

УДК 62.83.52:62.503.56

**РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММ
ДЛЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**DEVELOPMENT TIME-OPTIMAL CHARTS
FOR SMALL CHANGES IN THE ANGULAR VELOCITY
OF THE EXECUTIVE BODY OF THE ELECTRIC DRIVE**

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный
технологический университет
itstimetoprivod@yahoo.com

Кошкин Гордей Анатольевич

кандидат технических наук,
начальник цеха,
НКУ, ООО «Прогресс»

Овсиенко Виктория Александровна

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
alexandrovnava32@mail.ru

Цыганов Дмитрий Юрьевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

Щигринов Евгений Сергеевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

Аннотация. Для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода разработаны двухэтапные оптимальные по быстродействию диаграммы. Получено математическое обеспечение, позволяющее определить параметры двухэтапных оптимальных по быстродействию диаграмм для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода.

Ключевые слова: двухэтапная оптимальная по быстродействию диаграмма, малые изменения угловой скорости, исполнительный орган электропривода.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate professor, professor of department
of power supply industrial enterprises,
Kuban state technological university
itstimetoprivod@yahoo.com

Koshkin Gordey Anatolyevich

Candidate of technical sciences,
Foreman,
NKU, LLCProgress

Ovsiyenko Victoria Aleksandrovna

Student,
Kuban state technological university
alexandrovnava32@mail.ru

Tsyganov Dmitry Yuryevich

Student,
Kuban state technological university

Shchigrinov Evgeny Sergeyevich

Student,
Kuban state technological university

Annotation. For small changes in the angular velocity of the executive body of the electric drive developed a two-stage time-optimal charts. Received mathematical support, allowing to define the parameters of the two-stage time-optimal charts for small changes in the angular velocity of the executive body of the electric drive.

Keywords: two-stage time-optimal charts, large changes in the angular velocity, executive body of the electric drive.

Математическая модель силовой части электрического привода постоянного тока:

$$U(t) = C_e \cdot \omega(t) + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(t) + L_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^{(1)}(t);$$

$$C_M \cdot I_{\text{я}}(t) = M_C(t) + J \cdot \omega^{(1)}(t);$$

$$M_C(t) = M_{C0} = \text{const};$$

где U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, B ; C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя,

$\frac{B \cdot c}{\text{рад}}$; ω – угловая скорость электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом; $I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн; C_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В · с; M_C – момент сопротивления электропривода, Н·м; J – момент инерции электропривода, кг·м².

Критерий оптимизации:

$$\int_0^{T_{\text{ц}}} dt = \min ,$$

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

По технологическим и техническим требованиям на координаты электропривода накладываются ограничения:

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

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

$$-\omega_{\text{доп}} \leq \omega(t) \leq \omega_{\text{доп}}$$

где $U_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, В; $I_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А; $\omega_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Начальное значение контролируемых координат:

$$U(0) = C_e \cdot \omega_{\text{нач}} + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} ;$$

$$I_{\text{я}}(0) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} ;$$

$$\omega(0) = \omega_{\text{нач}} ,$$

где $\omega_{\text{нач}}$ – начальное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Конечное значение контролируемых координат:

$$U(T) = C_e \cdot \omega_{\text{нач}} + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} ;$$

$$I_{\text{я}}(T) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} ;$$

$$\omega(T) = \omega_{\text{нач}} ,$$

где $\omega_{\text{кон}}$ – конечное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$\frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M} > 4 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} .$$

Анализ характеристического уравнения показывает, что возможны три расклада его корней и соответственно три вида переходных процессов.

При выполнении условия:

$$\frac{R_{я}J}{C_e C_M} > 4 \cdot \frac{L_{я}}{R_{я}},$$

характеристическое уравнение системы имеет вид первый:

$$(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) = 0,$$

$$\text{Где } T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{я}J}{C_e C_M} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{R_{я}^2 \cdot J^2}{C_e^2 C_M^2} - \frac{L_{я}J}{C_e C_M}}; T_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{я}J}{C_e C_M} - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{R_{я}^2 \cdot J^2}{C_e^2 C_M^2} - \frac{L_{я}J}{C_e C_M}}.$$

При выполнении условия:

$$\frac{R_{я}J}{C_e C_M} = 4 \cdot \frac{L_{я}}{R_{я}},$$

характеристическое уравнение системы имеет вид второй:

$$(Tp + 1)^2 = 0,$$

$$\text{где } T = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{я}J}{C_e C_M}.$$

При выполнении условия:

$$\frac{R_{я}J}{C_e C_M} < 4 \cdot \frac{L_{я}}{R_{я}}.$$

характеристическое уравнение системы имеет вид третий:

$$(T^2 p^2 + 2\varepsilon Tp + 1) = 0,$$

$$\text{где } T = \sqrt{\frac{L_{я}J}{C_e C_M}}; \xi = \frac{1}{2} R_{я} \cdot \sqrt{\frac{J}{L_{я} C_e C_M}}, \text{ при этом } \xi < 1.$$

Таким образом, в зависимости от заданного значения изменения угловой скорости исполнительного органа электропривода, возможны две различные оптимальные по быстродействию диаграммы соответственно для малых и для больших изменений угловой скорости электропривода. При этом в зависимости от соотношения параметров электропривода возможны три вида диаграмм.

Оптимальная по быстродействию диаграмма первого вида для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода

Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$:

$$U(t) = U_{доп};$$

$$\omega(t) = A_1 \cdot e^{\frac{t}{T_1}} + B_1 \cdot e^{\frac{t}{T_2}} + C_1;$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{CO} - \frac{J}{C_M} \cdot \left(\frac{A_1}{T_1} \cdot e^{\frac{t}{T_1}} + \frac{B_1}{T_2} \cdot e^{\frac{t}{T_2}} \right).$$

$$\text{где } A_1 = -\frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right); \quad B_1 = -\frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right);$$

$$C_1 = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

Этап 2. В интервале времени $0 \leq t \leq (t_1 + t_2)$;

$$U(t) = -U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_2 \cdot e^{\frac{t-t_1}{T_1}} + B_2 \cdot e^{\frac{t-t_1}{T_2}} + C_2;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} - \frac{J}{C_M} \cdot \left(\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{\frac{t-t_1}{T_1}} + \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{\frac{t-t_1}{T_2}} \right).$$

$$\text{где } A_2 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t}{T_1}} \right];$$

$$B_2 = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t}{T_2}} \right];$$

$$C_2 = -\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

Длительности этапов t_1 и t_2 определяются из системы уравнений:

$$\left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T_1}} \right] \cdot e^{\frac{t_2}{T_1}} = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right);$$

$$\left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot e^{\frac{t_2}{T_2}} = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right)$$

Длительность цикла равна:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2.$$

Если ток в конце первого этапа равен максимально допустимому току, то:
 $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = \omega_{\text{ер}}$.

При этом длительность первого этапа t_1 определяется из уравнения:

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (T_1 - T_2) = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot \left(e^{\frac{t_1}{T_1}} - e^{\frac{t_1}{T_2}} \right).$$

Длительность второго этапа t_2 вычисляется по формуле:

$$t_2 = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T_2}}}{2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T_1}}}.$$

Граничное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{\text{зр}} = \left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \right] \cdot e^{\frac{t_2}{T}} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) - \omega_{\text{нач}}.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма второго вида для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода

Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$:

$$U(t) = U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_1 \cdot e^{\frac{t}{T}} + B_1 \cdot t \cdot e^{\frac{t}{T}} + C_1;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} - \frac{J}{C_M} \cdot \left(\frac{A_1}{T} \cdot e^{\frac{t}{T}} - B_1 \cdot e^{\frac{t}{T}} + B_1 \cdot \frac{t}{T} \cdot e^{\frac{t}{T}} \right).$$

где $A_1 = - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right)$; $B_1 = - \frac{1}{T} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right)$;

$$C_1 = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

Этап 2. В интервале времени $0 \leq t \leq (t_1 + t_2)$:

$$U(t) = -U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_2 \cdot e^{\frac{t-t_1}{T}} + B_2 \cdot (t-t_1) \cdot e^{\frac{t-t_1}{T}} + C_2;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} - \frac{J}{C_M} \cdot \left(\frac{A_2}{T} \cdot e^{\frac{t-t_1}{T}} - B_2 \cdot e^{\frac{t-t_1}{T}} + B_2 \cdot \frac{t-t_1}{T} \cdot e^{\frac{t-t_1}{T}} \right).$$

где $A_2 = 2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot \left(1 + \frac{t_1}{T} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}}$;

$$B_2 = \frac{2}{T} \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{1}{T} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}};$$

$$C_2 = - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

Длительности этапов t_1 и t_2 определяются из системы уравнений:

$$\left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot \left(1 + \frac{t_1}{T} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \right] \cdot e^{\frac{t_2}{T}} = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right) \cdot \left(1 - \frac{t_2}{T} \right);$$

$$\left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \right] \cdot e^{\frac{t_2}{T}} = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right)$$

Длительность цикла равна:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2$$

Если ток в конце первого этапа равен максимально допустимому току, то $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = \omega_{\text{зр}}$.

При этом длительность первого этапа t_1 определяется из уравнения:

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{CO}}{J} \cdot T = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot \frac{t_1}{T} \cdot e^{\frac{t_1}{T}}.$$

Длительность второго этапа t_2 вычисляется по формуле:

$$t_2 = \frac{\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}}}{2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}}} \cdot t_1.$$

Граничное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{\text{зр}} = \left[2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \right] \cdot e^{\frac{t_2}{T}} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right) - \omega_{\text{нач}}.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмматретьеговида для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода

Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$:

$$U(t) = U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_1 \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T}\right) + B_1 \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T}\right) + C_1;$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{CO} - \frac{J}{C_M} \cdot \left[\xi \cdot \frac{A_1}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T}\right) - \sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{A_1}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T}\right) + \xi \cdot \frac{B_1}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T}\right) + \sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{B_1}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T}\right) \right],$$

$$\text{где } A_1 = -\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right); \quad B_1 = -\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right);$$

$$C_1 = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right).$$

Этап 2. В интервале времени $0 \leq t \leq (t_1 + t_2)$:

$$U(t) = -U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_2 \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1}{T}\right) + B_2 \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1}{T}\right) + C_2;$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{CO} - \frac{J}{C_M} \cdot \left[\xi \cdot \frac{A_2}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1}{T}\right) - \sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{A_2}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1}{T}\right) + \xi \cdot \frac{B_2}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1}{T}\right) + \sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{B_2}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1}{T}\right) \right],$$

$$\begin{aligned} \text{где } A_2 &= 2 \cdot \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) + \\ &+ \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right); \\ B_2 &= 2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) - \\ &- \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right); \\ C_1 &= - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right). \end{aligned}$$

Длительности этапов t_1 и t_2 определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) = \\ &= \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_2}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_2}{T}\right); \\ &2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) = \\ &= \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_2}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_2}{T}\right). \end{aligned}$$

Длительность цикла равна:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2$$

Если ток в конце первого этапа равен максимально допустимому току, то $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = \omega_{\text{эр}}$.

При этом длительность первого этапа t_1 определяется из уравнения

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot T = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right).$$

Длительность второго этапа t_2 вычисляется по формуле:

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} = \operatorname{arctg} \frac{\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right)}{2 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right)}.$$

Граничное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{\text{эр}} = \left[\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) \right] \cdot e^{-\xi \frac{t_2}{T}} \cdot \frac{1}{\sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_2}{T}\right)} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) - \omega_{\text{нач}}.$$

Выводы

Таким образом, разработаны три вида двухэтапных оптимальных по быстродействию диаграмм для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода.

Получен алгоритм для определения длительностей этапов двухэтапных оптимальных по быстрдействию диаграмм для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода.