



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>**Система автоматического управления процессом черпания шагающего экскаватора-драглайна**Л. Д. Певзнер  , Н. А. Киселев

Российский технологический университет – МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация

 lpevzner@msmu.ru**Аннотация**

Актуальность исследований, результаты которых составляют основу систем автоматического управления рабочей операцией черпания шагающего экскаватора-драглайна, обусловлена необходимостью повышения производительности машины и снижением предельных нагрузок на механизмы и канатные системы. Анализу подвергается система автоматического управления рабочей операцией черпания шагающего экскаватора-драглайна, позволяющая обеспечить повышение его эксплуатационной производительности за счет приближения процесса черпания к рациональному.

На основе методов математического моделирования систем электропривода основных механизмов экскаватора-драглайна составлены имитационные математические модели, которые описывают движение ковша и канатных систем. Результаты компьютерного модельного исследования, выполненные программными средствами SimInTech, подтвердили работоспособность предложенного алгоритма автоматического черпания.

Разработанная система автоматического управления операцией черпания позволяет приблизить траекторию черпания к оптимальной, обеспечивая предельно быстрое заглубление с допустимым переуправлением и последующим равномерным черпанием с постоянной толщиной срезаемой стружки. Показатели качества управляемого процесса черпания в породах с удельным сопротивлением $k_p = 1,45 \pm 0,45$ кг/см² и $k_p = 3,35 \pm 0,75$ кг/см² практически совпадают: переуправление в первом случае 7,2 %, во втором – 10,4 %, время регулирования в первом случае 4 с, во втором – 3,5 с.

Разработанная система автоматического управления операцией черпания вместе с автоматическими системами транспортирования груженого ковша в отвал и порожнего ковша в забой, системами автоматической защиты от перегрузки главных механизмов, системой контроля безопасного движения ковша в рабочем пространстве драглайна позволяют повысить уровень автоматизации экскаватора-драглайна и его производительность

Ключевые слова

горная машина, шагающий экскаватор-драглайн, ковш, операция, черпание, автоматизация, математические модели, электропривод, алгоритм, управление, регулятор

Для цитирования

Pevzner L. D., Kiselev N. A. Automatic control system for walking dragline excavator digging. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):57–65. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research article

Automatic control system for walking dragline excavator diggingL. D. Pevzner  , N. A. Kiselev

Russian Technological University MIREA, Moscow, Russian Federation

 lpevzner@msmu.ru**Abstract**

This paper presents the results of the development of automatic control systems for walking dragline excavator digging process. The process enables operational productivity to be enhanced through optimizing digging process. This also prevents extreme loads on machinery and hoist cable deflection. The paper also describes mathematical models of the electric drives of the main excavator machinery which form the bucket motion and the model of cable length change. Further the study will analyse the structure of the control system and the automatic digging algorithm. Computer modeling findings are also described to confirm the operability of the automatic digging algorithm. Computer simulation of the processes in

electric drives of main machinery of a walking dragline in digging operations was performed by means of SimInTech software. The automatic control system optimizes digging trajectory with very fast penetration with permissible overregulation following digging at a constant cut depth. The integrated system of dragline operation process control is practically independent due to the following factors: the automatic digging control system in combination with automatic systems for transporting the loaded bucket to dump and the empty bucket to the face; the automatic main machinery overload protection systems; and the system of control over safe bucket movement in the dragline working space

Keywords

mining machinery, walking dragline excavator, bucket, operation, digging, mathematical models, automation, electric drive, algorithm, control, controller

For citation

Pevzner L.D., Kiselev N.A. Automatic control system for walking dragline excavator digging. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):57–65. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>

Введение

Шагающий экскаватор-драглайн – высокоэффективная горная машина, обладающая большими технологическими возможностями, – широко используется в горнодобывающей промышленности для ведения вскрышных работ по бестранспортной технологической схеме при добыче открытым способом таких полезных ископаемых, как уголь, сланцы, руды черных и цветных металлов, золото, сырье для химической промышленности [1, 2].

Опыт эксплуатации этих машин на угольных разрезах в России за достаточно длительный период показал, что эффективность использования шагающих драглайнов не превышает 70 %.

Обеспечить высокую эффективность работы шагающего экскаватора драглайна возможно путем автоматизации процессов управления основными рабочими операциями транспортирования грузевого ковша в отвал и порожнего в забой, автоматизации процесса черпания, путем автоматического ограничения динамических нагрузок в электромеханических системах и контроля безопасного управления процессом экскавации [3–5].

Исследования, направленные на создание системы автоматического управления рабочей операцией черпания шагающего экскаватора-драглайна, актуальны потому, что такая система позволит обеспечить повышение эксплуатационной производительности за счет приближения процесса черпания к рациональному, недопущения предельных нагрузок на механизмы и провисания подъемных канатов.

1. Математическая модель рабочей операции черпания

Математическое моделирование технологических операций шагающего экскаватора драглайна является первым и важным этапом решения задачи построения алгоритмов и систем управления отдельными механизмами и машины в целом [6, 7].

Для составления математической модели черпания предполагалось, что тяговые канаты невесомые и нерастяжимые и скорость изменения их длины постоянная. В процессе черпания горной массы ковшом экскаватора-драглайна возникает сила сопротивления F_c , которую можно представить в виде суммы

трех сил F_1, F_2, F_3 – соответственно силы трения ковша о грунт, силы сопротивления резанию и силы сопротивления перемещению призмы волочения горной массы. При этом сила трения ковша о грунт определяется выражением $F_1 = \beta N$, в котором β – коэффициент трения ковша о грунт, N – нормальная реакция опоры. Сила сопротивления резанию определяется выражением $F_2 = k_p B_b h$, в котором k_p – удельное сопротивление горной массы резанию, B_b – ширина ковша, h – величина заглупления ковша.

