



УДК 621. 31: 621.771. 06-88

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ****Андрей Анатольевич Мальцев**

доцент кафедр ФН-7 и МТ-10

МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Несмотря на многообразие существующих металлургических машин, их главные электроприводы имеют схожую традиционную конфигурацию: вращение передается от одного или нескольких электродвигателей к тому или иному технологическому инструменту через трансмиссию (валопровод). Например, объект компьютерного исследования — главный электропривод металлопрокатного стана — объединяет в себе электродвигатель, муфту, шестеренную клетку и два шпинделя. Все детали электропривода относятся к физическим объектам макромира, поэтому к описанию движения этих тел применимы законы классической механики, а именно, формализм Лагранжа. На основании кинематической схемы электропривода построены его физическая, структурная, математическая и компьютерная крутильно-колебательные модели. Выполнено исследование механических переходных процессов, вызванных ударным захватом заготовки рабочими валками, и получены в среде MathCAD графические результаты. Компьютерное моделирование как никогда актуально на стадии проектирования нового металлургического оборудования, поскольку способствует обоснованному выбору рациональной компоновки главного электропривода, исключая резонансы и преждевременные усталостные поломки деталей.

Ключевые слова: металлургия, электропривод, [MathCAD](#), моделирование, колебания, Лагранж.

**THE STUDY OF MECHANICAL TRANSIENTS IN THE ELECTRIC
DRIVE OF METALLURGICAL MACHINES****Andrey A. Maltsev**

associate professor

Bauman Moscow State Technical University

FN-7 and MT-10 Departments

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Аннотация

Despite the variety of existing metallurgical machines, their main electric drives have a similar traditional configuration: the rotation is transmitted from one or more electric motors to a particular technological tool through the transmission (shaft line). For example, the object of computer research – the main electric drive of a metal rolling mill – combines an electric motor, a clutch, a gear cage and two spindles. All details of the electric drive are physical objects of the macrocosm, so the description of the movement of these bodies are applicable laws of classical mechanics, namely, the formalism of Lagrange. Based on the kinematic scheme of the electric drive, its physical, structural, mathematical and computer torsional-oscillatory models are constructed. The study of mechanical transients caused by the impact capture of the workpiece working rolls, and obtained in MathCAD graphical results. Computer modeling is more relevant than ever at the design stage of new metallurgical equipment, as it contributes to the reasonable choice of rational layout of the main electric drive, eliminating resonances and premature fatigue failure of parts.

Keywords: metallurgy, electric drive, MathCAD, modeling, oscillation, Lagrange.

Актуальность

Полный цикл черной металлургии от добычи сырья до выпуска готовой металлопродукции состоит из следующих стадий (рис. 1):

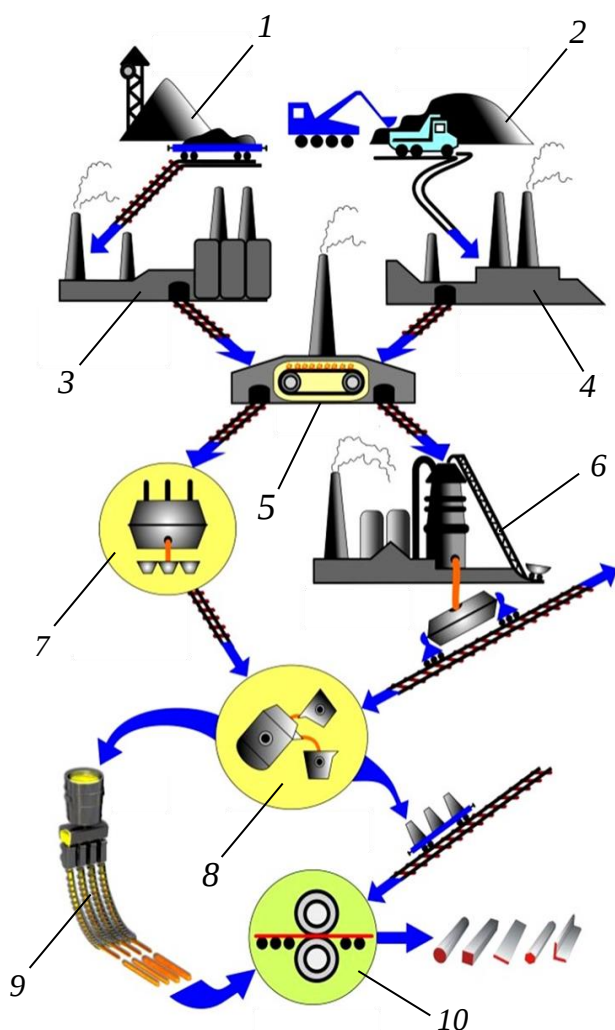


Рис. 1. Стадии полного металлургического цикла:

- 1 — добыча каменного угля в шахте;
- 2 — добыча железной руды в карьере;
- 3 — коксование угля на коксохимическом заводе;
- 4 — обогащение руды на горно-обогатительном комбинате;
- 5 — спекание агломерата на аглофабрике;
- 6 — выплавка чугуна в доменном цехе;
- 7 — производство ферросплавов на ферросплавном заводе;
- 8 — выплавка стали в сталеплавильном цехе;
- 9 — изготовление непрерывно-литой заготовки на МНЛЗ;
- 10 — изготовление металлопроката в прокатном цехе.

Проблема высокой аварийности и травматизма на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях актуальна с незапамятных времен. Производственные катастрофы обусловлены транспортировкой крупногабаритных и тяжелых грузов, работой с расплавленным или раскаленным металлом, физическим и моральным старением оборудования, человеческим фактором.

Практически на всех стадиях полного цикла эксплуатируются металлургические машины, главные электроприводы которых испытывают значительные динамические перегрузки крутильно-колебательного характера, усугубляющие износ узлов трения и вызывающие усталостное разрушение деталей. Поломки металлургических машин часто приводят к значительным убыткам, связанным как с дороговизной и трудоемкостью ремонтных работ, так и с потерями от долгого простоя высокопроизводительного оборудования.

Объект исследования — главный электропривод металлопрокатного стана — приводит во вращение рабочие, а через них и опорные валки, являющиеся технологическим инструментом (рис. 2).

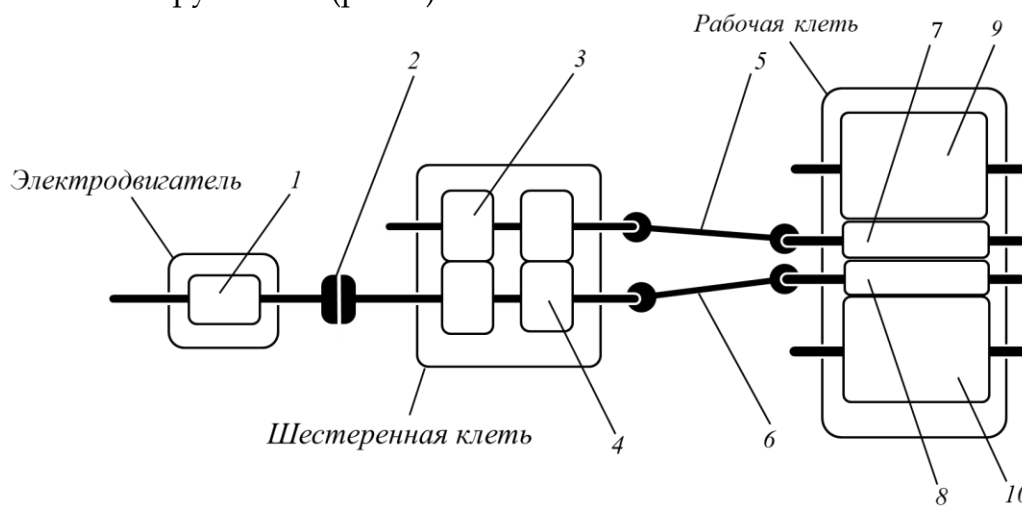


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода:

- 1 — ротор электродвигателя;
- 2 — соединительная муфта;
- 3, 4 — верхний и нижний шестеренные валки;
- 5, 6 — верхний и нижний шпиндели;
- 7, 8 — верхний и нижний рабочие валки;
- 9, 10 — верхний и нижний опорные валки

Предмет исследования — крутильные колебания валопровода (рис. 3).

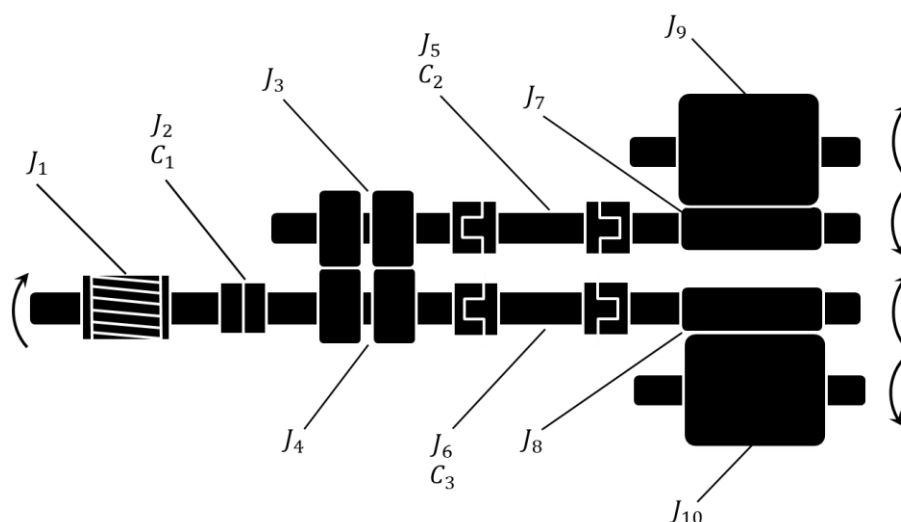


Рис. 3. Физическая модель электропривода:

$J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7, J_8, J_9, J_{10}$ — моменты инерции ротора, муфты, шестеренных валков, шпинделей, рабочих и опорных валков;
 C_1, C_2, C_3 — крутильные жесткости муфты и шпинделей

Неоспоримым критерием истины в исследовательской деятельности ученого-металлурга является натурный эксперимент в заводских условиях на работающем металлопрокатном стане [1, 2, 3]. Только тензометрические испытания с регистрацией механических колебаний, возникающих в главном электроприводе металлопрокатного стана вследствие удара переднего торца прокатываемой заготовки о рабочие валки или из-за неустойчивой работы электродвигателя в процессе прокатки, позволяют получить достаточно точную информацию.

На стадии конструирования нового индивидуального или группового электропривода металлопрокатного стана [4] экспериментальная информация в виде осциллограмм нагружения не существует в связи с физическим отсутствием самого оборудования. Тем не менее, такая информация очень необходима для того, чтобы оценить циклический ресурс деталей, выявить слабые места в конструкции и принять меры к их устранению еще на стадии проектирования. Остается единственный путь получения информации о нагружении деталей и узлов — математическое моделирование [5].

Материалы и методы исследования

С точки зрения классической механики исследуемый валопровод электропривода рабочих валков металлопрокатного стана представляет собой сложную механическую систему, состоящую из твердых макроскопических физических тел, каждое из которых образовано множеством материальных точек. В 1788 году Лагранж переформулировал классическую механику и ввел Лагранжиан $L(q_i, \dot{q}_i, t)$, где t — время, q_i — обобщенные координаты (точкой обозначено дифференцирование по времени), $i = 1, 2, \dots, n$, где n — число степеней свободы системы. Пример обобщенной координаты — угол, определяющий местоположение точки, движущейся по окружности.

Дифференциальные уравнения Лагранжа 2 рода имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где T — кинетическая энергия механической системы; Q_i — обобщенная сила.

На основании физической модели электропривода (см. рис. 2) построена структурная крутильно-колебательная модель (рис. 4).

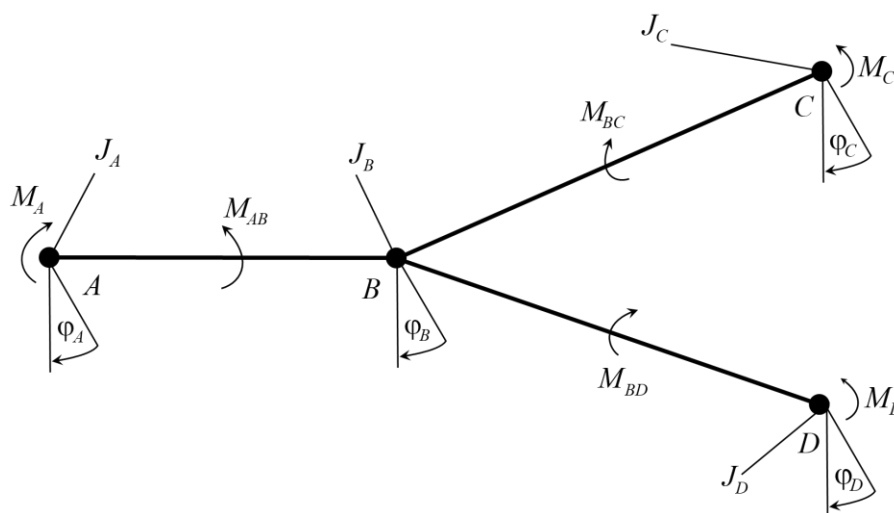


Рис. 4. Структурная модель электропривода:

A, B, C и D — сосредоточенные массы;

J_A, J_B, J_C и J_D — моменты инерции;

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ и φ_D — угловые координаты;

M_A, M_C и M_D — внешние крутящие моменты;

M_{AB}, M_{BC} и M_{BD} — упругие крутящие моменты в связях AB, BC и BD

Инерционно-упругие параметры структурной модели могут быть вычислены без учета КПД закрытой зубчатой передачи и подшипников:

$$J_A = J_1 + \frac{J_2}{2};$$

$$J_B = \frac{J_2}{2} + J_3 + J_4 + \frac{J_5}{2} + \frac{J_6}{2};$$

$$J_C = \frac{J_5}{2} + J_7 + J_9;$$

$$J_D = \frac{J_6}{2} + J_8 + J_{10};$$

$$C_{AB} = C_1;$$

$$C_{BC} = C_2;$$

$$C_{BD} = C_3.$$

(2)

Объединение деталей и узлов физической модели валопровода в сосредоточенную массу структурной модели выполнено при условии, что кинетическая энергия дисков равна кинетической энергии массы в течение одного оборота валопровода.

Разветвленная структура модели (см. рис. 4) удобна тем, что позволяет учесть возможную асимметрию нагружения параллельно работающих верхнего BC и нижнего BD валопроводов.

Число уравнений (1) равно числу сосредоточенных масс структурной модели (числу степеней свободы крутильно-колебательной системы):

(3)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_A} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_A} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_A} = M_A; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_B} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_B} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_B} = M_B; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_C} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_C} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_C} = M_C; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_D} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_D} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_D} = M_D, \end{cases}$$

где T — кинетическая энергия; Π — потенциальная энергия; M_A , M_B , M_C и M_D — внешние моменты.

