

УДК 62.83.52:62.503.56

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

**DEVELOPMENT TIME-OPTIMAL CHARTS  
FOR LARGE 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  
alexandrovnav32@mail.ru.

**Ковалев Роман Владимирович**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Щигринов Евгений Сергеевич**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Аннотация.** Для больших изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода разработаны трехэтапные оптимальные по быстродействию диаграммы. Получен алгоритм, позволяющий определить длительности этапов трехэтапных оптимальных по быстродействию диаграмм для больших изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода.

**Ключевые слова:** трехэтапные оптимальные по быстродействию диаграммы, большие 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  
alexandrovnav32@mail.ru.

**Kovalyov Roman Vladimirovich**

Student,  
Kuban state technological university

**Shchigrinov Evgeny Sergeyeovich**

Student,  
Kuban state technological university

**Annotation.** For large changes in the angular velocity of the executive body of the electric drive developed a three-stage time-optimal charts. The resulting algorithm, allowing to determine the duration of stages three-stage time-optimal charts for large changes in the angular velocity of the executive body of the electric drive.

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

Математическая модель силовой части электрического привода постоянного тока, обозначения параметров силовой части электрического привода постоянного тока, критерий оптимизации, начальное и конечное значения контролируемых координат, характеристическое уравнение и его корни представлены в предыдущей статье.

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

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

$$U(t) = U_{\text{дон}};$$

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

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

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

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

Длительность первого этапа  $t_1$  определяется из уравнения:

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

Значение угловой скорости исполнительного органа электропривода в конце первого этапа:

$$\omega_1 = -\frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T_1}} + \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T_2}} \cdot \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

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

$$I_{\text{я}}(t) = I_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (t - t_1);$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_1 + C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (t - t_1) + R_{\text{я}} I_{\text{доп}}.$$

Этап 3. В интервале времени  $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3)$ :

$$U(t) = -U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_3 \cdot e^{\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} + B_3 \cdot e^{\frac{t-t_1-t_2}{T_2}} + C_3;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} - \frac{J}{C_M} \cdot \left( \frac{A_3}{T_1} \cdot e^{\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2} \cdot e^{\frac{t-t_1-t_2}{T_2}} \right);$$

где  $A_3 = -\frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot \left[ \omega_1 + T_2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot t_2 \right]$ ;

$$B_3 = -\frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \left[ \omega_1 + T_1 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot t_2 \right];$$

$$C_3 = -\left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

Длительность третьего этапа  $t_3$  определяется из уравнения:

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{CO}}{J} \cdot (T_1 - T_2) = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{\text{нач}} \right) \cdot \left( e^{\frac{t_3}{T_2}} - e^{\frac{t_3}{T_1}} \right).$$

Длительность второго этапа  $t_2$  вычисляется по формуле:

$$t_2 = \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{CO}} \cdot \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_3}{T_1}} - \omega_1 - \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right) - T_2.$$

Длительность цикла равна:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3.$$

Если  $t_2 = 0$ , то  $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = \omega_{\text{зр}}$ .

При этом длительность третьего этапа  $t_3$  вычисляется по формуле:

$$t_3 = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{CO}}{J} \cdot T_1 + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right)}{\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{CO}}{J} \cdot T_2 + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right)}.$$

Граничное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{\text{зр}} = \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{CO}}{J} \cdot T_2 + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right) \cdot e^{\frac{t_3}{T_1}} - \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right) - \omega_{\text{нач}}.$$

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

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

$$U(t) = U_{\text{доп}};$$

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

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

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

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

Длительность первого этапа  $t_1$  определяется из уравнения:

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

Значение угловой скорости исполнительного органа электропривода в конце первого этапа:

$$\omega_1 = -\left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{\frac{t_1}{T}} - \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot \frac{t_1}{T} \cdot e^{\frac{t_1}{T}} + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{CO}}{C_e C_M} \right).$$

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

$$I_{\text{я}}(t) = I_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (t - t_1);$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_1 + C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (t - t_1) + R_{\text{я}} I_{\text{доп}}.$$

Этап 3. В интервале времени  $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3)$ :

$$U(t) = -U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_3 \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T}} + B_3 \cdot (t - t_1 - t_2) \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T}} + C_3;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} - \frac{J}{C_M} \cdot \left( \frac{A_3}{T} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T}} - B_3 \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T}} + B_3 \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T}} \right);$$

где  $A_3 = \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot t_2 + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right);$

$$B_3 = -\frac{1}{T} \cdot \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot \frac{t_2}{T} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} + \frac{1}{T} \cdot \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right);$$

$$C_3 = -\left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

Длительность третьего этапа  $t_3$  определяется из уравнения:

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot T = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right) \cdot \frac{t_3}{T} \cdot e^{-\frac{t_3}{T}}.$$

Длительность второго этапа  $t_2$  вычисляется по формуле:

$$t_2 = \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}} \cdot \left[ \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} + \omega_{\text{кон}} \right) \cdot e^{-\frac{t_3}{T}} - \omega_1 - \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) \right] - T.$$

Длительность цикла равна:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3.$$

Если  $t_2 = 0$ , то  $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = \omega_{\text{эр}}$ .

При этом длительность третьего этапа  $t_3$  вычисляется по формуле:

$$t_3 = \frac{\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot T}{\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot T + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right)}.$$

Граничное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{\text{эр}} = \left[ \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot T + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) \right] \cdot e^{-\frac{t_3}{T}} - \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right) - \omega_{\text{нач}}$$

**Оптимальная по быстродействию диаграмматретьего вида для больших изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода**

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

$$U(t) = U_{\text{доп}};$$

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

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

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

$$B_1 = -\left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right);$$

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

Длительность первого этапа  $t_1$  определяется из уравнения:

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

Значение угловой скорости исполнительного органа электропривода в конце первого этапа:

$$\omega_1 = -\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) - \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} - \omega_{\text{нач}} \right) \cdot e^{-\xi \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) + \left( \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{Я}} M_{\text{CO}}}{C_e C_M} \right).$$

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

$$I_{\text{Я}}(t) = I_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (t - t_1);$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_1 + C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J} \cdot (t - t_1) + R_{\text{Я}} I_{\text{доп}}.$$

Этап 3. В интервале времени  $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3)$ :

$$U(t) = -U_{\text{доп}};$$

$$\omega(t) = A_3 \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1-t_2}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T}\right) + B_3 \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1-t_2}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T}\right) + C_3;$$

$$I_{Я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{CO} - \frac{J}{C_M} \cdot \left[ \xi \cdot \frac{A_3}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1-t_2}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T}\right) - \right. \\ \left. - \sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{A_3}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1-t_2}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T}\right) + \xi \frac{B_3}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1-t_2}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T}\right) + \right. \\ \left. + \sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{B_3}{T} \cdot e^{-\xi \frac{t-t_1-t_2}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t-t_1-t_2}{T}\right) \right].$$

где  $A_3 = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \omega_1 + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{CO}}{J} \cdot t_2 + \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{CO}}{J} \cdot T +$   
 $+ \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left( \frac{U_{доп}}{C_e} - \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} \right);$   
 $B_3 = \omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{CO}}{J} \cdot t_2 + \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} \right);$   
 $C_3 = - \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} \right).$

Длительность третьего этапа  $t_3$  определяется из уравнения:

$$\frac{C_M I_{доп} - M_{CO}}{J} \cdot T = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{кон} \right) \cdot e^{\xi \frac{t_3}{T}} \cdot \sin\left(\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{t_3}{T}\right).$$

Длительность второго этапа  $t_2$  вычисляется по формуле:

$$t_2 = \frac{J}{C_M I_{доп} - M_{CO}} \cdot \left[ \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{кон} \right) \cdot e^{\xi \frac{t_3}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T}\right) - \right. \\ \left. - \sqrt{1-\xi^2} \cdot \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{кон} \right) \cdot e^{\xi \frac{t_3}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T}\right) - \omega_1 - \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} \right) \right].$$

Длительность цикла равна:

$$T_{ц} = t_1 + t_2 + t_3$$

Если  $t_2 = 0$ , то  $(\omega_{кон} - \omega_{нач}) = \omega_{зр}$ .

При этом длительность третьего этапа  $t_3$  и граничное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{зр}$  определяются из системы уравнение:

$$\left[ \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \omega_1 + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{CO}}{J} \cdot T + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} \right) \right] \cdot e^{-\xi \frac{t_3}{T}} = \\ = \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{зр} + \omega_{нач} \right) \cdot \sin\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{t_3}{T}\right) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \times \\ \times \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{зр} + \omega_{нач} \right) \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T}\right); \\ \left[ \omega_1 + \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} \right) \right] \cdot e^{-\xi \frac{t_3}{T}} = \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{зр} + \omega_{нач} \right) \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T}\right) - \\ - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left( \frac{U_{доп}}{C_e} + \frac{R_{Я} M_{CO}}{C_e C_M} + \omega_{зр} + \omega_{нач} \right) \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T}\right).$$

## **Выводы**

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

Получено математическое обеспечение, позволяющее определить параметры трехэтапных оптимальных по быстродействию диаграмм для больших изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода.