

**Висновки.** Досвід розробки теоретичних основ і практичної реалізації інтелектуальних систем свідчить про їхню велику перспективність для застосування в керуванні розподіленими системами БДМ. Проектування ієрархічних інтелектуальних систем підтримки оператора БДМ носить ітеративний характер і базується на проектуванні окремих підсистем і їхньої інтеграції в єдине ціле на основі штучного інтелекту й використання сучасних інструментальних засобів створення інтелектуальних додатків.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бартенов В.Г., Бартенов М.В. Энергосберегающая модульная АСУТП для распределенных объектов “СИНТАЛ ТЕЛЕТЕРМ” // Журнал Датчики и системы, № 2, 2005, С. 32-35.
2. Плющаев В., Грошева Л., Мерзляков В., Перевезенцев С., Зуев А., Пахомов А. Система дистанционного мониторинга и управления объектами. // Журнал Системы Технологической Автоматизации, № 2, 2003, С. 6-15.
3. Астапкович А.М. Микрооперационные системы реального времени // Монография, СПб: Политехника, 2002.
4. ThinkIO – универсальное решение для промышленной автоматизации // RTSoft Средства и системы автоматизации, Каталог продукции, 2013.

**УДК 681.532:69.002.5**

**И. Г. КИРИЧЕНКО**, докт. техн. наук, **А. Г. ГУРКО**, канд. техн. наук  
*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

## **РЕГУЛЯТОР С ВЫЧИСЛЯЕМЫМ МОМЕНТОМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ЭКСКАВАТОРА**

**Актуальность проблемы.** Повышение эффективности использования одноковшовых экскаваторов (ЭО) связано с внедрением систем автоматического управления рабочим процессом. В то же время разработка таких систем управления сопряжена с принципиальными трудностями вследствие нестационарности и неопределенности параметров как математической модели рабочего оборудования (РО), так и действующих на систему возмущений, например, сил взаимодействия

ковша с грунтом. В связи с этим широкое распространение получили лишь вспомогательные системы автоматического нивелирования и мониторинга положения РО [1], а также системы управления транспортным перемещением ковша [2]. Поэтому исследования, направленные на разработку систем управления ЭО имеют значительный практический интерес.

**Анализ публикаций.** Первые работы, посвященные автоматизации одноковшовых экскаваторов, преимущественно карьерных, появились еще в 60-х годах XX в., при этом основной упор делался на автоматизацию транспортной части рабочего процесса экскаватора. Существенный вклад в решение данной проблемы внесли такие видные ученые как М.С. Ломакин, В.П. Ломакин, Л.Д. Певзнер [3], В.М. Остриров и многие другие. Среди зарубежных работ, посвященных автоматизации ЭО следует отметить [4-8].

Анализ упомянутых выше и других работ показал, что современная тенденция создания систем управления РО ЭО связана с использованием методов робототехники с учетом особенностей рабочего процесса экскаватора.

Для упрощения процесса проектирования системы управления РО ЭО целесообразно использовать двухуровневую систему управления (рис. 1). Регулятор первого уровня определяет законы изменения обобщенных координат (углов поворота стрелы, рукояти и ковша), необходимых для перемещения РО по заданной траектории, а также рассчитывает силы и моменты, необходимые для реализации этого перемещения с заданными скоростями и ускорениями.

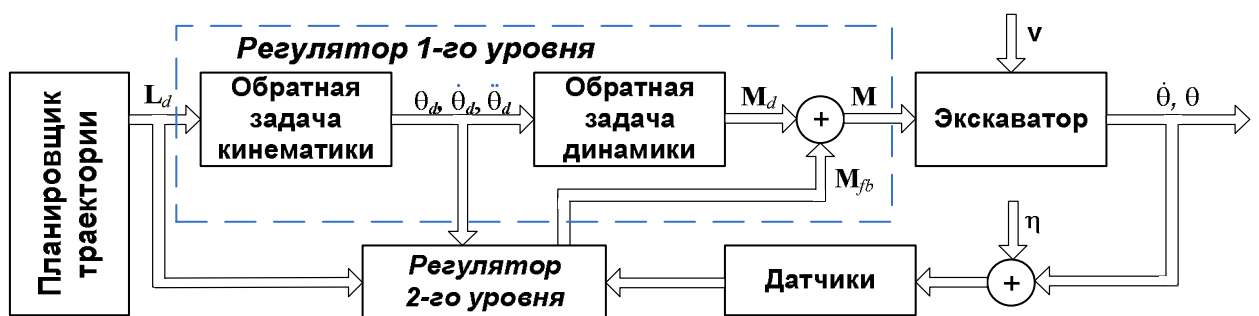


Рис. 1 - Структура системы управления РО ЭО:  $L_d$  – вектор желаемых декартовых координат ковша экскаватора;  $\mathbf{i}_d, \dot{\mathbf{i}}_d, \ddot{\mathbf{i}}_d$  – соответственно векторы желаемых обобщенных координат рабочего оборудования, их скоростей и ускорений;  $\mathbf{i}, \dot{\mathbf{i}}$  – соответственно векторы реальных обобщенных координат и их скоростей;  $\mathbf{M}_d, \mathbf{M}_{fb}, \mathbf{M}$  – соответственно векторы желаемых, добавочных и скорректированных моментов;  $\mathbf{v}$  – вектор внешних возмущений;  $\boldsymbol{\eta}$  – вектор помех измерений.

Регулятор второго уровня осуществляет компенсацию эффектов, вызванных неточностями модели экскаватора и среды, а также другими внешними возмущениями и помехами измерений.

**Цель и задачи работы.** Целью данной работы является проектирование регулятора первого уровня системы управления РО экскаватора. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: 1) обратной задачи кинематики РО экскаватора; 2) построение и анализ уравнений динамики; 3) синтез непосредственно регулятора.

**Кинематическое управление.** Перед разработкой системы управления РО ЭО с учетом динамических характеристик, необходимо решить обратную задачу кинематики (ОЗК), которая заключается в определении законов изменения обобщенных координат  $\mathbf{n}(t)$  на временном отрезке  $t \in [t_0; t_f]$  по заданному желаемому положению и ориентации ковша  $\mathbf{s}=\mathbf{s}^*$ . До настоящего времени ОЗК РО экскаваторов решалась геометрическим методом [5, 9], позволяющим получать решения в аналитическом виде. Однако эти аналитические выражения существенно усложняются при учете ограничений, накладываемых исполнительными гидроцилиндрами на область  $\Theta$  изменения обобщенных координат, конфигурацией забоя, необходимостью соблюдения угла резания и проч. К тому же указанный подход не дает оптимального решения. В связи с этим в [10] предложено следующее решение ОЗК рабочего оборудования экскаватора.

Рассмотрим кинематическую схему экскаватора (рис. 2). Будем считать, что угол

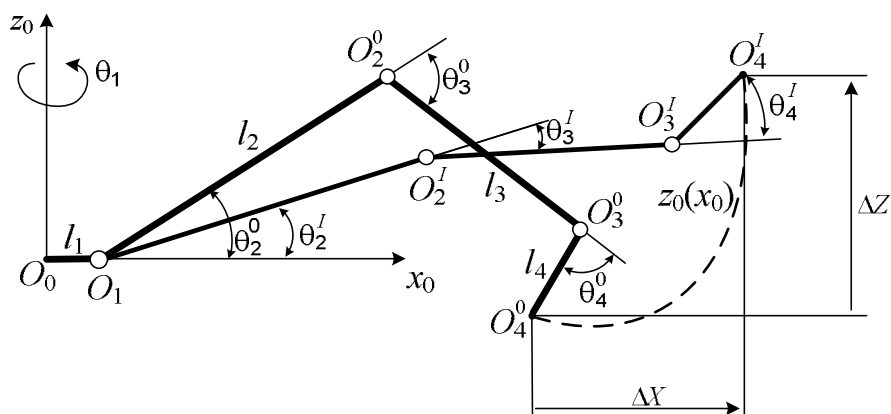


Рис. 2. Кинематическая схема РО ЭО и траектория т.  $O_4$ .

$\theta_1 = const$ , что, как правило, и имеет место при копании. Тогда постановка задачи заключается в определении обобщенных координат  $\theta_j(t)$  ( $j=\overline{2,4}$ ), обеспечивающих перевод точки  $O_4$ , связанной с зубьями ковша, из начального положения  $O_4^0$  с

координатами  $(x_4^0, z_4^0)$  в декартовой системе координат  $x_0O_0z_0$  (рис. 2) в конечное  $O_4^I$   $(x_4^I, z_4^I)$  по заданной траектории.

