны бурильных труб (КБТ) на сигналы, несущие небольшую энергию на высоких частотах, затруднительно. КБТ является фильтром нижних частот, т.е. она значительно уменьшает амплитуды на высоких частотах. Поэтому точность определения передаточной функции в области высоких частот с помощью переходных функций весьма низка. На качестве идентификации с помощью переходных функций неблагоприятно сказываются также случайные помехи. Частично указанные недостатки устраняются при идентификации объекта частотными методами.

Метод логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ) возможно применить для определения коэффициентов передаточной функции колонны бурильных труб, рассматривая ее как комбинацию колебательного и апериодического звеньев. Данный метод предполагает наличие гармонического воздействия долгое время. Если рассматривать вписываемость искривленного участка колонны бурильных труб в искривленном участке скважины как источник такого сигнала, то мы можем, меняя скорости вращения, получить данные для построения ЛАФЧХ и на этой основе оценить коэффициенты типовых передаточных функций. Естественно предположить зависимость коэффициентов передаточной функции колонны бурильных труб от ее длины.

Возможность использования ударных нагрузок на колонну бурильных труб как аналог функции Дирака также не следует сбрасывать в методе пассивной идентификации работы бурового снаряда в скважине.

Далее следует понимать, где работают скоростные гигабитные технологии и медленные технологии передачи данных (промышленные протоколы типа **Modbus RTU**, **PROFIBUS**, **LON**, **CAN** и т.п.). Последние медленнее первых, потому что преследуют цель доставки качественных достоверных данных об объекте управления в ПЛК. Выше для соединения уровней автоматизации и для «общения» ПЛК между собой можно применять и высокоскоростные гигабитные технологии, в частности стандарты IEEE **802.3ah** и два гигабитных стандарта для оптоволокна: **1000BASE-LX10** и **1000BASE-BX10**.

Рассмотренный пример показывает, что для создания интеллектуального геолого-разведочного и горного производства нужно собрать информацию из производственных процессов с нижнего полевого уровня в реальном времени, произвести ее фильтрацию, обработать ее, отсеяв грязные данные с помощью периферийных вычислений, и передать на верхние уровни автоматизации (рис. 1).

Большое количество зарубежных фирм в период санкций против России используют закрытые стандарты, преследуя рыночные цели получения прибыли за счет последующего совершенствования своих технологий, разрабатывая очередные новые закрытые методы, усовершенствования, переходя на новые разработки, более совершенные, и отказываясь от поддержки ранее выпущенных (устаревших технологий).

Огромное разнообразие протоколов и закрытых стандартов для работы контроллеров тормозит развитие и усложняет процесс внедрения решений по автоматизации. Поэтому появился новый стандарт TSN (Time Sensitive Networks), суть его в том, что все устройства в сети должны быть синхронизированы от общего эталона времени и образовывать единую и функционально совместимую инфраструктуру. При этом прокладывать специальные кабели не требуется, подойдут стандартные кабели «витая пара», дополнительно нужно будет в сетевых коммутаторах обновить прошивку для поддержки TSN. В 2018 году появляется такая открытая сетевая технология CC-Link IE TSN, объединяющая большинство протоколов передачи данных, которые поддерживаются различными производителями сетевого оборудования. Технология CC-Link IE TSN объединяет разные сети в единое поле передачи, позволяющее передавать большие объемы данных на сверхвысоких скоростях с привязкой к меткам времени, то есть с реализацией точной синхронизации данных по времени. Это дает возможность отслеживать большое число развивающихся событий в многочисленных часто переплетающихся между собой горных технологиях и на основе анализа полученных больших данных принимать правильные решения по управлению этими процессами в реальном времени.

Например, шахтная вентиляция, работа компрессоров, подъемных машин, освещение, электроснабжение работающих механизмов, управление горным давлением и т.д. при проходке горных выработок осуществляются одновременно. Встающие здесь задачи традиционно решались

человеком, однако лучшие решения на основе полного и быстрого учета всех данных дают современные программы искусственного интеллекта.

Эффективность современных производственных технологий определяется скоростью связи с приводами и сопоставимой скоростью процессора, обрабатывающего данные. Это, собственно, сейчас и будет влиять на новую технологию бурения скважин на твердые полезные ископаемые, когда решения по управлению магнитным полем электродвигателя привода бурового станка должны будут реализовываться за один оборот бурового снаряда и даже за его доли, на которых передаточная функция управления постоянна. На разных режимах будут свои передаточные функции, зависящие от профиля скважины, геолого-технических условий бурения и мультикасааний бурильщика сенсорных систем ввода (сенсорного экрана с мультитачем).

Для управления вращением бурового снаряда следует выбрать высокودинамичный привод [1, 2], а именно однодвигательный привод на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и векторным управлением (рис. 3).

Отметим, что данный привод работает на поле-вом уровне современной промышленной автоматизации (рис. 4). Современная автоматика четвертого поколения отличается от остальных тем, что в ней широко поддерживаются интернет-технологии. Стирается граница между верхним и нижним уровнем управления (рис. 4). Автоматика

четвертого поколения обладает высокой степенью децентрализации, унификацией исполнения на устройствах различного типа, характеризуется кросс-платформенностью [12, 13, 5].

В третьем и четвертом поколениях автоматизируются децентрализованные полевые протоколы. В них каждый датчик и привод снабжен микроконтроллером, способным обрабатывать сигнал, реализовывать алгоритм управления и общаться по сети передачи данных не только с рабочей станцией АРМ АСУ ТП, но и между собой, и преобразователями частоты асинхронных двигателей в целях реализации оптимального алгоритма управления, например процессом геолого-разведочного бурения.

MasterSCADA — одна из ведущих отечественных SCADA- и SoftLogic-систем для АСУ ТП и MES.

После сделанного замечания о месте приводов в обобщенной структуре средств автоматизации технологического уровня, включающих приводы буровых станков, рассмотрим возможности векторного управления асинхронным электродвигателем (рис. 6) для этого конкретного случая.

Оценим возможность цифрового экстремального регулирования за время одного оборота колонны бурильных труб. Электропривод состоит из трех основных частей: электродвигателя, преобразователя и системы управления. Система управления получает входные сигналы с разных датчиков электропривода (двигателя) и от контроллеров, собирающих информацию о самом процессе бурения

