

## Применение унифицированной системы управления электроприводами самосвала и экскаватора и способы ее диагностики

А.Е. Козярук, С.И. Таранов  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: kozjaruk@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В последние годы на самосвалах и экскаваторах все чаще применяется привод переменного тока с асинхронными двигателями, о чем может свидетельствовать создание экскаваторов ЭКГ-32Р и самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 136 тонн. Приводы хода этих машин имеют схожую структуру и режимы работы с разницей лишь в частоте вращения вала двигателя и величине питающего напряжения. В связи с этим актуальным является вопрос унификации структуры и применения одного приводного оборудования для самосвала и для экскаватора, с разницей только в настройке работы системы управления приводом и способе получения питающего напряжения.

**Материалы и методы:** Для проверки принципа унификации оборудования предложены математические модели приводов мотор-колеса самосвала и привода хода экскаватора, поскольку они имеют приблизительно сопоставимые режимы работы. Модель построена в пакете Simulink программы MatLab.

**Результаты:** Получены диаграммы, по которым отслеживается поведение приводов при различных режимах нагрузки, являющихся наиболее «тяжелыми» для работы привода: возрастание до максимально возможной, режимы стопорения, начало движения при полной загрузке, движение при уклоне поверхности до 12 %.

**Выводы:** Полученные диаграммы указывают на возможную совместимость привода для экскаваторов и самосвалов и возможность применения одного типа привода с прямым управлением момента. Полученные результаты могут быть применены при проектировании приводов машин горно-транспортного комплекса и позволят сократить расходы по его обслуживанию в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** асинхронный привод, алгоритмы управления моментом, горно-транспортный комплекс, унификация электрооборудования.

## Application of Unified Control System of Dump Truck and Excavator Electric Drive and of Its Diagnostics Methods

A.E. Kozjaruk, S.I. Taranov  
National Mineral Resources University, St. Petersburg, Russian Federation  
E-mail: kozjaruk@mail.ru

### Abstract

**Background:** Within the last years the alternating-current drive with asynchronous motors has been used on dump trucks and excavators more frequently. The evidence is designing the EKG-32P excavators and BelAz dump trucks with load-carrying ability of 136 tonnes. The motion drive of these machines has the similar structure and modes but the engine shaft speed and supply voltage amount can be different. Thus, the problem of structure unification and application of the driven equipment for dump trucks and excavators with difference only in operation adjustment of drive control system and method of supply voltage is considered.

**Materials and methods:** To check the unification principle of equipment the mathematical models of motorized wheel drives of dump trucks and motion drives of excavators are offered because they have approximately comparable operation modes. The model is developed in Simulink package of MatLab program.

**Results:** The diagrams are received to track the drives behavior in different load modes which are mostly hard for drive operation such as maximum increasing the stop modes, beginning of movement with full load, movement in inclination of the surface up to 12 per cent.

**Conclusions:** The given diagrams point on the possible drive compatibility for dump trucks and excavators as well as the possibility to apply one type of drive with direct torque control. The results can be used for designing the machines drives of mountain and transport systems and reduced the costs on its service during the operation period.

**Key words:** asynchronous drive, torque control algorithms, mountain and transport system, unification of electrical equipment.

**Введение.** В современных условиях на горных предприятиях для добычи и транспортировки горной массы применяются экскаваторы и самосвалы, имеющие электропривода как старого типа с применением двигателей постоянного тока, так и современные приводы с применени-

ем асинхронных двигателей. Последние приводы появились на нашем рынке сравнительно недавно и используются при изготовлении большегрузных самосвалов и экскаваторов с мощностью электродвигателей до 800–1000 кВт. Возможным это стало благода-

ря развитию и применению в системах управления приводом переменного тока полностью управляемых IGBT-транзисторов и IGBT-тиристоров.

**Выбор системы управления.** Данная модель привода содержит в своем составе выпрямитель и двухуровневый автономный инвертор напряжения. Применение активного выпрямителя в данных схемах обусловлено его возможностью обеспечения значения входного коэффициента мощности, близкого к единице, меньшего, по сравнению с диодным многопульсным выпрямителем, коэффициента гармоник по току, а также возможностью работы во всех четырех квадрантах механической характеристики с автоматической рекуперацией энергии в питающую сеть (что весьма актуально для экскаватора). Схема управления активным выпрямителем построена по векторному принципу с ориентацией по вектору напряжения сети.

