

К АНАЛИЗУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

С.И. Малафеев^{1,2}, С.С. Малафеев³

¹ ООО Компания «Объединенная Энергия», Москва, Россия, e-mail: simalafeev@gmail.com

² Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

³ Владимирский политехнический колледж, Владимир, Россия

Аннотация: Рассмотрены основные особенности электроэнергетических процессов в мехатронных системах электрических карьерных экскаваторов. Электрическая энергия от подстанции предприятия доставляется к экскаватору на основной гармонике. В мехатронном комплексе происходит преобразование электрической энергии в механическую работу, накопление кинетической и потенциальной энергий и их взаимное преобразование в движущихся элементах машины, а также механоэлектрическое преобразование энергии. При преобразовании электрической энергии происходит генерирование высших гармоник за счет энергии основной гармоники. Нагрузкой генератора рекуперированной энергии и высших гармоник становятся сеть, подключенное к ней электрооборудование и источник энергии. При снижении коэффициента мощности потери энергии в питающей сети возрастают обратно пропорционально его квадрату. На основании анализа энергетических процессов и выполненных экспериментальных исследований определены основные соотношения между потребленной и рекуперированной энергией при работе карьерного экскаватора ЭКГ-20 с электрическими приводами переменного тока. Активная энергия, рекуперированная взаимосвязанными главными приводами экскаватора, объединенными общим звеном постоянного тока, частично потребляется самой системой главных приводов, а часть рекуперированной энергии через главный трансформатор поступает в питающую электрическую сеть. Трансформатор собственных нужд, подключенный к питающей сети, принимает часть рекуперированной энергии, которая используется вспомогательным электрооборудованием экскаватора. Экспериментально подтверждено полезное использование части рекуперированной энергии электрооборудованием собственных нужд экскаватора (более 30%). Повышение эффективности передачи энергии от источника к потребителю достигается применением компенсирующих устройств для повышения коэффициента мощности и качества электрической энергии, снижением токов, потребляемых электроприводами, а также использованием алгоритмов управления электроприводами, обеспечивающих электромагнитную совместимость оборудования.

Ключевые слова: мехатроника, экскаватор, энергия, электропривод, коэффициент мощности, рекуперация, эффективность, система управления.

Для цитирования: Малафеев С.И., Малафеев С.С. К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 126–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

Analyzing energy processes in power line of operating open-pit excavator

S.I. Malafeev^{1,2}, S.S. Malafeev³

¹ «Joint Power» Company Ltd, Moscow, Russia, e-mail: simalafeev@gmail.com

² Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, Russia

³ Vladimir Polytechnic College, Vladimir, Russia

Abstract: Key features of electric energy processes in mechatronic systems of electric excavators are discussed. Electrical power is supplied to excavator with 1st harmonic. In mechatronic system, electrical power is converted to mechanical work together with accumulation of kinetic and potential energies and with their mutual transformation inside movable elements of the machine, as well as with the dynamoelectric conversion of energy. During electric energy conversion, generation of higher harmonics takes place owing to the 1st harmonic energy. The load of the recuperated energy and higher harmonic generator is the power line, connected electrical equipment and the power source. When the power factor decreases, the loss of energy in the power line increases in proportion to the power factor square. From the analysis of energy processes and the accomplished experimental research, the key relationships are established between the consumed and recuperated energy during operation of open-pit excavator EKG-20 with ac-drive. Active energy recuperated by interconnected main drives of the excavator and united by the common dc link is partly taken by the main drives and partly goes, via the main transformer, to the power line. The auxiliary transformer connected to the power line takes some recuperated energy to power the ancillary electrics of the excavator. The beneficial use of the recuperated energy portion (more than 30%) by the ancillary electrics of excavators is experimentally proved. Higher efficiency of energy transmission from the source to a consumer is achieved owing to the use of compensating devices improving power factor and energy quality, due to reduction in input current of electric motors as well as thanks to the electric drive control algorithms ensuring electromagnetic compatibility of equipment.

Key words: mechatronics, excavator, energy, electric drive, power factor, recuperation, efficiency, control system.

For citation: Malafeev S.I., Malafeev S.S. Analyzing energy processes in power line of operating open-pit excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3):126-137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

Введение

Для предприятий горной промышленности эффективность энергопотребления является важнейшим показателем их работы [1–3]. Мероприятия в области энергоэффективности направлены на все аспекты горных работ и добычи полезных ископаемых [4]. В этом процессе важнейшим звеном является горная машина, энергетические характеристики которой заложены при проектировании и должны поддерживаться при эксплуатации. Экскаваторы, буровые станки, автосамосвалы, погрузчики и другие машины на карьерах относятся к категории энергоемкого оборудования: установ-

ленная мощность электрооборудования достигает 1 МВт и более. При этом машины работают в динамичных режимах с большими перегрузками и рекуперацией значительной части энергии (при торможении механизмов, активном противодействии горного массива, опускании ковша экскаватора), в тяжелых климатических условиях [5, 6].