Из дифференциальных уравнений Лагранжа 2 рода (3) после ряда математических преобразований вытекают следующие дифференциальные уравнения крутильно-колебательного движения сосредоточенных масс:

$$\begin{cases} J_A \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} = M_A(t) - M_{AB}(t); \\ J_B \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} = M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t); \\ J_C \frac{d^2 \varphi_C(t)}{dt^2} = M_{BC}(t) - M_C; \\ J_D \frac{d^2 \varphi_D(t)}{dt^2} = M_{BD}(t) - M_D. \end{cases} \quad (4)$$

Построена математическая модель электропривода, имеющая вид

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varphi_A(t)}{dt^2} - \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B}; \\ \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} - \frac{d^2 \varphi_C(t)}{dt^2} = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B} - \frac{M_{BC}(t) - M_C}{J_C}; \\ \frac{d^2 \varphi_B(t)}{dt^2} - \frac{d^2 \varphi_D(t)}{dt^2} = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B} - \frac{M_{BD}(t) - M_D}{J_D}, \\ \frac{d^2 \psi_{AB}(t)}{dt^2} = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B}; \\ \frac{d^2 \psi_{BC}(t)}{dt^2} = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B} - \frac{M_{BC}(t) - M_C}{J_C}; \\ \frac{d^2 \psi_{BD}(t)}{dt^2} = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B} - \frac{M_{BD}(t) - M_D}{J_D}, \end{cases}$$

где t — время; ψ_{AB} , ψ_{BC} , ψ_{BD} — углы закручивания связей AB , BC и BD ;

$$\psi_{AB} = \varphi_A - \varphi_B;$$

$$\psi_{BC} = \varphi_B - \varphi_C;$$

$$\psi_{BD} = \varphi_B - \varphi_D.$$

Приняты нулевые начальные условия, поскольку крутильные колебания в нулевой момент времени отсутствуют:

$$\psi_{AB}(0) = \psi_{BC}(0) = \psi_{BD}(0) = 0;$$

$$\frac{d\psi_{AB}(0)}{dt} = \frac{d\psi_{BC}(0)}{dt} = \frac{d\psi_{BD}(0)}{dt} = 0.$$

С учетом диссипации (рассеяния) энергии, вызванной фрикционным взаимодействием деталей электропривода, внутренние упругие крутящие моменты записаны так:

$$\begin{aligned} M_{AB}(t) &= C_{AB}\psi_{AB}(t) + \beta_{AB} \frac{d\psi_{AB}(t)}{dt}; \\ M_{BC}(t) &= C_{BC}\psi_{BC}(t) + \beta_{BC} \frac{d\psi_{BC}(t)}{dt}; \\ M_{BD}(t) &= C_{BD}\psi_{BD}(t) + \beta_{BD} \frac{d\psi_{BD}(t)}{dt}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}$ — коэффициенты демпфирования.

Внешние крутящие моменты заданы как экспоненциальные функции времени:

$$\begin{aligned} M_A &= M_{эд} \left[1 - e^{-\frac{t}{0,45 T_{зах}}} \right]; \\ M_C &= M_{п} \left[1 - e^{-\frac{t}{0,45 T_{зах}}} \right]; \\ M_D &= M_{п} \left[1 - e^{-\frac{t}{0,45 T_{зах}}} \right], \end{aligned}$$

где $M_{эд}$ — электромагнитный момент электродвигателя; $M_{эд} = 2M_{п}$; $M_{п}$ — момент прокатки (на один рабочий валок); $T_{зах}$ — продолжительность захвата заготовки рабочими валками.

Цель исследования — изучить поведение математической модели при тестовых исходных данных, а именно:

- построить компьютерные графики внутренних упругих крутящих моментов $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$ и $M_{BD}(t)$ на временном промежутке $t \in [0, T_{п}]$, где $T_{п}$ — продолжительность прокатки одной заготовки.
- установить, как влияет изменение коэффициентов демпфирования $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}$ на продолжительность переходного процесса $T_{пп}$;
- выяснить, зависят ли величины коэффициентов динамичности K_{AB}, K_{BC} и K_{BD} от продолжительности захвата заготовки рабочими валками $T_{зах}$.

Математическое моделирование в компьютерной среде MathCAD является одним из эффективных методов изучения сложных механических систем. Ниже приведен текст компьютерной программы (все величины в системе СИ):

$J_A := 1000$	$C_{AB} := 10000000$	$\beta_{AB} := 10000$	$M_{п} := 10000$
$J_B := 1000$	$C_{BC} := 10000000$	$\beta_{BC} := 10000$	$M_{эд} := 2 \cdot M_{п}$
$J_C := 1000$	$C_{BD} := 10000000$	$\beta_{BD} := 10000$	$T_{п} := 1$
$J_D := 1000$			$T_{зах} := 0.01$

Given

$$\psi_{AB}(0) = 0 \quad \psi_{AB'}(0) = 0 \quad M_{AB}(0) = 0 \quad M_A(0) = 0$$

$$\psi_{BC}(0) = 0 \quad \psi_{BC'}(0) = 0 \quad M_{BC}(0) = 0 \quad M_C(0) = 0$$

$$\psi_{BD}(0) = 0 \quad \psi_{BD'}(0) = 0 \quad M_{BD}(0) = 0 \quad M_D(0) = 0$$

$$M_A(t) = M_{\text{эд}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0.45 \cdot T_{\text{зax}}}\right) \right)$$

$$M_C(t) = M_{\text{п}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0.45 \cdot T_{\text{зax}}}\right) \right)$$

$$M_D(t) = M_{\text{п}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{0.45 \cdot T_{\text{зax}}}\right) \right)$$

$$M_{AB}(t) = c_{AB} \cdot \psi_{AB}(t) + \beta_{AB} \cdot \psi_{AB'}(t)$$

$$M_{BC}(t) = c_{BC} \cdot \psi_{BC}(t) + \beta_{BC} \cdot \psi_{BC'}(t)$$

$$M_{BD}(t) = c_{BD} \cdot \psi_{BD}(t) + \beta_{BD} \cdot \psi_{BD'}(t)$$

$$\psi_{AB''}(t) = \frac{M_A(t) - M_{AB}(t)}{J_A} - \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B}$$

$$\psi_{BC''}(t) = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B} - \frac{M_{BC}(t) - M_C(t)}{J_C}$$

$$\psi_{BD''}(t) = \frac{M_{AB}(t) - M_{BC}(t) - M_{BD}(t)}{J_B} - \frac{M_{BD}(t) - M_D(t)}{J_D}$$

$$\begin{pmatrix} \psi_{AB} \\ \psi_{BC} \\ \psi_{BD} \\ M_{AB} \\ M_{BC} \\ M_{BD} \\ M_A \\ M_C \\ M_D \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} \psi_{AB} \\ \psi_{BC} \\ \psi_{BD} \\ M_{AB} \\ M_{BC} \\ M_{BD} \\ M_A \\ M_C \\ M_D \end{pmatrix}, t, T_{II} \right]$$

В математическом пакете MathCAD для численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений реализован алгоритм классического метода Рунге-Кутты, имеющего четвертый порядок точности. Имеется выбор — либо использовать одну из встроенных функций, либо вычислительный блок *Given – Odesolve*.

Результаты и их обсуждение

Характеристики переходных колебательных процессов определены по результирующим графикам, построенным в среде MathCAD (рис. 5, 6, 7, 8).

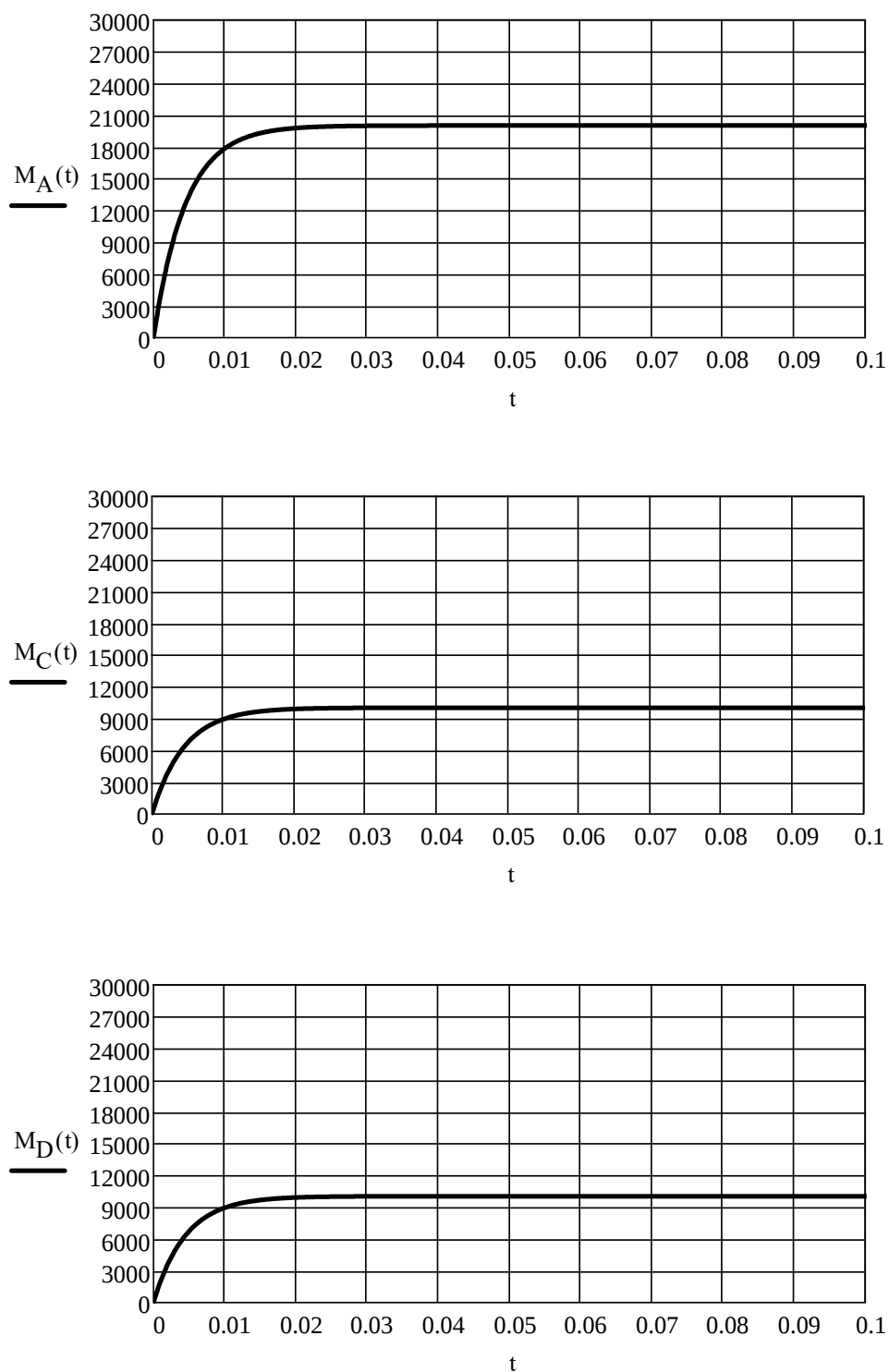


Рис. 5. Внешние моменты [Н·м], действующие на сосредоточенные массы A , C и D : продолжительность захвата заготовки рабочими валками — больше 0,01 [с]; установившийся момент прокатки — 10 000 [Н·м]

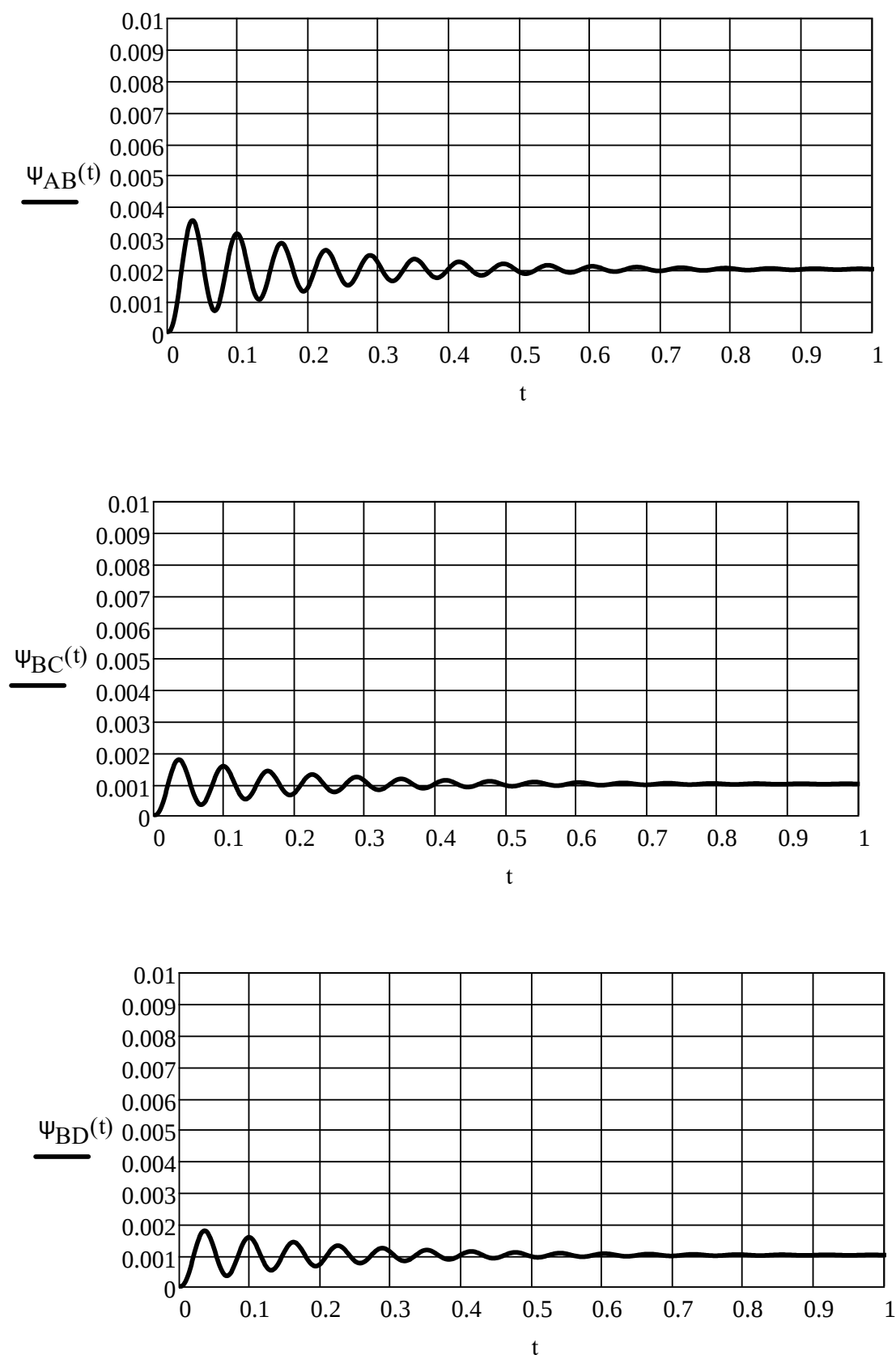


Рис. 6. Углы закручивания [рад] упругих связей AB, BC и BD: продолжительность колебаний — меньше 0,7 секунды; частота колебаний — примерно 16 [Гц].

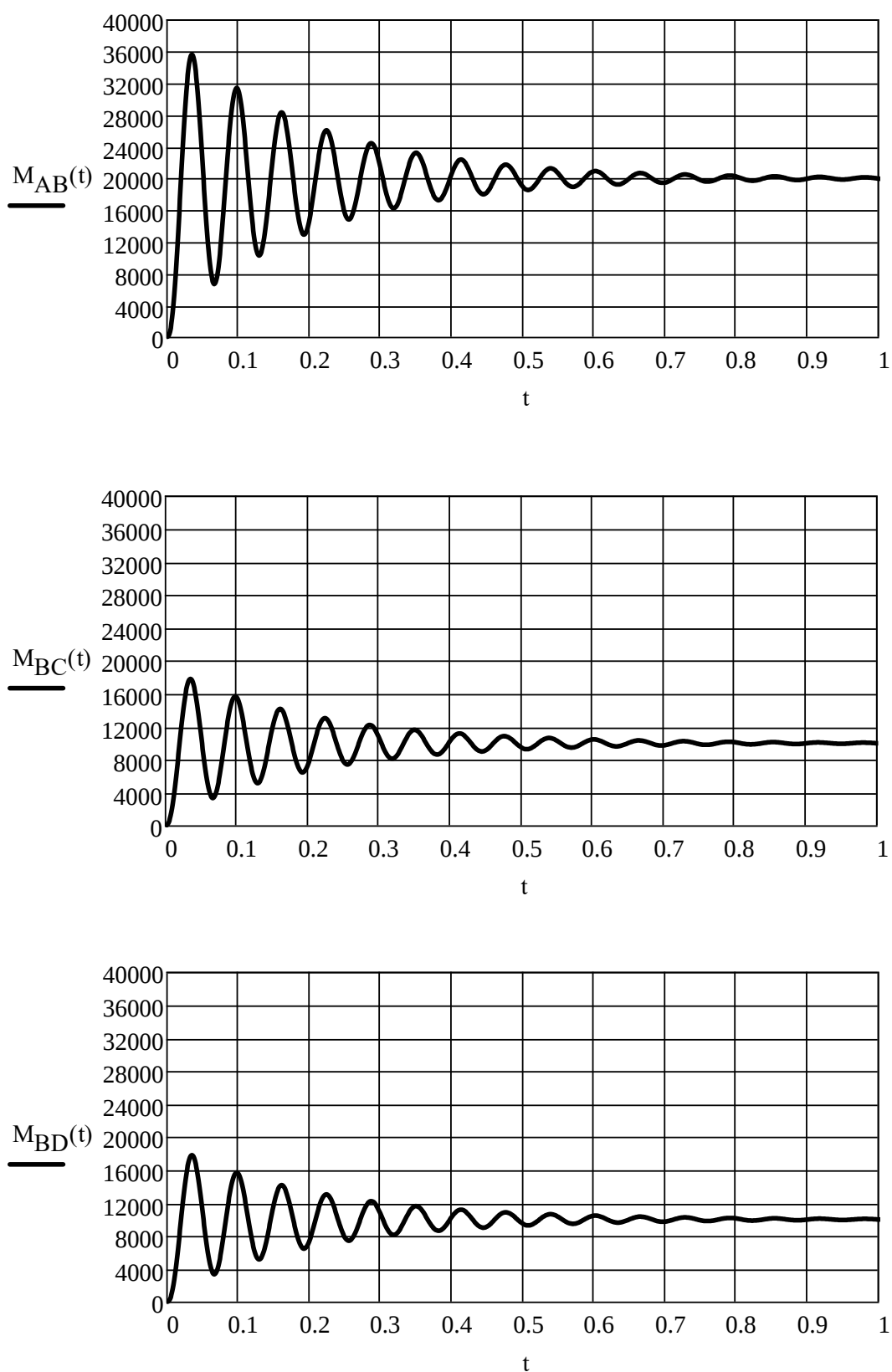


Рис. 7. Внутренние упругие крутящие моменты [Н·м] связей AB, BC и BD: коэффициенты динамичности K_{AB} , K_{BC} и K_{BD} меньше двух — отношение наибольшего момента к установившемуся

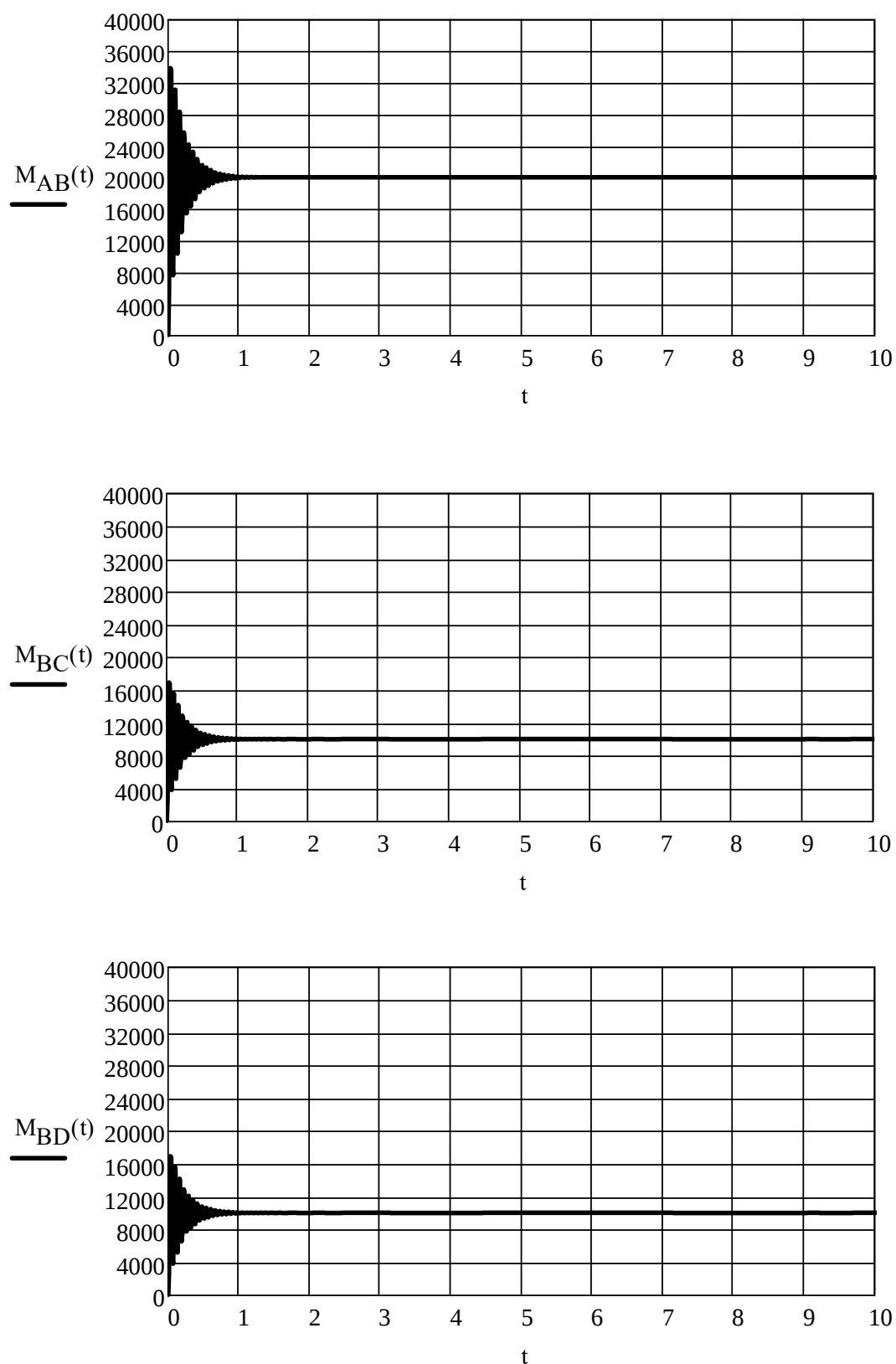


Рис. 8. Внутренние упругие крутящие моменты [Н·м] связей AB, BC и BD: продолжительность прокатки одной заготовки — 10 секунд

Выводы

Необходимость исследования переходных процессов обусловлена тем, что ими чаще всего определяются механические и электрические перегрузки валопровода главного электропривода металлопрокатного стана.

Благодаря компьютерному моделированию было установлено, что значительное увеличение продолжительности захвата заготовки рабочими валками — при известном радиусе рабочих валков время захвата $T_{\text{зах}}$ зависит от скорости прокатки и величины абсолютного обжатия заготовки — существенно снижает коэффициент динамичности вплоть до единицы.

Чрезмерное увеличение значений коэффициентов демпфирования β_{AB} , β_{BC} и β_{BD} всегда приводит к быстрому затуханию или даже полному подавлению крутильных колебаний.

Полученные компьютерные графики изменения моментов сил упругости M_{AB} , M_{BC} и M_{BD} на десятисекундном временном интервале $t \in [0, T_n]$ служат наглядным доказательством адекватного поведения построенной компьютерной модели.

Список литературы

1. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах. — Мариуполь: ПГТУ, 2008. — 246с.
2. Подковырин Е.Я., Веренев В.В. Диагностическая информативность момента сил упругости в линии привода валков прокатного стана. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2015. №7. — С. 162 — 165.
3. Смирнов В.В., Яковлев Р.А. Механика приводов прокатных станов — М.: Металлургия, 1977. — 216с.
4. Колесников А.Г., Яковлев Р.А., Мальцев А.А. Технологическое оборудование прокатного производства / А.Г. Колесников. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. — 158с.
5. Мальцев А.А. Идентификация параметров крутильно-колебательной модели электропривода клетки дуо-450. Инженерный вестник. 2017. №07. 17 с. [Электронный ресурс] <http://engsi.ru/doc/860317.html> (дата обращения: 10.08.2019)

References

1. Artyukh V.G. Loads and overloads in metallurgical machines. — Mariupol: PSTU, 2008. — 246 p.
2. Podkovyrin E.J., Werenew V.V. Diagnostic information content of the moment of forces of elasticity in the line of drive of the rollers of the rolling mill. Metallurgical and mining industry. 2015. No. 7. — P. 162 — 165.
3. Smirnov V.V., Yakovlev R.A. Mechanics of rolling mill drives — M.: Metallurgy, 1977. — 216 p.
4. Kolesnikov A.G., Yakovlev R.A., Maltsev A. A. Technological equipment of rolling production / A.G. Kolesnikov. M.: Publisher BMSTU. 2014. — 158s.
5. Maltsev A. A. Identification of parameters of the torsional-oscillatory model of the electric drive crate Duo-450. Engineering Bulletin. 2017. No. 07. 17 p. [Electronic resource] <http://engsi.ru/doc/860317.html> (date of application: 10.08.2019).