Оптимальным будем считать решение, минимизирующее квадратичный параметр  $J_0$ :

$$J_0 = \sum_{j=2}^4 \gamma_j \cdot (\theta_j^I - \theta_j^0)^2 \xrightarrow{\theta_j \in \Theta} \min, \quad (1)$$

где  $\theta_j^0, \theta_j^I$  – начальное и конечное значения углов  $\theta_j$  ( $j=\overline{2,4}$ ), соответственно (рис. 2);  $\gamma_j$  – весовые коэффициенты, соотношение между которыми устанавливает приоритетность в изменении  $\theta_j$ ,  $\Theta$  – заданное множество, описывающее область допустимых значений координат  $\theta_j$ . Иными словами, решение ОЗК должно обеспечить перемещение зубьев ковша по заданной траектории при минимальном изменении углов поворота стрелы, рукояти и ковша, что, в свою очередь, приводит к минимизации энергетических затрат на выполнение рабочего процесса.

Поскольку рассматривается кинематическая задача и не учитываются действующие на РО нагрузки, то можно принять, что точка  $O_4$  движется с постоянной скоростью  $v_4 = \text{const}$ . Разобьем временной интервал  $[0; T]$ , за который точка  $O_4$  преодолевает расстояние  $L$ , на  $I$  равных промежутков с шагом  $\Delta t = T/I$ . Тогда с учетом постоянства скорости за малые промежутки времени  $\Delta t$  точка  $O_4$  проходит одинаковые расстояния  $\Delta L = L/I = v_4 \cdot \Delta t$ . Соответствующие значению  $\Delta L$  приращения координат точки  $O_4$  по осям абсцисс  $\Delta x_4^i$  и ординат  $\Delta z_4^i$  (рис. 2) на каждом временном интервале  $[(i-1)\Delta t; i\Delta t]$  при  $i=\overline{1, I}$  находятся путем решения следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=2}^4 \Delta \theta_j^i \sum_{k=j}^4 l_k \sin \alpha_k^{i-1} &= -\Delta x_4^i, \\ \sum_{j=2}^4 \Delta \theta_j^i \sum_{k=j}^4 l_k \cos \alpha_k^{i-1} &= \Delta z_4^i. \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta \theta_j$  – приращения обобщенных координат  $\theta_j$ ;  $\alpha_j$  – углы, измеренные между  $j$ -м звеном РО экскаватора и неподвижной осью  $O_0x_0$ :

$$\alpha_j = \sum_{k=2}^j \theta_k \quad (j=\overline{2,4}). \quad (3)$$

В матричной форме система (2) имеет вид:

$$\mathbf{A}_i \mathbf{X}_i = \mathbf{F}_i, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \sum_{j=2}^4 l_j \sin \alpha_j^{i-1} & \sum_{j=3}^4 l_j \sin \alpha_j^{i-1} & l_4 \sin \alpha_4^{i-1} \\ \sum_{j=2}^4 l_j \cos \alpha_j^{i-1} & \sum_{j=3}^4 l_j \cos \alpha_j^{i-1} & l_4 \cos \alpha_4^{i-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^i \\ \Delta \theta_3^i \\ \Delta \theta_4^i \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} -\Delta x_4^i \\ \Delta z_4^i \end{bmatrix}.$$

Уравнение (4) должно быть решено на каждом шаге по  $i$  относительно вектора  $\mathbf{X}_i$ , при этом критерий оптимальности (1), которому должно удовлетворять решение, преобразуется к виду:

$$J_i = \sum_{j=2}^4 \gamma_j \cdot (\Delta \theta_j^i)^2 \xrightarrow{\mathbf{x} \in \Theta} \min. \quad (5)$$

Очевидно, что обратного оператора  $\mathbf{A}_i^{-1}$  в (4) не существует. Подобные системы можно решить либо при помощи псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза, либо методом регуляризации Тихонова. Учитывая специфику задачи, будем использовать метод Тихонова, численная сторона которого заключается в переходе от исходного уравнения I-го рода (4) к уравнению II-го рода:

$$(\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i + \lambda \mathbf{C}) \mathbf{X}_i = \mathbf{A}_i^T \mathbf{F}_i, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – малый произвольный положительный параметр, обеспечивающий устойчивость вычисления матрицы  $(\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i + \lambda \mathbf{C})^{-1}$ ;  $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  – матрица, которая в классических постановках имеет равные между собой диагональные элементы. Мы же введем диагональную матрицу  $\mathbf{C}$ , ненулевые элементы которой задаются по формуле:

$$(\mathbf{C})_{j-1, j-1} = \gamma_j, \quad (j = \overline{2, 4}).$$

При известных значениях весовых коэффициентов решение уравнения (6) не вызывает принципиальных затруднений и выполняется на каждом шаге по времени ( $i = \overline{1, I}$ ).

Назначение значений весовых коэффициентов  $\gamma_j, (j = \overline{2, 4})$  предлагается осуществлять следующим способом. На начальном этапе управления значение  $\gamma_2$  выбрать заведомо большим, чтобы минимизировать движение стрелы. Значения  $\gamma_3$  и  $\gamma_4$  зависят от метода копания:

- при копании грунта поворотом ковша  $\gamma_3 \gg \gamma_4$ ;
- при копании рукоятью  $\gamma_4 \gg \gamma_3$ ;
- при одновременном копании рукоятью и ковшом соотношение между коэффициентами  $\gamma_3$  и  $\gamma_4$  выбирается таким, чтобы выровнять максимальные значения угловых ускорений  $\ddot{\theta}_j$  соответствующих звеньев РО.

**Уравнения динамики.** Динамика РО ЭО может быть описана следующим, известным в робототехнике, матричным уравнением второго порядка [5]:

$$\mathbf{D}(\mathbf{i})\ddot{\mathbf{i}} + \mathbf{C}(\mathbf{i}, \dot{\mathbf{i}})\dot{\mathbf{i}} + \mathbf{G}(\mathbf{i}) + \mathbf{V}(\dot{\mathbf{i}}) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{M} - \mathbf{M}_L, \quad (7)$$

где  $\mathbf{D}(\mathbf{i}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  - симметричная положительно определенная матрица инерции манипулятора;  $\mathbf{C}(\mathbf{i}, \dot{\mathbf{i}}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  - матрица, включающая все центробежные и кориолисовы члены;  $\mathbf{G}(\mathbf{i}) \in \mathbf{R}^3$  - вектор сил гравитации;  $\mathbf{V}(\dot{\mathbf{i}}) \in \mathbf{R}^3$  - вектор сил трения;  $\mathbf{\Gamma} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  - матрица входа;  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^3$  - подлежащий определению вектор действующих на звенья манипулятора управляющих моментов;  $\mathbf{M}_L \in \mathbf{R}^3$  - вектор моментов сил сопротивления, возникающих при взаимодействии ковша с грунтом. Элементы матрицы  $\mathbf{\Gamma}$  равны:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Компоненты вектора  $\mathbf{M}_L$  определены в [10]:

$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} M_{L2} \\ M_{L3} \\ M_{L4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta M_{L2} \\ \Delta M_{L3} \\ \Delta M_{L4} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\Delta M_{L4} = l_4(F_t \sin \theta_b - F_n \cos \theta_b)$ ,  $\Delta M_{L3} = -l_3(F_t \sin(\theta_4 - \theta_b) + F_n \cos(\theta_4 - \theta_b))$ ,  $\Delta M_{L2} = l_2(F_t \sin(\theta_{34} - \theta_b) + F_n \cos(\theta_{34} - \theta_b))$ ,  $\theta_b$  - угол между осью  $x_4$  и касательной к траектории движения,  $\theta_{34} = \theta_3 + \theta_4$  (рис. 3).

Очевидно, что использование более совершенных моделей повысит точность работы системы управления, однако усложнит вычисления.

**Синтез регулятора.** Как уже отмечалось, исследование и управление роботизированным экскаватором значительно более сложное, чем большинством традиционных промышленных роботов, поскольку он работает в динамичной среде под действием значительного числа неопределенных факторов. Тем не менее, методы управления промышленными роботами могут быть адаптированы для управления

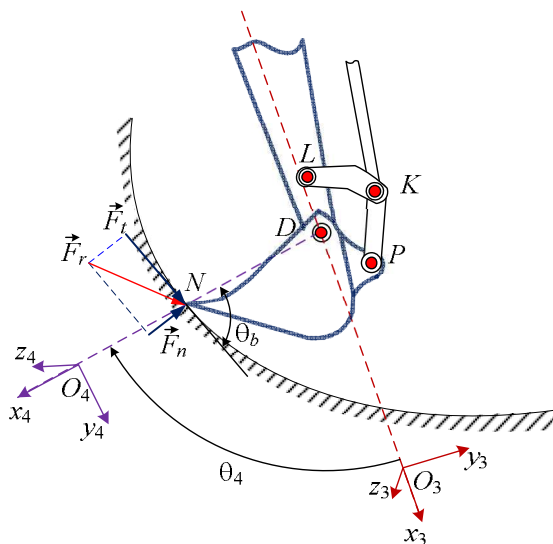


Рис. 3 - Силы, действующие на ковш при взаимодействии с грунтом.

экскаватором. В данной работе мы рассмотрим управление при помощи вычисляемого момента [11], которое заключается в нахождении управляющих моментов, обеспечивающих максимально приближенное к заданной траектории движение ковша экскаватора в реальном времени.

Рассмотрим динамическую модель (7) экскаватора. Пусть при решении ОЗК получены ограниченные вектор-функции

желаемых положений  $\mathbf{i}_d$ , скоростей  $\dot{\mathbf{i}}_d$  и ускорений  $\ddot{\mathbf{i}}_d$  РО. Необходимо найти такой вектор управляющих моментов  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{i}, \dot{\mathbf{i}}, \mathbf{i}_d, \dot{\mathbf{i}}_d, \ddot{\mathbf{i}}_d, \mathbf{D}(\mathbf{i}), \mathbf{C}(\mathbf{i}, \dot{\mathbf{i}}), \mathbf{G}(\mathbf{i}), \mathbf{V}(\dot{\mathbf{i}})), \quad (9)$$

который бы обеспечил выполнение условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_d, \quad \mathbf{i}_d \in \mathbb{R}^3.$$

Закон (9) не зависит от ускорения  $\ddot{\mathbf{i}}$ , т.к. существующие акселерометры сильно чувствительны к шумам. Согласно методу вычисляемого момента, общее уравнение (9) можно привести к виду:

$$\mathbf{M} = \mathbf{D}(\mathbf{i})(\ddot{\mathbf{i}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{K}_p \boldsymbol{\varepsilon}) + \mathbf{C}(\mathbf{i}, \dot{\mathbf{i}})\dot{\mathbf{i}} + \mathbf{G}(\mathbf{i}) + \mathbf{V}(\dot{\mathbf{i}}) + \mathbf{M}_L, \quad (10)$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{i}_d - \mathbf{i}$  - ошибка по положению;  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\mathbf{i}}_d - \dot{\mathbf{i}}$ ;  $\mathbf{K}_v \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  и  $\mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  - подлежащие определению симметричные положительно определенные матрицы коэффициентов обратных связей по скорости и по положению.

Структурная схема, соответствующая системе управления РО экскаватора на основе вычисляемого момента представлена на рис. 4.

Характеристическое уравнение такого регулятора при известных возмущениях имеет вид:

$$\ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{K}_p \boldsymbol{\varepsilon} = 0 \quad (11)$$

или в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} \\ -\mathbf{K}_p & -\mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $\mathbf{E}$  - единичная матрица.



Рис. 4. Структурная схема системы управления РО с вычисляемым моментом.

Элементы матрицы  $\mathbf{K}_v$  и  $\mathbf{K}_p$ , необходимо выбрать так, чтобы корни характеристического уравнения (12) имели отрицательные вещественные части, при которых вектор  $\mathbf{\varepsilon}(t)$  асимптотически стремится к нулю, и обеспечивали в системе критическое демпфирование. Данная задача решается методами классической теории управления [12], в результате чего получаем диагональные матрицы:

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}\{\omega_j^2\}, \quad \mathbf{K}_v = \text{diag}\{2\omega_j\}, \quad j = \overline{2,4},$$

где  $\omega_j$  - собственная частота колебаний каждого звена манипулятора.

Матрицы  $\mathbf{K}_v$  и  $\mathbf{K}_p$  выбраны диагональными с целью достижения независимого управления звеньями манипулятора экскаватора.

**Расчет компенсатора.** Рассмотренный выше регулятор требует наличия полной математической модели РО экскаватора, что на практике невозможно. В связи с этим для компенсации ошибок модели введем в закон управления (9) динамические составляющие [13], в результате чего уравнение регулятора примет вид:

$$\mathbf{M} = \mathbf{D}(\mathbf{n}) (\ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{\varepsilon}} + \mathbf{K}_p \mathbf{\varepsilon}) + \mathbf{C}(\mathbf{n}, \dot{\mathbf{n}}) \dot{\mathbf{n}} + \mathbf{G}(\mathbf{n}) + \mathbf{B}(\dot{\mathbf{n}}) + \mathbf{M}_L - \mathbf{C}(\mathbf{n}, \dot{\mathbf{n}}) \mathbf{n}, \quad (13)$$

где  $\mathbf{n} \in \mathbf{R}^3$  - вектор, образующийся путем фильтрации ошибок по положению  $\mathbf{e}$  и по скорости  $\dot{\mathbf{e}}$ , т.е.:



$$\mathbf{n} = -\frac{p}{p+\lambda} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{1}{p+\lambda} (\mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{K}_p \boldsymbol{\varepsilon}), \quad (14)$$

где  $p$  - оператор дифференцирования,  $\lambda$  - подлежащая определению положительная константа. Соответствующая структурная схема приведена на рис. 5.

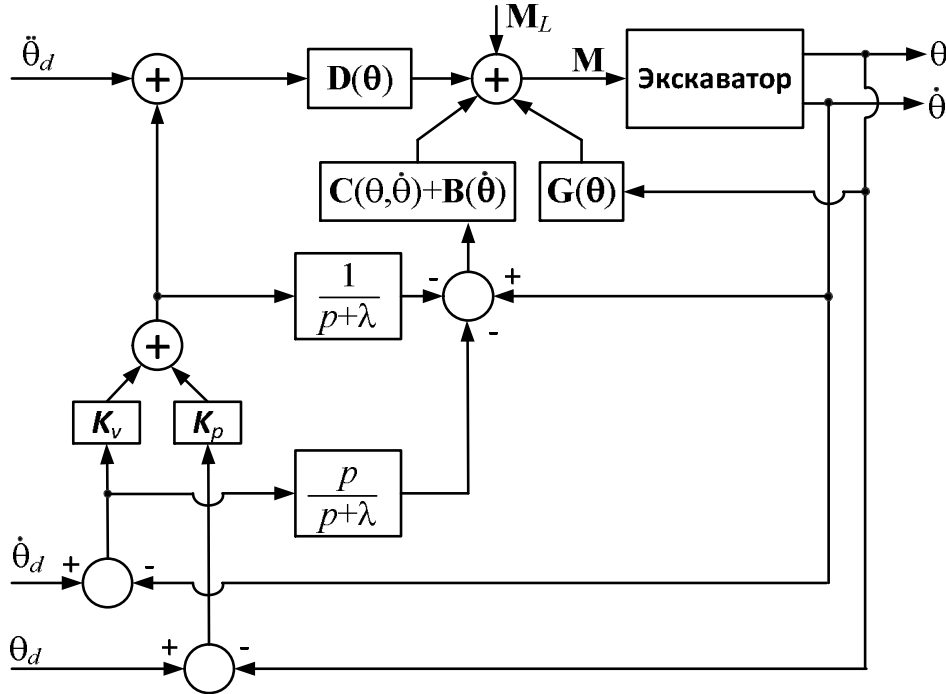


Рис. 5. Структурная схема системы управления с компенсатором.

Благодаря наличию в уравнении (13) вектора  $\mathbf{n}$ , управляющее воздействие  $\mathbf{M}$  зависит не только от текущих значений компонентов вектора состояния  $[\mathbf{e}^T \quad \dot{\mathbf{e}}^T]^T$ , но также от их предшествующих значений. В связи с этим для опиания закона управления необходимо ввести дополнительные переменные состояния. Перепишем (14) в терминах переменных состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{o}_1 \\ \mathbf{o}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda \mathbf{E}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\lambda \mathbf{E}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{o}_1 \\ \mathbf{o}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_p & \mathbf{K}_v \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\lambda \mathbf{E}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} -\mathbf{E}_{3 \times 3} & -\mathbf{E}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{o}_1 \\ \mathbf{o}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где  $\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2 \in \mathbf{R}^3$  - новые переменные состояния.

Рассмотрев совместно уравнения (7) и (13) получим следующее уравнение для регулятора:

$$\mathbf{D}(\mathbf{u}) [\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}] - \mathbf{C}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}) \mathbf{n} = \mathbf{0}. \quad (17)$$

Запишем уравнения (15) - (17) в терминах вектора состояния  $\begin{bmatrix} \mathbf{e}^T & \dot{\mathbf{e}}^T & \mathbf{o}_1^T & \mathbf{o}_2^T \end{bmatrix}^T$  :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \dot{\mathbf{e}} \\ \mathbf{o}_1 \\ \mathbf{o}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}} \\ -\mathbf{D}(\mathbf{n})^{-1} \mathbf{C}(\mathbf{n}, \dot{\mathbf{n}}) [\mathbf{o}_1 + \mathbf{o}_2 + \dot{\mathbf{e}}] - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{K}_p \mathbf{e} \\ -\lambda \mathbf{o}_1 + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} \\ -\lambda \mathbf{o}_2 - \lambda \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Решение уравнения (18) позволяет получить искомые параметры  $\mathbf{K}_p$ ,  $\mathbf{K}_v$  и  $\lambda$ .

**Выводы.** Рассмотренный в работе регулятор с вычисляемым моментом широко используется при управлении промышленными роботами, поэтому может быть применен при управлении рабочим оборудованием экскаваторов. Однако работа такого регулятора эффективна в детерминированных условиях, когда имеются надёжные уравнения динамики и точные значения параметров системы. Поскольку на практике параметры экскаватора точно неизвестны, и, к тому же, являются нестационарными, то использование одного лишь регулятора с вычисляемым моментом неэффективно. Введение динамических фильтров при постоянных значениях параметра  $\lambda$  позволяет уменьшить ошибки регулирования, вызванные неточностью модели. Тем не менее, необходима разработка дополнительного регулятора, обеспечивающего системе свойства адаптивности или робастности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Калабин. Системы управления для экскаваторов 3Dxi – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://prin.ru/articles/135/>
2. Green M. E. Estimating and verifying truck pose for automated excavator loading / M.E. Green // School of Mechanical and Mining Engineering — Режим доступа <http://trove.nla.gov.au/work/184369187>
3. Певзнер Л.Д. Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления / Л.Д. Певзнер, С.Е. Бабаков // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 8. – С. 40-47.
4. Koivo A.J. Modeling and Control of Excavator Dynamics During Digging Operation / A.J. Koivo, M. Thoma, E. Kocaoglan E., J. Andrade-Cetto // Journal of Aerospace Engineering. – 1996. – Vol. 9. - No. 1. - P. 10-18.
5. Liu Y. Modelling and remote control of an excavator / Y. Liu, M.S. Hasan, H.N. Yu // International Journal of Automation and Computing. – 2010. – Vol. 7. – No. 3. – P. 349-358.

6. Kim, Y. B., Ha, J., Kang, H., Kim, P. Y., Park, J., & Park, F. C. (2013). Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators / Y.B. Kim, J. Ha, H. Kang, P.Y. Kim, J. Park, F.C. Park // Automation in Construction. – 2013. – Vol. 35. – P. 568–578.
7. Wu Z. Design an Autonomous Excavation System for Hydraulic Excavators/ Z. Wu, K.Y. Sun, M. Song, M. Zheng //Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 437. – P. 471-474.
8. Jun Gu. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling // Gu Jun , D. Seward // Journal of Central South University. – 2012. – Vol. 19. – No.2. – P. 384-392.
9. Tafazoli S. Identification of frictional effects and structural dynamics for improved control of hydraulic manipulator: PhD dissertation / S. Tafazoli; Dept. Elect. Comput. Eng. Univ. British Columbia, Vancouver, B.C., Canada. – 1997.
10. Гурко А.Г. Оптимальное управление манипулятором одноковшового экскаватора / А.Г. Гурко, И.В. Янчевский // Материалы XIX Международной конференции по автоматическому управлению Автоматика/ Automatics – 2012, 26-28 сентября 2012 г. – К.: НУХТ, 2012. С. 149-150.
- 11 Kelly R. Control of Robot Manipulators in Joint Space / R. Kelly, V. Santibanez, A. Loria – Springer, 2005. - 452 p.
12. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 616 с.
13. Cartesian Control for Robot Manipulators, Robot Manipulators Trends and Development / Ed. Agustin Jimenez and Basil M Al Hadithi. - InTech, 2010 – 676 p. Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/robot-manipulators-trends-and-development/cartesian-control-for-robot-manipulators>.

**УДК 621:875**

**В. А. ПЕНЧУК, докт. техн. наук.**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРОВАННЫХ СТАЛЕЙ  
В КОНСТРУКЦИЯХ СТРЕЛОВЫХ САМОХОДНЫХ КРАНОВ**