На рис. 1 показан ковш и силы, приложенные к нему.

Рассматривая на рис. 1 схему сил, приложенных к ковшу, как расчетную, составим уравнения динамики движения ковша в осях длин канатов подъема и тяги $\{l_1, l_2\}$.

$$\begin{aligned} m_{lb}(t)\ddot{l}_1(t) &= F_1(t) - G_{lb}(t) \cos \mu - (F_2(t) + F_r(t)) \sin(\alpha - \mu), \\ m_{lb}(t)\ddot{l}_2(t) &= F_2(t) - G_{lb}(t) \sin \alpha - (F_1(t) + F_r(t)) \sin(\alpha - \mu), \end{aligned} \quad (1)$$

где $m_{lb}(t)$ – масса ковша вместе с наполняемой горной массой.

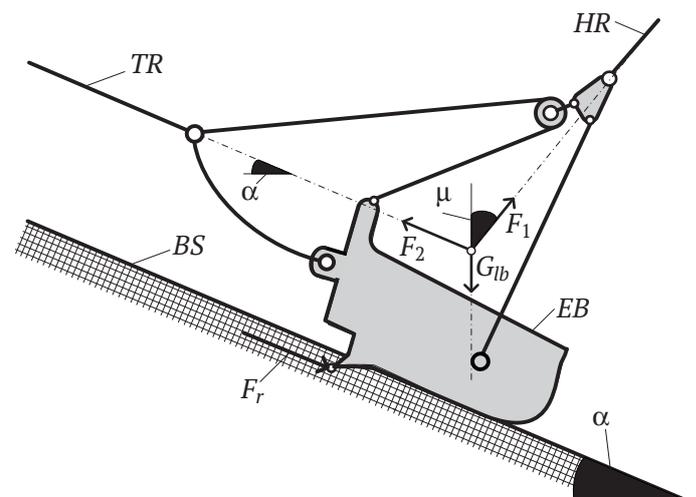


Рис. 1. Схема сил, приложенных к ковшу: HR – канаты подъема; TR – тяговые канаты; BS – забойная поверхность; EB – ковш экскаватора; F_r – силы сопротивления черпанию; F_1 – натяжение канатов подъема; F_2 – натяжение канатов тяги; G_{lb} – вес нагруженного ковша; α – угол наклона забоя; μ – отклонение от вертикали канатов подъема

2. Математическая модель электроприводов механизмов подъема и тяги

Электроприводы механизмов подъема и тяги шагающего экскаватора ЭШ 20.90 имеют одинаковую структуру [8, 9]: генератор – двигатель (Г–Д) с тиристорным возбуждением и системой управления по схеме двухконтурного подчиненного регулирования с регуляторами тока силовой цепи и напряжения генератора.

Математическая модель¹ системы «механизм подъема–ковш–механизм тяги» составлена по схеме, показанной на рис. 2, в условиях известных допущений [10, 11].

Математическая модель электропривода любого из механизмов подъема или тяги, входом которого есть $U_i(t)$ – напряжение командоаппарата задания скорости изменения длины соответствующего каната, а выходом $\omega(t)$ – частота вращения вала двигателя, представляется системой уравнений (2).

¹ Техдокументация на ЭШ 20.90. URL: https://maxi-exkavator.ru/excapedia/technic/esh-2090_omz

$$\begin{aligned}
 u_{VR}(t) &= \text{sat}(U_i(t) - k_1 e(t); k_{VR}, u_{VR}^*), \\
 u_{CR}(t) &= \text{sat} \left(u_{VR}(t) - k_4 I(t) + k_5 \int_0^t (u_{VR}(t) - k_4 I(t)) dt; k_{CR}, u_{CR}^* \right), \\
 u_{MA}(t) &= k_{MA} u_{CR}(t), \\
 T_{TC} \dot{u}_{TC}(t) + u_{TC}(t) &= k_{TC}(t) u_{MA}(t), \\
 T_G \dot{u}_G(t) + u_G(t) &= k_G u_{TC}(t), \\
 T_{AC} \dot{I}(t) + I(t) &= k_{AC}(u_G(t) - C_F \omega(t)), \\
 J \dot{\omega}(t) &= C_M I(t) - M_R.
 \end{aligned} \tag{2}$$

В этих выражениях:

$u_{VR}(t), u_{CR}(t), u_{MA}(t), u_{TC}(t), u_G(t)$ – выходные сигналы соответственно регулятора напряжения, регулятора тока, согласующего усилителя, тиристорного преобразователя и генератора; u_{VR}^*, u_{CR}^* – предельные

