

УДК 622.232

П.А. Горбатов, докт. техн. наук, проф., Н.М. Лысенко, канд.техн.наук, доц., М.Н. Лысенко, магистрант, Донецкий национальный технический университет, Украина

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ ПОДСИСТЕМ ПРИВОДА ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ

Предложены концептуальные положения, разработаны математическая и структурная модели для использования при оптимальном параллельном проектировании мехатронных подсистем привода исполнительного органа в составе проходческих комбайнов.

ПРОХОДЧЕСКИЙ КОМБАЙН, МЕХАТРОННАЯ ПОДСИСТЕМА ПРИВОДА, ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ФУНКЦИИ ЦЕЛИ, РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Основные причины снижения темпов проведения подготовительных выработок комбайновым способом, наблюдаемого на протяжении последних ряда лет на шахтах Украины, наряду с крайне медленным обновлением парка проходческой техники из-за ограниченных финансовых возможностей большинства шахт, также заключаются в недостаточно эффективном использовании современных проходческих комбайнов вследствие реализации ручного управления режимами работы исполнительных органов при достаточно широком диапазоне изменения физико-механических свойств вмещающих пород.

Поэтому дальнейшее совершенствование проходческих комбайнов путем повышения уровня интеллектуализации процесса управления ними, направленное на решение проблемы увеличения темпов проходческих работ, является актуальной научной и практической задачей.

Анализ исследований и публикаций. В [1] для проходческих комбайнов (ПК) стреловидного типа применительно к автоматизированному управлению режимами работы исполнительных органов сформулирован ряд требований, в том числе указывается, что, как правило, должно быть обеспечено: автоматическое регулирование скорости перемещения или частоты вращения исполнительного органа (ИО); автоматическая стабилизация нагрузки электропривода ИО.

Рассмотрим специфику режима автоматизированной стабилизации¹ на заданном соответствующими уставками уровне нагрузки электродвигателя (ЭД) подсистем привода ИО за счет бесступенчатого регулирования частоты вращения ротора ЭД n (стабилизация среднего значения момента M на валу ЭД и, следовательно, на валу ИО M_p), который характеризуется следующими особенностями: скорость перемещения органов $V_{\Pi} \approx const$, $n = var$, скорость резания $V_p = var$, средняя толщина стружки на резцах $h = var$, теоретическая производительность $Q \approx const$, $M_p \approx const$, мощность ЭД $P = var$.

Учитывая достаточный опыт, накопленный в настоящее время при создании очистных комбайнов с частотно-регулируемым электроприводом их подсистем подачи [2], представляется целесообразным в качестве перспективного варианта для ПК следующего поколения рассмотреть вариант однопараметрического бесступенчатого автоматизированного управления скоростью V_p в составе мехатронных подсистем привода ИО (подсистем ПИО). Этот вариант в полной мере отвечает требованиям стандарта [1], характеризуется стабильностью производительности Q , что улучшает управление грузопотоками при выполнении проходческих работ, и не требует усложнений гидросистем современных ПК.

В работе ДонНТУ [3] предложен алгоритм рационального управления режимами работы мехатронных подсистем ПИО ПК, однако практически не рассмотрены вопросы оптимального пректирования этих подсистем.

Постановка задачи. Целью настоящих исследований является обоснование концептуальных положений и разработка математической модели оптимального, итерационного характера, проектирования мехатронных подсистем привода ПК следующего поколения, создание рациональной структурной модели для этих подсистем на основе развития разработок ДонНТУ в рассматриваемой области [3].

Изложение материала и результаты. В качестве объекта исследований в настоящей работе рассматриваются широко применяемые ПК стреловидного типа, оснащенные аксиальными фрезерными ИО, при использовании современных технологических схем обработки забоя на основе доминирующих поворотных перемещений стрелы в горизонтальной плоскости.

¹ Термин «автоматизированная стабилизация» авторам представляется более корректным, чем «автоматическая стабилизация».

Управляемыми при изменении свойств разрушаемых массивов режимными параметрами для ПК в общем случае, кроме скоростей V_P и V_{II} , могут быть: толщина разрушаемого слоя горного массива H_C при перемещении ИО вдоль забоя; величина заглубления ИО в массив B_3 . Однако при регулировании H_C и B_3 очень существенно усложняется или даже практически исключается автоматизированное управления режимами работы ПК.

Вариант бесступенчатого автоматизированного управления V_p с учетом вышеуказанных особенностей может быть реализован при построении подсистем ПИО на базе частотно-регулируемого асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором (в дальнейшем мехатронных подсистем ПИО). При этом мехатронные объекты, как известно [4, 5], должны создаваться только на основе параллельного проектирования и обладать высокой степенью синергетической интеграции между традиционными структурными элементами (механическими-М, электротехническими-СЭ и гидравлическими-СГ) и интеллектуального характера информационно-электронными (ИЭ) компонентами.

При формировании векторного представления математической модели (ММ) оптимального проектирования мехатронных подсистем ПИО в составе ПК воспользуемся подходами и рекомендациями, предложенными в работе [6] применительно к сложным системам. С учетом указанных разработок, ММ в общем виде можно представить следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_o \supset \vec{X}_y, \quad y = 1, \dots, N_y, \\ \vec{F}(\vec{X}_y, \vec{C}) = \text{extr}_y \vec{F}(\vec{X}_y, \vec{C}), \\ \vec{X}_y \in R, \\ R \supset \begin{cases} K_p \in [K_{pH}; K_{pB}], & p = 1, \dots, N_p, \\ \Pi_j \in [\Pi_{jH}; \Pi_{jB}], & j = 1, \dots, N_j, \\ \Phi_r \in [\Phi_{rH}; \Phi_{rB}], & r = 1, \dots, N_r. \end{cases} \end{array} \right.$$

Здесь приняты следующие обозначения:

R_o – гиперпространство оптимальных значений переменных проектирования (параметров и структур);

$\vec{X}_y(\vec{Y}_y, S_y, \vec{P}_y)$ – вектор переменных проектирования для y -го оптимального варианта;

\vec{Y}_y - вектор управляющих воздействий на ПК при реализации технологического цикла с необходимыми режимными параметрами;

S_y - структурная модель (S-модель) мехатронной подсистемы ПИО в составе ПК;

\vec{P}_y - вектор параметров М, СЭ, ИЭ компонент создаваемого объекта;

\vec{C} - вектор постоянных проектирования, задаваемых при создании исполнений ПК, максимально адаптированных к конкретным условиям эксплуатации, исходя из области применения и основных макроуровневых характеристик машины в соответствии с требованиями заказчика и ТЗ;

$\vec{F}(\vec{X}_y, \vec{C})$ - вектор-функция цели;

R - гиперпространство проектирования, формируемое возможными значениями переменных проектирования \vec{X}_y ;

K_p - критериальные ограничения, накладываемые на значения соответствующих функций цели (критериев качества); здесь и далее индексы «н» и «в» означают нижние и верхние значения;

P_j, Φ_r - соответственно параметрические и функциональные ограничения, накладываемые на значения переменных проектирования.

Для решения поставленных задач в качестве составляющих вектора-функции цели $\vec{F}(\Delta m \leq \Delta m_3; \Delta q_i \rightarrow \min; K_m \rightarrow \min)$ представляется целесообразным рассматривать следующие критерии:

1. Критерий стабилизации момента на валу ИО $\Delta m = (M_{pv} - M_p)M_p^{-1} = (M_p - M_{pn})M_p^{-1} \leq \Delta m_3$, где M_{pn} и M_{pv} - границы «коридора» автоматизированного поддержания заданного среднего уровня M_p ; Δm_3 - заданное значение критерия.

2. Критерий стабилизации теоретической производительности ПК $\Delta q_i = |k_{q_i} - 1| \rightarrow \min$, где $k_{q_i} = Q_i \cdot Q_o^{-1}$; Q_o - производительность ПК при номинальном положении ИО, соответствующем нулевым значениям углов подъема-опускания φ_e и поворотов вправо-влево φ_z стрелы (в дальнейшем индекс «о» также указывает на соответствие параметра номинальному положению ИО); Q_i - производительность ПК при выполнении i -го бокового реза в случае $\varphi_z \neq 0$ и $\varphi_e \neq 0$.

Известно, что при перемещениях ИО будут наблюдаться некоторые отклонения производительности $Q_i = S_{ci} \cdot V_{ni}$ по отношению к Q_o

из-за кинематических изменений скорости V_{ni} и поперечной площади вынимаемых слоев породы S_{ci} в процессе выполнения i -го бокового реза. Для частичной компенсации указанных отклонений в работе [7] предложено соответствующим образом пошагово изменять величину $\Delta\varphi_{vi}$ углового шага поворота стрелы в вертикальной плоскости между соседними боковыми резами.

3. Критерий (коэффициент) неравномерности изменения момента сил сопротивления на валу ИО K_m , отражающий степень остаточной силовой неуравновешенности разрабатываемой схемы набора резцов на ИО [8, 9 и др.]: $K_m \rightarrow \min$.

Критериальное ограничение K_p при решении рассматриваемой задачи следующее: $Q_0 \geq Q = \frac{P_v}{60W}$. Здесь: Q и W - заданные соответ-

ственно значения минимально допустимой теоретической производительности и максимально допускаемых энергозатрат, которые можно считать приемлемыми при разрушении пород с максимальным пределом прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сжв}$; P_v - величина мощности, фиксируемая на валу ИО в процессе разрушения пород с $\sigma_{сжв}$ при реализации верхней границы V_{pv} скорости резания.

Вектор постоянных проектирования \vec{C} характеризуется: типом забоя (смешанный, породный); геометрическими параметрами выработки, в т.ч. угольного пласта; свойствами вмещающих пород как объектов разрушения (прежде всего $\sigma_{сжв}$); заданными значениями Q , W и параметров H_a , характеризующих надежность редуктора (например, запасы прочности и выносливости).

Вектор управляющих воздействий \vec{Y}_y формируют следующие характеристики и параметры:

1. Рациональная схема обработки забоя с позиций силового фактора, состояния боковых стенок и кровли выработки и др.

2. Поперечные площади вынимаемых слоев породы при $\varphi_2 = 0$: $S_{coi} = f(\Delta\varphi_{vi}, B_{zo})$, где B_{zo} - номинальная величина заглубления ИО в массив.

3. Средняя скорость подачи ИО V_{no} . При выборе режимных параметров должно выполняться условие: $S_{co} \cdot V_{no} \geq Q$. Здесь величины S_{co} и V_{no} соответствуют номинальному положению ИО.

4. Скорость резания V_p . Диапазон регулирования $V_p \in [V_{pn}; V_{pv}]$ определяет граничные значения частоты вращения ИО $n_{об} \in [n_{об.н}; n_{об.в}]$ и соответствующие значения толщин стружки $h_{во}$ и $h_{но}$, которые будут формироваться на резцах в процессе выполнения горизонтальных резов при ранее установленной величине скорости ИО $V_{но}$. При этом необходимо иметь в виду, что в соответствии с результатами исследований ученых ГП «Донгипроуглемаш» целесообразно V_{pv} (рассматриваемый параметр предлагается относить к резцам, расположенным на среднем, по вершинам резцов, диаметре $D_{ср}$ аксиального ИО) задавать примерно до 2 м/с (максимум до 3 м/с), т.к. при выемке крепких и абразивных пород при более высоких значениях V_p резко интенсифицируется износ резцов. Нижнее значение скорости V_{pn} применительно к аксиальному исполнительному органу при боковых резах определяется, исходя из существующего ограничения величины $h_{во}$ по радиальному вылету l_p резцов, при известном их количестве m в одной линии резания:

$$V_{pn} = \frac{V_{но} \cdot \pi \cdot D_{ср}}{0,6 \cdot l_p \cdot m}.$$

Таким образом, сформирован вектор функциональных ограничений $\vec{\Phi}_r(V_{pv}, h_{во})$.

Предлагаемая S-модель рассматриваемых мехатронных подсистем ПИО в составе ПК, сформированная на основе структур, реализующих необходимые функциональные преобразования с помощью минимального числа блоков и смежных с ними интерфейсов [4], представлена на рис.1 в виде совокупности следующих структурных блоков, имеющих собственные функциональные назначения:

1. Электродвигатель (ЭД), как преобразователь электрической энергии во вращательное движение ротора с моментом M и частотой вращения n .

2. Редуктор, как преобразователь вращательного движения с необходимым передаточным числом u_p , характеризуется средним уровнем момента на выходном валу M_p .

