

УДК 62.83

UDC 62.83

**РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ
ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММЫ
ДЛЯ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИНЕРЦИОННЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И УПРУГИМ
ВАЛОПРОВОДОМ**

**DEVELOPING AN OPTIMUM PERFORMANCE
DIAGRAM FOR MEDIUM MOVEMENT OF
EXECUTIVE UNIT OF INERTIAL CONVER-
TOR-EQUIPPED ELECTRICAL DRIVE WITH
ELASTIC SHAFTING**

Барандыч Виктор Юрьевич
аспирант
*Кубанский государственный технологический
университет, Краснодар, Россия*

Barandych Victor Yurievich
postgraduate student
*Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russia*

В различных отраслях металлообрабатывающей промышленности автоматизация технологических процессов осуществляется на основе позиционных электроприводов с инерционными преобразователями. Автор проанализировал ранее разработанную оптимальную по быстродействию диаграмму для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом и разработал оптимальную по быстродействию диаграмму для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом

In various branches of the metalworking industry, the automation of technological processes is based on the use of inertial convertor-equipped positional electrical drives. The author has analyzed an optimum performance diagram for medium movement of executive unit of the inertial convertor-equipped electrical drive with ideal shafting that had been developed before, and has developed an optimum performance diagram for medium movement of executive unit of the inertial convertor-equipped electrical drive with elastic shafting

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОПРИВОД, ДИАГРАММЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ОГРАНИЧЕНИЯ, ЭТАПЫ, ЗАВИСИМОСТИ, ВАЛОПРОВОД

Keywords: ELECTRICAL DRIVE, MOVEMENT DIAGRAMS, LIMITATIONS, STAGES, DEPENDENCIES, SHAFTING

При изготовлении детали на металлообрабатывающем станке необходимо контролировать расхождение результата и теоретического задания. Для оценки качества созданной детали принят ряд показателей.

Основными показателями качества металлообработки на станках являются точность, шероховатость и волнистость обработанных деталей. Точность определяется оценками соответствия размеров и формы деталей заданным значениям; шероховатость – разности между максимальной и минимальной высотами кривой сечения обработанных поверхностей; волнистость поверхности – это периодически повторяющиеся и близкие по размерам неровности, расстояние между которыми значительно больше, чем у шероховатостей. Отклонения от заданных нормированных значений точности и шероховатости возникают: из-за кинематических погрешностей

станка, упругих деформаций в механической системе «станок – приспособление – деталь»; возмущений систем управления приводов подач; изменений усилий резания и подач из-за неоднородности обрабатываемого материала и изменения качества инструмента; недостаточного быстродействия и неоптимальности настройки регуляторов систем управления движением механизмов станка. Волнистость поверхности вызывается колебаниями системы «станок – приспособление – деталь».

Шероховатость и волнистость поверхности взаимосвязаны с точностью размеров; при высокой точности шероховатость и волнистость имеют малые величины.

Все вышесказанное свидетельствует о том, что на качество металлообработки оказывают существенное влияние динамические характеристики электроприводов станка. При повышении скорости обработки деталей снижается точность их изготовления за счет недостаточно большого быстродействия систем автоматического управления электроприводов. Кроме того, на точность обработки деталей существенно влияют: упругость вала-провода, настройки регуляторов, нелинейность системы и варьирование параметров ее силовой части.

Для повышения качества металлообработки на станках предлагается создать систему автоматического управления перемещением инструмента прецизионного металлорежущего станка, малочувствительную к изменению внутренних параметров и внешних воздействий, обладающую высокой степенью точности и производительности.

Проблема создания системы автоматического управления перемещением инструмента прецизионного металлорежущего станка, формирующей управляющий сигнал и обрабатывающей его, является очень сложной. Поэтому для упрощения решения поставленной задачи предлагается представить систему автоматического управления перемещением инструмента металлорежущего станка как электротехнический комплекс, состоящий из

устройства для формирования управляющего сигнала (командоаппарата) и системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода. Задача разработки системы автоматического управления перемещением инструмента прецизионного металлорежущего станка реализуется посредством:

- разработки устройств формирования сигналов, соответствующих оптимальным по быстродействию диаграммам перемещения исполнительного органа электропривода;

- синтеза систем автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода, обрабатывающих сигналы и соответствующих оптимальным по быстродействию диаграммам перемещения исполнительного органа электропривода.

Автоматизация технологических процессов металлообрабатывающей промышленности, зачастую, осуществляется на основе позиционных электроприводов с инерционными преобразователями как с идеальными (безредукторными), так и с упругими (с редуктором) валопроводами.

В статье [1] разработаны для позиционных электроприводов с инерционными преобразователями и идеальными валопроводами следующие три вида оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения:

- диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода с ограничениями второй и третьей производных скорости, состоящая из семи этапов;

- диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода с ограничениями первой, второй и третьей производных скорости, состоящая из одиннадцати этапов;

- диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с ограничениями скорости и ее первой, второй и третьей производных, состоящая из пятнадцати этапов.

В существующих оптимальных по быстродействию диаграммах перемещения исполнительных органов электроприводов с инерционными преобразователями не учтена упругость валопроводов, что приводит к снижению основных показателей качества металлообработки на станках.

При участии автора разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом [2] и получен патент на полезную модель "устройство для формирования сигнала, соответствующего оптимальной по быстродействию диаграмме для малых перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом" [3].

В данной работе предлагается подробно проанализировать ранее разработанную авторами оптимальную по быстродействию диаграмму для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным (безредукторным) валопроводом и выявить информационные признаки, которые позволят сформулировать идеологию разработки оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений электропривода с инерционным преобразователем и упругим (с редуктором) валопроводом.

Математическая модель позиционного электропривода с двигателем постоянного тока, с инерционным преобразователем и упругим валопроводом описывается системой дифференциальных уравнений шестого порядка [4]:

$$K_{тп} U_{упр} = U + T_{\mu} \cdot \frac{dU}{dt};$$
$$U = C_e \omega_1 + R_{я} I_{я} + L_{я} \cdot \frac{dI_{я}}{dt};$$
$$C_M I_{я} = M_y + J_1 \cdot \frac{dV_1}{dt};$$

$$\frac{dS_1}{dt} = V_1;$$

$$M_y = M_c + J_2 \cdot \frac{dV_2}{dt};$$

$$M_y = C_y(S_1 - S_2);$$

$$\frac{dS_2}{dt} = V_2,$$

где $U_{\text{упр}}$ – напряжение управления, В;

U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;

ω_1 – угловая скорость исполнительного органа электродвигателя, рад/с;

V_1 – скорость исполнительного органа электродвигателя, рад/с;

V_2 – скорость исполнительного органа механизма, рад/с;

S_1 – приведенное значение перемещения исполнительного органа электродвигателя, м;

S_2 – приведенное значение перемещения исполнительного органа механизма, м;

M_c – момент сопротивления электропривода, Н·м;

M_y – момент упругий (момент в валопроводе), Н·м;

$K_{\text{ТП}}$ – коэффициент пропорциональности инерционного преобразователя;

T_{μ} – постоянная времени инерционного преобразователя, с;

C_e – коэффициент пропорциональности между скоростью исполнительного органа и ЭДС электродвигателя, В·с/м;

C_m – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;

C_y – жесткость валопровода, Н·м/рад;

$R_я$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

$L_я$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;

J_1 – момент инерции исполнительного органа электродвигателя, кг·м²;

J_2 – момент инерции исполнительного органа механизма, кг·м².

Электропривод совершает перемещение исполнительного органа механизма за минимально возможное время при наличии ограничений по скорости и её первой и второй производным:

$$-V_{\text{доп}} \leq V_2(t) \leq V_{\text{доп}};$$

$$-V_{\text{доп}}^{(1)} \leq V_2^{(1)}(t) \leq V_{\text{доп}}^{(1)};$$

$$-V_{\text{доп}}^{(2)} \leq V_2^{(2)}(t) \leq V_{\text{доп}}^{(2)}.$$

где $V_{\text{доп}}$ – допустимое значение скорости исполнительного органа механизма, м/с;

$V_{\text{доп}}^{(1)}$ – допустимое значение первой производной скорости исполнительного органа механизма, м/с²;

$V_{\text{доп}}^{(2)}$ – допустимое значение второй производной скорости исполнительного органа механизма, м/с³.

Критерий оптимизации – быстроедействие.

По технологическим и техническим требованиям на электропривод с упругим валопроводом накладываются ограничения:

$$-I_{\text{доп}} \leq I_я(t) \leq I_{\text{доп}};$$

$$-U_{\text{доп}} \leq U(t) \leq U_{\text{доп}},$$

где $U_{\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{\text{доп}}$ – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;

Начальные значения контролируемых координат:

$$U(0) = \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_{\text{м}}}; \quad I_{\text{я}}(0) = \frac{M_{\text{с}}}{C_{\text{м}}}; \quad I_{\text{я}}^{(1)}(0) = 0;$$

$$S_2(0) = S_{\text{нач}}; \quad V_2(0) = 0; \quad V_2^{(1)}(0) = 0;$$

$$V_2^{(2)}(0) = 0; \quad V_2^{(3)}(0) = 0; \quad V_2^{(4)}(0) = 0; \quad V_2^{(5)}(0) = 0,$$

где $S_{\text{нач}}$ – начальное значение перемещения исполнительного органа электропривода, м.

Конечные значения контролируемых координат:

$$U(T_{\text{ц}}) = \frac{R_{\text{я}} M_{\text{с}}}{C_{\text{м}}}; \quad I_{\text{я}}(T_{\text{ц}}) = \frac{M_{\text{с}}}{C_{\text{м}}}; \quad I_{\text{я}}^{(1)}(T_{\text{ц}}) = 0;$$

$$S_2(T_{\text{ц}}) = S_{\text{кон}}; \quad V_2(T_{\text{ц}}) = 0; \quad V_2^{(1)}(T_{\text{ц}}) = 0;$$

$$V_2^{(2)}(T_{\text{ц}}) = 0; \quad V_2^{(3)}(T_{\text{ц}}) = 0; \quad V_2^{(4)}(T_{\text{ц}}) = 0; \quad V_2^{(5)}(T_{\text{ц}}) = 0,$$

где $S_{\text{кон}}$ – конечное значение перемещения исполнительного органа электропривода, м.

Предложено использовать ограничения по скорости исполнительного органа электропривода и её производных. При этом командоаппарат формирует требуемые оптимальные по быстродействию диаграммы перемещений электроприводов, а система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода отрабатывает заданный сигнал с малой чувствительностью к изменению параметров системы автоматического управления перемещением инструмента прецизионного металлорежущего станка.

Согласно принципу максимумов академика Л.С. Понтрягина, управляющее воздействие должно быть прямоугольной формы, достигая своего максимального и минимального значений [5]. Согласно теореме об n – интервалах А.А. Фельдбаума, минимально возможное количество интервалов диаграммы перемещения равно порядку системы, описывающей матема-

тическую модель, при условии отсутствия дополнительных ограничений [6].

Так как математическая модель электропривода постоянного тока с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом представляет собой систему дифференциальных уравнений четвертого порядка, то скачкообразное изменение величины напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, приведет к скачкообразному изменению величины четвертой производной перемещения (третьей производной скорости) исполнительного органа электропривода. Поэтому для реализации оптимального по быстродействию движения позиционных электроприводов с инерционными преобразователями и идеальными валопроводами предлагается формировать зависимость третьей производной скорости исполнительных органов электроприводов от времени. При этом изменение величины второй производной скорости исполнительного органа электропривода от одной величины до другой величины осуществимо за один этап.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом (зависимости: перемещения исполнительного органа механизма от времени $S = f_1(t)$; скорости исполнительного органа электропривода от времени $V = f_2(t)$; первой, второй и третьей производных скорости исполнительного органа электропривода от времени $V^{(1)} = f_3(t)$, $V^{(2)} = f_4(t)$, $V^{(3)} = f_5(t)$).

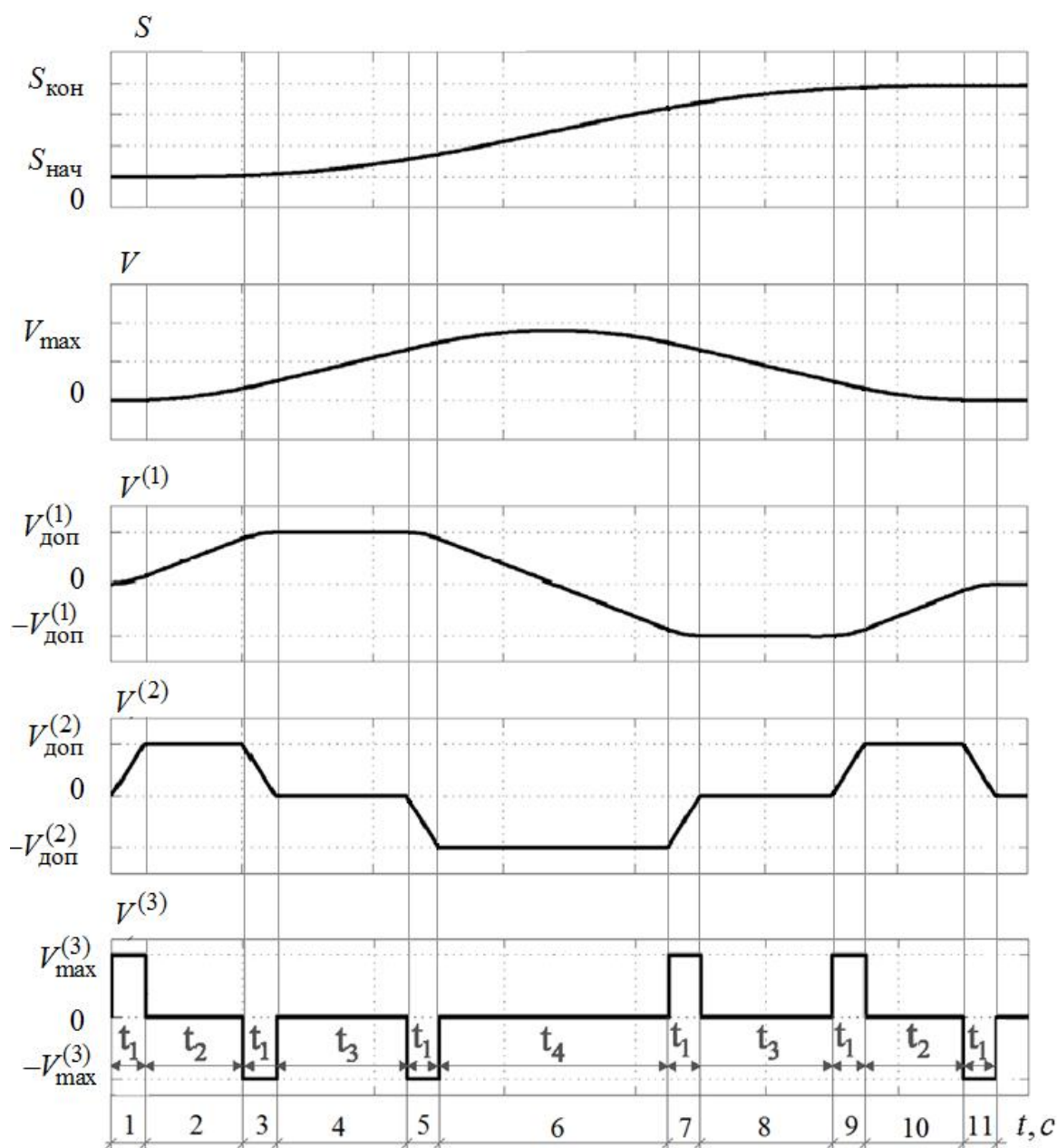


Рисунок 1. Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом

Диаграмма состоит из одиннадцати этапов. На первом, седьмом и девятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $V_{\max}^{(3)}$; на третьем, пятом и одиннадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком “минус”

$-V_{\max}^{(3)}$; на втором, четвертом, шестом, восьмом и десятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого, третьего, пятого, седьмого, девятого и одиннадцатого этапов равна t_1 ; длительность второго и десятого этапов – t_2 ; длительность четвертого и восьмого этапов – t_3 ; длительность шестого этапа – t_4 . На втором и десятом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $V_{\text{доп}}^{(2)}$; на шестом этапе вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком “минус” $-V_{\text{доп}}^{(2)}$; на четвертом и восьмом этапе вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. На четвертом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $V_{\text{доп}}^{(1)}$; на восьмом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода – максимально допустимому значению со знаком “минус” $-V_{\text{доп}}^{(1)}$. В момент времени $(3t_1 + t_2 + t_3 + \frac{1}{2}t_4)$ скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения V_{\max} . Положение исполнительного органа электропривода увеличивается от начального значения $S_{\text{нач}}$ до конечного значения $S_{\text{кон}}$.

Для данной диаграммы справедливы соотношения:

$$t_1 = \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\max}^{(3)}};$$

$$t_2 = \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\max}^{(3)}};$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}}{V_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(3)}};$$

$$t_4 = 2 \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(3)}};$$

$$T_{\text{ц}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}}{V_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} + \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(3)}};$$

$$V_{\text{макс}} = V_{\text{доп}}^{(1)} \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}}{V_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[V_{\text{доп}}^{(1)} \right]^2}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{1}{24} \cdot \frac{\left[V_{\text{доп}}^{(2)} \right]^3}{\left[V_{\text{макс}}^{(3)} \right]^2},$$

где $T_{\text{ц}}$ – длительность цикла.

Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом справедлива при выполнении условий:

$$S_{\text{гр.1}} \leq (S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}) \leq S_{\text{гр.2}},$$

где $S_{\text{гр.1}} = V_{\text{доп}}^{(1)} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(3)}} \right] \cdot \left[2 \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(3)}} \right];$

$$S_{\text{гр.2}} = \left\{ w_{\text{доп}} + \frac{1}{24} \cdot \frac{\left[w_{\text{доп}}^{(2)} \right]^3}{\left[w_{\text{макс}}^{(3)} \right]^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{w_{\text{доп}}}{w_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{w_{\text{доп}}^{(1)}}{w_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{1}{24} \cdot \frac{w_{\text{доп}}^{(2)}}{w_{\text{доп}}^{(1)}} \cdot \left[\frac{w_{\text{доп}}^{(2)}}{w_{\text{доп}}^{(3)}} \right]^2 \right\}.$$

Так как математическая модель электропривода постоянного тока с инерционным преобразователем и упругим валопроводом представляет собой систему дифференциальных уравнений шестого порядка, то скачкообразное изменение величины напряжения, приложенного к якорной цепи

электродвигателя, приводит к скачкообразному изменению величины шестой производной перемещения (пятой производной скорости) исполнительного органа механизма. Поэтому для реализации оптимального по быстродействию движения позиционного электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом предлагается формировать зависимость пятой производной скорости исполнительных органов механизмов от времени. При этом изменение величины второй производной скорости исполнительного органа механизма от одной величины до другой осуществимо за три этапа.

На рисунке 2 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом (зависимости: перемещения исполнительного органа механизма от времени $S_2 = f_1(t)$; скорости исполнительного органа механизма от времени $V_2 = f_2(t)$; первой, второй, третьей, четвертой и пятой производных скорости исполнительного органа механизма от времени $V_2^{(1)} = f_3(t)$, $V_2^{(2)} = f_4(t)$, $V_2^{(3)} = f_5(t)$, $V_2^{(4)} = f_6(t)$ и $V_2^{(5)} = f_7(t)$).

Диаграмма состоит из двадцати трех этапов. На первом, третьем, шестом, десятом, тринадцатом, пятнадцатом, семнадцатом, девятнадцатом и двадцать втором этапах пятая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $V_{\max}^{(5)}$; на втором, пятом, седьмом, девятом, одиннадцатом, четырнадцатом, восемнадцатом, двадцать первом и двадцать третьем этапах пятая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком “минус” $-V_{\max}^{(5)}$.

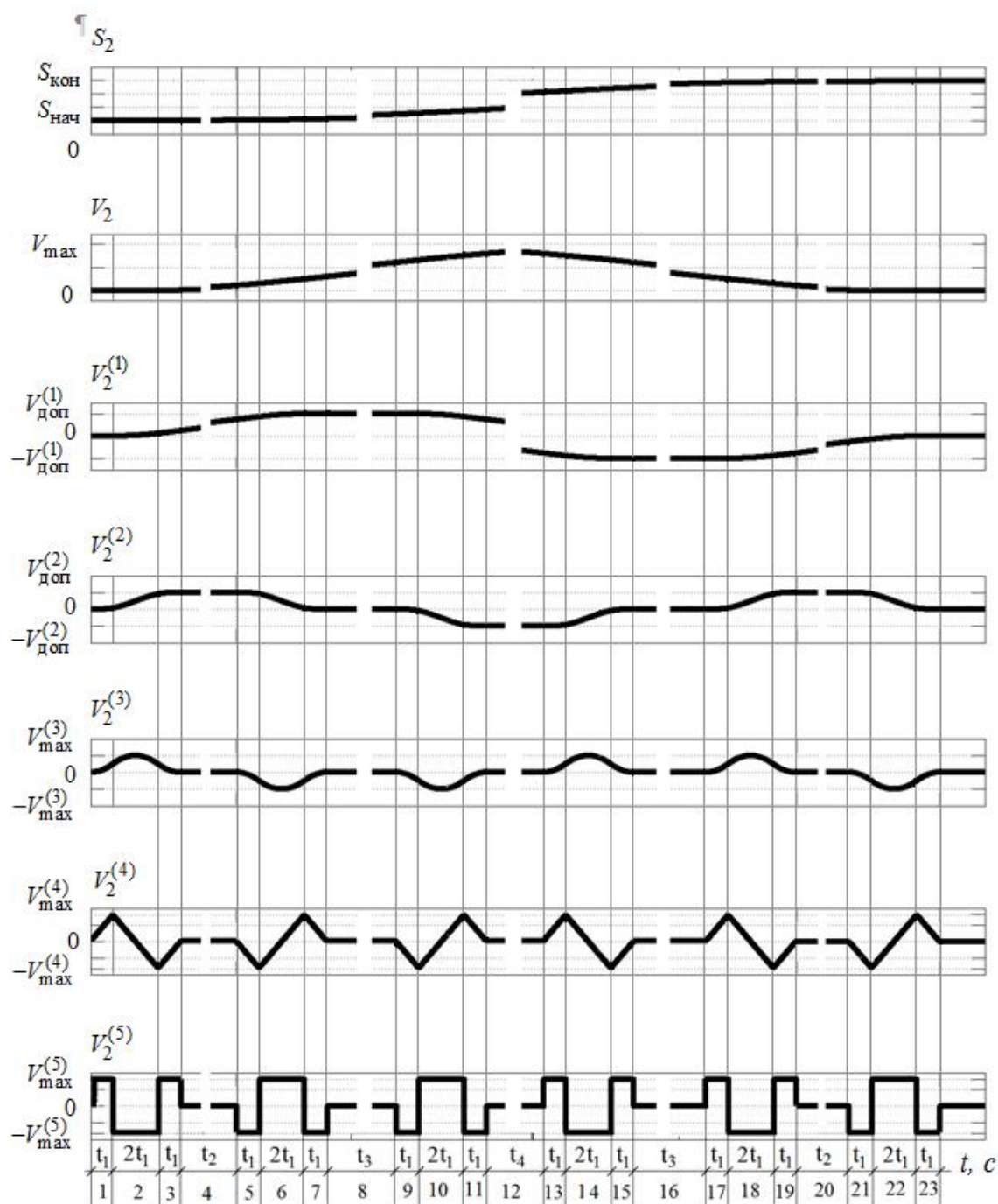


Рисунок 2. Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом

На четвертом, восьмом, двенадцатом, шестнадцатом и двадцатом этапах пятая производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого, третьего, пятого, седьмого, девятого, одиннадцатого, тринадцатого, пятнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцать первого и двадцать третьего этапов равна t_1 ; длительность

второго, шестого, десятого, четырнадцатого, восемнадцатого и двадцать второго этапов равна $2t_1$; длительность четвертого и двадцатого этапов – t_2 ; длительность восьмого и шестнадцатого этапов – t_3 ; длительность двенадцатого этапа – t_4 . В моменты времени $t_1, (7t_1 + t_2), (11t_1 + t_2 + t_3), (13t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$ четвертая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $V_{\max}^{(4)}$. В моменты времени $3t_1, (5t_1 + t_2), (9t_1 + t_2 + t_3), (15t_1 + t_2 + t_3 + t_4), (19t_1 + t_2 + 2t_3 + t_4), (21t_1 + 2t_2 + 2t_3 + t_4)$ четвертая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком “минус” $-V_{\max}^{(4)}$. На четвертом, восьмом, двенадцатом, шестнадцатом и двадцатом этапах четвертая производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. В моменты времени $2t_1, (14t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$ и $(18t_1 + t_2 + 2t_3 + t_4)$ третья производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $V_{\max}^{(3)}$. В моменты времени $(6t_1 + t_2), (10t_1 + t_2 + t_3), (22t_1 + 2t_2 + 2t_3 + t_4)$ третья производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком “минус” $-V_{\max}^{(3)}$. На четвертом, восьмом, двенадцатом, шестнадцатом и двадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. На четвертом и двадцатом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $V_{\text{доп}}^{(2)}$; на двенадцатом этапе вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком “минус” $-V_{\text{доп}}^{(2)}$. На восьмом и шестнадцатом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. На восьмом этапе первая

производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $V_{\text{доп}}^{(1)}$; на шестнадцатом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода – максимально допустимому значению со знаком “минус” $-V_{\text{доп}}^{(1)}$. В момент времени $(12t_1 + t_2 + t_3 + \frac{1}{2}t_4)$ скорость исполнительного органа механизма достигает максимального значения $V_{\text{макс}}$.

Перемещение исполнительного органа электропривода увеличивается от начального значения $S_{\text{нач}}$ до конечного значения $S_{\text{кон}}$.

Для данной диаграммы справедливы соотношения:

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{1}{2} \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(5)}}};$$

$$t_2 = \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - 4 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{макс}}^{(2)}}};$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}}{V_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - 4 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(5)}}};$$

$$t_4 = 2 \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - 4 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(5)}}};$$

$$T_{\text{ц}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}}{V_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} + \frac{V_{\text{доп}}^{(1)}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} + 4 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{макс}}^{(5)}}};$$

$$V_{\text{макс}}^{(4)} = V_{\text{макс}}^{(5)} \cdot t_1;$$

$$V_{\text{макс}}^{(3)} = V_{\text{макс}}^{(5)} \cdot t_1^2;$$

$$V_{\max} = V_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{127}{4} t_1^2 + 12 t_1 t_2 + t_2^2 \right) + (4 t_1 + t_2) \cdot t_3 \right].$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом справедлива при выполнении условий:

$$S_{\text{гр.1}} \leq (S_{\text{кон}} - S_{\text{нач}}) \leq S_{\text{гр.2}},$$

$$\text{где } S_{\text{гр.1}} = 2V_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (6t_1 + t_2) \cdot (8t_1 + t_2);$$

$$S_{\text{гр.2}} = V_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[t_{3\max}^3 + (20t_1 + 3t_2) \cdot t_{3\max} + (96t_1^2 + 28t_1 t_2 + 2t_2^2) \right];$$

$$t_{3\max} = \frac{1}{4t_1 + t_2} \cdot \left[\frac{V_{\text{доп}}}{V_{\text{доп}}^{(2)}} - \left(\frac{127}{4} t_1^2 + 12t_1 t_2 + t_2^2 \right) \right].$$

Разница по времени между диаграммой для средних перемещений электроприводов с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом и диаграммой для средних перемещений электроприводов с инерционным преобразователем и упругим валопроводом составляет:

$$\square T_{\text{ц}} = 4 \cdot 3 \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{max}}^{(5)}} - \frac{V_{\text{доп}}^{(2)}}{V_{\text{max}}^{(3)}}}.$$

Если $V_{\text{доп}}^{(2)} = 2 \text{ м/с}^2$, $V_{\text{max}}^{(3)} = 200 \text{ м/с}^4$ и $V_{\text{max}}^{(5)} = 320000 \text{ м/с}^6$, то

$$\square T_{\text{ц}} = 0,048480354 \text{ с.}$$

Отработка задания происходит долго, однако погрешность перемещения отсутствует, обусловленная упругостью валопровода.

Выводы

При разработке существующих оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительных органов электроприводов с инерционными преобразователями не учтена упругость валопроводов, что при-

ведёт при их реализации к снижению основных показателей качества металлообработки на станках.

Разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом, определены её параметры и условия существования.

Найдена аналитическая зависимость отставания по времени оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом от оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и идеальным валопроводом.

Полученные результаты позволяют перейти к разработке устройства для формирования сигнала, соответствующего оптимальной по быстродействию диаграмме для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом. Это, совместно с синтезом системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода, позволит решить задачу разработки системы автоматического управления перемещением инструмента прецизионного металлорежущего станка.

Список литературы

1. Добробаба Ю.П., Барандыч В.Ю. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения электроприводов с инерционными преобразователями и идеальными валопроводами // Известия вузов. Пищевая технология. 2008. № 5–6. С. 110 ÷ 112.
2. Добробаба Ю.П., Барандыч В. Ю. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм для малых перемещений исполнительных органов электроприводов с инерционными преобразователями // Известия вузов. Пищевая технология. 2010. № 5–6. С. 96 ÷ 98.
3. Пат. на полезную модель № 97577, Н 02 Р 7/14 (2006.01). Устройство для формирования сигнала, соответствующего оптимальной по быстродействию диаграмме для малых перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным пре-

образователем и идеальным валопроводом / Ю.П. Добробаба, В.Ю. Барандыч, Ю.В Колоненко // от 10.09.2010, бюл. № 25/.

4. Ключев В.И. Теория электропривода // Энергоатомиздат., 2001. 704 с.

5. Математическая теория оптимальных процессов. 4-е изд., стереотипное / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. М.: Наука, 1983. 393 с.

6. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Физматгиз, 1963. 553 с.