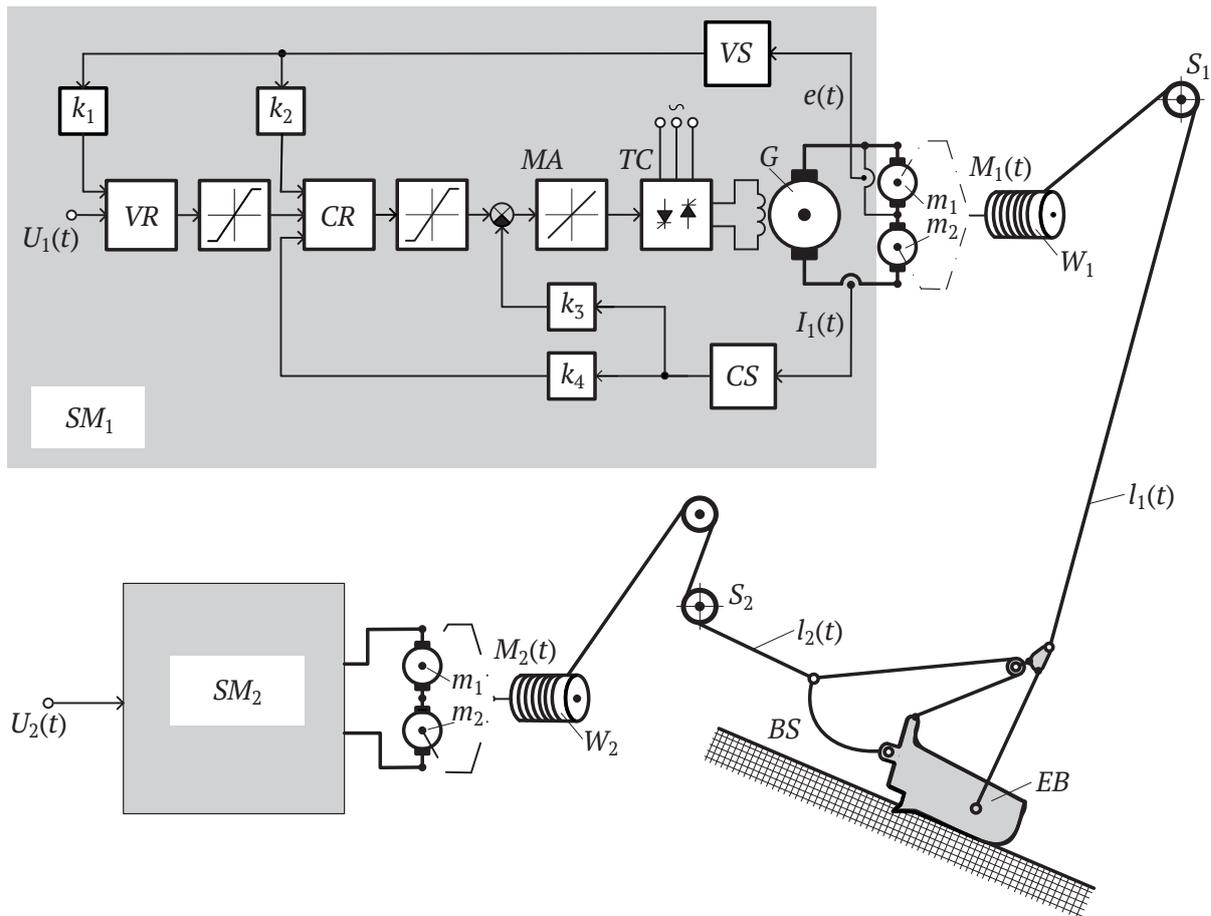


Рис. 2. Схема системы «механизм подъема–ковш–механизм тяги»:

S_1 – головные блоки; S_2 – блоки наводки; l_1 – подъемные канаты; l_2 – тяговые канаты; EB – ковш экскаватора; BS – забойная поверхность; W_1 – лебедка механизма подъема; W_2 – лебедка механизма тяги; SM_1, SM_2 – система управления питанием двигателей соответственно подъема и тяги; CS – датчик тока привода подъема; VS – датчик напряжения генератора; VR – регулятор напряжения; CR – регулятор тока; MA – согласующий усилитель; TC – тиристорный преобразователь; k_1, k_2, k_3, k_4 – блоки коэффициентов обратных связей; m_1, m_2 – двигатели; M_1, M_2 – движущие моменты подъема и тяги соответственно; U_1, U_2 – задания на движение подъема и тяги соответственно

значения сигналов регуляторов напряжения и тока; k_{VR} , k_{CR} – коэффициенты передачи ограничителей; T_{TC} , T_G , T_{AC} – постоянные времени тиристорного преобразователя, генератора и якорной цепи; k_1 , k_4 , k_5 – параметры ПИ-регулятора напряжения и ПИИ-регулятора тока; k_{MA} , k_{TC} , k_G , k_{AC} – коэффициенты передачи согласующего усилителя, тиристорного преобразователя, генератора и якорной цепи; J – момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя; $I(t)$ – ток якорной цепи двигателей; C_E , C_M – конструктивные постоянные двигателя; M_R – момент сопротивления в приводе, приведенный к валу двигателя.

Выполнена процедура синтеза ПИИ-регулятора внутреннего контура – контура тока, путем настройки его на модульный оптимум. Найдены с использованием технических характеристик экскаватора ЭШ 20.90² параметры регулятора и его передаточная функция

$$W_{CR}(s) = \frac{4,6s + 1}{6,69s}.$$

Согласно процедуре синтеза на модульный оптимум определены параметр ПИ-регулятора напряжения и его передаточная функция

$$W_{VR}(s) = 8,32.$$

² Некоторые технические характеристики шагающего экскаватора драглайна ЭШ20/90, используемые при получении передаточных функций звеньев его модели:

- коэффициент передачи тиристорного возбудителя $k_{TC} = 44,3V/V$;
- постоянная времени тиристорного возбудителя $T_{TC} = 0,01s$;
- коэффициент передачи генератора $k_G = 14,0V/V$;
- постоянная времени генератора $T_G = 4,6s$;
- коэффициент передачи якорной цепи двигателя $k_{AC} = 31,0\Omega^{-1}$;
- постоянная времени якорной цепи $T_{AC} = 0,05s$;
- момент инерции ротора двигателя и лебедки механизма подъема/тяги, приведенный к валу двигателя $J = 517Nm/A$;
- конструктивные постоянные двигателя $C_E = 8,64V/s$, $C_M = 8,64Nm/A$;
- коэффициент передачи датчика тока $k_{CS} = 0,0029V/A$;
- коэффициент передачи датчика напряжения $k_{VS} = 0,0081V/V$;
- предельные значения сигналов регуляторов напряжения и тока $10V$;
- стопорный ток якоря двигателя $I_{stop} = 3400A$;
- номинальное напряжение генератора $U_G^* = 1230V$;
- $U_{Гном} = 1230V$;
- номинальная угловая скорость двигателя $\omega_M^* = 70,6s^{-1}$;
- передаточное отношение редуктора механизма подъема/тяги $r = 22,53$;
- КПД редуктора механизма подъема/тяги $\eta = 0,9$;
- радиус барабана лебедки механизма подъема/тяги $r_W = 0,9m$;
- электромеханическая постоянная времени двигателя $T_M = 0,06s$;
- вес порожнего ковша $G_b = 220kN$;
- вес ковша с горной массой $G_{ib} = 480kN$.