В данной схеме управления может быть реализован один из способов формирования напряжения: PWM (Pulse Width Modulation), SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), DTC (Direct Torque Control). Система формирования напряжения DTC выполнена по алгоритму прямого управления моментом, имеет более простую процедуру настройки, в отличие от систем PWM и SVPWM, и содержит всего один ПИ-регулятор скорости. Способ формирования напряжения основан на табличном переключении ключей инвертора, при этом ключи переключаются, только когда рассогласование по потокосцеплению  $\Psi$  или моменту  $M$  достигнет заданного значения. Структурная схема привода с DTC представлена на рис. 1.

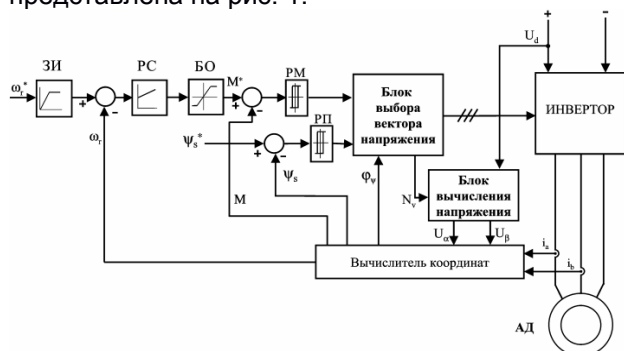


Рис. 1. Схема привода с DTC

Схема является двухконтурной, содержащей внешний контур регулирования скорости и внутренний контур регулирования потокосцепления статора и момента. Для реализации системы регулирования необходима информация о регулируемых переменных. Задание на угловую скорость  $\omega_r$  поступает на вход задатчика интенсивности (ЗИ), который определяет необходимый темп изменения скорости задающим сигналом. Заданное значение сравнивается с вычисленным  $\omega_r$ , а затем обрабатывается регулятором скорости (РС). На выходе РС после учета ограничений в блоке ограничения (БО) формируется задание на электромагнитный момент  $M$ . Вычис-

ленные рассогласования по моменту и потокосцеплению поступают на релейные регуляторы РМ и РП, отвечающие за желаемую частоту переключения ключей, и далее в блок выбора вектора напряжения, где происходит выбор оптимального значения из множества состояний, которое выдается в виде управления на силовые ключи инвертора и формирует заданное значение вектора выходного напряжения.

**Унификация оборудования.** Для рассматриваемых машин горно-транспортного комплекса целесообразно рассматривать следующие структуры привода: выпрямитель, инвертор, система управления приводом. Эта задача является весьма актуальной, поскольку высокая степень унификации оборудования позволит сократить затраты на изготовление дорогостоящего оборудования, зачастую являющегося уникальным, так как оно может применяться в конкретном приводе одной модели агрегата. Примером такого привода может служить привод хода экскаватора и тяговый привод самосвалов. Поскольку два этих привода будут иметь приблизительно одинаковые режимы работы, можно говорить об унификации оборудования привода. Унификация других типов электроприводов экскаватора (подъема, напора, поворота) также может быть осуществлена путем использования аналогичных типов комплектов привода оборудования. В части структуры и алгоритмов управления электроприводами механизмов горно-транспортного комплекса переход определяется в первую очередь требованиями по обеспечению максимальных моментов в режимах трогания, стопорения и ограничения длительных перегрузок рабочих органов в этих режимах.

В [1, 3] рассмотрены структуры электропривода с применением систем DTC, обеспечивающих максимальное быстродействие по контуру момента, а в [4] – алгоритмы управления асинхронным электроприводом с различными принципами модуляции напряжения на выходе инвертора (PWM, SVPWM, DTC).

**Построение математической модели привода.** Для исследования режимов работы приводов в среде Simulink была построена модель привода DTC (рис. 2), а также модель системы управления DTC (рис. 3) На рис. 4, 5 приведены осциллограммы в номинальном режиме и при резком возрастании нагрузки.

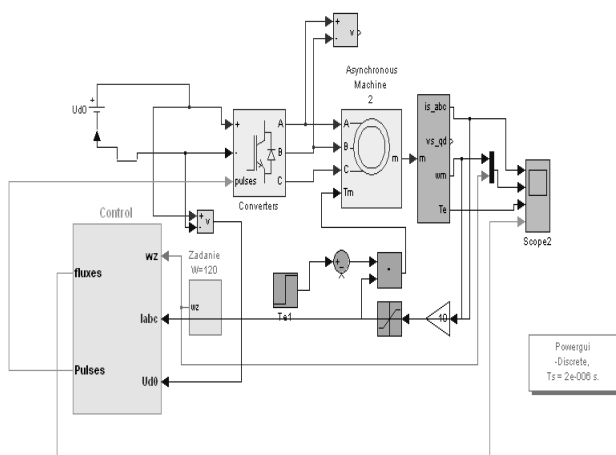


Рис. 2. Модель привода DTC с асинхронным двигателем, выполненная в среде Simulink

Были смоделированы двигатель мощностью  $P_H = 560$  кВт и номинальным моментом  $M_{НОМ} = 5350$  Нм (самосвал грузоподъемностью 220 тонн) и двигатель хода экскаватора ЭКГ-32Р мощностью  $P_H = 420$  кВт и номинальным моментом  $M_{НОМ} = 3885$  Нм. Некоторые параметры электродвигателей приведены в таблице. Так как наиболее тяжелым режимом работы для этих двигателей является момент пуска под нагрузкой при движении на трассе с эквивалентным уклоном 12 %, моделировался именно такой режим. При помощи элемента Signal Builder среды Simulink задавался момент сопротивления, равный превышению номинального момента на 30 % с постепенным снижением нагрузки. Анализ полученных осциллограмм (рис. 4, 5) показывает, что система управления приводом справляется с нагрузкой первого и второго двигателей и одинаково успешно обеспечивает тяжелые режимы работы горных машин и ограничение динамических моментов.

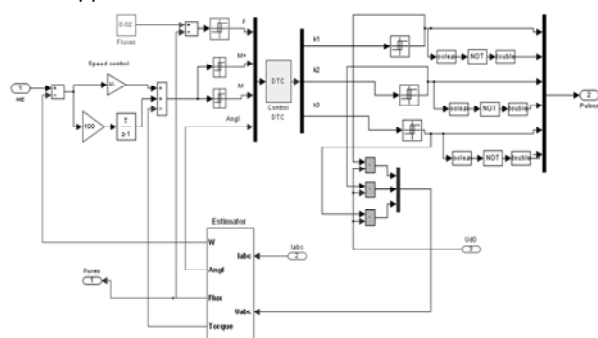


Рис. 3. Модель системы управления DTC, собранная в среде Simulink

Для анализа брался рабочий промежуток времени, когда приводы имеют максимальную нагрузку. Осциллограммы в таком режиме имеют схожую форму, что указывает на возможность унификации в составе привода системы управления двигателем (выпрямитель, инвертор, система управления приводом) на экскаваторе и самосвале.

**Мониторинг и диагностика.** Задачу управления экскаваторами с электроприводом можно разделить на две части: создание системы автоматического управления (САУ) электроприводом и создание системы автоматизации управления экскаватором и самосвалом. Учитывая особо жесткие требования по ограничению динамических моментов и усилий в трансмиссиях экскаватора, система автоматического управления режимами работы электропривода должна реализовывать алгоритм «прямого управления моментом» (DTC), обеспечивающий самое высокое быстроедействие по контуру момента (тока) двигателя [1].