В настоящее время на карьерах большинство электрических экскаваторов имеют электроприводы, выполненные по системе генератор — двигатель (Г-Д) [7].

Достоинствами такой системы приводов считаются простота взаимодей-

ствия машин с питающей сетью при различных направлениях энергетических потоков и простая техническая реализация. Двойное преобразование энергии в системе Г-Д служит причиной ее низкой энергетической эффективности.

Совершенствование схемотехнических решений и компонентов электроприводов позволяет изменить идеологические принципы построения мехатронных систем экскаваторов и обеспечивает возможность существенного повышения энергетических характеристик [3, 8]. Мехатронная технология проектирования приводов карьерных экскаваторов обеспечивает формирования желаемых характеристик машин при различных типах двигателей за счет специальных алгоритмов управления, реализуемых с помощью микроконтроллерных средств.

Наибольшая энергетическая эффективность достигается при использовании для экскаваторов электроприводов переменного тока с асинхронными двигателями. По оценкам, например, сделанным в работе [9], общая энергетическая эффективность экскаваторов с электроприводами переменного тока по сравнению с приводами по системе Г-Д повышается на 12%.

Энергетические соотношения в системах электроснабжения для традиционных экскаваторов подробно исследованы теоретически и экспериментально в работах советских и зарубежных ученых [1, 10–13]. Исследование электроэнергетических процессов при работе экскаваторов нового поколения с полупроводниковыми преобразователями энергии представляет актуальную задачу.

В настоящей работе рассмотрены основные особенности взаимодействия новых экскаваторов с электроприводами переменного тока, разработанными Компанией «Объединенная Энергия», г. Москва, с питающей сетью.

Энергетические процессы в электропитающей подсистеме мехатронного комплекса экскаватора

Мехатронный комплекс современного экскаватора включает следующие взаимодействующие компоненты: электропитающую систему; электромеханические преобразователи энергии; силовые преобразователи управления двигателями; механизмы и рабочие органы; информационно-измерительную систему; систему управления движением, человеко-машинный интерфейс, телекоммуникационную систему [14].

Первый приоритет в мехатронном комплексе экскаватора имеет система электропитания, обеспечивающая его эффективную работу во всех режимах. Экскаватор как элемент электрической сети относится к категории нагрузок повышенной сложности. Это объясняется электропитанием от передвижных линий, имеющих переменные параметры; высокочастотным циклическим режимом работы при чередовании потребления и рекуперации энергии; большой единичной потребляемой мощностью, взаимным влиянием потребителей, получающих питание от одного источника; повышенной опасностью поражения персонала электрическим током и возникновения других аварий.

Упрощенная структурная схема энергетических процессов в мехатронном комплексе экскаватора показана на рис. 1.

На ней обозначено: U_0 — напряжение на подстанции; U — напряжение на вводе экскаватора; ΔU_n — падение напряжения в линии; I — полный ток, потребляемый экскаватором; I_d — ток, потребляемый системой главных приводов; I_a — ток, потребляемый вспомогательным оборудованием экскаватора.

Затраты электрической энергии на работу экскаватора в течение заданного

интервала времени можно представить в виде

$$E = E_d + E_{ad} + E_n$$

где E_d — энергия, затраченная на работу главных приводов экскаватора (подъем, напор, поворот); E_{ad} — энергия, затраченная на работу вспомогательного оборудования; E_n — энергия потерь в питающей электрической сети.

Электрическая энергия от источника (подстанции предприятия) доставляется к экскаватору на основной гармонике. В мехатронном комплексе происходит преобразование электрической энергии в механическую работу, накопление кинетической и потенциальной энергии и их взаимное преобразование в движущихся элементах машины, а также механоэлектрическое преобразование энергии. При преобразовании электрической энергии происходит изменение энергетического спектра, а именно, генерирование высших гармоник за счет энергии основной гармоники. Нагрузкой генератора рекуперируемой энергии и высших гармоник становятся сеть, подключенное к ней электрооборудование и источник энергии.