Техдокументация на ЭШ 20.90 https://maxi-exkavator.ru/exclopedia/technic/esh-2090_omz

3. Моделирование операции черпания

Модель движения ковша при взаимодействии с забоем состоит из модели электроприводов тяги и подъема (2), модели движения ковша при черпании (1) и технических данных экскаватора-драглайна ЭШ 20.90. Структура модели представлена на рис. 3.

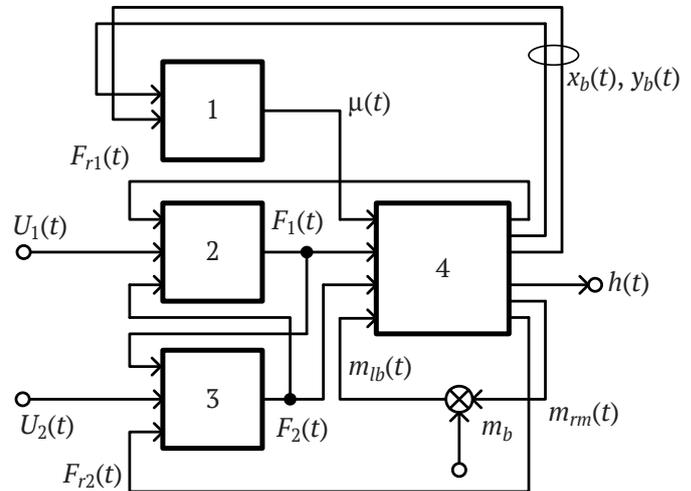


Рис. 3. Структура модели движения ковша при черпании:

блок 1 – определение угла μ ; блок 2 – модель механизма подъема; блок 3 – модель механизма тяги; блок 4 – модель забоя; $U_1(t)$, $U_2(t)$ – задающие напряжения приводов подъема и тяги; $x_b(t)$, $y_b(t)$ – текущие декартовы координаты положения ковша; μ – угол между подъемными канатами и осью y ; $h(t)$ – величина заглубления ковша в забой; m_b , $m_{rm}(t)$, $m_{ib}(t)$ – масса порожнего ковша, горная масса в ковше, масса груженого ковша соответственно; $F_1(t)$, $F_2(t)$ – сила, действующая на ковш со стороны механизма подъема и тяги соответственно; $F_{r2}(t)$ – сила, действующая на ковш со стороны забоя вдоль оси тягового каната, содержащая силы трения, сопротивления резанию породы, сопротивления перемещению призмы волочения породы; $F_{rN}(t)$ – сила, действующая на ковш со стороны забоя по нормали, содержащая силы тяжести, сопротивления резанию породы

3.1. Модельные исследования процессов в электроприводах главных механизмов

Для реализации компьютерного моделирования процессов в электроприводах главных механизмов шагающего драглайна при выполнении операции черпания выбраны программные средства среды SimInTech.

Моделирование процессов изменения длин канатов подъема и тяги и процессов в электроприводах выполнялось на основании модельных представлений (1), (2). Схемы компьютерных моделей электроприводов подъема и тяги и изменения длин канатов представлены соответственно на рис. 4 и 5.

Параметры моделей взяты из технической документации [12] шагающего экскаватора ЭШ 20.90, для которого электроприводы подъема и тяги используют генератор ППЭ-2500-750УЗ с номинальным напряжением $1200V$ и двигатели МПЭ-1000-630УЗ с номинальной частотой вращения $70,6c^{-1}$.

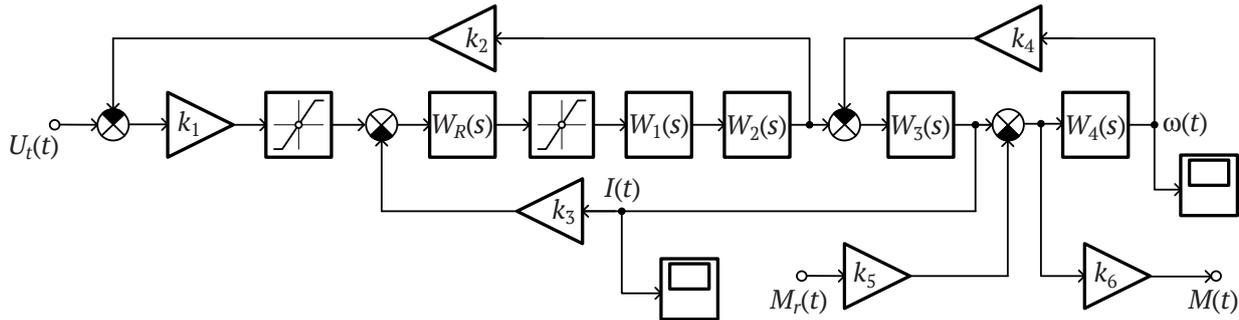


Рис. 4. Структурная схема модели электроприводов:

$U_t(t)$ – сигнал задания с командоконтроллера; коэффициенты: $k_1 = 0,324$, $k_2 = 0,0081$, $k_3 = 0,0029$, $k_4 = 17,28$, $k_5 = 0,00231$, $k_6 = 389,769$; передаточные функции моделей звеньев: $W_1(s) = 44,3/(0,01s + 1)$, $W_2(s) = 14,0/(4,6s + 1)$, $W_3(s) = 31/(0,05s + 1)$, $W_4(s) = 0,032/s$; $\omega(t)$ – частота вращения вала двигателя; $M_r(t)$ – момент сил сопротивления, приведенный к валу двигателя; $M(t)$ – момент на валу лебедки подъема/тяги

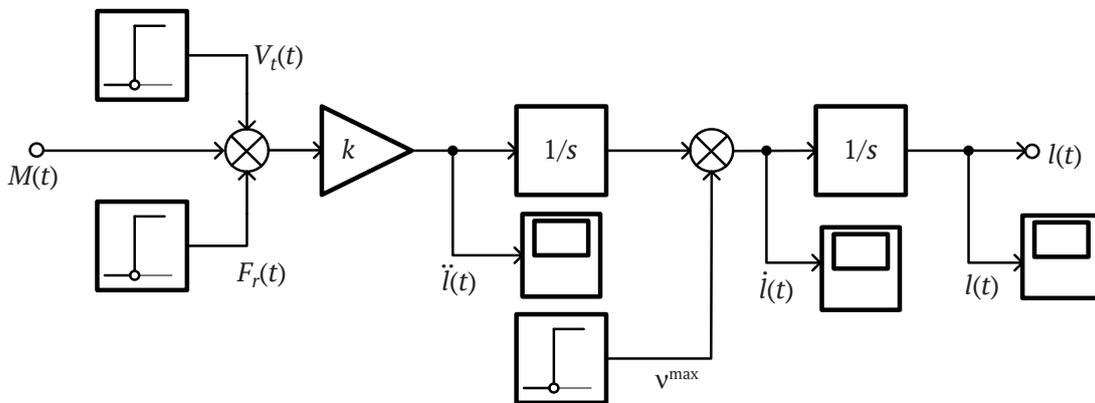


Рис. 5. Схема компьютерной модели изменения длин канатов:

$V_t(t)$ – сигнал задания скорости изменения длин канатов. Для максимальной скорости сигнал командоаппарата равен 10 В; максимальная сила сопротивления черпанию $\max F_r(t) = 201\ 858,7234$ кН; $M(t)$ – момент на валу лебедки подъема/тяги; коэффициент $k = 3,2987e^{-06}$; величина максимальной скорости изменения длины каната $v^{\max} = 0,2497$ мс⁻¹; $\dot{i}(t)$, $i(t)$, $l(t)$ – текущие значения ускорения, скорости и длины каната подъема / тяги соответственно

Из результатов модельных исследований, показанных на рис. 6, видно, что время разгона модели электропривода составило 3 с установившаяся скорость изменения длины канатов $v^{\max} = 0,25$ мс⁻¹ согласуется с осциллограммами реальных кривых разгона и торможения электроприводов драглайна, представленными в [13].

Модельные исследования подтвердили достаточную адекватность описания динамических процессов в электроприводах и кинематики движения канатов тяги и подъема.

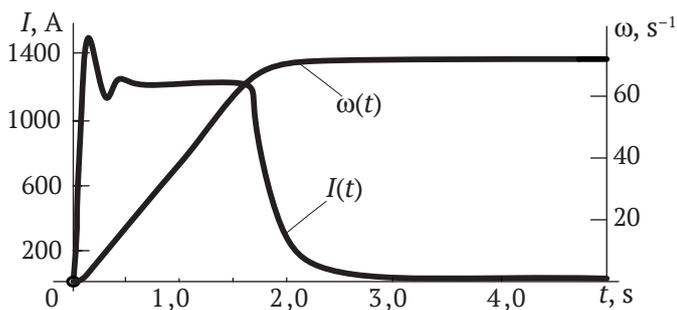


Рис. 6. Результаты модельных исследований:

I – ток разгона, А; ω – частота вращения вала двигателя, с⁻¹

3.2. Моделирование процесса черпания

Модельные исследования процесса черпания выполняются в соответствии со схемой на рис. 3. Процесс черпания выполняется с постоянной скоростью тяги, равной 1 мс⁻¹. Процесс рационального черпания осуществляется либо с максимальным начальным заглублением, либо с постоянной толщиной стружки.

В первом случае время черпания минимально, поскольку используется максимально мощность экскаваторных приводов тяги и подъема. Однако такой метод может привести к стопорению привода тяги и, что не менее важно, к сложностям последующих черпаний в силу неравномерности профиля забоя.

При втором методе черпания рельеф забоя обрабатывается равномерно, мощность экскаваторных приводов используется не полностью, динамические нагрузки исключают возможность стопорения ковша.

Метод равномерного наполнения ковша положен в основу синтеза системы управления процессом черпания, для которой регулируемой величиной является толщина срезаемой стружки.

Структура системы автоматического управления процессом черпания представлена на рис. 7.

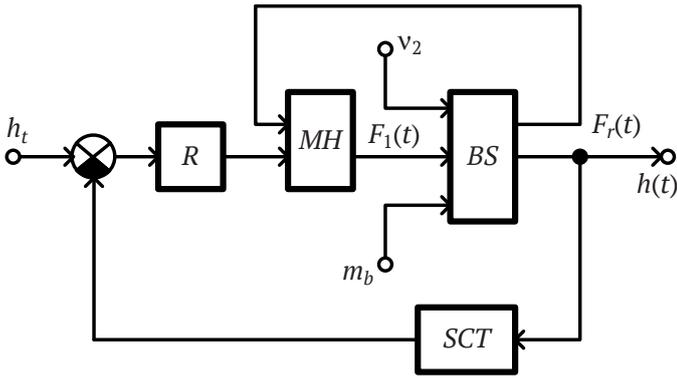


Рис. 7. Структура системы автоматического управления процессом черпания:

блок *R* – регулятор; блок *MH* – модель механизма подъема; блок *BS* – модель забоя; $h(t)$ – текущее значение толщины срезаемой стружки; $F_r(t)$ – текущее сопротивление резанию горной массы; *SCT* – датчик толщины стружки; h_t – задание на толщину стружки

В системе исследовалась возможность использования ПИД-регулятора с найденными по Циглеру-Никольсу параметрами: $k_p = 46$, $k_i = 33,3$, $k_d = 15,19$. Выполнялась отработка задания небольшой $-0,3$ м – и существенно большей $-0,75$ м – толщине стружки. Результат исследования приведен на рис. 8. В обоих случаях имеет место недопустимое перерегулирование и длительное время регулирования.

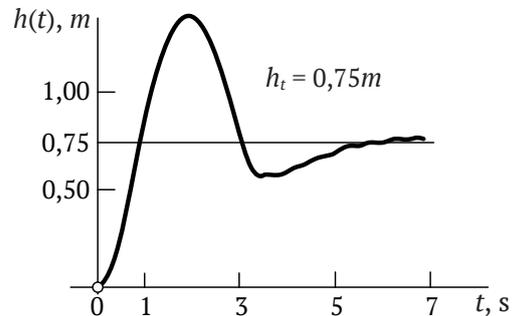
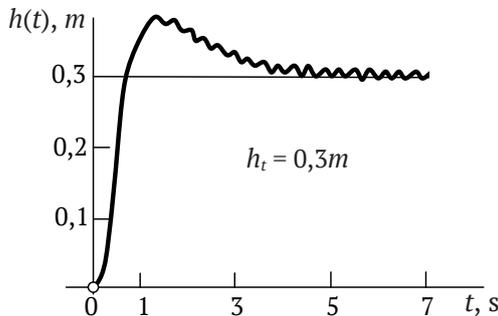


Рис. 8. Изменение толщины стружки при различных параметрах ПИД-регулятора

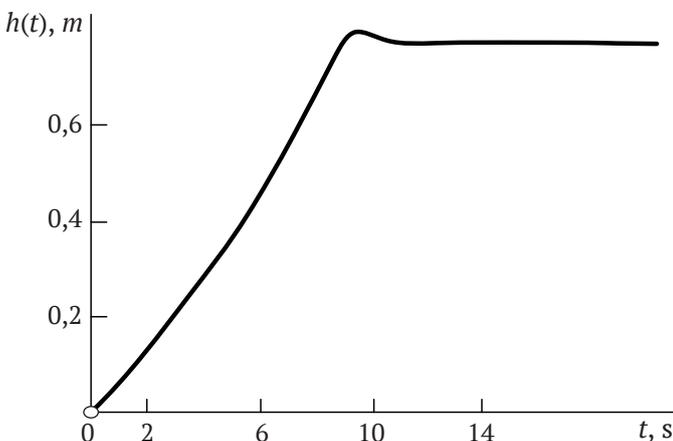


Рис. 9. Изменения толщины стружки при И-регуляторе

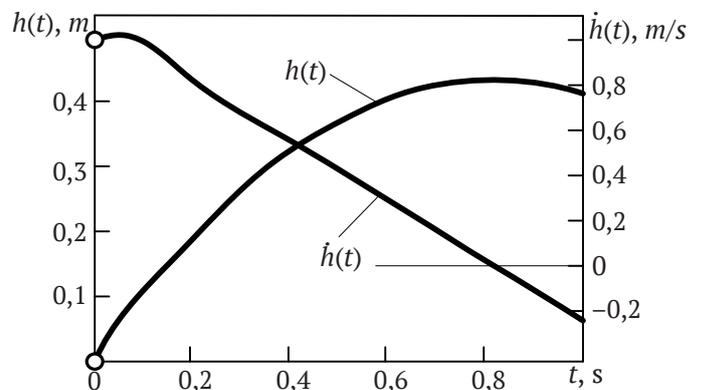


Рис. 10. Изменение толщины стружки с нелинейным регулятором: $h(t)$ – текущая толщина стружки; $\dot{h}(t)$ – скорость изменения толщины срезаемой стружки

Использование интегрального регулятора позволило значительно уменьшить перерегулирование, но при этом переходный процесс существенно удлинился.

Исследования показали неэффективность линейных регуляторов, поэтому, исходя из логики реальной работы машиниста, предлагается двухэтапный алгоритм формирования управляющего воздействия на привод тяги.

Процесс черпания представляется состоящим из двух этапов: заглупление и движение ковша с постоянной толщиной стружки. Второй этап обеспечивает линейный алгоритм ПИД-регулятора, первый этап черпания формируется нелинейным алгоритмом

$$u(h; \mu) = \begin{cases} 0, & \varepsilon \leq h_0(\mu), \\ -10, & \varepsilon > h_0(\mu), \end{cases}$$

$$\varepsilon(t) = h_3 - h(t).$$

В этом выражении $h_0(\mu)$ – путь торможения при заглуплении ковша, зависящий от силы натяжения канатов подъема, точнее, от угла наклона канатов подъема.

Содержательный смысл этого алгоритма состоит в том, что заглупление ковша в породу проходит с максимальным усилием и остановить движение следует на глубине задания. Таким образом, срезаемая толщина оказывается нелинейной функцией времени, но скорость изменения толщины – почти линейная функция времени, что видно из рис. 10.

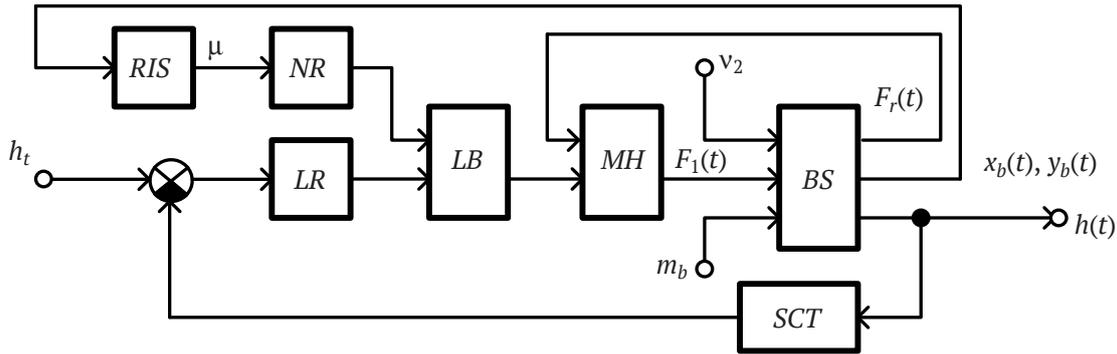


Рис. 11. Структурная схема системы автоматического управления процессом черпания:

LR – линейный регулятор; NR – нелинейный регулятор; LB – логический блок; RIS – датчик угла наклона канатов подъема; MH – модель механизма подъема; BS – модель забоя; SCT – датчик толщины стружки; h_t – заданное значение толщины срезаемой стружки; $h(t)$ – текущее значение толщины срезаемой стружки; $x_b(t), y_b(t)$ – текущие декартовы координаты ковша; блок $F_r(t)$ – текущее сопротивление резанию горной массы

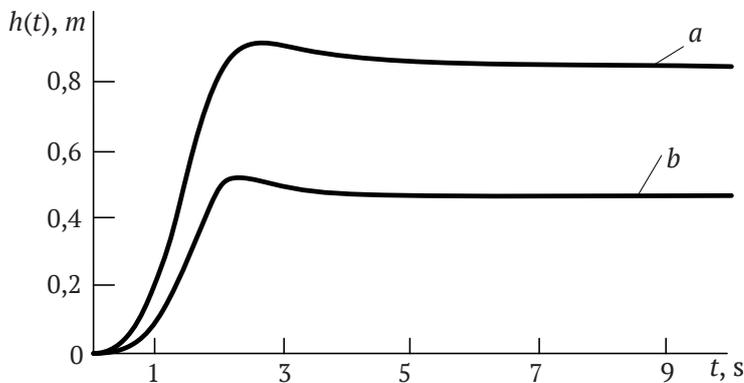


Рис. 12. Изменение толщины горной массы при автоматическом черпании

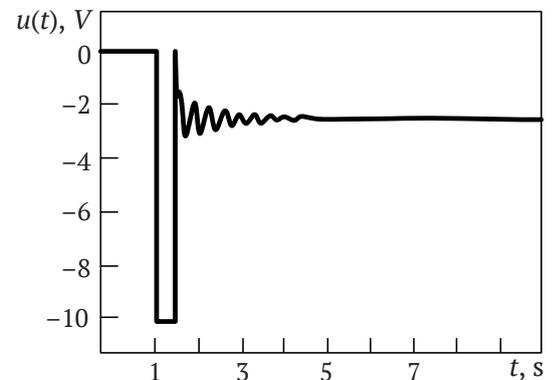


Рис. 13. Вид управляющего воздействия при автоматическом черпании

Структурная схема системы автоматического управления процессом черпания шагающим драглайном представлена на рис. 11.

Модельные исследования работоспособности системы автоматического управления процессом черпания проводились для случая, когда $m_b = 22\,000$ кг – масса порожнего ковша; $\alpha = 30^\circ$ – угол откоса забоя; $v_0 = 1$ мс⁻¹ – скорости движения тяговых канатов при черпании; $h_t = 0,85$ м – задание толщины черпания при удельном сопротивлении черпанию $k_p = 1,45 \pm 0,45$ кг/см²; $h_t = 0,45$ м – задание толщины черпания при удельном сопротивлении черпанию $k_p = 3,35 \pm 0,75$ кг/см².

Результаты моделирования в виде кривых изменения толщины горной массы при автоматическом черпании для заданий *a, б* соответственно представлены на рис. 12. Кроме того, на рис. 13 представлен общий вид управляющего воздействия при автоматическом черпании.

Показатели качества управляемого процесса черпания в породах с удельным сопротивлением $k_p = 1,45 \pm 0,45$ кг/см² и $k_p = 3,35 \pm 0,75$ кг/см² практически совпадают: перерегулирование в первом случае 7,2 %, во втором – 10,4 %, время регулирования в первом случае 4 с, во втором – 3,5 с.

Заключение

Разработанная система автоматического управления операцией черпания позволяет приблизить траекторию черпания к оптимальной, обеспечивая предельно быстрое заглубление, не более 3 секунд с допустимым перерегулированием не более 10 % и последующим равномерным черпанием с постоянной толщиной срезаемой стружки. Толщина стружки задается при внешней настройке.

Такие характеристики автоматической системы управления черпанием приводят к снижению нагрузок на электромеханическое оборудование и позволяют увеличить эксплуатационную производительность шагающего экскаватора-драглайна.

Разработанная система автоматического управления операцией черпания вместе с автоматическими системами транспортирования груженого ковша в отвал и порожнего ковша в забой, системами автоматической защиты от перегрузки главных механизмов, системой контроля безопасного движения ковша в рабочем пространстве драглайна – делает комплексную систему управления рабочим процессом драглайна практически автономной.



Список литературы

1. Ponnusamy M., Maity T. Recent advancements in dragline control systems. *Journal of Mining Science*. 2016;52:160–168. <https://doi.org/10.1134/S106273911601025X>
2. Liu H., Kearney M., Austin K. Development of dragline excavation model for operation planning. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA*. 2016. Pp. 55–63. URL: <https://www.araa.asn.au/acra/acra2016/papers/pap107s1.pdf>
3. Corke P., Winstanley G., Dunbabin M., Roberts J. Dragline automation: experimental evaluation through productivity trial. In: Yuta S., Asama H., Prassler E., Tsubouchi T., Thrun S. (eds.) *Field and Service Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006;24:459–468. https://doi.org/10.1007/10991459_44
4. Liu H., Kearney M.P., Austin K.J. Dragline operation modelling and task assignment based on mixed-integer linear programming. *Optimization and Engineering*. 2018;19:1005–1036. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9386-5>
5. Htay W.Z., Pevzner L.D., Temkin I.O. Algorithmic and hardware support for on-board information system of walking dragline excavator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(2):190–196. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-190-196>
6. Gölbaşı O., Demirel N. Investigation of stress in an earthmover bucket using finite element analysis: A generic model for draglines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;115(7):623–628. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n7a8>
7. Kumar A., Nandikanti S., Batchu C. Analysis of stress distribution on the bucket of a dragline machine. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2016;64(5-6):118–122.
8. Ha Q., Santos M., Nguyen Q., Rye D., Durrant-Whyte H. Robotic excavation in construction automation. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2002;9:20–28. <https://doi.org/10.1109/100.993151>
9. Вуль Ю.Я., Ключев В.И., Седаков Л.В. *Наладка электроприводов экскаваторов*. М.: Недра; 1975.
10. Певзнер Л.Д. Автоматизированная система управления тяжелыми экскаваторами циклического действия. *Горная промышленность*. 2011;(5):58. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/karertekh/842-avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-tyazhelymi-ekskavatorami-tsiklicheskogo-dejstviya-2>
11. Певзнер Л.Д. *Автоматизированное управление мощными одноковшовыми экскаваторами*. М.: Изд-во «Горное дело»; 2014.
12. Winstanley G.J., Corke P.I., Roberts J.M. Dragline swing automation. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque, New Mexico, USA. 1997;3:1827–1832. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.619053>
13. Ridley P., Corke P. Dragline Automation. In: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*. Seoul, Korea (South). 2001;4:3742–3747. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933200>

References

1. Ponnusamy M., Maity T. Recent advancements in dragline control systems. *Journal of Mining Science*. 2016;52:160–168. <https://doi.org/10.1134/S106273911601025X>
2. Liu H., Kearney M., Austin K. Development of dragline excavation model for operation planning. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA*. 2016. Pp. 55–63. URL: <https://www.araa.asn.au/acra/acra2016/papers/pap107s1.pdf>
3. Corke P., Winstanley G., Dunbabin M., Roberts J. Dragline automation: experimental evaluation through productivity trial. In: Yuta S., Asama H., Prassler E., Tsubouchi T., Thrun S. (eds.) *Field and Service Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006;24:459–468. https://doi.org/10.1007/10991459_44
4. Liu H., Kearney M.P., Austin K.J. Dragline operation modelling and task assignment based on mixed-integer linear programming. *Optimization and Engineering*. 2018;19:1005–1036. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9386-5>
5. Htay W.Z., Pevzner L.D., Temkin I.O. Algorithmic and hardware support for on-board information system of walking dragline excavator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(2):190–196. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-190-196>
6. Gölbaşı O., Demirel N. Investigation of stress in an earthmover bucket using finite element analysis: A generic model for draglines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;115(7):623–628. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n7a8>
7. Kumar A., Nandikanti S., Batchu C. Analysis of stress distribution on the bucket of a dragline machine. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2016;64(5-6):118–122.
8. Ha Q., Santos M., Nguyen Q., Rye D., Durrant-Whyte H. Robotic excavation in construction automation. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2002;9:20–28. <https://doi.org/10.1109/100.993151>



9. Vul Yu. Ya., Kluchev V.I., Sedakov L.V. *Adjustment of electric drives of excavators*. Moscow: Nedra Publ.; 1975. (In Russ.)

10. Pevzner L.D. Automated control system for heavy cyclic excavators. *Russian Mining Industry*. 2011;(5):58. (In Russ.). URL: <https://mining-media.ru/ru/article/karertekh/842-avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-tyazhelymi-ekskavatorami-tsiklicheskogo-dejstviya-2>

11. Pevzner L.D. *Automated control of heavy-duty single-bucket excavators*. Moscow: Gornoe Delo Publ.; 2014 p. (In Russ.)

12. Winstanley G.J., Corke P.I., Roberts J.M. Dragline swing automation. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque, New Mexico, USA. 1997;3:1827–1832. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.619053>

13. Ridley P., Corke P. Dragline Automation. In: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*. Seoul, Korea (South). 2001;4:3742–3747. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933200>

Информация об авторах

Леонид Давидович Певзнер – доктор технических наук, профессор, кафедры «Автоматические системы», Институт кибернетики, Российский технологический университет – МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [37093879700](https://orcid.org/0009-0001-9332-0001); e-mail: lpevzner@msmu.ru

Николай Антонович Киселев – магистрант, кафедры «Автоматические системы», Институт кибернетики, Российский технологический университет – МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: gost1996@gmail.com

Information about the authors

Leonid D. Pevzner – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [37093879700](https://orcid.org/0009-0001-9332-0001); e-mail: lpevzner@msmu.ru

Nikolay A. Kiselev – Undergraduate, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; e-mail: gost1996@gmail.com

Поступила в редакцию	11.07.2021	Received	11.07.2021
Поступила после рецензирования	17.09.2021	Revised	17.09.2021
Принята к публикации	01.02.2021	Accepted	01.02.2021