

**А.В. Мамай****ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ПРИВОДАМИ  
ЭКСКАВАТОРА-МЕХЛОПАТЫ**

*Рассмотрены системы управления экскаватором-мехлопаты. Обоснована необходимость разработки новых подходов к управлению процессом копания. Приведена математическая модель взаимосвязанных приводов напора и подъема. Произведено моделирование разработанной системы автоматизации при копании.*

*Ключевые слова:* экскаватор, электропривод, автоматизация, управление, модель.

**У**величение объемов добычи различных полезных ископаемых на основе всемирного роста производительности труда рабочих горных предприятий – неперенное условие интенсификации экономического развития предприятий и различных горнодобывающих отраслей страны. Выполнение его теснейшим образом связано с оснащением предприятий современной высокопроизводительной и надежной горной техникой [1].

Основной задачей, стоящей перед горнодобывающей промышленностью, является обеспечение прироста добычи полезных ископаемых в основном за счет повышения добычи наиболее эффективным открытым способом на основе широкого внедрения прогрессивной технологии и горнотранспортного оборудования большой единичной мощности [2].

Для выполнения этих задач требуется как строительство новой горнодобывающей техники, так и реконструкция действующей.

Непосредственная разработка горных пород в карьере, представляющая собой выемку и погрузку в средства транспорта или отвал, называется выемочно-погрузочными работами или экскавацией горной массы. Для механизации этого процесса наиболее часто используют одноковшовые экскаваторы циклического действия.

Производительность карьерных экскаваторов (КЭ) зависит от качества подготовки разрабатываемых пород, транспортного оборудования, климатических условий и др. Но особое влияние на производительность выемочно-погрузочных машин оказывают параметры экскаваторного забоя и принятой технологии разработки месторождения [3].

Особенностью работы электроприводов горных машин (ГМ) является стохастически изменяющийся в большом диапазоне характер их нагружения и возможные стопорения исполнительного органа. Наличие упругой податливости в элементах трансмиссии ГМ совместно с изменяющейся нагрузкой способствует постоянному присутствию переходных процессов в механических передачах. Следствием этого и одной из основных причин поломок элементов трансмиссий ГМ является накопление в них усталостных повреждений. Особую роль при этом играют пиковые нагрузки, существенно ускоряющие накопление усталостных повреждений деталей.

Динамические процессы составляют значительную долю всего рабочего цикла КЭ. Электромеханические системы КЭ при этом находятся в специфических условиях работы. Специфика состоит в способе изменения энергетического со-

стояния систем. Например, в режимах пуска происходит резкое изменение потока энергии, направляемого в систему со стороны силового трансформатора, а в режимах стопорения происходит интенсивное перераспределение запасенной энергии между элементами электромеханических и механических систем экскаватора. Эти процессы изменения энергетического состояния системы сопровождаются появлением в механических и электрических элементах приводов КЭ значительных по величине перегрузок. С точки зрения нагруженности элементов приводов в динамических режимах можно говорить о предельном состоянии всей электромеханической системы привода.

Статистические исследования показывают, что существенная доля отказов ГМ связана с выходом из строя элементов трансмиссии их главных приводов. Так, на элементы трансмиссии угледобывающих комбайнов приходится около 25% всех отказов, а длительность простоев карьерных экскаваторов, вызванных ликвидацией поломок элементов трансмиссии, составляют около 50–65% от общего времени аварийных простоев.

Решение проблемы повышения эксплуатационной надежности механических подсистем электроприводов ГМ в настоящее время имеет два основных направления, одно из которых заключается в совершенствовании механических преобразователей, а второе – в использовании управляемого электропривода, осуществляющего управление упругими напряжениями в элементах трансмиссии без снижения момента на рабочем органе ГМ.

При этом второе направление имеет такие достоинства, как возможность применения управляемого электропривода в составе ранее разработанных и находящихся в эксплуатации ГМ без существенных изменений их конструкции, а также позволяет увеличить эксплуатационную надежность ГМ в тех случаях, когда конструктивные меры полностью исчерпаны.

Управляемый электропривод при обеспечении заданной производительности ГМ должен поддерживать механическую нагрузку на элементы трансмиссии в допустимом диапазоне, для уменьшения интенсивности накопления усталостных повреждений и исключения аварийных ситуаций.

Снижение динамической нагруженности элементов механических преобразователей электроприводов ГМ в процессе их работы является важной научной проблемой и ее актуальность определяется не только потребностями практики, но и необходимостью использования полученных результатов для дальнейших научных исследований.

Повышение технического уровня КЭ требует разработки математической модели, адекватно описывающей их основные рабочие процессы.

Наиболее сложной операцией, совершаемой КЭ, с точки зрения возникновения внешних нагрузок является процесс копания, в ходе которого одновременно принимают участие два электропривода: подъема и напора. При составлении описываемой математической модели необходимо учесть, как кинематические особенности электроприводов, так и их взаимную связь. При этом наибольшую роль будет играть изменение параметров электроприводов, вызванное изменением геометрического положения ковша и рукояти.

Анализ работы взаимосвязанных приводов напора и подъема, проводимый методом компьютерного моделирования, показывает, что для повышения надежности КЭ необходима замена систем подчиненного регулирования более совершенными системами, учитывающими протекающие в них взаимосвязанные динамические процессы.

Для синтеза таких систем управления предлагается использовать математическую модель взаимосвязанных приводов напора и подъема экскаватора [4].

$$\frac{d\omega_n}{dt} = \frac{M_n - r_n F_{12n}}{J_n}; \quad \frac{d\omega_n}{dt} = \frac{M_n - r_n F_{12n}}{J_n};$$

$$\frac{dv_\kappa}{dt} = \frac{F_{12n} + m_p \omega_\kappa^2 (s_\kappa - l_p / 2) + (m_\kappa + m_n) \omega_\kappa^2 s_\kappa - F_{ch} - F_{12n} \cos \beta - v_\kappa \frac{dm_n}{dt}}{m_p + m_\kappa + m_n};$$

$$\frac{d\omega_\kappa}{dt} = \frac{F_{12n} s_\kappa \sin \beta - M_{cn} - 2m_p \omega_\kappa v_\kappa (s_\kappa - l_p / 2) - 2(m_\kappa + m_n) \omega_\kappa v_\kappa s_\kappa - \omega_\kappa s_\kappa^2 \frac{dm_n}{dt}}{m_p (s_\kappa - l_p / 2)^2 + m_p l_p^2 / 12 + (m_\kappa + m_n) s_\kappa^2};$$

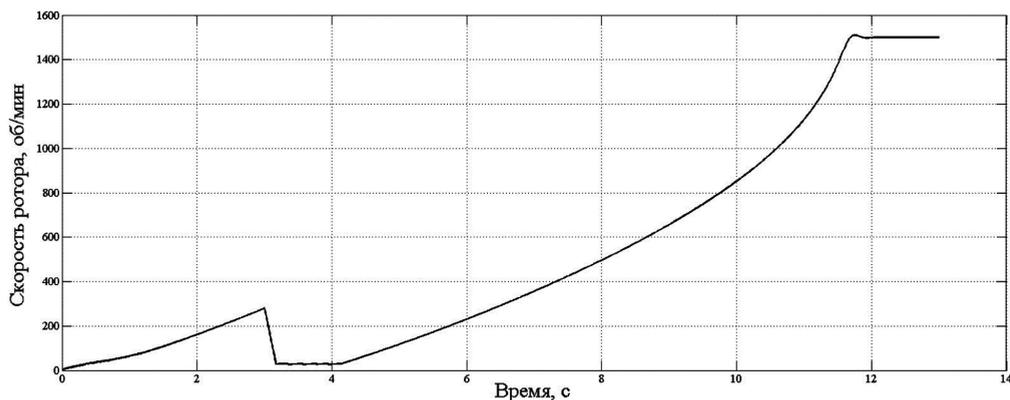
$$\frac{d\varphi_n}{dt} = \omega_n; \quad \frac{d\varphi_n}{dt} = \omega_n; \quad \frac{ds_\kappa}{dt} = v_\kappa; \quad \frac{d\varphi_\kappa}{dt} = \omega_\kappa.$$

Принятые обозначения:  $J_n$  – суммарный приведенный момент инерции первой массы привода напора, включающий момент инерции ротора двигателя, редуктора и напорного барабана;  $J_n$  – суммарный приведенный момент инерции первой массы привода подъема, включающий момент инерции ротора двигателя, редуктора и подъемного барабана;  $m_p, m_\kappa, m_n$  – масса рукояти, ковша и породы соответственно;  $M_n$  – электромагнитный момент двигателя напора, приведенный к скорости напорного барабана;  $M_n$  – электромагнитный момент двигателя подъема, приведенный к скорости подъемного барабана;  $\omega_n, \omega_n$  – угловая скорость первой массы привода напора и подъема соответственно;  $F_{ch}, M_{ch}$  – сила и момент сопротивления привода напора и подъема соответственно;  $v_\kappa$  – линейная скорость напора ковша;  $\omega_\kappa$  – угловая скорость ковша и рукояти;  $\alpha$  – угол наклона стрелы относительно горизонта;  $\beta$  – угол наклона подъемного каната относительно рукояти;  $l_p$  – полная длина рукояти;  $\varphi_n, \varphi_n$ ,  $\varphi_\kappa$  – угловое положение напорного барабана, подъемного барабана и рукояти соответственно;  $s_\kappa$  – величина выбега рукояти;  $F_{12n}$  – упругая сила в напорном канате;  $F_{12n}$  – упругая сила в подъемном канате.

При использовании рассматриваемой математической модели необходимо учитывать изменяющийся характер нагрузки электроприводов. На величину нагрузки влияют пространственное расположение ковша и рукояти, неоднородность грунта, непостоянство координации подъемных и напорных движений, случайные изменения высоты забоя и угла поворота экскаватора при его работе.

Нагрузка на привод напора складывается из составляющих сил сопротивления, направленных вдоль рукояти ковша. Нагрузка на привод подъема определяется как момент силы, складывающейся из составляющих сил сопротивления, направленных перпендикулярно рукояти ковша. Для окончательного описания нагрузки взаимосвязанных электроприводов подъема и напора необходимо показать вероятностный характер сил сопротивления резанию.

При разработке системы управления взаимосвязанных приводов напора и подъема следует учитывать человеческий фактор. В процессе копания часто возникают ситуации стопорения ковша породой. В большинстве случаев задающее воздействие из кабины машиниста на системы главных приводов носит



### **Моделирование процесса копания КЭ с системой автоматизации**

односторонний характер – машинист пытается «продавить» ковш дальше вместо того чтобы немного убавить задание на привод напора. Возникает необходимость создания системы управления взаимосвязанных приводов напора и подъема, влияющей на процесс копания и помогающей машинисту справиться с подобными ситуациями. Для осуществления такой обратной связи разработаны алгоритмы поведения для процесса копания, отраженные в математической модели, выполненной в пакете MATLAB. Результаты моделирования представлены на рисунке.

Результаты разработки используются в Компании «Объединенная Энергия» при проектировании низковольтных комплектных устройств для новых экскаваторов с транзисторными преобразователями энергии.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кантович Л.И., Гетопанов В.Н. Горные машины: Учебник для техникумов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.: ил.
2. Бритаев В.А., Замышляев В.Ф. Горные машины и комплексы. Учебное пособие для техникумов. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
3. Мазаев В.М., Протасов С.И., Самусев П.А. Процессы открытых горных работ: Практикум по дисциплине «Процессы горного производства» для студентов, обучающихся по направлению 550600 «Горное дело» (специальность 090500 «Открытые горные работы»). – Кемерово: КузГТУ, 2000. – 110 с.
4. Завьялов В.М., Семькина И.Ю. Математическая модель механической части взаимосвязанных электроприводов напора и подъема карьерного экскаватора [Электронный ресурс] // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 40–43. **ТИАБ**

### **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

Мамай Андрей Викторович – аспирант, инженер, ООО «Объединенная энергия», Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: ma@jpc.ru.

UDC 621.879.879.3

### **ANALYSIS AND DESIGN OF CONTROL FOR INTERCONNECTED DRIVES OF SHOVEL**

Maмай A.V., Graduate Student, Engineer, «United Energy», Vladimir State University named after Stoletovs, Vladimir, Russia, e-mail: ma@jpc.ru.

The paper considers control excavator-mexlapati. The necessity of developing new approaches to managing the process of digging. The mathematical model of the interconnected actuator head and lifting. A simulation of the developed system automation digging.

Key words: excavator, electric, automation, control, model.

## REFERENCES

1. Kantovich L.I., Getopanov V.N. *Gornye mashiny: Uchebnik dlya tekhnikumov* (Mining machines. Technical school textbook), Moscow, Nedra, 1989, 304 p.
2. Britaev V.A., Zamyshlyayev V.F. *Gornye mashiny i komplekсы. Uchebnoe posobie dlya tekhnikumov* (Mining machines and equipment sets. Educational aid for technical schools), Moscow, Nedra, 1984, 288 p.
3. Mazaev V.M., Protasov S.I., Samusev P.A. *Protsessy otkrytykh gornykh работ: Praktikum* (Open pit mining processes: Practical course), Kemerovo, KuzGTU, 2000, 110 p.
4. Zav'yalov V.M., Semykina I.Yu. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007, vol. 310, no 3, pp. 40–43.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

### ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВЗРЫВНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ С УЧЕТОМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И УСЛОВИЙ РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Анисимов Виктор Николаевич – академик АГН, МАНЭБ, Общественной академии национальной безопасности, президент НПЦ «Экоресурсы» Регионального отделения КМА, АГН.

Рассмотрена концепция разработки сложноструктурных массивов железистых кварцитов на карьерах и шахтах на примере железорудных месторождений КМА с учетом их геолого-геофизических особенностей и требований по улучшению условий рационального природопользования. Предложена методология разработки на примере Лебединского, Стойленского, Коробковского и подготавливаемого к разработке Чернянского месторождений. Реализацией методологии является геолого-геофизическим обоснованием оптимального освоения месторождений с учетом выполнения условий и требований рационального недропользования. Достижимый технический результат позволяет: снизить потери полезных компонентов, повысить показатели их извлечения, повысить степень дробления, снизить энергозатраты на дробление и измельчение, в целом снизить техногенную нагрузку на окружающую среду для выполнения условий и требований рационального недропользования.

Ключевые слова: сложноструктурные массивы, железистые кварциты, геолого-геофизические особенности, карьеры, шахты, схемы взрывания.

### SUBSTANTIATION OF IRON ORE MINING AND BLASTING, CONSIDERING GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS AND THE RATIONAL SUBSOIL USE STANDARDS

Anisimov V.N., Academician of the Academy of Mining Sciences, International Academy of Ecology and Life Protection Sciences, National Safety Academy, President of Eco-Resources Research & Production Center, Regional Division, KMA, AMS.

In terms of iron ore deposits of the Kursk Magnetic Anomaly, the article gives a concept of open-pit and underground mining of complex-structure ferruginous quartzite ore bodies, considering their geology and geophysics and the improved and sound nature management standards. The mining methodology is developed in terms of operating Lebedyansky, Stoilensky and Korobkovsky Mines, and Chernyansky deposit under primary mining. Implementation of the methodology is the geological and geophysical foundation of optimized mineral mining, considering terms and conditions of rational subsoil use. The obtained technological results allow: reducing mineral loss, enhancing mineral recovery, improving mineral fragmentation quality, putting down energy consumption for crushing and grinding and abating the technological environmental impact for the purpose of rational subsoil use compliance.

Key words: complex-structure rock masses, ferruginous quartzite, geological and geophysical characteristics, open-pit mines, underground mines, blasting patterns.