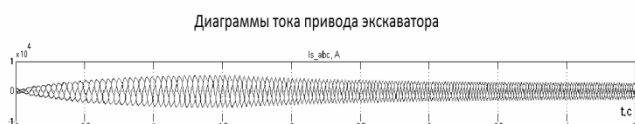
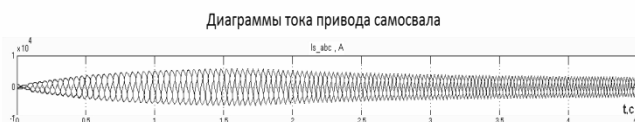


Рис. 4. Токые диаграммы приводов самосвала и экскаватора в режиме пуска



Рис. 5. Диаграмма работы привода экскаватора и самосвала в режиме начала движения

**Параметры двигателей хода экскаватора и мотор – колес самосвала**

Тип машины	Самосвал 136 т	Экскаватор ЭКГ 32Р
Мощность в режиме тяги (хода), кВт	2 × 500	2 × 400
Номинальный ток АД, А	550	392
Частота вращения АД номинальная, мин <sup>-1</sup>	850–3400	992
Кратность максимального момента АД, более	5	5
Коэффициент мощности АД в номинальном режиме	0,84	0,84
КПД АД, %	93	95
Выпрямленное напряжение, В	950	750

В результате разработаны структуры и устройства системы «разрывного» управления частотным электроприводом с реализацией табличных алгоритмов формирования управляющих воздействий на электронные

ключи полупроводникового преобразователя частоты. К задачам системы автоматизации управления экскаватором можно отнести получение информации о длительности и объемах выполненных работ, об использовании экскаватора во времени, объеме переработанной горной массы, энергозатратах и результатах работы смены.

Системы контроля и учета, как правило, вырабатывают следующую информацию: общий расход электроэнергии, усилие в механизме подъема (по току двигателя), усилие в механизме напора или тяги (по току двигателя напора/тяги), угол поворота платформы, время рабочего цикла, сигнализация о наполнении ковша, время поворота, энергопотребление за цикл экскавации, общее количество перемещенной горной массы и общее количество циклов за рабочий период (смена, сутки, месяц).

На современном этапе особо важную роль в обеспечении эффективности и надежности экскаваторного оборудования играют системы диагностики, мониторинга и оценки остаточного ресурса. Существующие методы диагностики электрооборудования следующие:

- 1) методы, основанные на анализе вибраций отдельных элементов оборудования;
- 2) методы, основанные на измерении и анализе акустических колебаний, создаваемых работающим оборудованием;
- 3) методы, основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре электрической машины;
- 4) методы, основанные на анализе вторичных электромагнитных полей электрооборудования;
- 5) методы, основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов оборудования;
- 6) методы, основанные на анализе значений электрических параметров оборудования.

Для электромеханического оборудования наиболее целесообразным методом функционирования диагностического комплекса является метод на основе «ваттметрографии» (измерение, обработка и анализ электрических сигналов.) Оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования позволит спрогнозировать необходимость ремонта агрегата, закупку необходимых запчастей, тем самым сократив время простоя горно-транспортного комплекса, а значит, и экономические потери. Кроме того, сократятся эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание данного оборудования, а также затраты, связанные с обучением обслуживающего персонала.

В части структуры и алгоритмов управления электроприводами механизмов горно-транспортного комплекса переход определяется в первую очередь требованиями по обеспечению максимальных моментов в режимах трогания и стопорения и ограничения длительных перегрузок рабочих органов в этих режимах. Уни-

фикация других типов электроприводов экскаватора (подъема, напора, поворота) также может быть осуществлена путем использования аналогичных типов комплектующего привод оборудования.

Для более успешного управления работой электроприводов необходимым и целесообразным является применение систем управления с переменной структурой, поскольку они не предполагают скользящего режима работы, а последовательно изменяют структуру по заранее заданным алгоритмам в зависимости от каких-либо возмущающих воздействий извне или по достижении объектом управления заранее заданных значений. Техническим результатом является обеспечение режимов максимальных крутящих моментов при низких скоростях вращения электродвигателя, стабилизации скорости движения в широком диапазоне и ограничения мощности, потребляемой от источника энергии. В устройстве автоматического управления используют три независимых локальных регулятора и коммутатор, который включает в работу один из локальных регуляторов в соответствии с логической таблицей переключений и режимом работы электродвигателя.

