

## СИНТЕЗ ЗАДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ РЫВКА ПРИ УЧЕТЕ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

*Толочко О.И., д.т.н., проф.*

*Коцегуб П.Х., д.т.н., проф.*

*Розкаряка П. И., ас.*

*Донецкий национальный технический университет*

*83000, Донецк, ул. Артема, 58*

*toi@elf.dgtu.donetsk.ua, pavel\_rozkar@mail.ru*

В данной статье осуществлена разработка оптимальных по тепловым потерям и по быстродействию диаграмм отработки заданных перемещений позиционными электроприводами с учетом ограничений на рывок, ускорение и скорости при наличии постоянного статического момента на валу двигателя.

**Ключевые слова:** позиционный электропривод, оптимальное управление, ограничение рывка.

In the given paper the design of optimal by heat loss and response time profiles for position electrical drive was implemented. These position profiles allow for limitation to jerk, acceleration and speed with constant static load on the researching motor.

**Key words:** position electrical drive, optimal control, limit of jerk.

**Введение.** Для уменьшения динамических ударов в кинематических передачах в электромеханических системах стремятся обеспечить ограничение рывка [1,2]. Существует несколько способов решения этой задачи – например, использование задатчика интенсивности второго порядка на входе контура регулирования скорости. Для систем позиционного электропривода можно применить задающее устройство (задатчик положения), формирующее эталонные сигналы задания на изменение основных координат электропривода на входе системы автоматического управления. Использование задатчика положения позволяет сформировать диаграммы изменения положения, обеспечивающие оптимальность переходных процессов по различным критериям [1-5].

**Анализ предыдущих исследований.** В работе [5] рассматриваются законы формирования оптимальной по тепловым потерям диаграммы с учетом постоянно действующего статического момента на валу двигателя и ограничений на скорость и ускорение, но без ограничения на рывок.

Методика коррекции алгоритмов цифровой реализации оптимальных по тепловым потерям диаграмм отработки заданных перемещений в реальном времени с учетом эффектов квантования и экстраполяции приведена в работе [6, 7]. Особенности выполнения операций численного интегрирования учтены в [6, 8].

**Целью работы** является расчет диаграмм отработки заданных перемещений с учетом ограничений на рывок, ускорение и скорость при наличии постоянного статического момента на валу двигателя.

**Материал и результаты исследования.** Рассмотрим методику формирования диаграмм отработки заданного перемещения  $\Delta\varphi_3$  за заданное время  $t_0$ , с учетом ограничений на скорость  $\omega_0$ , ускорение  $\varepsilon_0$  и рывок  $\rho_0$ . При реализации приведенных

диаграмм достаточно сформировать сигнал задания на рывок  $\rho(t)$ , а оставшиеся координаты (ускорение  $\varepsilon(t)$ , скорость  $\omega(t)$  и перемещение  $\Delta\varphi(t)$ ) получить его последовательным интегрированием, аналогично [5].

Обычно при формировании диаграмм учитывают ограничение на ускорение (динамический момент). Однако при наличии статического момента величина ограничения на динамический момент может измениться за счет достижения уровня токоограничения. Поэтому считаем, что ограничение динамического момента приводит к ограничению ускорения при разгоне на уровне  $\varepsilon_1$ , а при торможении – на уровне  $\varepsilon_2$ . В этом случае диаграмма ускорения и тахограмма становятся несимметричными.

Следует отметить, что хотя диаграммы формируются с учетом ограничения на ускорение и скорость, в зависимости от величины перемещения и времени его отработки могут использоваться разные виды диаграмм. При управлении, оптимальном по быстродействию, возможны два варианта:

1а – без достижения уровня ограничения по скорости (участок  $t_4$  отсутствует,  $t_1 = t_3$ ,  $t_7 = t_5$ );

1б – с достижением уровня ограничения по скорости (наличие всех участков,  $t_1 = t_3$ ,  $t_7 = t_5$ ).

При управлении, оптимальном по тепловым потерям, возможны такие диаграммы:

2а – без ограничений ( без участков  $t_2$ ,  $t_4$ ,  $t_6$ );

2б – с ограничением ускорения при разгоне ( отсутствуют участки  $t_4$ ,  $t_6$ );

2в – с ограничением ускорения при разгоне и торможении ( без участка  $t_4$ ,  $t_1 \neq t_3$ ,  $t_7 \neq t_5$ );

2г – с ограничением скорости ( нет участков  $t_2$  и  $t_6$ );

2д – с ограничением скорости и ускорения при разгоне (без участка  $t_6$ );

2е – с ограничением скорости и ускорения как при разгоне так и при торможении (все участки присутствуют,  $t_1 \neq t_3$ ,  $t_7 \neq t_5$ ).