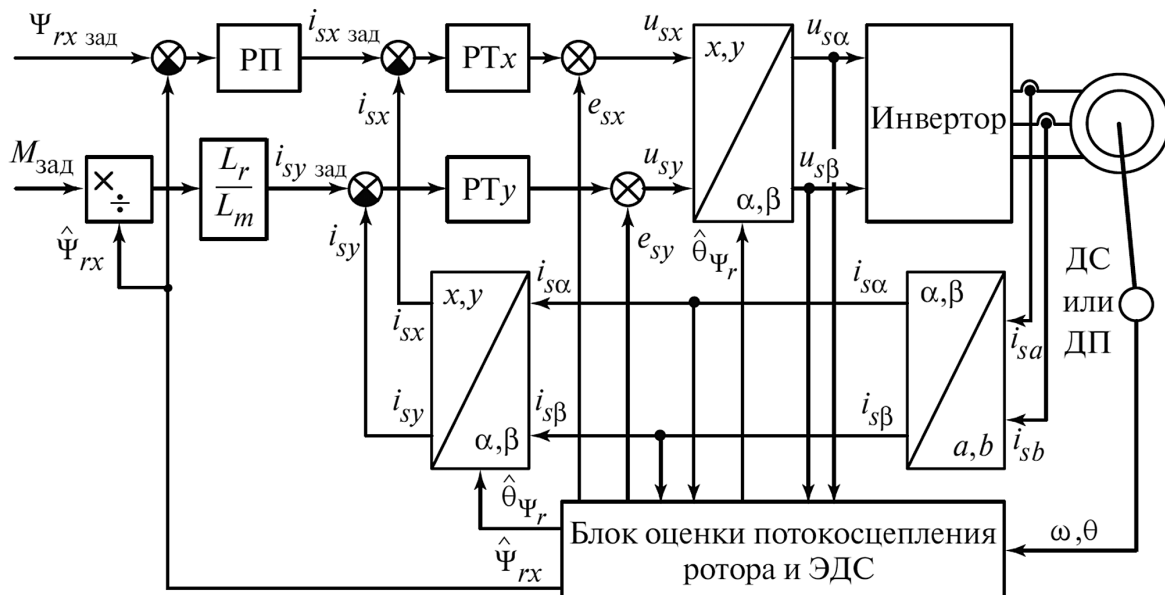


Рис. 3. Схема векторного управления асинхронным двигателем

Fig. 3. Scheme of vector control of an asynchronous motor

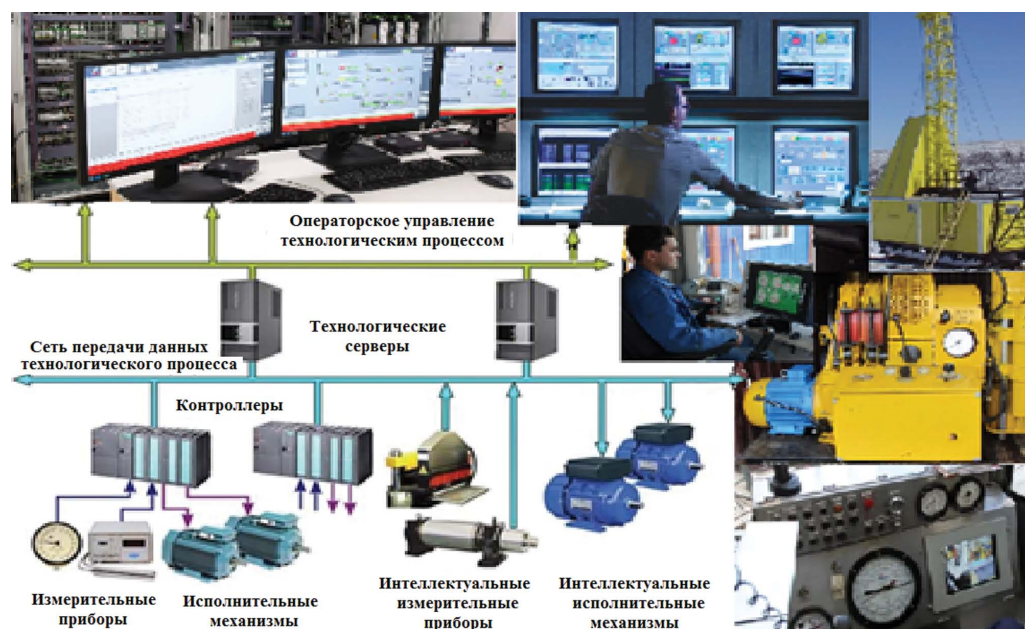


Рис. 4. Производственные уровни автоматизации АСУТП на базе автоматизации 4-го поколения
Fig. 4. Production levels of automation of process control systems based on 4th generation automation

для формирования управляющих сигналов (рис. 3, 6), и на основании этой информации формирует сигналы для инвертора, который обеспечивает (задает) требуемые амплитуду и угловое положение вектора напряжения (или тока) статора. При этом амплитуда и положение вектора потокоцепления ротора рассчитываются с помощью наблюдателя. Амплитуда и положение вектора потокоцепления ротора относятся к не измеряемым параметрам системы управления [1, 2].

Для реализации векторного управления нужно также задать параметры самого электродвигателя и параметры конструктивных особенностей. Нужно задать: количество пар полюсов, соединение обмоток двигателя (Y/Δ), сопротивления обмоток статора, индуктивности по осям d и q (рис. 6). Надо также определить момент инерции ротора, демпфирование, коэффициенты противо-ЭДС и трения. Эти параметры определяются экспериментально для каждого двигателя.

Регулирование скорости асинхронного двигателя (АД) осуществляется путем изменения частоты и текущих переменных асинхронного двигателя и взаимной ориентацией их векторов в декартовой системе координат. Система управления является многоконтурной, и необходимо оценить производительность контроллеров, чтобы они успевали рассчитывать управляющие сигналы для магнитного потока и момента двигателя. С помощью датчиков тока определяются токи фаз

статора, затем определяются токи ротора i_{rd} и i_{rq} (рис. 6) и их значения подаются на вход контроллера тока. Контроллер формирует опорные напряжения и отправляет их на широтно-импульсный преобразователь (ШИМ). ШИМ, в свою очередь, формирует команды инвертору для управления ключами. Дополнительно контроллеру токов добавляется контроллер скорости, компенсатор перекрестных связей и защита.

Рассмотренная структура должна постоянно осуществлять преобразования Кларка и Парка.

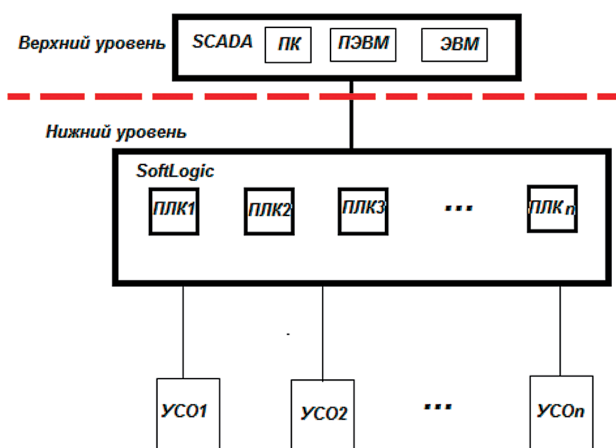


Рис. 5. Пояснение к тому, чем отличается автоматизация (управление) 3-го поколения от 4-го
Fig. 5. Explanation of how the 3rd generation automation (control) differs from the 4th

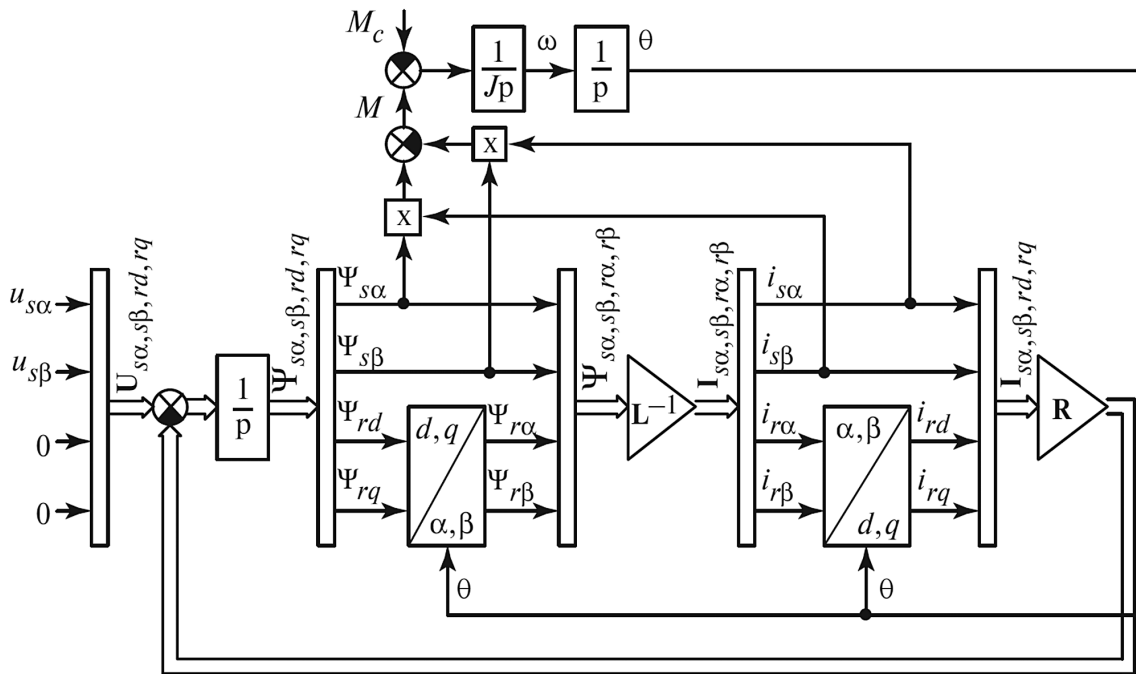


Рис. 6. Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [7]: p — оператор дифференцирования: $p = d / dt$; M_c — момент сопротивления

Fig. 6. Model of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor [7]: p — differentiation operator: $p = d / dt$; M_c — moment of resistance

Три контроллера должны успеть выполнить свои вычисления за один оборот бурового снаряда, это за 0,03 секунды (если $\omega = 2000$ об/мин), или за 30 мс, или за 30 000 мкс. Что же дает современная электроника? Ее контроллеры работают на частоте 5 и 100 мкс, чего вполне достаточно для управления на одном обороте бурового снаряда. Современные контроллеры имеют производительность свыше 1 млн операций в секунду, обычно от десятков млн до сотен млн операций в секунду [13, 14]. Скорость передачи информации от датчиков, работающих на частоте, и их самих также достаточна для управления на «одном обороте бурового снаряда». Предполагается бездатчиковое управление, в крайнем случае использовать датчики на элементах Холла с CAN-интерфейсом.

Таким образом, в условиях автоматизации четвертого поколения возможно экстремальное регулирование работы приводов стационарных буровых установок за один оборот вращения бурового снаряда.

Расчеты параметров режима бурения по критериям оптимизации, естественно, выполняются на верхнем уровне SCADA-системы, например в отечественной системе MasterSCADA 4D. Она в рамках одного проекта позволяет программировать:

- 1) программируемые логические контроллеры (ПЛК);
- 2) локальные панели управления (HMI-панели);
- 3) рабочие места операторов (АРМ) [5, 12, 13].

Суть современной цифровой управляющей системы заключается в ее возможности перепрограммирования управляющих контроллеров на основе методов активной и пассивной идентификации многокомпонентных многосвязных объектов управления, выполняемого в режиме реального времени.

Для программируемых контроллеров разработан новый язык FCL (Flight Control Language), позволяющий использовать в управлении методы «Нечеткой логики» [5, 14]. Это контроллерный язык нечеткого управления, в котором используется новый тип данных «лингвистическая переменная» — числовая переменная, имеющая имя (давление, скорость вращения, температура и т.д.), с которой связаны лингвистические описания. Например, в бурении при смене разбуриваемых пород должна происходить своевременная инициализация значений параметров по выносимому на поверхность шламу и т.п., с учетом нечеткого геологического разреза.

Вопросу применения искусственного интеллекта для распознавания геолого-технических ситуаций в бурении будет посвящена следующая статья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.В., Козярук А.Е., Батуринов С.В. Электрический привод. Моделирование приводов с векторным управлением горного оборудования: учебное пособие. СПб., 2012.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
3. Басинский В.Г., Жернаков А.П., Крылков М.Ю. Современные цифровые системы автоматического управления: учебно-методическое пособие к курсам «Автоматизация технологических процессов» и «Теория автоматического управления» для студентов специальности «горный инженер». М.: МГРИ-РГГРУ, 2018. 33 с.
4. Беляев А.К. Локальная неустойчивость вращения буровой колонны // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2008. № 1. С. 5—11.
5. Варламов И.Г. SCADA нового поколения. Эволюция технологий — революция системостроения // Автоматизированные информационно-управляющие системы в энергетике. 2016. № 2 (79). С. 2—6.
6. Воробьев Г.А. Оптимизация работы сжатой зоны буровой колонны: дисс. ... канд. техн. наук: 04.00.19. М., 1984. 302 с.
7. Горицкий А.Ю., Кружков С.Н., Чечкин Г.А. Квазилинейные уравнения с частными производными первого порядка: обобщенные решения, ударные волны, центрированные волны разряжения. Краткое учебное пособие. М.: Изд-во мехмат ф-та ВГУ, 1999.
8. Зиненко В.П. Направленное бурение: учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1990. 152 с.
9. Елисеев В.В. Механика упругих тел. СПб.: Изд-во С.-Петербургского политехнического университета, 1999.
10. Крылков М.Ю. Оценка информации о геологоразведочном бурении с помощью многофакторного анализа // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1981, № 4. С. 144—150.
11. Крылков М.Ю. Об оперативном управлении бурением на базе мини- и микро-ЭВМ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1981. № 7. С. 62—66.
12. Крылков М.Ю., Крылков Н.М., Латышев Г.В. Автоматизация колонкового алмазного бурения. XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва: Российский государственный геологоразведочный университет, 8—10 апреля, 2015 г.): в 2 т.: доклады. Т. 1. С. 61—62. М.: МГРИ-РГГРУ, 2015. 576 с.
13. Крылков М.Ю., Крылков Н.М., Латышев Г.В. Распределенная автоматизированная система управления алмазным колонковым бурением // Математика, информатика, естествознание в экономике и обществе: труды Всероссийской научной конференции: в 2 т. М.: МФЮА, 2016. Т. 1. С. 113—117.
14. Крылков М.Ю., Оливетский И.Н. Цифровые системы управления производственными процессами. Пособие к курсу «Автоматизация технологических процессов»: учебно-методическое пособие для студентов специальности «горный инженер». М.: МГРИ-РГГРУ, 2020. 38 с.
15. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Наука, 1961. 824 с.
16. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. М.: Наука, 1987. 352 с.
17. Сароян А.Е., Оганов Г.С., Ширин-Заде С.А. Проектирование и эксплуатация буровой колонны. М.: ВНИИОЭНГ, 2010. 380 с.

REFERENCES

1. Alekseev V.V., Kozaryuk A.E., Baturin S.V. Electric drive. Modeling of drives with vector control of mining equipment. St. Petersburg, 2012.
2. Anuchin A.S. Control systems for electric drives: a textbook for universities. Moscow: MPEI, 2015. 373 p.
3. Basinsky V.G., Zhernakov A.P., Krylov M.Yu. Modern digital automatic control systems: teaching aid for the courses "Automation of technological processes" and "Theory of automatic control" for students of the specialty "mining engineer". Moscow: MGRI-RGGRU, 2018. 33 p.
4. Belyaev A.K. Local instability of the drill string rotation // Ecological Bulletin of Scientific Centers of the BSEC. 2008. No. 1. P. 5—11.
5. Varlamov I.G. SCADA of a new generation. Evolution of technologies — revolution of system engineering // Automated information and control systems in the power industry. 2016. No. 2 (79). P. 2—6.
6. Vorobyev G.A. Optimization of work of the compressed zone of the drill string: dissertation of the candidate: 04.00.19. Moscow, 1984. 302 p.
7. Goritsky A.Yu., Kruzhkov S.N., Chechkin G.A. First order quasilinear partial differential equations: generalized solutions, shock waves, centered discharge waves. A short tutorial. Publishing house of the Faculty of Mechanics and Mathematics of the Voronezh State University. 1999.
8. Zinenko V.P. Directed drilling: textbook. manual for universities. Moscow: Nedra, 1990. 152 p.
9. Eliseev V.V. Mechanics of elastic bodies. St. Petersburg Polytechnic University Publishing House, 1999.
10. Krylov M.Yu. Evaluation of information on exploration drilling using multivariate analysis Proceedings of higher educational institutions. Geology and exploration. 1981. No. 4. P. 144—150.
11. Krylov M.Yu. On the operational control of drilling on the basis of mini- and micro-computers. Proceedings of higher educational institutions. Geology and exploration. 1981. No. 7. P. 62—66.

12. Krylkov M.Yu., Krylkov N.M., Latyshev G.V. Automation of diamond core drilling. XII International Scientific and Practical Conference "New Ideas in Geosciences" (Moscow: Russian State Geological Prospecting University, April 8—10, 2015): in 2 volumes: reports. T. 1. P. 61—62. Moscow: MGRI-RGGRU, 2015. 576 p.
13. Krylkov M.Yu., Krylkov N.M., Latyshev G.V. Distributed automated control system for diamond core drilling. // Mathematics, informatics, natural science in economics and society. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference: in 2 volumes. Moscow: MFYuA, 2016. T. 1. P. 113—117.
14. Krylkov M.Yu., Olivetskiy I.N. Digital control systems of production processes: textbook for the course "Automation of technological processes": a teaching aid for students of the specialty "mining engineer". Moscow: MGRI-RGGRU, 2020. 38 p.
15. Lurie A.I. Analytical Mechanics. Moscow: Nauka, 1961. 824 p.
16. Panovko Ya.G., Gubanov I.I. Stability and oscillations of elastic systems: Modern concepts, paradoxes and errors. Moscow: Nauka, 1987. 352 p.
17. Saroyan A.E., Oganov G.S., Shirin-Zade S.A. Design and operation of the drill string. Moscow: VNIIOENG, 2010. 380 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Крылков М.Ю. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Оливетский И.Н. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Mikhail Yu. Krylkov — developed the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Ivan N. Olivetskiy — developed the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крылков Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и энергетики горных и геолого-разведочных работ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: krilkovmi@mgri.ru
тел.: +7 (925) 881-03-98
SPIN-код: 9637-9330
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0306-6238>

Оливетский Иван Николаевич* — кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и энергетики горных и геолого-разведочных работ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: olivetskiyin@mgri.ru
тел.: +7 (925) 739-85-91
SPIN-код: 4753-2620
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8320-5890>

Mikhail Yu. Krylkov — Cand. of Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Mechanization, Automation and Energy of Mining and Geological Exploration Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: krilkovmi@mgri.ru
tel.: +7 (925) 881-03-98
SPIN-code: 9637-9330
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0306-6238>

Ivan N. Olivetskiy* — Cand. of Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Mechanization, Automation and Energy of Mining and Geological Exploration Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: olivetskiyin@mgri.ru
tel.: +7 (925) 739-85-91
SPIN-code: 4753-2620
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8320-5890>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author