

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.Л. Петров¹, Н.М. Кузнецов¹, И.Н. Морозов¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: petrovv@misis.ru

² Центр физико-технических проблем энергетики Севера

Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

³ Мурманский арктический государственный университет, Мурманск, Россия

Аннотация: Системы электропривода машин и оборудования играют ключевую роль в реализации технологических процессов, управление которыми в значительной степени интегрирует в себе решения, связанные с автоматизацией горно-металлургических производств. Поэтому моделирование режимов работы электроприводов технологического оборудования является актуальной задачей. При рассмотрении качества управления электроприводом механизма поворота вертикального конвертера КВК-30Ц на базе асинхронного электропривода предлагается использовать методы исследования, базирующиеся на имитационном моделировании. В качестве исходных данных использовалась реальная установка вертикального конвертера – металлургический цех АО «Кольская ГМК». Модели тестировались при максимальной нагрузке, учитывающей как вес самого конвертера, так и вес расплавленного металла. Вес расплава составляет 6,88% от общей массы поворачиваемой конструкции, а слив металла происходит плавно. Наполнение одного ковша при сливе готовой черновой меди составляет менее 3% от массы всей конструкции, значительного ступенчатого сброса нагрузки не происходит, поэтому в данной статье рассмотрение вопроса изменения нагрузки в процессе работы является нецелесообразным. Моделирование показало, что во всех режимах привод работает устойчиво. Основные показатели регулирования: время переходного процесса и выхода на номинальные параметры находится в пределах $t_{\text{пуск}} = 0,64$ с; пусковые и установившиеся токи и моменты не выходят из пределов паспортных данных асинхронного электродвигателя; время полной остановки механизма конвертера для всех установившихся скоростей находится в пределах 0,7–0,8 с. В режиме торможения точность позиционирования не превышает 1,17%, что соответствует технологическим требованиям.

Ключевые слова: горно-металлургическая промышленность, конвертер, ковш, электропривод, нагрузка, переходный процесс, качество управления, имитационное моделирование, регулятор.

Для цитирования: Петров В. Л., Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Анализ показателей регулирования в электроприводе механизма поворота вертикального кислородного конвертера на основе имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 169–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_169.

Analysis of control quality of rotary mechanism drives in upright oxygen converters by simulation modeling

V.L. Petrov¹, N.M. Kuznetsov², I.N. Morozov³

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: petrovv@isis.ru

² Northern Energetics Research Centre Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

³ Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russia

Abstract: Electric drives of machines and equipment take a key part in implementation of process flows, and their control integrates various engineering solutions connected with production automation in mining and metallurgy. This makes modeling of operating modes of machinery drives a topical task. It is proposed to analyze the quality of control of the rotary mechanism drive in upright oxygen converter KVK-30C with an induction motor drive using the simulation modeling techniques. The source data were specifications of a real-life upright converter operated at the metallurgy workshop at Kola Mining and Metallurgy. Models were tested under maximal load with regard to both weight of the converter and weight of the molten metal. The molten metal weight is 6.88% of the total weight of the rotary structure, and tapping is carried out gradually. The ladle filling during tapping of crude copper totals less than 3%, no great drop happens in loading, and variation in loading during operation is inexpedient to analyze therefore. Modeling shows that the drive operates stably in all modes. The main figures of the control quality are: the time of transient and normal rating attainment $t_{\text{start}} = 0,64$ s; the starter and steady-state currents and moments are within the ranges of the induction motor drive rating; the time of the full stop of the converter at all sustained speeds ranges as 0.7–0.8 s. In braking mode, positional precision is 1.17%, which conforms with the process requirements.

Key words: mining and metallurgical industry, converter, ladle, drive, load, transient, control quality, simulation modeling, regulator.

For citation: Petrov V. L., Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Analysis of control quality of rotary mechanism drives in upright oxygen converters by simulation modeling. *MAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1):169-179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_169.

Введение

Сложные технологические процессы предприятий горно-металлургического комплекса во многом определяют специфику структуры, параметры и режимы работы технологического оборудования. Очевидно, что характер нагрузок, формируемых технологическим оборудованием, определяется задачами управления технологическими процессами, уровнем их автоматизации, а также качественными характеристиками переходных процессов при управлении [1, 2]. Значитель-

ная часть процессов в горной отрасли описывается на основе статистических методов формирования нагрузок, режимов работы оборудования [3, 4], которые позволяют учитывать многие внешние факторы и наличие неопределенностей [4]. В качестве показателей используются прямые параметры, которые могут быть измерены инженерно-информационными системами [5, 6], а также косвенными показателями, которые могут быть определены при использовании вычислительных методов на базе измере-

ния текущих значений технологических параметров [7]. Такие подходы позволяют решить класс задач, опираясь на достоверные данные об объектах и процессах, а также о режимах их работы [8, 9].

В автоматизированных системах управления технологическими процессами промышленных предприятий предъявляются высокие требования ко многим показателям, например, производительности, качеству управления, коэффициенту полезного действия и энергопотреблению. Это связано с большой ролью, которую играют эти показатели в формировании качества продукции [10, 11], со снижением затрат на производство, с увеличением объемов и прибыли [12], повышением энергоэффективности [13–15], а следовательно, повышением конкурентоспособности конкретного предприятия или производства.

Автоматизированные системы управления электроприводами разрабатываются с ориентацией на согласованное функционирование нескольких приводов в составе сети или единую нагрузку при групповом электроприводе. При имитационном моделировании сложных динамических объектов и процессов

оценка качественных показателей регулируемых электроприводов различных технологических установок проводится на основе анализа переходных процессов, протекающих в регулируемых электроприводах [16, 17], в электрической и механической его частях [18]. Поэтому при рассмотрении качества управления электроприводом механизма поворота вертикального конвертера КВК-30Ц на базе асинхронного электропривода предлагается использовать методы исследования, базирующиеся на имитационном моделировании. Такой подход позволит не только найти методические решения для разработки соответствующих систем электропривода, но провести апробацию этих методик.

Имитационная модель электропривода поворота вертикального кислородного конвертера

Разработка модели осуществлялась на основе вертикального кислородного конвертера КВК-30Ц (рис. 1), который имеет следующие технические характеристики: емкость конвертера — 30 т; объем рабочего пространства — 38 м³;

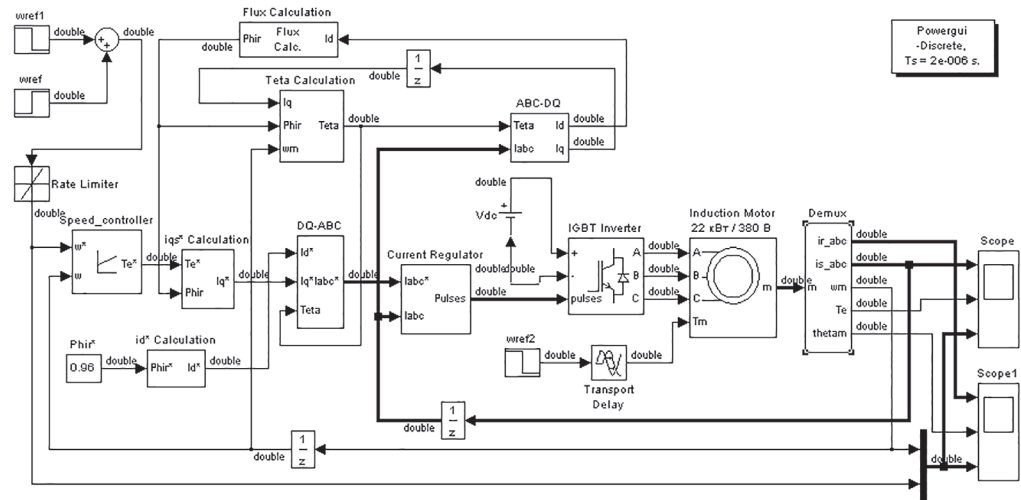


Рис. 1. Имитационная модель привода с векторным управлением асинхронным приводом
 Fig. 1. Simulation model of a vector-controlled asynchronous drive

высота внутреннего пространства — 6185 мм; общая масса металлоконструкций — 250 т; общая масса футеровки — 150 т; внутренний диаметр бочки без футеровки — 4500 мм; внутренний диаметр горловины — 2000 мм; внутренний диаметр горловины по футеровке — 1500 мм; скорость поворота корпуса минимальная — 0,13 об/мин; скорость поворота корпуса максимальная — 1 об/мин.

Конвертер приводится в действие электроприводом из четырех электродвигателей постоянного тока мощностью 22 кВт каждый. Использование электропривода постоянного тока в установке было принято для обеспечения возможности регулирования основных координат электропривода и управления процессом перемещения ковша конвертера.

Вышеизложенным требованиям полностью удовлетворяет короткозамкнутый асинхронный электродвигатель АД(АИРМ)200М6У3 мощностью 22 кВт, 1000 об/мин.

Условия работы характеризуются неравномерностью нагрузки, вызванной изменением массы расплава черновой меди, возникновением вибраций при работе и запыленностью.

Используя математическое описание системы векторного управления асинхронным электроприводом и параметры привода [2], формализуем модель системы управления электроприводом механизма поворота конвертера в приложении «Simulink» программы «Matlab» [19–21] (см. рис. 1).

При разработке модели были сделаны следующие допущения: линейные напряжения на выходе инвертора содержат только основную гармонику; силовая часть инвертера и его система управления не содержат звеньев с запаздыванием. Структура имитационной модели основывается на двухканальной системе регулирования. Во внутреннем кон-

туре регулирования составляющей тока статора $i_{s\alpha}$ используется ПИД-регулятор, во внешнем контуре регулирования модуля потокосцепления Ψ_{rm} — ПИ-регулятор. Оба контура формируют канал регулирования потокосцепления ротора.

Кроме асинхронного электродвигателя и статического преобразователя в структурную схему электропривода входят датчик скорости, имеющий передаточную функцию $k_{\omega c}$, пропорциональный регулятор скорости с передаточной функцией k_{pc} .

Нелинейный характер частотно-управляемого электропривода определяет возможность реализации приближенных расчетов.

В случаях отдельных каналов векторного управления асинхронным электродвигателем анализ регулирования потокосцепления ротора целесообразно производить в режиме короткого замыкания электродвигателя. В то же время канал регулирования момента и частоты вращения асинхронного электродвигателя подвергается анализу в режиме холостого хода.

Определим операторную систему линейных уравнений, которая определяет законы регулирования для потокосцепления ротора:

$$i_s = \frac{\frac{1}{R_s}(T_r p + 1)}{\sigma T_s T_r p^2 + (T_s + T_r)p + 1} U_s, \quad (1)$$

$$\Psi_{rm} = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{s\alpha}, \quad (2)$$

где T_s — электромагнитная постоянная времени цепи статора асинхронного электродвигателя; T_r — электромагнитная постоянная времени роторной цепи асинхронного электродвигателя; σ — коэффициент рассеяния асинхронного электродвигателя.

Определим основные параметры в представленной выше системе уравнений:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,03565}{0,28} = 0,13 \text{ с}, \quad (3)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = 0,16 \text{ с}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} = 0,0486;$$

$$k_{нч} = U_{нф} / U_{ynp} = 53,7, \quad (4)$$

$$k_{д\psi} = U_{ynp} / \Psi_{rm} = 5,99,$$

где $k_{нч}$ — коэффициент передачи устройства управления — преобразователя частоты; $ek_{д\psi}$ — коэффициент передачи датчика, который определяет потоко-сцепление ротора асинхронного электродвигателя.

Значения ключевых параметров ПИД-регулятора и потоко-сцепления ротора определяются на основании следующих соотношений:

$$T_{\partial\psi} T_{uv} = \sigma T_s T_r; \quad k_{p\psi} T_{uv} = (T_s + T_r), \quad (5)$$

где T_{μ} — эквивалентная постоянная времени соответствующего контура регулирования, которая определяется на основании следующего выражения

$$T_{\mu} = 1/f_{нч \max} = 0,0025 \text{ с}, \quad (6)$$

где $f_{нч \max}$ — наибольшая величина генерируемой частоты преобразователя.