На рис. 2 и рис. 3 показаны векторные диаграммы напряжений и токов в питающей сети при потреблении (а) и рекуперации (б) энергии для различных типов приводов экскаваторов. На чертежах обозначено: \dot{U}_0 — напряжение на подстанции; \dot{U} — напряжение на

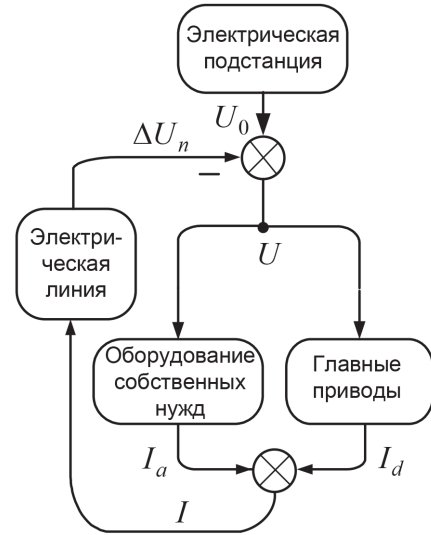


Рис. 1. Упрощенная схема электропитающей подсистемы экскаватора

Fig. 1. Simplified diagram of the power subsystem of the excavator

вводе экскаватора; $\Delta \dot{U}$ — падение напряжения в питающей линии; \dot{I} — ток, потребляемый экскаватором; \dot{I}_a и \dot{I}_r — активный и реактивный токи питающей линии; r и x — активное и реактивное сопротивление питающей линии.

В экскаваторах с приводами, выполненными по системе Г-Д, синхронный приводной двигатель работает с перевозбуждением и генерирует в питающую сеть реактивный ток. Коэффициент мощности в узле нагрузки при опережающем токе изменяется в широком диапазоне (от 0,3 до 0,8). Для экска-

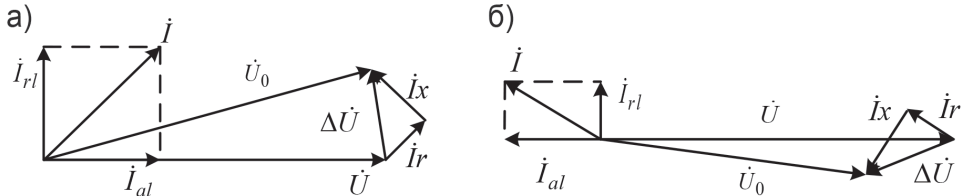


Рис. 2. Векторные диаграммы напряжений и токов при работе экскаватора с приводным синхронным двигателем (система приводов Г-Д) в режиме потребления (а) и рекуперации (б) энергии

Fig. 2. Vector diagrams of voltages and currents at operating excavator with a synchronous drive (drive system GD) in the mode of consumption (a) and recuperation (b) of energy

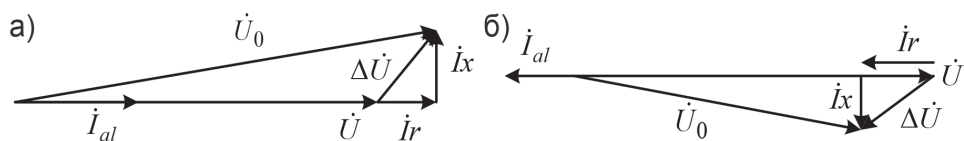


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений и токов при работе экскаватора с полупроводниковыми преобразователями энергии и активными выпрямителями в режиме потребления (а) и рекуперации (б) энергии при коэффициенте мощности, равном 1,0

Fig. 3. Vector diagrams of voltages and currents at operating excavator with semiconductor energy converters and active rectifiers in consumption mode (a) and recuperation (b) of energy with a power factor of 1.0

ваторов с приводами по традиционной системе Г-Д (рис. 2) большой реактивный ток синхронного двигателя в режиме потребления энергии обеспечивает малую чувствительность колебаний напряжения к изменениям тока нагрузки. При рекуперации, наоборот, большой реактивный ток вызывает увеличение потери напряжения в сети.

Векторные диаграммы токов и напряжений на вводе экскаватора с электроприводами с полупроводниковыми преобразователями энергии и активными выпрямителями в режимах потребления и рекуперации электрической энергии показаны на рис. 3.

В таких мехатронных системах экскаваторов за счет активных выпрямителей поддерживается постоянный коэффициент мощности, например 1,0 [15, 16]. Из диаграмм следует, что в режиме потребления происходит снижение,

а при рекуперации – повышение напряжения на вводе экскаватора.

Для оценки потери напряжения в питающей сети запишем уравнение для действующих значений напряжения в питающей электрической сети при отстающем токе:

$$U_0^2 = (U + rI_a + xI_r)^2 + (rI_r - xI_a)^2. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) относительно напряжения на вводе экскаватора дает выражение

$$U = \sqrt{U_0^2 - (rI_r + xI_a)^2} - (rI_a + xI_r) \quad (2)$$

Так как для питающих сетей обычно выполняется условие

$$U_0^2 \gg (rI_r + xI_a)^2,$$

то напряжение на вводе экскаватора можно оценить по приближенному уравнению

$$U \approx U_0 - (rI_a + xI_r) \quad (3)$$

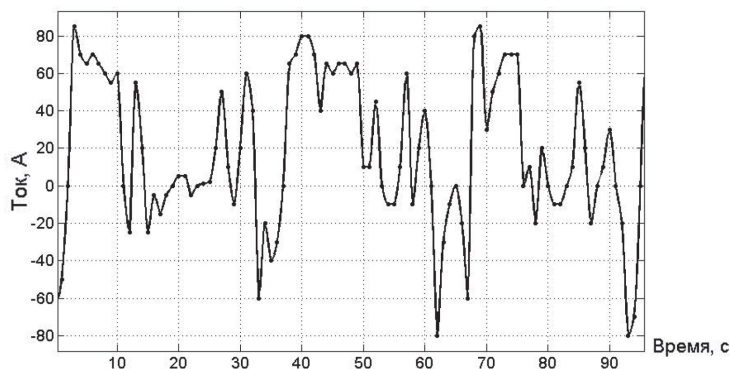


Рис. 4. Осциллограмма активного тока экскаватора ЭКГ-10

Fig. 4. Oscillogram of the active current of the EKG-10 excavator

Ток, потребляемый экскаватором, имеет случайный характер. На рис. 4 показана экспериментальная осциллограмма активного тока экскаватора ЭКГ-10 с электроприводами переменного тока. На рис. 5 приведена гистограмма для этого тока.

Распределение имеет мультимодальный характер. Экстремумы потребляемого и рекуперированного токов позволяют дать оценку размаха колебаний напряжения:

$$\Delta U_M \approx \left| (rI_{am} + xI_{rm}) \right| + \left| (rI_{ac} + xI_{rc}) \right|$$

где I_{am} и I_{ac} — максимальные значения активной составляющей тока при потреблении и рекуперации энергии; I_{rm} и I_{rc} — максимальные значения реактивной составляющей тока при потреблении и рекуперации энергии.

При работе экскаватора с коэффициентом мощности, равным 1,0 (рис. 3), имеем

$$\Delta U_M \approx rI_{am} + rI_{ac}$$

Потери энергии в питающей сети

Потери энергии в сети зависят от ее частотной характеристики и спектральной плотности тока. При неизменной характеристике сети они минимальны, если действующий ток имеет минимальное значение при заданной технологическим процессом активной мощности. В мехатронной системе полезная работа совершается за счет синфазной составляющей основной гармоники тока. Потери будут наименьшими, если напряжение и ток на зажимах потребителя имеют синусоидальную форму и совпадают по фазе. Такой режим работы системы является идеальным. Однако в большинстве случаев он практически недостижим вследствие искажений тока, потребляемого полупроводниковыми преобразователями, и сдвига по фазе основной гармоники тока относительно питающего напряжения.

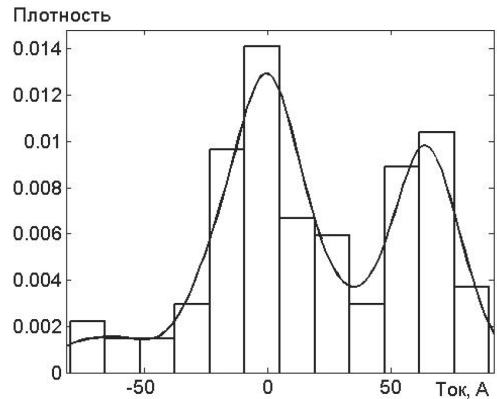


Рис. 5. Гистограмма активного тока экскаватора ЭКГ-10

Fig. 5. Histogram of active current of the EKG-10 excavator

Оценим увеличение потерь в питающей сети, приходящихся на 1 Ом ее активного сопротивления, при отклонении режима электропотребления от режима с заданным коэффициентом мощности $\lambda = \lambda_0$, по формуле

$$\Delta p_n = I^2 - I_0^2 = p_n - p_{n0} = \frac{P^2}{\lambda^2 U^2} - \frac{P_0^2}{\lambda_0^2 U_0^2}$$

где I , U , P — ток, напряжение и активная мощность, потребляемая нагрузкой; I_0 , U_0 , P_0 , λ_0 — ток, напряжение и

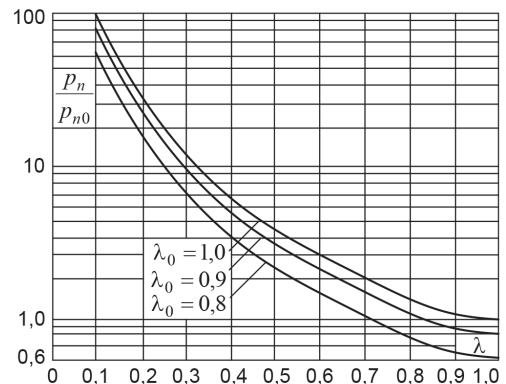


Рис. 6. Зависимости изменения потерь в питающей сети от коэффициента мощности λ при различных значениях λ_0

Fig. 6. Dependences of change in losses in supply network on power factor λ at various values of λ_0

активная мощность, соответствующие режиму работы с заданным коэффициентом мощности λ_0 ; p_n и p_{n0} — потери энергии в питающей линии, приходящиеся на 1 Ом ее активного сопротивления при коэффициентах мощности соответственно λ и λ_0 .

Из последнего выражения следует, что потери в электрической сети при снижении коэффициента мощности возрастают обратно пропорционально его квадрату. На рис. 6 показана зависимость изменения потерь в питающей сети от коэффициента мощности при $P \approx P_0$ при различных значениях λ_0 .

Рекуперация энергии при работе экскаватора

Особый интерес представляет использование рекуперированной энергии при работе экскаваторов. Приближенная оценка энергетических процессов при работе экскаватора может быть выполнена путем моделирования [17]. Получить достоверные данные об энергоёмкости и эффективности использования рекуперированной энергии можно только на основании специальных экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования с использованием разработанной системы контроля электроэнергетических процессов проведены на экскаваторе ЭКГ-20 на Лебединском горно-обогатительном комбинате. Для измерения расходов электроэнергии использовались 3 многофункциональных счетчика электрической энергии ЗНАК+ класса точности 0,5S [18]. Счетчики установлены в ячейке высоковольтного ввода и подключены к информационно-диагностической системе экскаватора. Информационно-диагностическая система обеспечивает непрерывную регистрацию активной, реактивной и полной мощностей, текущих значений расхода прямой и рекуперированной энергии на вводе экска-

ватора, в системе главных приводов и в системе вспомогательного электропитания.

Активная энергия, рекуперированная взаимосвязанными главными приводами экскаватора, объединенными общим звеном постоянного тока, частично потребляется самой системой главных приводов (внутренняя рекуперация) [19]. Часть рекуперированной энергии через главный трансформатор поступает в питающую электрическую сеть. Трансформатор собственных нужд, подключенный к питающей сети, принимает часть рекуперированной энергии. Эта энергия используется вспомогательным электрооборудованием экскаватора.

При отсутствии других потребителей энергии в локальной электрической сети рекуперированная электроэнергия возвращается во внешнюю питающую сеть.

Разность значений энергии, рекуперированной главными приводами, и энергии, рекуперированной экскаватором, дает оценку рекуперированной энергии, использованной электрооборудованием собственных нужд экскаватора.

В таблице приведены расчетные и экспериментальные данные о потреблении и рекуперации энергии приводами главного движения экскаватора ЭКГ-20 за цикл экскавации. Расчетные данные получены на основе типовых диаграмм, составленных разработчиком экскаватора ПАО «Уралмашзавод». Экспериментальные данные получены на Лебединском ГОКе.

Результаты экспериментальных исследований электропотребления на основе измерений счетчиками электроэнергии позволяют сделать следующие выводы:

- электрическая энергия, рекуперированная главными приводами, составляет 20...26% от потребленной приводами активной энергии;

Механическая энергия приводов главного движения за цикл экскавации
The mechanical energy of the main drives for the excavation cycle

Привод	Механическая энергия, кВт·ч			
	потребление		рекуперация	
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
Подъем	3,34	3,70	0,46	1,48
Напор	0,91	1,13	0,09	0,31
Поворот	1,65	0,88	0,72	0,72

- более 30% рекуперированной приводами главного движения энергии, потребляется электрооборудованием собственных нужд экскаватора;
- рекуперированная экскаватором активная энергия составляет от 9 до 14% от потребленной энергии;
- удельная энергоёмкость экскавации, рассчитанная для погрузки 5 автосамосвалов с учетом рекуперированной энергии, составила 0,24 кВт · ч/м³.

Основные направления повышения энергетической эффективности карьерных экскаваторов

Эффективная работа экскаватора в условиях электрической сети разреза обеспечивается рациональным использованием энергетического ресурса, высокой электромагнитной совместимостью всех компонентов, полным контролем электроэнергетических процессов и применением многофункциональных устройств защиты. Таким образом, основные направления повышения энергетической эффективности экскаваторов состоят в снижении общего электропотребления, обратного воздействия электрических нагрузок на питающую сеть и полезном использовании рекуперированной энергии. Поэтому повышение энергетической эффективности предполагает совершенствование структурной организации систем и включает следующие методы.