Приведем методику расчета характерных точек сигналов задания на рывок на примере диаграммы 2в – параболической диаграммы с ограничением ускорения при разгоне и торможении, но без ограничения скорости (рис.2).

Исходными данными являются: перемещение, которое необходимо обработать,  $\Delta\varphi_3$ ; желаемое время обработки перемещения  $t_0$ ; ограничение рывка – величина  $\rho_0$ ; ограничение ускорения – величина  $\varepsilon_0$ .

Так как ускорение при разгоне и торможении ограничены, то можно записать

$$t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}. \quad (1)$$

Неизвестными величинами здесь являются только параметры участков времени  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_5$ ; и  $t_6$  (для диаграмм с ограничением тока только при разгоне – диаграммы 2б и 2д – еще необходимо найти величину максимального ускорения при торможении  $\varepsilon_2$ ).

Изменение координат на участках  $t_3$  и  $t_5$  осуществляется с одинаковой величиной рывка:

$$\frac{t_3}{\varepsilon_1} = \frac{t_5}{\varepsilon_2}, \quad (2)$$

откуда можно выразить одно из времен, например  $t_3$ , через другое:

$$t_3 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} t_5. \quad (3)$$

После завершения отработки перемещения кривая скорости должна приходить в ноль, т.е. максимум скорости можно выразить двумя способами:

$$\omega_{\max} = \int_0^{t_p} \varepsilon(t) dt = \int_0^{t_T} \varepsilon(t) dt,$$

где  $t_p$  и  $t_T$  – время разгона и торможения.

$$\omega_{\max} = \frac{\varepsilon_1 t_1}{2} + \varepsilon_1 t_2 + \frac{\varepsilon_1 t_3}{2} = \frac{\varepsilon_2 t_5}{2} + \varepsilon_2 t_6 + \frac{\varepsilon_2 t_7}{2}. \quad (4)$$

Теперь можно записать выражение для  $t_2$ :

$$t_2 = \frac{1}{\varepsilon_1} \left( \frac{\varepsilon_2 t_5}{2} + \varepsilon_2 t_6 + \frac{\varepsilon_2 t_7}{2} - \frac{\varepsilon_1 t_1}{2} - \frac{\varepsilon_1 t_3}{2} \right), \quad (5)$$

а с учетом (3):

$$t_2 = \frac{\varepsilon_2}{2\varepsilon_1} (t_5 + 2t_6 + t_7) - \frac{t_1}{2} - t_5 \frac{\varepsilon_1}{2\varepsilon_2}. \quad (6)$$

Сумма времен всех участков равна желаемому времени обработки перемещения  $t_0$ :

$$t_0 = t_1 + t_2 + t_3 + t_5 + t_6 + t_7. \quad (7)$$

Выражаем  $t_5$  с подстановкой (3, 6):

$$t_5 = \frac{\varepsilon_2 (2t_0 \varepsilon_1 - 2t_6 \varepsilon_2 - 2t_7 \varepsilon_1 - 2t_1 \varepsilon_1 - t_1 \varepsilon_1 - t_7 \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}. \quad (8)$$

Осталось записать выражения для перемещений на каждом участке (рис.2) и просуммировать их:

$$\sum_{i=1}^{10} \varphi_i = \varphi_3, \quad (9)$$

где  $\varphi_1 = \frac{1}{6} \varepsilon_1 t_1^2$ ;  $\varphi_2 = \frac{1}{2} \varepsilon_1 t_1 (t_2 + t_3)$ ;  $\varphi_3 = \frac{1}{2} \varepsilon_1 t_2^2$ ;

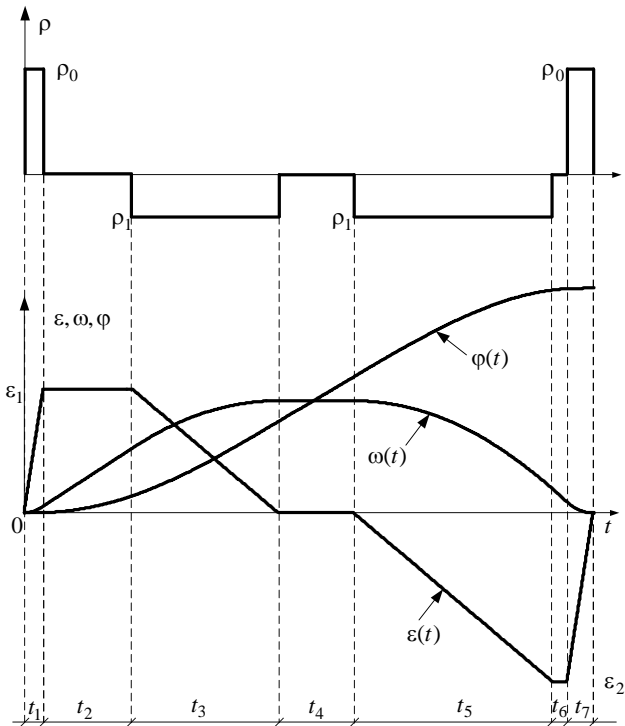


Рис. 1 – Обобщенная диаграмма отработки перемещения

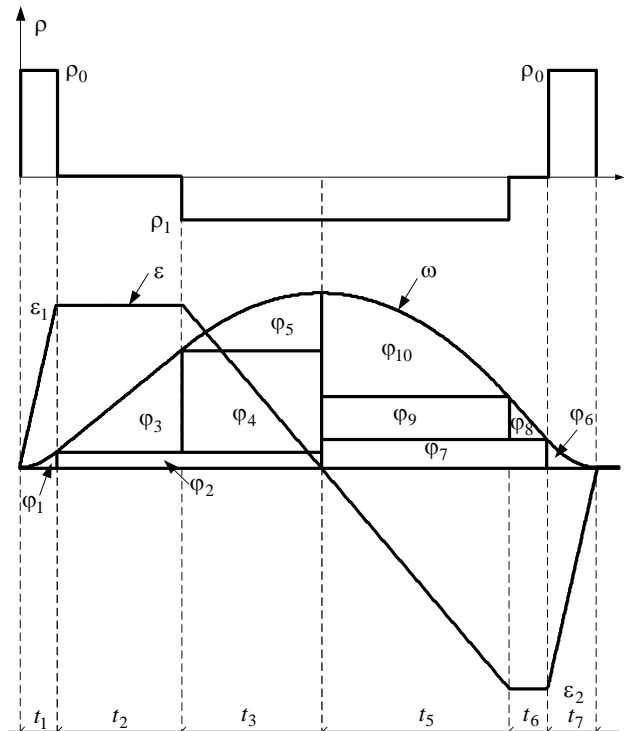


Рис. 2 – Параболическая диаграмма с ограничением ускорения при разгоне и торможении

$$\begin{aligned}\varphi_4 &= \varepsilon_1 t_2 t_3; \quad \varphi_5 = \frac{1}{3} \varepsilon_1 t_3^2; \quad \varphi_6 = \frac{1}{6} \varepsilon_2 t_7^2; \\ \varphi_7 &= \frac{1}{2} \varepsilon_2 t_7 (t_5 + t_6); \quad \varphi_8 = \frac{1}{2} \varepsilon_2 t_6^2; \quad \varphi_9 = \varepsilon_2 t_5 t_6; \\ \varphi_{10} &= \frac{1}{3} \varepsilon_2 t_5^2.\end{aligned}$$

Подставляем в (9) все времена, получаем квадратное уравнение относительно  $t_6$ :

$$at_6^2 + bt_6 + c = 0, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned}a &= -\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{6}; \\ b &= \frac{\varepsilon_1 t_0}{3} - \frac{\varepsilon_1 t_7}{3} - \frac{\varepsilon_1 t_1}{6} - \frac{\varepsilon_2 t_7}{6}; \\ c &= \frac{t_0 t_1 \varepsilon_1^2 - t_7 t_1 \varepsilon_1^2 - 3 t_0 t_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 + 2 t_0 t_7 \varepsilon_1^2 - t_7^2 \varepsilon_1^2 - 2 t_0 t_7 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{6(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} + \\ &+ \frac{-6 \varphi \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 t_1^2 - t_0^2 \varepsilon_1^2 + t_1 t_7 \varepsilon_1 \varepsilon_2 - 6 \varepsilon_1 \varphi + 3 \varepsilon_1 \varepsilon_2 t_0^2}{6(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}.\end{aligned}$$

Решением этого уравнения будет искомая величина времени  $t_6$ :

$$t_6 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (11)$$

Для остальных диаграмм методика нахождения характерных точек аналогична. Результаты расчетов сводим в табл. 1.

Так же как и в работе [5], где осуществлялся расчет без учета ограничения рывка, для диаграммы 2д необходимо решить неполное уравнение пятой степени относительно переменной  $\varepsilon_2$ , которое не имеет аналитического решения:

$$a\varepsilon_2^5 + b\varepsilon_2^4 + c\varepsilon_2^3 + d\varepsilon_2^2 + e = 0. \quad (12)$$

В работе [9] рассмотрено численное решение нелинейных трансцендентных и алгебраических уравнений в реальном времени. Уравнение (12) успешно решается предложенной методикой.

Для решения задачи выбора диаграммы обработки перемещения из 8-ми приведенных необходимо знать значения максимальной скорости для диаграмм 1а, 2а, 2б, 2в. Эти выражения также приведены в табл. 1.

Можно использовать алгоритм выбора диаграммы аналогичный приведенному в работе [5] с соответствующими корректировками формул.

Для успешной реализации алгоритмов необходимо учесть эффект квантования по времени, обеспечивая кратность времен излома графиков эталонных сигналов периоду дискретности. Воспользуемся методикой коррекции, описанной в [7], и осуществим перерасчет ординат точек для кривой задания на ускорение таким образом, чтобы при уточненных абсциссах не изменилась величина обрабатываемого перемещения. Результаты расчета приведены в табл. 2.

## Выводы

1. Произведен расчет диаграмм обработки заданных перемещений с учетом ограничений на рывок,

ускорение и скорость при наличии постоянного статического момента на валу двигателя.

2. Для учета эффекта квантования по времени по методике, описанной в [7], осуществлен перерасчет максимальных значений ускорений при разгоне и торможении после коррекции временных интервалов с сохранением величины обрабатываемого перемещения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чермалых А.В., Данилин А.В., Прядко С.П. Сравнительный анализ диаграмм управляющих воздействий электропривода, формируемых задающими моделями // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – №1 (12). – с. 13-17.
2. Денисова А.В., Сабинин Ю.А. Формирование задающего воздействия в позиционном электроприводе. //Электротехника №9 2002, с. 21-28.
3. Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Яблонь В.П., Морозов Д.И. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – К.: Техніка, 2006. – С. 315-319.
4. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.
5. Костенко В.И., Коцегуб П.Х., Розкаряка П.И., Толочко О.И. Формирование оптимальных по нагреву диаграмм обработки заданных перемещений при наличии постоянного статического момента на валу двигателя // Вісник Національного Технічного Університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ", 2002, №12. – Т.2. – С. 350-354
6. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Розкаряка П.И. Особенности цифровой реализации оптимальных алгоритмов управления позиционным электроприводом // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2006. – №3 (38). Ч. 1. – С. 8-11.
7. Розкаряка П.И. Коррекция оптимальных по тепловым потерям диаграмм обработки перемещений с учетом эффекта квантования по времени // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія: "Електротехніка і енергетика". – Випуск 112: Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С 71-75.
8. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Розкаряка П.И. Повышение точности цифрового интегрирования при реализации оптимальных алгоритмов управления позиционным приводом. – Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: Техніка. – 2006. – Випуск 66. – С. 66-68.
9. Толочко О.И., Розкаряка П.И., Кателло З.И. Численное решение алгебраического уравнения в реальном времени при реализации оптимального алгоритма управления позиционным электроприводом // Науковий вісник НГУ. – 2006. – №6. – С. 91-94.

