

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

РАЗРАБОТКА ВТОРОЙ ГРУППЫ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

DEVELOPMENT OF THE SECOND GROUP OF OPTIMUM SPEED DIAGRAMS OF MOVING ACTUATING DEVICE OF ALTERNATING CURRENT ELECTRIC DRIVE

Добробаба Юрий Петрович
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yury Petrovich
Cand.Tech.Sci., professor

Шпилев Александр Александрович
аспирант
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Shpilev Alexandr Aleksandrovich
postgraduate student
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

В статье описана вторая группа оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока. Определены параметры, условия существования и аналитические зависимости угла поворота исполнительного органа электропривода переменного тока от времени для каждой из диаграмм

In this article, the second group of optimum speed of diagrams of moving actuating device of electric drive of alternating current is described. Parameters, conditions of existence and analytical dependences of an angle of rotation of actuating device of electric drive of alternating current on time for each of diagrams are defined

Ключевые слова: ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ПАРАМЕТРЫ ДИАГРАММЫ, УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДИАГРАММЫ

Keywords: DIAGRAM OF MOVING OF ACTUATING DEVICE OF ELECTRIC DRIVE, DIAGRAM PARAMETERS, CONDITION OF EXISTENCE OF DIAGRAM

В конце 1990-х и начале 2000-х годов разработка и производство электроприводов переменного тока были серьезно осложнены из-за длительного застоя в экономике и промышленности государства. Вследствие чего, современные отечественные серийно выпускаемые электроприводы переменного тока для металлообрабатывающей промышленности обладают весьма ограниченными динамическими характеристиками, что не позволяет обеспечить дальнейшее повышение быстродействия перемещения и точности позиционирования их исполнительных органов и эффективность технологического процесса в целом. Поэтому решение задачи оптимизации по быстродействию перемещения исполнительного органа электропривода является весьма актуальным.

На предприятиях металлообрабатывающей промышленности в последнее время широко применяются электроприводы переменного тока (главного движения, вспомогательного и движения подачи), укомплекто-

ванные асинхронными двигателями и частотными преобразователями.

Система автоматического управления электроприводом переменного тока состоит из задачика интенсивности (командоаппарата), формирующего диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода, и системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода, обрабатывающей эти диаграммы.

Задачей является разработка полного комплекса оптимальных по быстрдействию диаграмм для всех возможных перемещений исполнительного органа при ограничении максимально допустимого значения третьей производной скорости исполнительного органа электропривода $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$.

Ранее для электроприводов переменного тока была разработана и исследована первая группа оптимальных по быстрдействию диаграмм перемещения, включающая следующие диаграммы:

- диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости, состоящая из шести этапов, [1];
- диаграмма для небольших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничениями второй и третьей производных скорости, состоящая из десяти этапов, [2];
- диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничениями первой, второй и третьей производных скорости, состоящая из четырнадцати этапов, [3];
- диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничениями скорости и её первой, второй и третьей производных, состоящая из пятнадцати этапов, [4].

Первая группа оптимальных по быстрдействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока справедлива при выполнении условия:

$$\frac{[\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^2}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} \leq \omega_{\text{доп}}^{(3)}, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$ – максимально допустимое значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода;

$\omega_{\text{доп}}^{(2)}$ – максимально допустимое значение второй производной скорости исполнительного органа электропривода.

Если условие (1) не выполняется, то необходимо перейти ко второй группе оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока.

Силовая часть электротехнической системы электропривода переменного тока с асинхронным двигателем представлена системой дифференциальных уравнений четвертого порядка, так как учитываются следующие постоянные времени: электромагнитная постоянная времени статора; электромагнитная постоянная времени ротора; электромеханическая постоянная времени привода и механическая постоянная времени равная единице.

Так как математическая модель электропривода переменного тока с асинхронным двигателем представляет собой систему дифференциальных уравнений четвертого порядка, то для реализации оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока предлагается формировать зависимость четвертой производной угла поворота исполнительного органа электропривода переменного тока (третьей производной скорости исполнительного органа электропривода переменного тока).

На электропривод переменного тока накладываются технические ограничения по скорости исполнительного органа и ее первой (ускорение) и второй (рывок) производным.

Так как система имеет локальные ограничения, то управляющее воздей-

ствие, в соответствии с принципом максимума академика Л.С. Понтрягина, представляет собой кусочно-постоянную функцию от времени, принимающую граничные значения.

Проведенные нами исследования позволяют предложить для электроприводов переменного тока следующие, относящиеся ко второй группе, оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения:

- оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости, состоящая из шести этапов, [1];
- оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных скорости, состоящая из десяти этапов;
- оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением скорости и ее первой и третьей производных, состоящая из одиннадцати этапов.

Вторая группа оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока справедлива при выполнении условий:

$$\omega_{\text{доп}}^{(3)} \leq \frac{[\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^2}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}; \quad (2)$$

$$4 \cdot \frac{[\omega_{\text{доп}}^{(1)}]^3}{\omega_{\text{доп}}^2} \leq \omega_{\text{доп}}^{(3)}. \quad (3)$$

Если условие (2) не выполняется, то необходимо перейти к первой группе оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока. Если условие (3) не

выполняется, то необходимо перейти к третьей группе оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока.

Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости одинаковая для первой, второй и третьей групп оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока.

Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости, представленная на рисунке 1, сформирована следующим образом [1]. На первом, третьем и пятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на втором, четвертом и шестом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$. Длительность первого, третьего, четвертого и шестого этапов равна t_1 ; длительность второго и пятого этапов равна $2t_1$. В моменты времени t_1 и $7t_1$ вторая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $\omega_{\text{max}}^{(2)}$; в моменты времени $3t_1$ и $5t_1$ вторая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус $-\omega_{\text{max}}^{(2)}$. В момент времени $2t_1$ первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $\omega_{\text{max}}^{(1)}$; в моменты времени $6t_1$ первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус $-\omega_{\text{max}}^{(1)}$. В момент

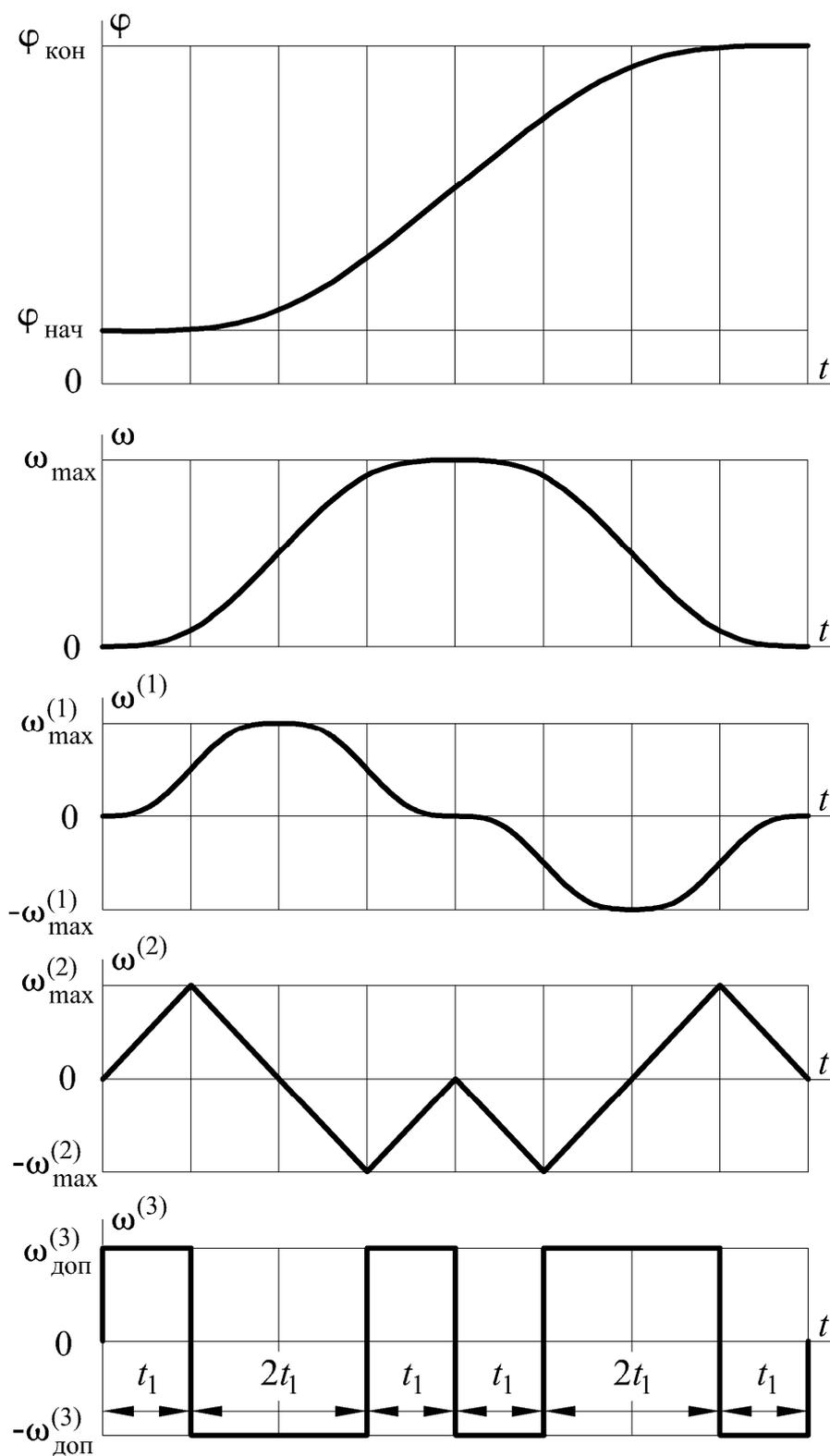


Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости

времени $4t_1$ скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения ω_{\max} . Угол поворота (перемещение) исполнительного органа увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для диаграммы справедливы соотношения [1]:

$$t_1 = 4 \sqrt[4]{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(3)}}};$$

$$T = 8t_1;$$

$$\omega_{\max}^{(2)} = 4 \sqrt[4]{\frac{1}{8}(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \cdot [\omega_{\text{доп}}^{(3)}]^3};$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{8}(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)}};$$

$$\omega_{\max} = 4 \sqrt[4]{\frac{1}{32}(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^3 \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)}}.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости справедлива при выполнении условия [1]:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq 8 \cdot \frac{[\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^4}{[\omega_{\text{доп}}^{(3)}]^3}. \quad (4)$$

Если условие (4) не выполняется, то необходимо перейти к оптимальной по быстродействию диаграмме для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных скорости.

Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных скорости, представленная на рисунке 2, сформирована следующим образом. На первом, пятом, седьмом и

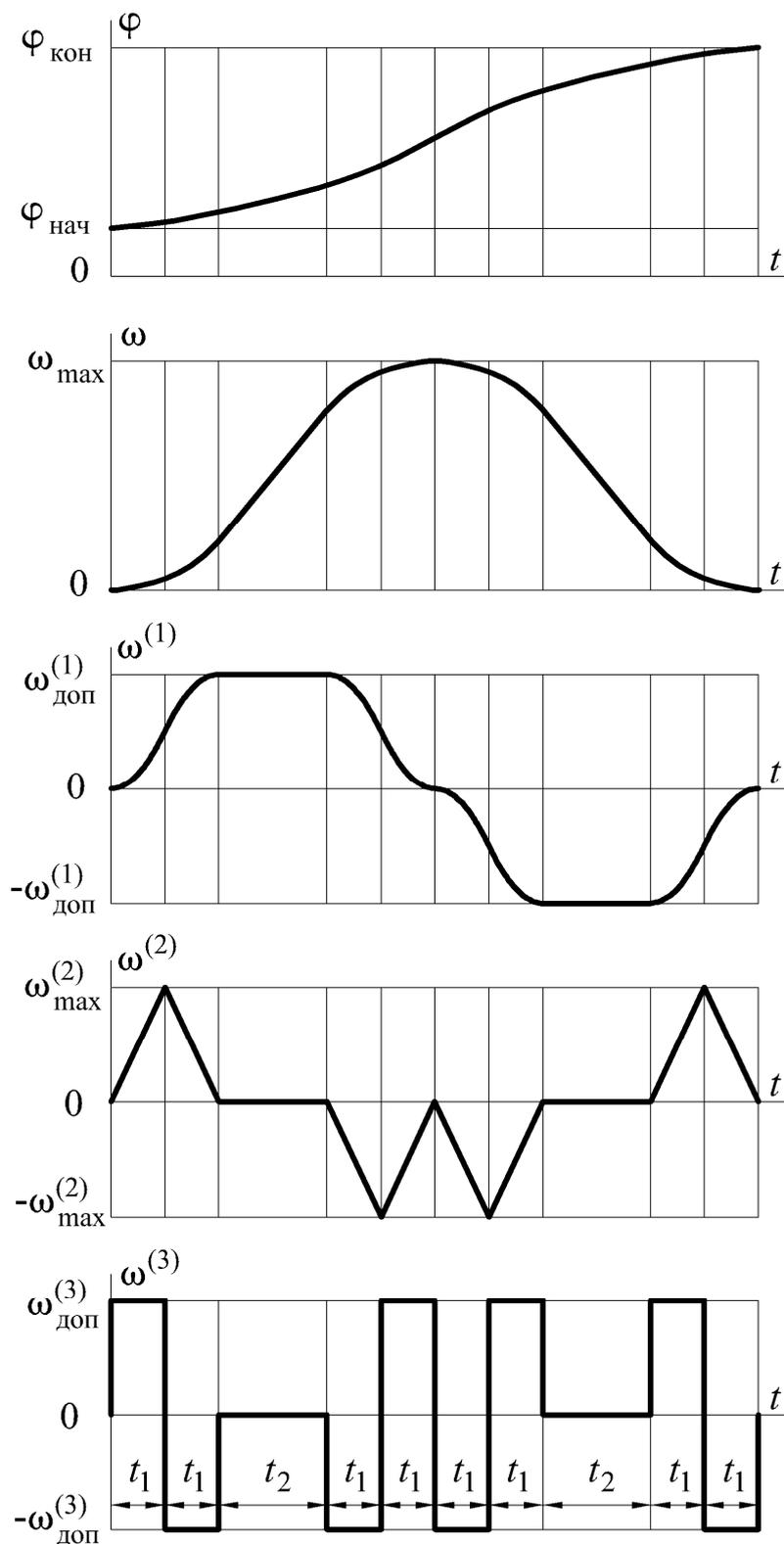


Рисунок 2 – Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных скорости

девятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на втором, четвертом, шестом и десятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна

максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на третьем и восьмом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна нулю. Длительность первого, второго, четвертого, пятого, шестого, седьмого, девятого и десятого этапов равна t_1 ; длительность третьего и восьмого этапов равна t_2 . В моменты времени t_1 и $(7t_1 + 2t_2)$ вторая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока достигает максимального значения $\omega_{\text{max}}^{(2)}$; в моменты времени $(3t_1 + t_2)$ и $(5t_1 + t_2)$ вторая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока достигает максимального значения со знаком минус $-\omega_{\text{max}}^{(2)}$. На третьем этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$; на восьмом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(1)}$. В момент времени $(4t_1 + t_2)$ скорость исполнительного органа электропривода переменного тока достигает максимального значения ω_{max} . Угол поворота (перемещение) исполнительного органа увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$t_1 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}};$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}}} - 3 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}};$$

$$T = 8t_1 + 2t_2;$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot (2t_1 + t_2).$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных скорости справедлива при выполнении условий:

$$8 \cdot \frac{[\omega_{\text{доп}}^{(1)}]^2}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}); \tag{5}$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \omega_{\text{доп}} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}} \right]. \tag{6}$$

Если не выполняется условие (5), то необходимо перейти к оптимальной по быстродействию диаграмме для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением третьей производной скорости. Если не выполняется условие (6), то необходимо перейти к оптимальной по быстродействию диаграмме для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением скорости и ее первой и третьей производных.

Оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением скорости и ее первой и третьей производных, представленная на рисунке 3, сформирована следующим образом. На первом, пятом, восьмом и десятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению

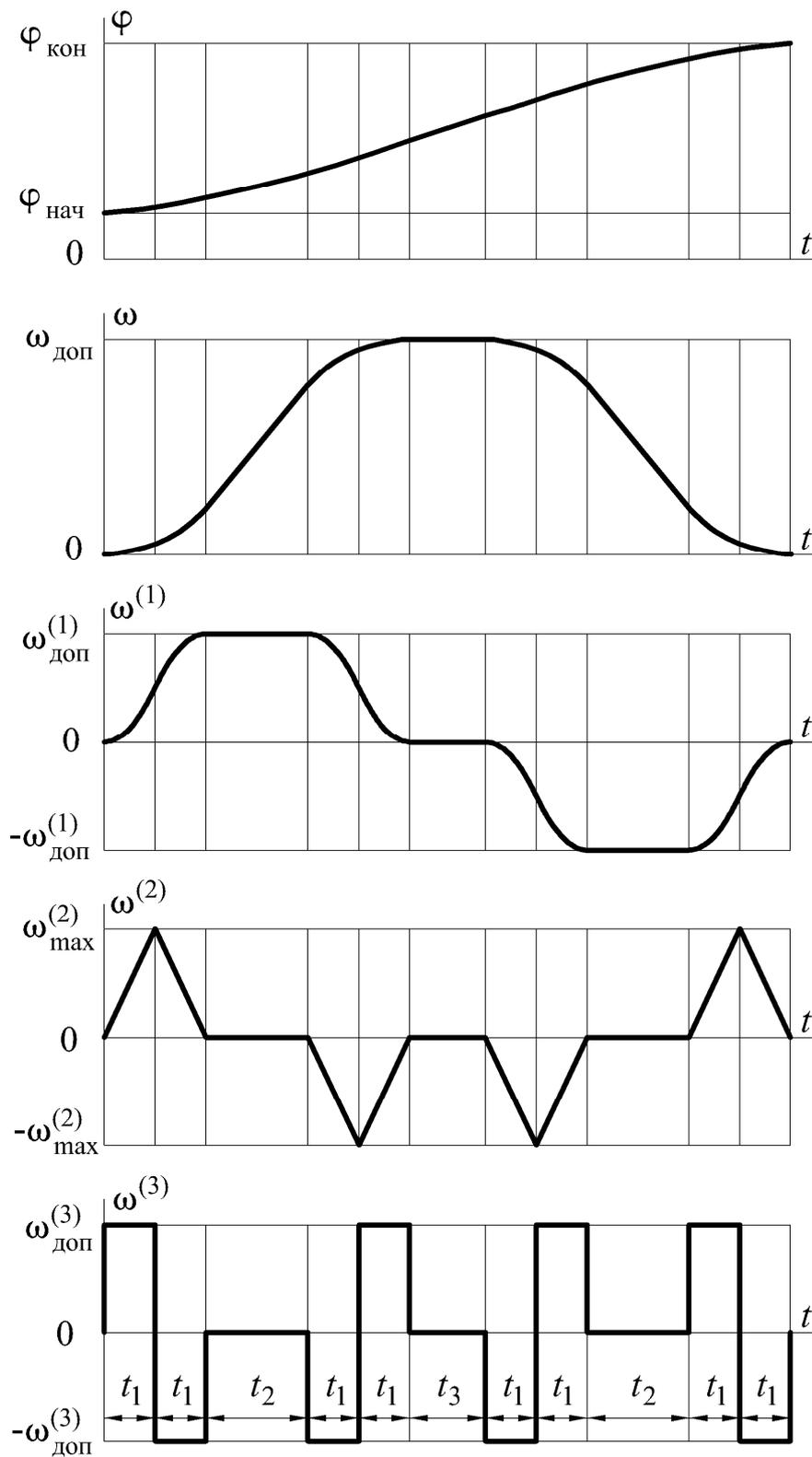


Рисунок 3 – Оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением скорости и ее первой и третьей производных

$\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на втором, четвертом, седьмом и одиннадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на третьем, шестом и девятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна нулю. Длительность первого, второго, четвертого, пятого, седьмого, восьмого, десятого и одиннадцатого этапов равна t_1 ; длительность третьего и девятого этапов равна t_2 ; длительность шестого этапа равна t_3 . В моменты времени t_1 и $(7t_1 + 2t_2 + t_3)$ вторая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока достигает максимального значения $\omega_{\text{max}}^{(2)}$; в моменты времени $(3t_1 + t_2)$ и $(5t_1 + t_2 + t_3)$ вторая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока достигает максимального значения со знаком минус $-\omega_{\text{max}}^{(2)}$. На третьем этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$; на девятом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(1)}$. На шестом этапе скорость исполнительного органа электропривода переменного тока равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}$. Угол поворота (перемещение) исполнительного органа увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$t_1 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}};$$

$$t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}};$$

$$t_3 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}};$$

$$T = 8t_1 + 2t_2 + t_3;$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением скорости и ее первой и третьей производных справедлива при выполнении условия:

$$\omega_{\text{доп}} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}} \right] \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}). \quad (7)$$

Если условие (7) не выполняется, то необходимо перейти к оптимальной по быстродействию диаграмме для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных скорости.

Определены аналитические зависимости угла поворота исполнительного органа электропривода φ от времени t на каждом этапе для каждой, относящейся ко второй группе, оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока.

Разработаны, реализованы и экспериментально исследованы устройства на базе программируемого контроллера, формирующие сигналы, которые соответствуют, относящимся ко второй группе, оптимальным по быстродействию диаграммам перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока. На разработанные устройства получены патенты на полезные модели [5, 6, 7].

Разработанные устройства, совместно с системой автоматического

регулирования положения исполнительного органа электропривода переменного тока, позволят интенсифицировать процесс перемещения исполнительного органа электропривода переменного тока, повысить точность позиционирования исполнительного органа и эффективность технологического процесса в целом.

Полученные результаты позволяют перейти к следующей задаче исследований – разработке системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода переменного тока.

Список литературы

1. Дობробаба Ю.П., Шпилев А.А., Мурлина Е.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для малых перемещений электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология. – 2009. – № 5-6. – с. 99-101.
2. Дობробаба Ю.П., Шпилев А.А., Мурлина Е.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для небольших перемещений электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 1. – с. 84-87.
3. Дობробаба Ю.П., Шпилев А.А., Мурлина Е.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 2-3. – с. 95-97.
4. Дობробаба Ю.П., Шпилев А.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для больших перемещений электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 4. – с. 95-98.
5. Пат. на полезную модель № 101599. Устройство для формирования сигнала, соответствующего оптимальной по быстродействию диаграмме для малых перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока / Ю.П. Дობробаба, А.А. Шпилев. Опубл. 20.01.2011, Бюл. № 2.
6. Пат. на полезную модель № 113097. Устройство для формирования сигнала, соответствующего оптимальной по быстродействию диаграмме для средних перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением первой и третьей производных частоты вращения / Ю.П. Дობробаба, А.А. Шпилев. Опубл. 21.01.2012, Бюл. № 3.
7. Пат. на полезную модель № 112549. Устройство для формирования сигнала, соответствующего оптимальной по быстродействию диаграмме для больших перемещений исполнительного органа электропривода переменного тока с ограничением частоты вращения и ее первой и третьей производных / Ю.П. Дობробаба, А.А. Шпилев. Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.