В этих условиях можно далее определить параметры для стандартных настроек ПИД-регулятора:

$$k_{p\psi} = \frac{(T_s + T_r) R_s}{T_{\mu} k_{нч} k_{д\psi} L_m} = 0,00284; \quad (7)$$

$$T_{\partial\psi} = \frac{\sigma T_r}{T_{\mu} k_{нч} k_{д\psi}} \cdot \frac{L_s}{L_m} = 0,00967 \text{ с}. \quad (8)$$

При этом передаточная функция контура регулирования потоко-сцепления ротора асинхронного электродвигателя принимает следующий вид:

$$W_{k\psi}(p) = \frac{1}{T_{\mu} p + 1}. \quad (9)$$

Значение коэффициента рассеяния асинхронного электродвигателя σ не-

значительно, этой величиной можно пренебречь при определении дифференцирующей составляющей ПИД-регулятора в контуре регулирования составляющей тока статора асинхронной машины $i_{s\alpha}$ в случае векторного управления ею.

Дальнейшее упрощение системы для приближенных расчетов и анализа качества регулирования может основываться на пренебрежении инерционным фильтром первого порядка. Представленные объективные допущения не сказываются на количественных параметрах оценочных расчетов.

Предложенная система допущений позволяет произвести предварительный расчет параметров регулятора составляющей тока статора $i_{s\alpha}$ асинхронного электродвигателя:

$$k_{pm1} \approx \frac{L_s}{T_{\mu} k_{нч} k_{\partial m1}} \approx \frac{35,65}{0,0025 \cdot 53,7 \cdot 0,074} \approx 3588,5 \quad (10)$$

$$T_{um1} \approx \frac{T_{\mu} k_{нч} k_{\partial m1}}{R_s} \approx \frac{0,0025 \cdot 53,7 \cdot 0,074}{0,28} \approx 0,0355 \text{ с} \quad (11)$$

где $k_{\partial m1} = 0,074$ — коэффициент усиления датчика составляющей тока асинхронного электродвигателя $i_{s\alpha}$.

Аналогичные выражения для определения параметров регулятора потоко-сцепления ротора асинхронного электродвигателя:

$$k_{p\psi} \approx \frac{T_r k_{\partial m1}}{2 T_{\mu} k_{д\psi} L_m} \approx \frac{0,1557 \cdot 0,074}{2 \cdot 0,0025 \cdot 5,99 \cdot 34,7} \approx 0,0111 \quad (12)$$

$$T_{uv} \approx \frac{2 T_{\mu} k_{д\psi} L_m}{k_{\partial m1}} \approx \frac{2 \cdot 0,0025 \cdot 5,99 \cdot 34,7}{0,074} \approx 0,14 \text{ с} \quad (13)$$

Отличительной особенностью канала регулирования потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя является его более сложная структура организации, базирующаяся на двухконтурной системе подчиненного регулирования координат.

Основу канала регулирования угловой скорости асинхронного электродвигателя составляют внутренний контур регулирования составляющей тока статора $i_{с\beta}$ с использованием соответствующего ПИД-регулятора, а также контур регулирования скорости с использованием возможно разных типов соответствующих регуляторов (П-регулятор либо ПИ-регулятор). Тип используемого регулятора зависит от того, какая статическая ошибка закладывается в систему в установившемся режиме.

Важно определить соотношение между переходными процессами в контурах системы векторного управления асинхронным электродвигателем. Поэтому будем считать, что аналитический расчет всего канала регулирования скорости асинхронного электродвигателя производится при затухших переходных процессах в канале регулирования потокосцепления ротора.

В таких условиях можно записать зависимость для электромагнитного момента асинхронного электродвигателя в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора:

$$M_{\Sigma} = \frac{m \cdot L_m}{2L_r} i_{с\beta} \Psi_{rm}. \quad (14)$$

Аналогично системе допущений при расчете канала регулирования потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя пренебрегаем величиной коэффициента рассеяния электродвигателя σ . Такой подход позволит произвести синтез регулятора составляющей тока статора $i_{с\beta}$ алгоритмов ПИ-регулятора.

В итоге в схеме с принятой системой

допущений канал включает внутренний токовый контур с ПИ-регулятором тока, а также внешний контур регулирования скорости с П-алгоритмом регулирования скорости:

$$W_{\Sigma, \text{к.м}} = \frac{1}{2T_{\mu} p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \cdot k_{\Delta m}. \quad (15)$$

Определим операторную модель замкнутого контура скорости:

$$W_{\Sigma, \text{к.с.}} = \frac{1}{k_{\Delta c}} \cdot \frac{J_{\Sigma} k_{\Delta m}}{k_{pc} \Psi_{rm} k_{\Delta c}} p (2T_{\mu} p^2 + 2T_{\mu} p + 1) + 1 \quad (16)$$

Численное значение коэффициента передачи для датчика скорости определяется из условия, что напряжение на выходе датчика составляет 10 В при номинальной угловой скорости асинхронного электродвигателя $\omega_{\text{ном}}$:

$$k_{\Delta c} = \frac{U_{\Delta}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{10}{102,3} = 0,098. \quad (17)$$

Аналитическая зависимость для определения коэффициента усиления регулятора для канала регулирования скорости имеет следующий вид:

$$k_{pc} = \frac{J_{\Sigma} k_{\Delta m 2}}{4T_{\mu} k_{\Delta c} \Psi_{rm}}, \quad (18)$$

где J_{Σ} — приведенный момент инерции к валу асинхронного электродвигателя; $k_{\Delta m 2} = \omega_{\text{зад max}} / i_{с\beta \text{ max}}$ — коэффициент усиления датчика обратной связи по составляющей тока статора $i_{с\beta}$, который находится из соответствующего максимального значения составляющей тока при критическом моменте асинхронного электродвигателя $M_{\text{к}}$. Критический момент асинхронного электродвигателя определяется на основании его паспортных характеристик:

$$M_{\text{к}} = M_{\text{ном}} \lambda = 2,5 \cdot 215,05 = 537,6 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (19)$$

где λ — коэффициент максимальной перегрузки, для асинхронных электродвигателей $\lambda = 2,5 - 3,5$.

Максимальная составляющая тока статора при этом определяется как

$$i_{\beta\max} = \frac{2L_r M_k}{3L_m \Psi_{rm}} = \frac{2 \cdot 35,5 \cdot 537,6}{3 \cdot 34,7 \cdot 1,67} = 219,56 \text{ А} \quad (20)$$

Определяем величину коэффициента усиления регулятора скорости на основании (22):

$$k_{pc} = \frac{J_{\Sigma} k_{\Delta m2}}{4T_{\mu} k_{dc} \Psi_{rm}} = \frac{4,645 \cdot 0,46}{4 \cdot 0,0025 \cdot 0,098 \cdot 1,67} = 1335,4 \quad (21)$$

Результаты моделирования

Далее для наглядности представлены графики переходных процессов при заданной скорости 12,5 рад/с, с использованием которых производилась оценка качественных показателей (рис. 2).

Все результаты экспериментов были занесены в итоговую таблицу.

Обозначения, принятые в таблице:

$\omega_{\text{зад}}$ — заданная скорость работы асинх-

ронного электродвигателя привода (по графику), рад/с; $\omega_{\text{рот}}$ — скорость асинхронного электродвигателя привода, об/мин; $t_{\text{раб}}$ — время работы асинхронного электродвигателя, с; $t_{\text{нп}}$ — время переходного процесса при пуске асинхронного электродвигателя, с; $M_{\text{пуск}}$ — пусковой момент, нм; $M_{\text{уст}}$ — установившийся момент, нм; $I_{\text{ст max}}$ — максимальный ток статора, А; $I_{\text{ст уст}}$ — установившийся ток статора, А; $\varphi_{\text{раб}}$ — угол поворота ротора асинхронного электродвигателя за время $t_{\text{раб}}$, рад; $\varphi_{\text{Кр}}$ — угол поворота механизма конвертера за время $t_{\text{раб}}$, град.; t_{90} — расчетное время поворота механизма конвертера на угол 90° , с; $t_{\text{торм}}$ — время торможения асинхронного электродвигателя до полной остановки, с; $\varphi_{\text{Кт}}$ — угол поворота механизма конвертера за время $t_{\text{торм}}$, град.; $\Delta\varphi_{\text{н}}$ — точность позиционирования механизма привода конвертера при повороте на угол 90° (минимальная повалка), %.

Анализируя таблицу, можно сделать следующие выводы:

- скорость вращения асинхронного электродвигателя соответствует заданной;

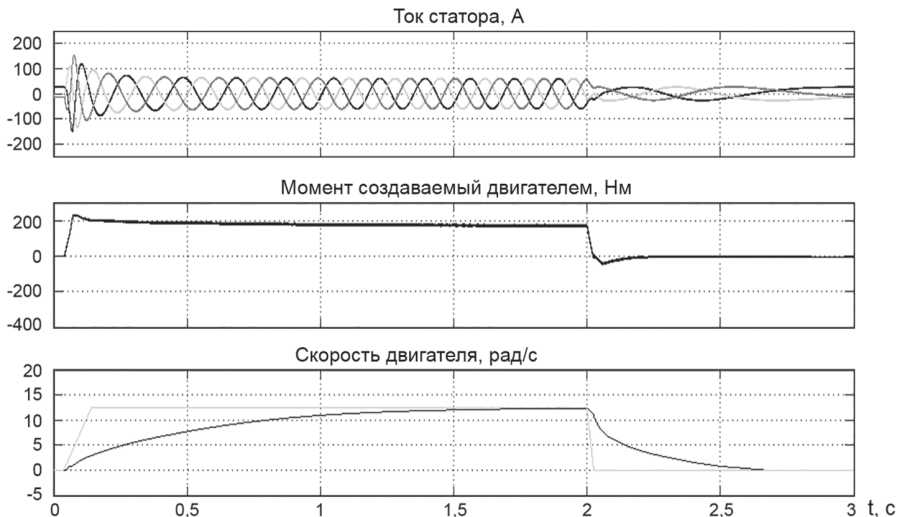


Рис. 2. Графики переходных процессов при заданной скорости 12,5 рад/с

Fig. 2. Graphs of transients at a given speed of 12.5 rad/s

Значения параметров переходных процессов при разных режимах работы
Values of transient process parameters in different operating modes

Параметр	Переходные процессы					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
$\omega_{\text{зад}}$	12,5	25	30	50	80	102,3
$\omega_{\text{рот}}$	119,37	238,73	286,48	477,46	763,94	976,89
$t_{\text{раб}}$	2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
$t_{\text{пп}}$	0,4	0,45	0,5	0,5	0,6	0,55
$M_{\text{пуск}}$	240	400	415	410	415	410
$M_{\text{уст}}$	185	195	190	195	195	180
$I_{\text{ст. макс}}$	145	205	210	210	210	240
$I_{\text{ст. уст}}$	72	70	70	70	70	70
$\varphi_{\text{раб}}$	716,2	1432,4	1718,9	2864,8	4583,7	5861,4
$\varphi_{\text{К.р}}$	0,72	1,45	1,74	2,9	4,63	5,92
t_{90}	249	88	72	44	27	21
$t_{\text{торм}}$	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,75
$\varphi_{\text{К.т}}$	0,15	0,21	0,25	0,4	0,65	1,05
$\Delta\varphi_{\text{п}}$	0,17	0,23	0,28	0,44	0,72	1,17

- точность поддержания скорости асинхронного электродвигателя не выходит за пределы, оговоренные в техническом задании;

- диапазон регулирования скорости электропривода соответствует параметрам 1/8 для механизма привода конвертера;

- время переходного процесса в электроприводе и выхода его на номинальные параметры находится в пределах $t_{\text{пуск}} = 0,64$ с;

- пусковые и установившиеся токи и моменты в электроприводе не выходят за пределы паспортных данных асинхронного электродвигателя;

- время полной остановки механизма конвертера для всех установившихся скоростей находится в пределах 0,7 – 0,8 с, что говорит об удовлетворительном режиме торможения в системе электропривода;

- точность позиционирования электропривода находится в пределах, оговоренных в техническом задании, и при

работе с номинальной скоростью не превышает 1,17%.

Заключение

Разработанные модели тестировались при максимальной нагрузке, учитывающей как вес самого конвертера, так и вес расплавленного металла. Вес расплава составляет 6,88% от общей массы поворачиваемой конструкции, а слив металла происходит плавно. Наполнение одного ковша при сливе готовой черновой меди составляет менее 3% от массы всей конструкции, значительного ступенчатого сброса нагрузки не происходит, поэтому в данной статье рассмотрение вопроса изменения нагрузки в процессе работы является нецелесообразным.