Таблица 1 – Параметры для расчета диаграмм

№	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_T$	$\omega_M$	$t$
1a	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\omega_{\max} = \varepsilon_1(t_1 + t_2)$	$t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_3 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_5 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_2 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} t_6 + \frac{\varepsilon_2^2}{\varepsilon_1 \rho} - \frac{\varepsilon_1}{\rho};$ $a = \frac{\varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_2^2}{2\varepsilon_1}; b = \frac{3\varepsilon_2^2}{2\rho} + \frac{\varepsilon_2^3}{\varepsilon_1 \rho} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2\rho}; c = \frac{\varepsilon_2^4}{2\varepsilon_1 \rho^2} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2^2}{2\rho^2} + \frac{\varepsilon_2^3}{\rho^2} - \varphi; t_6 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$
1б	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\omega_0$	$t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_3 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_5 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_2 = \frac{\omega_0}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_6 = \frac{\omega_0}{\varepsilon_2} - \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_4 = \frac{\varphi}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{2\varepsilon_1} - \frac{\omega_0}{2\varepsilon_2} - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\rho};$
2a	$\varepsilon_1 = \rho t_1$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1$	$\omega_{\max} = \frac{1}{4} \rho t_1 t_0$	$t_1 = \frac{t_0}{2} - \sqrt{\frac{t_0^2}{4} - \frac{6\varphi}{t_0 \rho_0}}; t_7 = t_1; t_3 = \frac{t_0}{2} - t_1; t_5 = \frac{t_0}{2} - t_1$
2б	$\varepsilon_1$	$a = \varepsilon_1^2 + 2t_0 \rho \varepsilon_1 - t_1 \rho \varepsilon_1;$ $b = \rho(t_1 \varepsilon_1^2 - 2t_0 \varepsilon_1^2 + 6\varphi \rho - t_1^2 \varepsilon_1 \rho + 3t_1 t_0 \varepsilon_1 \rho - 3t_0^2 \varepsilon_1 \rho);$ $c = \varepsilon_1 \rho^2 (t_0^2 \varepsilon_1 - t_0 t_1 \varepsilon_1 + 6\varphi)$ $\varepsilon_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$	$\omega_{\max} = \varepsilon_1 \left( \frac{t_1}{2} + t_2 + \frac{t_3}{2} \right)$	$t_5 = t_3 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}; t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_2 = \frac{t_7 \varepsilon_2}{2\varepsilon_1} + \frac{t_3 \varepsilon_2^2}{2\varepsilon_1^2} - \frac{t_1}{2} - \frac{t_3}{2}; t_3 = \frac{\varepsilon_1 (2t_0 \rho \varepsilon_1 - t_1 \rho \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 \varepsilon_1 - \varepsilon_2^2)}{\rho (\varepsilon_2 + \varepsilon_1)^2}$
2в	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\omega_{\max} = \varepsilon_1 \left( \frac{t_1}{2} + t_2 + \frac{t_3}{2} \right)$	$t_3 = t_5 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}; t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}; t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}; t_2 = \frac{\varepsilon_2}{2\varepsilon_1} (t_5 + 2t_6 + t_7) - \frac{t_1}{2} - t_5 \frac{\varepsilon_1}{2\varepsilon_2};$ $t_5 = \frac{\varepsilon_2 (2t_0 \varepsilon_1 - 2t_6 \varepsilon_2 - 2t_6 \varepsilon_1 - 2t_7 \varepsilon_1 - t_1 \varepsilon_1 - t_7 \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}; a = -\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{6}; b = \frac{\varepsilon_1 t_0}{3} - \frac{\varepsilon_1 t_7}{3} - \frac{\varepsilon_1 t_1}{6} - \frac{\varepsilon_2 t_7}{6};$ $c = \frac{t_0 t_1 \varepsilon_1^2 - t_7 t_1 \varepsilon_1^2 - 3t_0 t_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 + 2t_0 t_7 \varepsilon_1^2 - t_7^2 \varepsilon_1^2 - 2t_0 t_7 \varepsilon_1 \varepsilon_2 - 6\varphi \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 t_1^2 - t_0^2 \varepsilon_1^2 + t_1 t_7 \varepsilon_1 \varepsilon_2 - 6\varepsilon_1 \varphi + 3\varepsilon_1 \varepsilon_2 t_0^2}{6(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}$ $t_6 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a};$

Продолжение таблицы 1

№	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_T$	$\omega_M$	$t$
2Г	$\varepsilon_1 = \rho t_1$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1$	$\omega_0$	$t_1 = \frac{3}{4} \left( t_0 - \frac{\varphi}{\omega_0} - \frac{\sqrt{\omega_0^2 t_0^2 - 2\omega_0 t_0 \varphi + \varphi^2 - \frac{32\omega_0^3}{9\rho_0}}}{\omega_0} \right)$ ; $t_3 = \frac{2\omega_0}{\rho t_1} - t_1$ ; $t_4 = t_0 - \frac{4\omega_0}{\rho t_1}$ ; $t_5 = t_3$ ; $t_7 = t_1$ ;
2Д	$\varepsilon_1$	$a = -\frac{\omega_0}{3\rho};$ $b = -\varphi + t_0\omega_0 - \frac{\omega_0^2}{2\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_1\omega_0}{2\rho};$ $c = -\frac{2}{3}\omega_0^2; d = \frac{\varepsilon_1^3\omega_0}{6\rho}; e = -\frac{\varepsilon_1^3\omega_0^2}{6}.$ $a\varepsilon_2^5 + b\varepsilon_2^4 + c\varepsilon_2^3 + d\varepsilon_2^2 + e = 0$	$\omega_0$	$t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}$ ; $t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}$ ; $t_2 = \frac{\omega_0}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_1\omega_0}{\varepsilon_2^2}$ ; $t_5 = \frac{2\omega_0}{\varepsilon_2} - \frac{\varepsilon_2}{\rho}$ ; $t_4 = t_0 - \frac{\omega_0}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_1\omega_0}{\varepsilon_2^2} - \frac{2\omega_0}{\varepsilon_2}$ ;
2е	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\omega_0$	$t_7 = \frac{\varepsilon_2}{\rho}$ ; $t_1 = \frac{\varepsilon_1}{\rho}$ ; $t_3 = t_5 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ ; $t_2 = \frac{\omega_0}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_1}{2\rho} - t_5 \frac{\varepsilon_1}{2\varepsilon_2}$ ; $t_6 = \frac{\omega_0}{\varepsilon_2} - \frac{\varepsilon_2}{2\rho} - \frac{t_5}{2}$ ;
$t_5 = \frac{t_0 - \frac{\varepsilon_1}{2\rho} - \frac{\varepsilon_2}{2\rho} - t_4 - \frac{\omega_0}{\varepsilon_1} - \frac{\omega_0}{v_2}}{\frac{1}{2} + \frac{\varepsilon_1}{2\varepsilon_2}}; a = \frac{\varepsilon_2\varepsilon_1 - \varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2}{6(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)};$				
$b = \frac{\varepsilon_2\varepsilon_1 - \varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2}{6(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\varepsilon_1\varepsilon_2} (2\omega_0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \varepsilon_1\varepsilon_2(t_1 - 2t_0 + t_7)); c = \frac{k+l+m+n+p}{-24\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)};$				
$k = t_7^2\varepsilon_1^4\varepsilon_2^2 + 24\varphi\varepsilon_1^2\varepsilon_2^3 - 4t_0^2\varepsilon_1^3\varepsilon_2^3 - 2t_1^2\varepsilon_1^3\varepsilon_2^3 + 24\varphi\varepsilon_1^3\varepsilon_2^2 - 2t_7^2\varepsilon_1^3\varepsilon_2^3 + 4t_0^2\varepsilon_1^4\varepsilon_2^2 + 4t_0^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^4;$				
$l = 16\omega_0^2\varepsilon_2^3\varepsilon_1 + 16\omega_0^2\varepsilon_1^3\varepsilon_2 + 24\omega_0^2\varepsilon_2^2\varepsilon_1^2 + t_1^2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^4 - 8t_0\varepsilon_2^4\varepsilon_1\omega_0 - 4t_0t_1\varepsilon_1^2\varepsilon_2^4 + 12t_7\varepsilon_1^2\varepsilon_2^3\omega_0 - 2t_7t_1\varepsilon_1^3\varepsilon_2^3;$				
$m = 4t_0t_7\varepsilon_1^3\varepsilon_2^3 + 12t_1\varepsilon_1^3\varepsilon_2^2\omega_0 - 24t_0\varepsilon_1^3\varepsilon_2^2\omega_0 + 4t_7\varepsilon_1^4\varepsilon_2\omega_0 + 12t_1\varepsilon_1^2\varepsilon_2^3\omega_0;$				
$n = -24\omega_0\varepsilon_1^2\varepsilon_2^3t_0 + 12\omega_0\varepsilon_2^2\varepsilon_1^3t_7 + 4t_1t_0\varepsilon_1^3\varepsilon_2^3 = 4t_1\varepsilon_1\varepsilon_2^4\omega_0 + 4t_7\varepsilon_1\varepsilon_2^4\omega_0 - 4t_0t_7\varepsilon_1^2\varepsilon_2^4 + 2t_1t_7\varepsilon_1^2\varepsilon_2^4;$				
$p = 4t_1\varepsilon_1^4\varepsilon_2\omega_0 - 4t_1t_0\varepsilon_1^4\varepsilon_2^2 + 2t_1t_7\varepsilon_1^4\varepsilon_2^2 - 8t_0\varepsilon_1^4\varepsilon_2\omega_0 - 4t_7t_0\varepsilon_1^4\varepsilon_2^2 + 4\varepsilon_2^4\omega_0^2 + 4\varepsilon_1^4\omega_0^2.$				
$t_4 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$				