1. Совершенствование технологических процессов, направленное на снижение их энергоёмкости. В горной промышленности при традиционной добыче полезных ископаемых открытым способом изменение технологии связано в основном с рациональным выбором параметров транспортно-технологического комплекса [20]. В мировой практике наблюдается тенденция увеличения объема ковша экскаватора и грузоподъемности автосамосвалов.

2. Рациональное построение системы путем оптимального выбора рода тока, типов двигателей, преобразовательных и передаточных устройств, согласования характеристик элементов и др.

3. Оптимальный выбор элементов по мощности. Анализ статистических данных о режимах работы электрооборудования, в том числе приводных двигателей, свидетельствует о том, что двигатели, как правило, работают с неполной загрузкой и, следовательно, при пониженных энергетических характеристиках.

4. Использование рекуперированной энергии электрооборудованием самого экскаватора с помощью накопителей энергии [21, 22].

5. Применение быстродействующих компенсаторов реактивной мощности для регулирования напряжения [23].

6. Использование мониторинга для получения объективной информации о работе машины в течение интервала работы с целью принятия управленче-

ских решений на различных уровнях иерархии [24].

Результаты мониторинга экскаватора позволяют существенно повысить эффективность эксплуатации оборудования, в первую очередь, за счет повышения его надежности в конкретных горно-геологических условиях, коэффициента технического использования, своевременного выполнения профилактических мероприятий, экономии энергозатрат.

Заключение

Электропотребление в мехатронных системах экскаваторов характеризуется искажениями формы токов и напряжений и сдвигом по фазе основной гармоники тока относительно напряжения в питающей сети. Потери в сети при снижении коэффициента мощности на грузки возрастают обратно пропорционально его квадрату.

Для экскаваторов с приводами по традиционной системе Г-Д большой реактивный ток синхронного двигателя в режиме потребления энергии обеспечивает малую чувствительность колебаний напряжения к изменениям тока нагрузки. При рекуперации, наоборот, большой реактивный ток вызывает увеличение потери напряжения в сети. В мехатронных системах с полупроводниковыми преобразователями энергии за счет активных выпрямителей поддерживается постоянный коэффициент мощности, например, 1,0.

На основании анализа энергетических процессов и выполненных экспериментальных исследований определены основные соотношения между потребленной и рекуперированной энергией при работе карьерного экскаватора ЭКГ-20 с электрическими приводами переменного тока.

Экспериментально подтверждено полезное использование части рекупериро-

ванной энергии электрооборудованием собственных нужд экскаватора (более 30%).

Повышение эффективности передачи энергии от источника к потребителю достигается применением компенсирующих устройств для повышения коэффициента мощности и качества электрической энергии, снижением токов, потребляемых электроприводами, а также использованием алгоритмов управления электроприводами, обеспечивающих электромагнитную совместимость оборудования.

Полученные результаты исследования и предлагаемые способы повышения энергетической эффективности электрических экскаваторов реализованы в системах управления, предлагаемых Компанией «Объединенная Энергия».

За счет использования новой элементной базы мехатронных систем управления на экскаваторах (специальных двигателей переменного тока, транзисторных преобразователей, активных выпрямителей и др.) и специальных интеллектуальных алгоритмов управления, использующих нелинейные обратные связи и энергонаблюдатели, достигнуто снижение удельной энергоемкости экскавации до 0,2—0,4 кВт·ч/м³.

Увеличен коэффициент мощности горных машин за счет применения активных выпрямителей.

Снижены потери электроэнергии в питающих электрических сетях в 3—4 раза за счет поддержания высокого коэффициента мощности.

Дальнейшее развитие рассмотренных направлений закладывает основы технического перевооружения парков технологического оборудования добывающих предприятий с наибольшей экономической эффективностью согласно мировым тенденциям производства открытых горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Energy efficiency in Minerals Industry. Best Practices and Research Directions.* Awuah-Offei K. (Ed.). Springer International Publishing AG, 2018, 329 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54199-0.
2. Соловьева Н.А., Крашенинников А.И., Зырянов И.В., Рыбников А.В. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности в АК «АЛРОСА» (ПАО) // Горное оборудование и электромеханика. — 2016. — №2. — С. 16–19.
3. Малафеев С.И., Серебренников Н.А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления // Уголь. — 2018. — № 10. — С. 30–34. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-30-34.
4. Levesque M., Millar D., Paraszczak J. Energy and mining – the home truths // Journal of Cleaner Production. 2014. Vol. 84, no 1. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.088.
5. Bise C.J. Modern american coal mining. Methods and applications. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2013, 563 p.
6. Махно Д.Е. Эксплуатация и ремонт карьерных экскаваторов в условиях Севера. — М.: Недра, 1984. — 133 с.
7. Чулков Н.Н. Расчет приводов карьерных машин. — М.: Недра, 1987. — 196 с.
8. Guzman M.V., Valenzuela M.A. Integrated mechanical-electrical modeling of an AC electric mining shovel and evaluation of power requirements during a truck loading cycle // IEEE Transactions on industry applications, 2015, Vol. 51, No 3, pp. 2590–2599. DOI: 10.1109/TIA.2014.2375378.
9. Casson M. Dragline retrofit for AC motion power / «SYMPHOS 2013» 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate. Procedia Engineering 83, 2014, pp. 86–89. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.017.
10. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. — М.: Недра, 1986 — 231 с.
11. Котлярчук В.А., Гончаров А.Ф. Электроснабжение экскаваторов. — М.: Недра, 1980. — 175 с.
12. Чулков Н.Н. Электрификация карьеров. — М.: Недра, 1974. — 344 с.
13. Morley L.A. Mine power systems. Information circular 9258. United States Bureau of Mines, 1991. 437 p.
14. Malafeev S.I., Malafeev S.S., Tikhonov Y.V. Intelligent diagnostics of mechatronic system components of career excavators in operation / Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research. Selected Papers from the XIX International Conference on Neuroinformatics, October 2–6, 2017, Moscow, Russia. Springer International Publishing AG, 2018. Pp. 110–116. DOI: 10.1007/978-3-319-66604-4_17.
15. Pandit P., Mazumdar J., May T., Koellner W.G. Real-time power quality measurements from a conventional AC dragline // IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, Vol. 46, No 5, pp. 1755–1763. DOI 10.1109/TIA.2010.2057470.
16. Aqueveque P., Wiechmann E.P., Henríquez J.A., Muñoz L.G. Energy quality and efficiency of an open pit mine distribution system: evaluation and solution // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016, Vol. 52, No 1, pp. 580–588. DOI: 10.1109/TIA.2015.2464172.
17. Малафеев С.И., Малафеев С.С., Серебренников Н.А. Компьютерное моделирование мехатронных систем одноковшовых экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 5. — С. 24–29.
18. Счетчик электрической энергии трехфазный многофункциональный КЭЯ «ЗНАК+». Руководство по эксплуатации. МТНЦ.424359.0030-РЭ-05. — М., 2005. — 49 с.
19. Андреев А.Н., Несговоров Е.В., Королев Т.В., Колесниченко Д.А., Колесниченко Н.М. Эффективность внутренней рекуперации энергии в частотно-регулируемом приводе // Вестник Череповецкого государственного университета. — 2015. — № 7. — С. 5–8.
20. Владимиров Д.Я. Интеллектуальный карьер: Эволюция или революция? // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — СВ 45-1. — С. 77–82.

21. P&H 2650 CX Hybrid Shovel. Joy Global, 2016. 7 p.
22. Kolner W., Madhavarao G. Peak shaver/rate rise limiter for electric rope shovels and draglines. June 13, 2013 MEMSA Annual Meeting, Clearwater, Fl. 2013. 24 p.
23. Bilgin H.F., Muammer Ermis, Kose K.N., Alper Cetin, etc. Reactive-power compensation of coal mining excavators by using a new-generation STATCOM // IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, Vol. 43, No 1, pp. 97–110. DOI: 10.1109/TIA.2006.887308.
24. Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Система технического диагностирования электромеханических комплексов // Контроль. Диагностика. — 2016. — № 3. — С. 52–56. **ТАЭ**