В качестве локальных алгоритмов (прежде всего, в контуре регулирования тока) предлагается использовать алгоритмы с разрывным управлением, обеспечивающим высокое быстродействие и инвариантность к внешним и параметрическим возмущениям.

Высокая степень унификации привода впоследствии может обеспечить создание единой методики диагностики технического состояния и остаточного ресурса приводов самосвала и экскаватора. Тема оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования актуальна, поскольку такая оценка позволит спрогнозировать необходимость ремонта агрегата, закупку необходимых запчастей, тем самым сократив время простоя горно-транспортного комплекса, а значит, и экономические потери. Кроме того, сократятся эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание данного оборудования, а также затраты, связанные с обучением обслуживающего персонала.

## Заключение

Для перспективных типов машин горно-транспортного комплекса наилучшим типом электропривода является бесколлекторный асинхронный электропривод с алгоритмом «прямое управление моментом» (DTC).

Высокая степень унификации позволит снизить стоимость оборудования на стадии проектирования и производства оборудования.

При высоком уровне унификации оборудования достигается снижение эксплуатационных и ремонтных затрат, поскольку привод является самым дорогостоящим элементом как самосвала, так и экскаватора.

Для обеспечения надежности работы приводов и сокращения времени простоя экскаваторов целесообразным является применение систем мониторинга и диагностики для прогнозирования ремонтов по фактическому состоянию оборудования.

#### Список литературы

1. **Козярук А.Е., Рудаков В.В.** Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства. – СПб.: СПГИ(ТУ), 2008. – 100 с.
2. **Рудаков В.В., Столярков И.М., Дартау В.А.** Асинхронные приводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987.
3. **Козярук А.Е.** Структура и алгоритмы управления высокودинамичным электроприводом переменного тока // Электроприводы переменного тока 2012: тр. XV Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 89–92.
4. **Дробкин Б.Э., Козярук А.Е., Емельянов А.П., Свириденко А.О.** Высокодинамичные энергоэффективные электроприводы горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 34–39.
5. **Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П.** Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями

*Козярук Анатолий Евтихевич,*  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ЭЭЭ,  
адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2,  
e-mail: kozjaruk@mail.ru.

*Таранов Сергей Игоревич,*  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
аспирант кафедры ЭЭЭ,  
адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2,  
e-mail: Gray47@mail.ru

(моделирование, расчет, применение) «Силовые машины», «Электросила». – СПб., 2004. – 252 с.

#### References

1. **Kozyaruk, A.E., Rudakov, V.V.** *Prямое upravlenie momentom v elektroprivode peremennogo toka mashin i mekhanizmov gornogo proizvodstva* [Direct Torque Control in Electric Drive of Alternating Current Machines and Mining Mechanisms]. Saint-Petersburg, SPGGI(TU), 2008. 100 p.
2. **Rudakov, V.V., Stolyarov, I.M., Dartau, V.A.** *Asinkhronnye privody s vektornym upravleniem* [Asynchronous Drives with Vector Control]. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1987.
3. **Kozyaruk, A.E.** *Struktura i algoritmy upravleniya vysokodinamichnym elektroprivodom peremennogo toka* [Structure and Algorithm Control of Highly Dynamical Electric Drive of Alternating Current]. *Trudy XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka 2012»* [Alternating Current Electric Drives 2012]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, pp. 89–92.
4. **Drobkin, B.E., Kozyaruk, A.E., Emel'yanov, A.P., Sviridenko, A.O.** *Vysokodinamichnye energoeffektivnye elektroprivody gornyx mashin* [High Dynamical Energy Efficient Electric Drives of Mining Machines]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, no. 4, pp. 34–39.
5. **Pronin, M.V., Vorontsov, A.G., Kalachikov, P.N., Emel'yanov, A.P.** *Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami* (modelirovanie, raschet, primeneniye) «*Silovye mashiny*», «*Elektrosila*» [Electrical Drives and Systems with Electrical Machines and «Power Machines» Semiconductor Converters (Modeling, Calculation, Application)]. Saint-Petersburg, 2004. 252 p.