3. ИО, входящий в состав функционально взаимодействующих подсистем ПИО и подвески и перемещения ИО и предназначенный для обеспечения выемки породы при реализации режимных параметров – скоростей $V_p = var$ и $V_n \approx const$, величин B_3 и H_c .

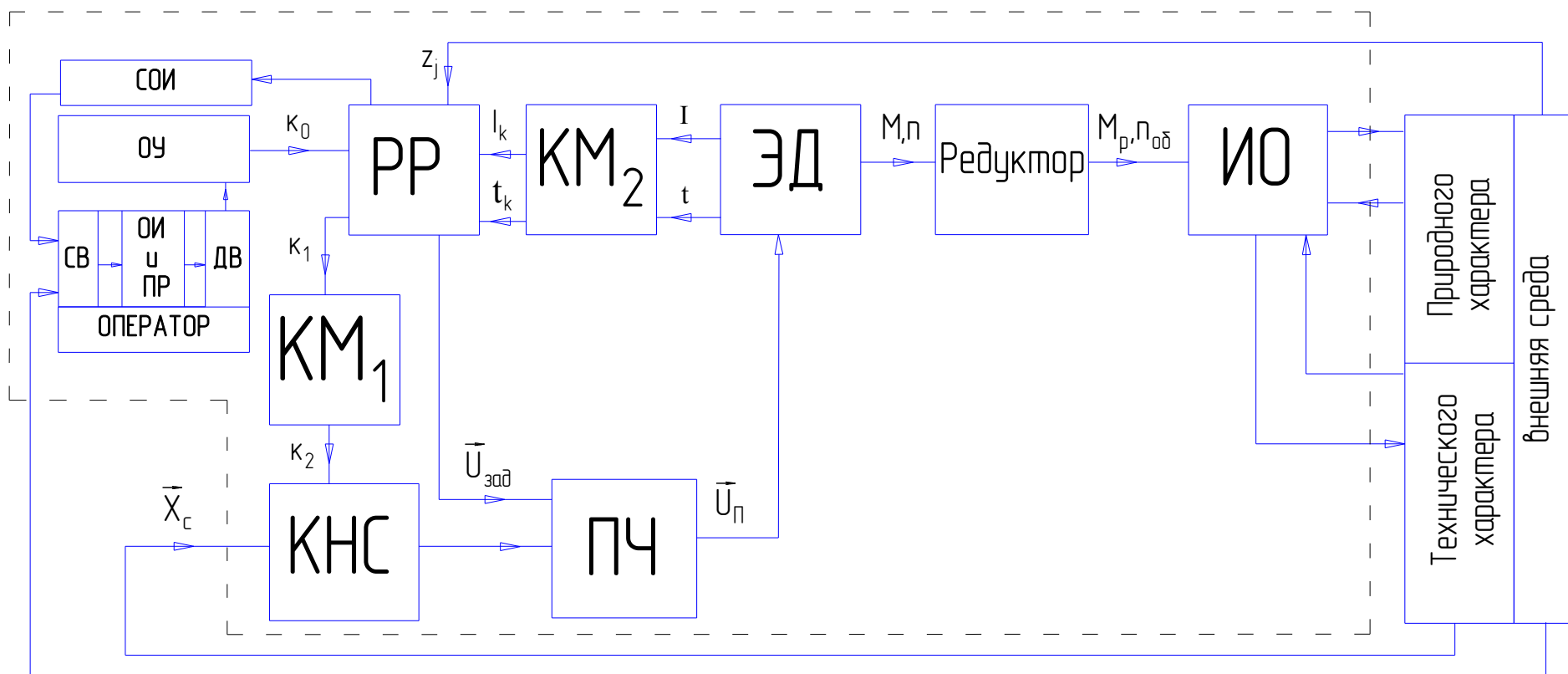


Рисунок 1 – S-модель мехатронных подсистем ПКО, взаимодействующих с внешней средой

4. Регулятор режимов работы (РР), как управляющий модуль, предназначенный для формирования управляющего преобразователем частоты кодового сигнала задания выходного напряжения $\vec{U}_{зад}$ в зависимости от:

- тока статора ЭД I , рассматриваемого в качестве мониторингового сигнала нагрузки ЭД M ; при этом граничные значения $I \in [I_n; I_g]$ должны соответствовать границам «коридора» автоматизированного поддержания заданного уровня момента $M_p \in [M_{pn}; M_{pg}]$;

- управляющих воздействий оператора K_o ;

- температуры $t \in [t]$ обмотки статора ЭД и величин сигналов $z_j \in [z_j]$, характеризующих состояние внешней среды: расхода и давления в подсистеме пылеподавления и охлаждения; содержания метана в шахтной атмосфере и др. ($[t]$, $[z_j]$ – допускаемые значения t и z_j , выступающие в качестве функциональных ограничений).

Кроме того, РР должен формировать кодовый сигнал K_l для управления подачей напряжения шахтной электросети к преобразователю частоты.

5. Электрический преобразователь частоты (ПЧ), преобразующий подаваемое (по сигналу K_l) напряжение шахтной электросети $\vec{X}_c(U_c, f_c)$ в соответствии с кодовым сигналом $\vec{U}_{зад}$ в напряжение $\vec{U}_П$ с переменными взаимосвязанными соответствующей зависимостью параметрами – частотой $f_1 \in [f_n; f_c]$ и действующим значением напряжения питания ЭД $U \in [U_n; U_c]$. Здесь $f_c=50$ Гц и U_c – номинальная частота и фактическое напряжение шахтной электросети, подводимое к пускателю.

Т. о. сигнал $\vec{U}_{зад}$ несет информацию о необходимых для выработки с помощью ПЧ значениях попарно связанных параметров U и f_1 в виде вектора $\vec{U}_П$ в зависимости от величины тока I . При этом граничные значения f_1 соответствуют границам регулирования частоты вращения ротора ЭД $n \in [n_n; n_g]$ и скорости $V_p \in [V_{pn}; V_{pg}]$. Для рассматриваемого регулирования ЭД целесообразно использовать рекомендации ГП «Донгипроуглемаш» [2] по применению разомкнутой системы частотного управления, по сути имитирующей работу замкнутой системы с положительной обратной связью по току статора в режиме IR компенсации [7].

6. На рис.1 применительно к структурному представлению человека-оператора обозначены: СВ – сенсорный вход, обеспечивающий получение соответствующих данных от средств отображения информации (СОИ); ОИ и ПР – блок обработки информации и принятия решений; ДВ – двигательный выход, обеспечивающий необходимые управляющие воздействия на органы управления (ОУ).

Рассмотрим формирование вектора \vec{P}_y основных параметров компонент М (ИО, редуктор), С_Э (электродвигатель, пускатель) и ИЭ (преобразователь частоты (ПЧ) и регулятор режимов (РР) работы ПЧ).

ИО, кроме высокой степени силовой пространственной уравновешенности, как правило [8, 9 и др.], должен обеспечивать достаточно низкие удельные энергозатраты, характеризоваться простой конструкцией и высокой надежностью.

Для выбора ЭД и проектирования редуктора необходимо, прежде всего, знать величину M_p , которая должна рассматриваться в качестве оценки длительно действующего крутящего момента при расчете основных элементов кинематической цепи на усталостную прочность. Предлагается следующий алгоритм определения M_p , а также нижней границы $\sigma_{сжн}$, характеризующей диапазон изменения предела прочности разрушаемых пород $\sigma_{сж} \in [\sigma_{сжн}; \sigma_{сжв}]$, при котором будет обеспечиваться стабилизация M_p .

При известных значениях $\sigma_{сжв}$, $V_{но}$, $S_{со}$ и параметрах схемы набора резцов на ИО на базе имеющихся методик выполняется построение оценочной зависимости средних уровней момента на валу ИО $\bar{M}_p = \bar{M}_p(h_o)$, см. рис.2, где ордината точки А соответствует искомому значению M_p .