REFERENCES

1. *Energy efficiency in Minerals Industry. Best Practices and Research Directions*. Awuah-Offei K. (Ed.). Springer International Publishing AG, 2018, 329 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54199-0.
2. Solov'eva N.A., Krasheninnikov A.I., Zyryanov I.V., Rybnikov A.V. About energy saving and increasing an energy efficiency in AK «ALROSA» (PAO). *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2016, no 2, pp. 16–19. [In Russ].
3. Malafeev S.I., Serebrennikov N.A. Increasing energy efficiency of mining excavators based on modernization of electrical equipment and control systems. *Ugol'*. 2018, no 10, pp. 30–34. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-30-34.
4. Levesque M., Millar D., Paraszczak J. Energy and mining — the home truths. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84, no 1. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.088.
5. Bise C.J. *Modern american coal mining. Methods and applications*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2013, 563 p.
6. Makhno D.E. *Ekspluatatsiya i remont kar'ernykh ekskavatorov v usloviyakh Severa* [Exploitation and repairing of mining excavators at Nordic conditions], Moscow, Nedra, 1984, 133 p.
7. Chulkov N.N. *Raschet privodov kar'ernykh mashin* [Design of drives of mining excavators], Moscow, Nedra, 1987, 196 p.
8. Guzman M.V., Valenzuela M.A. Integrated mechanical-electrical modeling of an AC electric mining shovel and evaluation of power requirements during a truck loading cycle. *IEEE Transactions on industry applications*, 2015, Vol. 51, No 3, pp. 2590–2599. DOI: 10.1109/TIA.2014.2375378.
9. Casson M. Dragline retrofit for AC motion power / «SYMPHOS 2013» 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate. *Procedia Engineering* 83, 2014, pp. 86–89. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.017.
10. Tangaev I.A. *Energoemkost' protsessov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh* [Energy capacity of processes of mining and processing of minerals], Moscow, Nedra, 1986, 231 p.
11. Kotlyarchuk V.A., Goncharov A.F. *Elektrosnabzhenie ekskavatorov* [Electrical power supply of excavators], Moscow, Nedra, 1980, 175 p.
12. Chulkov N.N. *Elektrifikatsiya kar'erov* [Electrification of mining pits], Moscow, Nedra, 1974, 344 p.
13. Morley L.A. *Mine power systems. Information circular 9258*. United States Bureau of Mines, 1991. 437 p.
14. Malafeev S.I., Malafeev S.S., Tikhonov Y.V. Intelligent diagnostics of mechatronic system components of career excavators in operation. *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research. Selected Papers from the XIX International Conference on Neuroinformatics*, October 2–6, 2017, Moscow, Russia. Springer International Publishing AG, 2018. Pp. 110–116. DOI: 10.1007/978-3-319-66604-4_17.
15. Pandit P., Mazumdar J., May T., Koellner W.G. Real-time power quality measurements from a conventional AC dragline. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, Vol. 46, No 5, pp. 1755–1763. DOI 10.1109/TIA.2010.2057470.

16. Aqueveque P., Wiechmann E.P., Henríquez J.A., Muñoz L.G. Energy quality and efficiency of an open pit mine distribution system: evaluation and solution. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016, Vol. 52, No 1, pp. 580–588. DOI: 10.1109/TIA.2015.2464172.
17. Malafeev S.I., Malafeev S.S., Serebrennikov N.A. Computer simulation of mechatronic systems of one-paddle excavators. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011, no 5, pp. 24–29. [In Russ].
18. Schetchik *elektricheskoy energii trekhfaznyy mnogofunktsional'nyy KEYA «ZNAK+»*. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. MTNTS.424359.0030-RE-05* [Multifunctional electrical power meter «ZNAK+». User manual. MTNC.424359.0030-RE-05], Moscow, 2005, 49 p.
19. Andreev A.N., Nesgovorov E.V., Korolev T.V., Kolesnichenko D.A., Kolesnichenko N.M. Efficiency of internal energy recuperation in frequency-controlled electrical drive. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015, no 7, pp. 5–8. [In Russ].
20. Владимиров Д.Я. Intelligent mining pit: evolution or revolution? *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015. Special edition 45-1, pp. 77–82. [In Russ].
21. *P&H 2650 CX Hybrid Shovel*. Joy Global, 2016. 7 p.
22. Kolner W., Madhavarao G. *Peak shaver/rate rise limiter for electric rope shovels and draglines*. June 13, 2013 MEMSA Annual Meeting, Clearwater, Fl. 2013. 24 p.
23. Bilgin H.F., Muammer Ermis, Kose K.N., Alper Cetin, etc. Reactive-power compensation of coal mining excavators by using a new-generation STATCOM. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, Vol. 43, No 1, pp. 97–110. DOI: 10.1109/TIA.2006.887308.
24. Shprekher D.M., Babokin G.I. System of technical diagnostic of electromechanical complexes. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016, no 3, pp. 52–56. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малафеев Сергей Иванович — доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ООО Компания «Объединенная Энергия», Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: simalafeev@gmail.com, sim@jpc.ru,
Малафеев Сергей Сергеевич — канд. техн. наук, преподаватель, Владимирский политехнический колледж, e-mail: serpg87@gmail.com.

Для контактов: Малафеев С.И., e-mail: simalafeev@gmail.com; sim@jpc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Malafeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, «Joint Power» Company Ltd, 111672, Moscow, Russia, Stoletovs Vladimir State University, 600000, Vladimir, Russia, e-mail: simalafeev@gmail.com, sim@jpc.ru,
S.S. Malafeev, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, e-mail: Serpg87@gmail.com, Vladimir Polytechnic College, 600001, Vladimir, Russia.

Corresponding author: S.I. Malafeev, simalafeev@gmail.com; sim@jpc.ru

Получена редакцией 09.01.2019; получена после рецензии 27.05.2019; принята к печати 20.02.2020.
 Received by the editors 09.01.2019; received after the review 27.05.2019; accepted for printing 20.02.2020.