Моделирование показало, что во всех режимах привод работает устойчиво, с хорошими статическими и динамическими характеристиками, без толчков и с достаточной точностью позиционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева Н. В., Федорова Э. Р. Анализ качества управления технологическим процессом // Цветные металлы. — 2020. — № 10. — С. 70–76. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.10.
2. Azzoug Y., Sahraoui M., Pusca R., Ameid T., Romary R., Cardoso A. J. M. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: Simulation and real-time implementation // ISA Transactions. 2021, vol. 109, pp. 295–306. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.09.021.
3. Тихонов Н. О., Господариков А. П. Учет динамики движения внутримельничной загрузки при расчете развиваемой мощности барабанных мельниц // Горный журнал. — 2014. — № 11. — С. 11–17.
4. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant / Proceedings of IEEE Intentional Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation (ICATMRI 2020), 2020, article 9398320. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320.
5. Семенов А. С., Кузнецов Н. М. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике // Измерительная техника. — 2014. — № 4. — С. 31–34.
6. Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Исследование динамики электропривода вращателя бурового станка шарошечного бурения с нечетким управлением // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 1. — С. 78–88. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-78-88.
7. Сафронов П. А., Цораев В. Т. Об автоматизации измельчения руд с применением вычислительных методов определения циркулирующей нагрузки и других технологических параметров // Обогащение руд. — 2018. — № 4(376). — С. 44–50. DOI: 10.17580/or.2018.04.09. Литературу с п. 8 по п. 9 смотри в REFERENCES.
10. Хакулов В. А., Крапивский Е. И., Блаев Б. Х., Шаповалов В. А. Технология формирования качества руд Тырнаузского месторождения с использованием предварительной сортировки и обогащения // Обогащение руд. — 2018. — № 5(377). — С. 33–39. DOI: 10.17580/or.2018.05.06.
11. Фомин К. В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 2. — С. 161–169. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-161-169.
12. Петров В. Л., Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 169–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.
13. Бабокин Г. И. Исследование влияния длины обрабатываемого столба на удельный расход электрической энергии очистного механизированного участка // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5. — С. 155–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_155.
14. Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Гаврина О. А., Плиева М. Т. Комплексный анализ потребления электроэнергии мельниц самоизмельчения обогатительной фабрики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5-1. — С. 145–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_1_0_145.
15. Садридинов А. Б. Анализ энергетических показателей работы горнопроходческих комплексов угольной шахты // Горные науки и технологии. — 2020. — Т. 5. — № 4. — С. 367–375. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-367-375.
16. Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И., Зеленков А. В., Овсянников Д. С. Универсальная компьютерная модель для исследования динамики скребкового конвейера с двухдвигательным приводом // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2021. — Т. 64. — № 2. — С. 56–64. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-2-56-64.
17. Petrov V., Sadridinov A., Pichuev A. Research and analysis of the efficiency of power consumption in tunneling sections // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022, vol. 823, pp. 109–117. DOI: 10.1007/978-981-16-7472-3_9.

18. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.
19. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. — М.: Академия, 2005. — 304 с.
20. Терехин В. Б., Дементьев Ю. Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — 307 с.
21. Indragandhi V., Selvamathi R., Subramaniaswamy V. Introduction to electric drives and MATLAB drive blocks / Electric Motor Drives and their Applications with Simulation Practices. Academic Press. 2022, pp. 1–45. DOI: 10.1016/B978-0-323-91162-7.00001-1. **PLM**

REFERENCES

1. Vasilieva N. V., Fedorova E. R. Process control quality analysis. *Tsvetnye Metally*. 2020, no. 10, pp. 70–76. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.10.
2. Azzoug Y., Sahraoui M., Pusca R., Ameid T., Romary R., Cardoso A. J. M. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: Simulation and real-time implementation. *ISA Transactions*. 2021, vol. 109, pp. 295–306. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.09.021.
3. Tikhonov N. O., Gospodarikov A. P. Accounting of dynamics of inter-mill charging movement in the time of calculation of power output of tumbling mills. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 11, pp. 11–17. [In Russ].
4. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant. *Proceedings of IEEE Intentional Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation (ICATMRI 2020)*, 2020, article 9398320. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320.
5. Semenov A. S., Kuznetsov N. M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2014, no. 4, pp. 31–34. [In Russ].
6. Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Behaviour of electric drive of roller-bit drilling rig swivel head with fuzzy control. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 1, pp. 78–88. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-78-88.
7. Safronov P. A., Tsoraev V. T. On automation of ore grinding using computational methods for determining circulating load and other process parameters. *Obogashchenie Rud*. 2018, no. 4(376), pp. 44–50. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.04.09.
8. Szczepanski R., Tarczewski T., Grzesiak L. M. Application of optimization algorithms to adaptive motion control for repetitive process. *ISA Transactions*. 2021, vol. 115, pp. 192–205. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.01.007.
9. Arpit G., Singh H. P., Pandey K. Advance speed control of three phase induction motor using field oriented control method. *Materials Today: Proceedings*. 2023, vol. 80, part 3, pp. 1981–1985. DOI:10.1016/j.matpr.2021.06.020.
10. Khakulov V. A., Krapivskiy E. I., Blayev B. Kh., Shapovalov V. A. Quality formation technology for Tyrnyauz deposit ores using preliminary sorting and beneficiation. *Obogashchenie Rud*. 2018, no. 5(377), pp. 33–39. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.05.06.
11. Fomin K. V. Simulation of loads on operating device of peat-cutting unit with regard to errors in the cutting elements arrangement. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 2, pp. 161–169. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-161-169.
12. Petrov V. L., Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 169–180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.
13. Babokin G. I. Influence of longwall length on specific power consumption. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5, pp. 155–169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_155.

14. Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Gavrina O. A., Plieva M. T. Integrated analysis of electric energy demand of autogenous grinding mills at concentration factories. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 145 – 156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_145.

15. Sadridinov A. B. Analysis of energy performance of heading sets of equipment at a coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020, vol. 5, no. 4, pp. 367 – 375. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-4-367-375.

16. Shprekher D. M., Babokin G. I., Zelenkov A. V., Ovsyannikov D. S. Universal computer model for studying the dynamics of a two-motor scraper conveyor. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 56 – 64. [In Russ]. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-2-56-64.

17. Petrov V., Sadridinov A., Pichuev A. Research and analysis of the efficiency of power consumption in tunneling sections. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022, vol. 823, pp. 109 – 117. DOI: 10.1007/978-981-16-7472-3_9.

18. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of modern mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 145 – 162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

19. Terekhov V. M., Osipov O. I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives], Moscow, Akademiya, 2005, 304 p.

20. Terekhin V. B., Dement'ev Yu. N. *Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink* [Computer simulation of direct and alternating current electric drive systems in Simulink], Tomsk, Izd-vo TPU, 2013, 307 p.

21. Indragandhi V., Selvamathi R., Subramaniaswamy V. Introduction to electric drives and MATLAB drive blocks. *Electric Motor Drives and their Applications with Simulation Practices*. Academic Press. 2022, pp. 1 – 45. DOI: 10.1016/B978-0-323-91162-7.00001-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Вадим Леонидович – д-р техн. наук, профессор, НИТУ «МИСиС», e-mail: petrovv@misis.ru,
Кузнецов Николай Матвеевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН, e-mail: kuzn55@mail.ru,
Морозов Иван Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Мурманский арктический государственный университет, e-mail: moroz.84@mail.ru.
Для контактов: Петров В.Л., e-mail: petrovv@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.L. Petrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: petrovv@misis.ru,
N.M. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Northern Energetics Research Centre Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia, e-mail: kuzn55@mail.ru,
I.N. Morozov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Murmansk Arctic State University, 183038, Murmansk, Russia, e-mail: moroz.84@mail.ru.
Corresponding author: V.L. Petrov, e-mail: petrovv@misis.ru.

Получена редакцией 17.08.2023; получена после рецензии 30.10.2023; принята к печати 10.12.2023.
Received by the editors 17.08.2023; received after the review 30.10.2023; accepted for printing 10.12.2023.