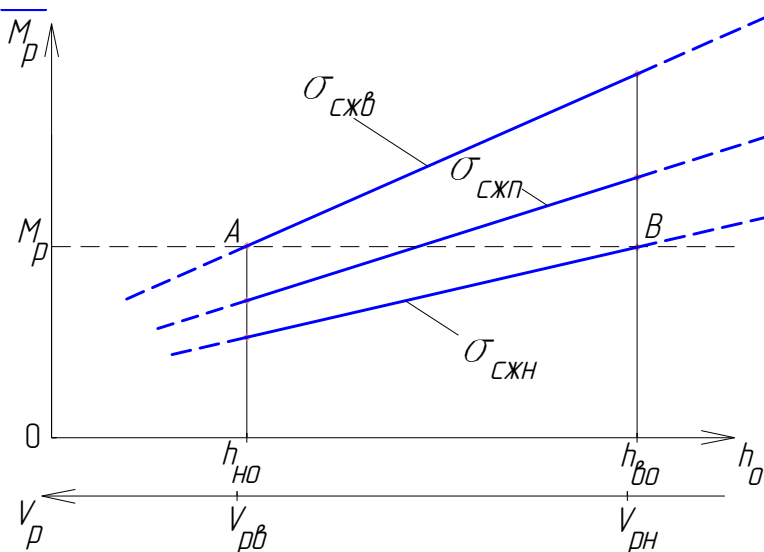


Рисунок 2 - К установлению параметров M_p и $\sigma_{сжн}$

Далее путем построения промежуточных зависимостей $\bar{M}_p = \bar{M}_p(h_o)$ при снижающихся промежуточных значениях $\sigma_{сжп}$ находят $\sigma_{сжн}$, соответствующее одной из указанных зависимостей, проходящей через точку B (см. рис.2) с координатами $(h_{во}; M_p)$. Т.о., устанавливается область применения ПК по пределу прочности пород $\sigma_{сж} \in [\sigma_{сжн}; \sigma_{сжв}]$.

Вектор основных параметров $\vec{P}_{уд}$ при выборе ЭД можно описать следующим образом:

$$\vec{P}_{уд}(P_{ном}(SN), n_{ном}, U_{ном}, M_k, I_{ном}, \text{габаритные размеры}).$$

Здесь: $P_{ном}(SN)$ - номинальная тепловая мощность в режиме SN ; $U_{ном}, n_{ном}, I_{ном}$ - номинальные значения напряжения питания при частоте электросети $f_c=50$ Гц, частоты вращения ротора и тока; M_k - критический момент ЭД при $U = U_{ном}$.

Выбор ЭД должен осуществляться с учетом функциональных $\vec{\Phi}_r(M_{уст}, P_{ном}(SN))$ и параметрических $\vec{\Pi}_j$ (габаритные размеры, допускаемые по конструктивным соображениям) ограничений, где:

$$M_{уст} \geq M_p (u_p \cdot \eta_p)^{-1}; \quad P_{ном} \geq \frac{M_p \cdot n_{об.в}}{9550 \cdot \eta_p}.$$

Здесь: $M_{уст}$ - оценка устойчивого момента ЭД в составе подсистем ПИО; u_p - требуемое передаточное число редуктора; η_p - оценочное значение КПД редуктора.

Вектор основных параметров $\vec{P}_{ур}$ при проектировании редуктора определяется зависимостью: $\vec{P}_{ур}(M_p, u_p, H_a, \text{габаритные размеры})$. При этом ограничения выглядят следующим образом:

- функциональные $\vec{\Phi}_r(K_n \geq [K_n], K_v \geq [K_v])$, где K – запасы прочности («п») и выносливости при заданной долговечности («в») расчетные и требуемые (в квадратных скобках);

- параметрические $\vec{\Pi}_j$ (габаритные размеры, допускаемые по конструктивным соображениям).

Вектор основных параметров \vec{P}_{ya} при проектировании аппаратуры автоматизированного управления на основе ИЭ – компонент (ПЧ, РР), входящей в состав мехатронных подсистем ПИО:

$$\vec{P}_{ya}(I_y; f_1; U; \tau; [t]; [z_j]),$$

где I_y - ток уставки, соответствующий величине M_p ;

$\tau = \tau_1 + \tau_2$; τ_1 и τ_2 - соответственно параметры, характеризующие быстрдействие РР и ПЧ. Величина τ должна обеспечивать реализацию критерия стабилизации $\Delta m \leq \Delta m_3$ при формировании прогнозируемого представительного значения скорости изменения среднего уровня нагрузки.

При выполнении горизонтальных резов, а также вертикальных резов и самозарубке в случае возникновения нештатных ситуаций:

1) $\vec{U}_{зад} = 0$, если выполняется хотя бы одно из следующих условий: $t > [t]$, $z_j > [z_j]$, $I > I_6$ при $f_1 = f_6$;

2) $\vec{U}_{зад} = U_n$, если $I < I_n$ при $f_1 = f_n$.

Если будет наблюдаться систематическая перегрузка или недогрузка ЭД, то следует внести необходимые коррективы в значения H_c .

Рассмотренные основные блоки S - модели (рис.1) должны быть дополнены следующими минимально необходимыми интерфейсами [2]:

1) коммутационным модулем КМ₁, преобразующим управляющий кодовый сигнал K_1 от РР в сигнал K_2 управления КНС;

2) коммутатором силового напряжения КНС в виде пускателя для подачи или отключения электроэнергии по сигналу управления K_2 ;

3) коммутационным модулем КМ₂, преобразующим сигналы обратной связи I и t (характеризующие текущее состояние ЭД) в кодовые информационные сигналы I_k и t_k .

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработанные концептуальные положения, математическая и структурная модели предназначены для оптимального проектирования мехатронных ПК с высокими макроуровневыми показателями для конкретных условий эксплуатации.

Дальнейшие исследования представляется целесообразным выполнить по формированию ММ и S-модели для оптимального проектирования проходческих комбайнов мехатронного класса, обеспечивающих реализацию альтернативного варианта автоматизированной стабилизации среднего уровня мощности на валу ЭД.

Список литературы

1. ДСТУ 4520:2006. Комбайни шахтні прохідницькі зі стріловидним виконавчим органом. Загальні технічні умови. Чинний від 01.07.2007.- Київ: Держспоживстандарт України, 2007.- 19 с.
2. Стадник Н.И., Сергеев А.В., Кондрахин В.П. Мехатроника в угольном машиностроении // Горное оборудование и электромеханика. –М.: Новые технологии, №4, 2007. – С.20-29.
3. Горбатов П.А. Научные основы разработки мехатронных подсистем приводов исполнительных органов проходческих комбайнов // Горные машины и автоматика.- М.: Новые технологии: 2004.- №7.- С. 42-44.
4. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей.-М.: Станкин, 2005.-368с.
5. Горбатов П.А., Косарев В.В., Стадник Н.И. Концептуальная характеристика сложных горных машин как мехатронных систем // Научн. труды ДонНТУ. Выпуск 104, серия горно-электромеханическая.- Донецк: ДонНТУ, 2006.- С. 53-61.
6. Семенченко А.К. Научные основы многокритериального синтеза горных машин как пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры. Автореф. дис....докт. техн. наук.-Донецк: ДонГТУ, 1997.-33с.
7. Разработка теории функционирования и методов оптимального проектирования для выемочных комбайнов нового поколения: Отчет / Донецк. национ. техн. университет; Руководитель П.А. Горбатов. – Донецк, 2008. – 435с.
8. Бойко Н.Г. Разрушение угольных пластов режущим инструментом очистных комбайнов. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – 128с.
9. Семенченко А.К., Кравченко В.М., Шабаев О.Е. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем. – Донецк: РИА ДонНТУ, 2002. – 302с.

P.A. Gorbatov, Doctor of Technical Sciences, Prof., N.M. Lysenko, Candidate Technical Sciences, M.N. Lysenko, Master, Donetsk National Technical University, Ukraine.

Conceptual provisions developed mathematical and structural models for use in the optimal concurrent design of mechatronic subsystems drive executive of heading harvesters.

CONTINUOUS MINER, MECHATRONIC SUBSYSTEM OF DRIVE, OPTIMAL DESIGN, MATHEMATICAL MODELS, FUNCTION PURPOSE, LIMITATIONS, STRUCTURAL MODEL

П.А. Горбатов, докт. техн. наук, проф., М.М. Лисенко, канд.техн.наук, доц., М.М. Лисенко, магістрант, Донецький національний технічний університет, Україна

Запропоновано концептуальні положення, розроблені математична і структурна моделі для використання при оптимальному паралельному проектуванні мехатронних підсистем приводу виконавчого органу у складі прохідницьких комбайнів.

ПРОХІДНИЦЬКИЙ КОМБАЙН, МЕХАТРОНА ПІДСИСТЕМА ПРИВОДА, ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ФУНКЦІЇ МЕТИ, РАЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ, СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ

Научн. труды ДонНТУ. Выпуск 17(157), серия горно-электромеханическая. –
Донецк: ДонНТУ, 2009. – С. 127 – 138.