

УДК 622.232.72

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЛОЖНЫХ ГОРНЫХ МАШИН КАК МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ**

Горбатов П.А., докт. техн. наук, профессор, Донецкий национальный технический университет, Косарев В.В., канд. техн. наук, Стадник Н.И., докт. техн. наук, Донгипроуглемаш.

*Впервые предложены и обоснованы признаки для отнесения сложных горных машин к классам мехатронизированных и мехатронных систем. Сформулирована сущность и показаны преимущества мехатронного подхода к рассматриваемым машинам при их проектировании. Выполнен анализ особенностей построения и функционирования подсистем автоматизированного управления очистных комбайнов мехатронного класса.*

*For the first time attributes for reference of complex mine machines to classes mechanotronic systems are offered and proved. The essence is formulated and advantages mechanotronic the approach to considered machines are shown at their designing. The analysis of features of construction and functioning of subsystems of automated management of clearing combines a mechanotronic class is executed.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

В числе основных направлений совершенствования сложных горных машин – повышение уровня интеллектуализации процесса управления ними на основе расширения использования средств автоматизации, обеспечивающих достижение более высоких технико-экономических показателей и улучшение условий труда рабочих.

Повышение качества проектирования горных машин новых поколений с развитыми подсистемами автоматизированного управления функциональными движениями их рабочих органов является актуальной научно-технической проблемой. Для решения этой проблемы необходимо решение ряда новых задач научного и практического характера. К числу таких задач относится разработка концептуальной характеристики сложных горных машин с позиций мехатронного подхода при их анализе, синтезе и оптимизации, принятого в наиболее развитых отраслях машиностроения ведущих стран мира.

**Анализ исследований и публикаций.** В работах [1-4] рассмотрены некоторые особенности построения и функционирования выемочных комбайнов с частотно-регулируемым электроприводом, а также других горных машин, характеризующихся высокой степенью сложности управления. В работах [1, 2] впервые было сформулировано концептуальное положение о необходимости обязательного использования мехатронного подхода при проектировании указанных машин, заключающегося, прежде всего, в рассмотрении как изначально технически равноправных всех компонентов таких объектов – как традиционных для механики (механических, электротехнических и гидравлических), так и аппаратуры автоматизированного управления. Вместе с тем следует отметить, что указанные исследования [1-4] охватывают решение сравнительно узких задач, не являются системными и поэтому не претендуют на уровень концептуальной характеристики сложных горных машин как мехатронных систем.

**Постановка задач.** В настоящей работе решаются следующие взаимосвязанные задачи:

- установить признаки для отнесения горных машин к классам мехатронизированных и мехатронных систем;
- сформулировать сущность мехатронного подхода к горным машинам при их анализе, синтез и оптимизации;
- на характерном примере сложной горной машины нового поколения рассмотреть особенности построения и функционирования её подсистемы автоматизированного управления и доказать правомочность отнесения этого объекта к классу мехатронных систем;
- сформулировать преимущества использования мехатронного подхода при проектировании современных горных машин.

**Изложение материала и результаты.** В связи с развитием информационных технологий в настоящее время ведущей мировой тенденцией в машиностроении является переход от механики к мехатронике, являющейся своеобразной современной философией проектирования сложных управляемых технических объектов. Мехатроника – это новая область науки и техники, занимающаяся созданием качественно новых машин с программным компьютерным управлением их функциональными операциями и базирующаяся на синергетической интеграции механических, электротехнических и гидравлических компонентов с электронными и компьютерными.

Синергетика – наука, в которой исследуется совместное действие различных компонентов объектов. Синергетика – это современ-

ная теория самоорганизации систем изменением характеристик их функционирования на основе самоприспособления (адаптивности) к изменению внешних факторов, параметров внешней среды. Под синергетической интеграцией подразумевается придание объекту качественно новых технико-экономических свойств на основе столь глубокого объединения в одном агрегате неразрывно связанных компонентов разной технической природы, что они действуют как единый функциональный и конструктивный организм.

Проанализируем особенности развития сложных горных машин (очистные и проходческие комбайны, механизированные крепи и др.) и горного оборудования более высокого уровня в виде соответствующих комплексов и агрегатов с позиций мехатронного подхода.

Сложные горные машины прежних поколений, созданные в конце прошлого века, в качестве основных структурных элементов включали тесно взаимосвязанные механические, электротехнические и гидравлические компоненты. В состав подсистем управления этих технических объектов могли входить средства автоматизации с использованием электронных, в т.ч. микроэлектронных компонентов, которые обеспечивали решение задач автоматизации некоторых функциональных операций. Как правило, при разработке рассматриваемых машин указанные средства формировались уже на завершающих стадиях проектно-конструкторских работ. Такие машины характеризовались доминированием энергетических и динамических процессов, протекающих в их узлах, т.е. по сути являлись энергодинамическими объектами.

В дальнейшем расширялось применение микроэлектронной техники, начали использоваться микропроцессорные вычислительные устройства с заранее жестко заданными функциональными программами. В последнее время в составе аппаратуры автоматизации стали применять также современные компьютерные компоненты на основе программируемых контроллеров.

Внедрение достижений информационных технологий ускорило повышение уровня интеллектуализации процесса управления сложными машинами для подземной добычи угля. Горные машины новых поколений с современной аппаратурой автоматизации, компьютерным управлением их функциональными операциями характеризуются доминированием не только энергетических и динамических, но и информационных процессов, т.е. являются энергодинамическими и

информационными объектами. Эти машины следует отнести к классу мехатронизированных систем.

Аппаратура автоматизации для класса мехатронизированных горных машин в общем случае должна выполнять следующие задачи:

1) управление с рациональной степенью интеллектуализации функциональными движениями их рабочих органов с требуемыми характеристиками и параметрами;

2) необходимые виды защит от различного рода технологических перегрузок и нештатных ситуаций;

3) функции сервисного характера, улучшающие качество эксплуатации оборудования (например, диагностическое обеспечение контроля технического состояния узлов в режиме мониторинга).

Аппаратура автоматизированного управления в составе современных мехатронизированных машин призвана обеспечить достижение ими значительно более высоких технологических показателей, создание максимально безопасных и комфортных условий работы.

Безусловно, горные машины, созданные в разное время и разными разработчиками, характеризуются различным уровнем:

- интеграции их традиционных (механических, электротехнических и гидравлических) структурных элементов с информационными (микроэлектронными и компьютерными) компонентами;

- интеллектуализации процесса управления на основе использования микропроцессорной вычислительной техники.

Изложенное позволяет говорить о разных уровнях мехатронизации рассматриваемых горных машин.

Наиболее высоким уровнем мехатронизации в настоящее время обладают горные машины новых поколений, степень сложности управления которыми не позволяет обеспечить необходимый уровень их функционирования, т.е. работу с требуемыми характеристиками и параметрами, человеком-оператором без использования соответствующей аппаратуры автоматизации. Подсистемы автоматизированного управления этими объектами, наряду с вышеуказанными задачами автоматизации, выполняют важнейшую обязательную функцию – обеспечивают необходимый уровень функционирования рассматриваемых машин. Такие объекты с наиболее высокими степенями интеграции структурных компонентов и интеллектуализации процесса управления следует отнести к классу мехатронных, а не мехатронизированных горных машин. Это относится, например, к выемочным машинам при применении электрических регуляторов скорости на

основе частотно-регулируемого электропривода; к струговым очистным механизированным комплексам при реализации дозированной выемки угля и последовательной пилообразной схемы передвижки секций агрегатированной крепи; к конвейероструговым очистным агрегатам, обеспечивающим фронтальную схему зарубки и отбойки угля и фронтально-групповую передвижку секций крепи с выводом обслуживающего персонала из лавы.

Анализ, синтез и структурно-параметрическая оптимизация таких систем должны выполняться только на основе мехатронного подхода, т.е. базироваться на изначально одинаково важных, технически равноправных, органически связанных механических, электротехнических, гидравлических, микроэлектронных (электронных) и компьютерных компонентах.

Для доказательства вышеуказанных положений рассмотрим особенности автоматизированного управления мехатронными объектами на примере созданных Донгипроуглемашем очистных комбайнов нового поколения (КДК400, КДК500, КДК700, УДК300), оснащенных двумя встроенными подсистемами подачи с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом и жестким тяговым органом.

На рисунке на качественном уровне представлены естественные статические механические характеристики указанных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при разных значениях частоты  $f_1$  (рис. а) и действующего значения напряжения  $U$  (рис. б) питающей электросети. Здесь:  $M$ ,  $M_k$ ,  $n$ ,  $n_k$  – текущие и критические (индекс «к») значения момента, Нм, и частоты вращения ротора, об/мин, электродвигателя;  $n_c$  – синхронная частота вращения ротора, об/мин.

Зависимости, описывающие основные параметры рабочего участка ( $0 \leq S \leq 1,2 S_{II}$ ) статических механических характеристик электродвигателей, следующие [2]:

$$n = n_c(1 - S) = \frac{60 f_1}{p}(1 - S); \quad (1)$$

$$M_k = \frac{3 \cdot U^2 \cdot p}{4 \pi f_1 \cdot \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + [2\pi f_1(L_1 + L_2')]^2} \right)} \approx \approx \frac{3 \cdot U^2 \cdot p}{8 \pi^2 f_1^2 (L_1 + L_2')} = a \frac{U^2}{f_1^2}; \quad (2)$$

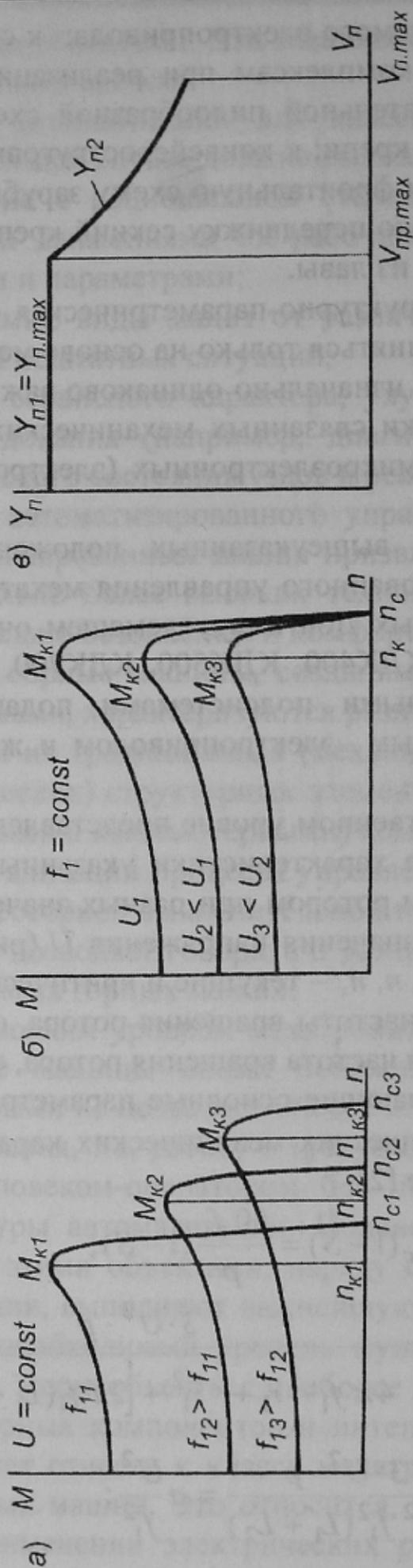


Рисунок – Статические механические характеристики для подсистем подачи очистных комбайнов с частотно-регулируемым электроприводом

$$S_k = \frac{r_2'}{r_1^2 + [2\pi \cdot f_1(L_1 + L_2')]^2} \approx \frac{r_2'}{2\pi \cdot f_1(L_1 + L_2')} = \frac{d}{f_1} \quad (3)$$

Формула (3) справедлива при  $U = \text{const}$ .

Здесь:  $S$ ,  $S_n$ ,  $S_k$  – текущее, номинальное и критическое значения скольжений электродвигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $r_1$  – активное сопротивление статора (в первом приближении для рассматриваемых задач им можно пренебречь);  $r_2'$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $L_1$ ,  $L_2'$  – индуктивности статора и приведенное ротора;  $a$ ,  $d$  – коэффициенты пропорциональности.

На рис. 6 в идеализированном виде представлена реализованная в проектно-конструкторских решениях статическая механическая (или тягово-скоростная) характеристика подсистем подачи рассматриваемых очистных комбайнов. Здесь  $Y_n$  – тяговое усилие,  $V_n$  – скорость подачи.

На первом участке этой характеристики, соответствующем частотам питающей сети  $f_1 \leq f_c$  (где  $f_1 = 50$  Гц – номинальная частота) и используемом при режимах работы комбайна по выемке, реализуются соотношение (правило М.П. Костенко):

$$\frac{U_1}{f_{11}} = \frac{U_2}{f_{12}} = \dots = \text{const} \quad (4)$$

На рис. 6  $V_{np,max}$  – максимальная рабочая скорость подачи, соответствующая  $f_1 = f_c$ ;  $Y_{n1} = Y_{n,max}$  – максимальное при выемке угля значение тягового усилия, соответствующее номинальному моменту  $M_n$  каждого из двигателей подсистем подачи.

При этом подсистемами автоматизированного управления поддерживается стабильность значений:

- критических моментов  $M_k$ , см. зависимости (2) и (4);
- перегрузочной способности  $\lambda$  каждого из двигателей.

Используя формулу Клосса, можно записать:

$$\lambda = \frac{M_k}{M_n} = \frac{1 + \kappa^2}{2\kappa} \quad (5)$$

где  $\kappa = S_n \cdot S_k^{-1}$  – безразмерный параметр, имеющий при реализации соотношения (4) стабильное значение.

Максимальная мощность на подачу при выемке соответствует допускаемой по фактору нагрева обмоток тепловой мощности электродвигателей при работе в режиме S1 и определяется по формуле:

$$P_{v. \max} = q Y_{n. \max} \cdot V_{np. \max}, \quad (6)$$

где  $q$  – коэффициент пропорциональности.

На втором участке характеристики, рис. 6, представлена зависимость тягового усилия  $Y_{n2}$  от используемой, как правило, для маневровых перемещений машины скорости подачи  $V_{n2} \in (V_{np. \max}; V_{n. \max}]$  при  $U = const$  и регулировании частоты сети  $f_1 \in (f_c; f_{1 \max}]$ . Здесь  $V_{n. \max}$  – максимальная скорость подачи при  $f_1 = f_{1 \max}$ ;  $f_{1 \max}$  – максимальное значение частоты  $f_1$ , принятое для конкретного технического решения. Зависимость  $Y_{n2} = Y_{n2}(V_{n2})$  соответствует постоянству ограничивающего фактора – допускаемой тепловой мощности  $P_d$  двигателей (учет КПД подсистем подачи здесь для упрощения изложения материала не рассматривается):

$$P_d = P_{v. \max} = q Y_{n2} V_{n2} = const. \quad (7)$$

Текущее значение среднего уровня тягового усилия при работе комбайна на обоих участках характеристики, представленной на рис. 6, определяется величиной технологической нагрузки для подсистем подачи.

В состав подсистем автоматизированного управления рассматриваемых очистных комбайнов входят преобразователи частоты и комплексы технических средств управления на основе электронных и микроэлектронных структурных единиц и компьютерных компонентов в виде программируемых контроллеров, адаптированных к работе в подземных условиях.

Преобразователи частоты формируют требуемые законы изменения  $U$  и  $f_1$  и, следовательно, необходимые искусственные статические механические характеристики электродвигателей в соответствии с управляющими воздействиями, которые обеспечивают комплексы технических средств управления.

Как видно из вышеприведенного материала при отсутствии указанных преобразователей частоты и комплексов невозможно обеспечить реализацию даже самого простого режима поддержания заданного стабильного значения скорости подачи  $V_n$  человеком-оператором. Изложенное позволяет сформулировать вывод о правомочности отнесения рассматриваемых объектов к классу мехатрон-

ных систем, обладающих высокими степенями интеграции всех их структурных элементов и интеллектуализации процесса управления.

Использование мехатронного подхода при проектировании современных горных машин позволяет:

- получить высокое качество, эффективность и безопасность управления сложными функциональными движениями их рабочих органов;

- улучшить динамические характеристики машины;

- реализовать модульный принцип построения мехатронизированных и мехатронных узлов или блоков с минимальным числом звеньев и кинематических пар, что дает возможность улучшить техническое обслуживание, создать предпосылки для унификации и мобильной адаптации горного оборудования к разным условиям эксплуатации;

- улучшить массо-габаритные характеристики, повысить надежность, снизить стоимость объектов.

Современный этап развития сложных горных машин можно охарактеризовать как переход от мехатронизированных объектов к мехатронным.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Впервые разработанную концептуальную характеристику сложных горных машин с позиций мехатронного подхода при их анализе, синтезе и оптимизации можно рассматривать в качестве этапа при решении проблемы улучшения качества проектирования рассматриваемых объектов нового поколения на основе повышения уровня интеллектуализации процесса управления ними. В дальнейшем предполагается разработка концепции оптимального проектирования очистных и проходческих стреловидного типа комбайнов новых поколений как мехатронных систем.

#### Список источников

1. Горбатов П.А., Лысенко Н.М., Воробьев Е.А. Оптимальное проектирование очистных комбайнов как сложных систем// Горные машины и автоматика. – М.:Машиностроение, 2001. – №6. – С. 9-13.
2. Горбатов П.А., Петрушкин Г.В., Лысенко Н.М. Горные машины и оборудование – В 2-х т. – Донецк: РИА ДонНТУ, 2003. – Т.1 – 295с.; Т.2 – 201с.
3. Горбатов П.А. Научные основы разработки мехатронных систем приводов исполнительных органов проходческих комбайнов. // Горные машины и автоматика. – М.:Новые технологии, 2004. – №7. – С. 42-44.
4. Горбатов П.А., Хиценко Н.В., Кислун А.В. Установление рациональных параметров обработки забоя проходческим комбайном с мехатронной подсистемой привода.// Научные труды международной научно-технической конференции «Горное оборудование – 2005». – Донецк: ДонНТУ, 2005. – С. 46-53.