Таблица 2 Формулы для перерасчета максимальных ускорений при разгоне  $\varepsilon_1$  и торможении  $\varepsilon_2$

№ диаграммы	Значения ускорений	
1а и 2в	$\varepsilon_1 = \frac{\varphi}{(t_3 + t_5) \left( \frac{t_6 + t_7}{2} + \frac{t_3 + t_5}{3} \right) + \left( \frac{t_1}{2} + t_2 \right) (t_3 + t_5 + t_6 + t_7) + \frac{t_2}{2} (t_1 + t_2) + \frac{t_1^2}{6} - \frac{t_5 + t_3 + 2t_2 + t_1}{t_5 + t_3 + 2t_6 + t_7} \left( (t_3 + t_5) \left( \frac{t_6 + t_7}{2} + \frac{t_3 + t_5}{6} \right) + t_6 \left( t_7 + \frac{t_6}{2} \right) + \frac{t_7^2}{3} \right)}$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{t_1 + 2t_2 + t_3 + t_5}{t_7 + 2t_6 + t_3 + t_5}$
1б и 2е	$\varepsilon_1 = \frac{2\varphi}{(t_4 + t_5 + t_6 + t_7)(t_1 + 2t_2 + t_3) + t_3 \left( t_1 + 2t_2 + \frac{2}{3}t_3 \right) + t_2(t_1 + t_2) + \frac{1}{3}t_1^2 - \frac{t_3 + 2t_2 + t_1}{t_5 + 2t_6 + t_7} \left( t_7 \left( \frac{2t_7}{3} + 2t_6 + t_5 \right) + t_6(t_5 + t_6) + \frac{1}{3}t_5^2 \right)}$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{t_7 + 2t_6 + t_5}$
2а	$\varepsilon_1 = \frac{\varphi}{(t_3 + t_5) \left( \frac{t_7}{2} + \frac{t_3 + t_5}{3} \right) + \frac{t_1}{2} (t_3 + t_5 + t_7) + \frac{t_1^2}{6} - \frac{t_5 + t_3 + t_1}{t_5 + t_3 + t_7} \left( (t_3 + t_5) \left( \frac{t_7}{2} + \frac{t_3 + t_5}{6} \right) + \frac{t_7^2}{3} \right)}$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{t_1 + t_3 + t_5}{t_7 + t_3 + t_5}$
2б	$\varepsilon_1 = \frac{\varphi}{(t_3 + t_5) \left( \frac{t_7}{2} + \frac{t_3 + t_5}{3} \right) + \left( \frac{t_1}{2} + t_2 \right) (t_3 + t_5 + t_7) + \frac{t_2}{2} (t_1 + t_2) + \frac{t_1^2}{6} - \frac{t_5 + t_3 + 2t_2 + t_1}{t_5 + t_3 + t_7} \left( (t_3 + t_5) \left( \frac{t_7}{2} + \frac{t_3 + t_5}{6} \right) + \frac{t_7^2}{3} \right)}$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{t_1 + 2t_2 + t_3 + t_5}{t_7 + t_3 + t_5}$
2г	$\varepsilon_1 = \frac{2\varphi}{(t_4 + t_5 + t_7)(t_1 + t_3) + t_3 \left( t_1 + \frac{2}{3}t_3 \right) + \frac{1}{3}t_1^2 - \frac{t_3 + t_1}{t_5 + t_7} \left( t_7 \left( \frac{2t_7}{3} + t_5 \right) + \frac{1}{3}t_5^2 \right)} ; ;$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{t_1 + t_3}{t_7 + t_5}$
2д	$\varepsilon_1 = \frac{2\varphi}{(t_4 + t_5 + t_7)(t_1 + 2t_2 + t_3) + t_3 \left( t_1 + 2t_2 + \frac{2}{3}t_3 \right) + t_2(t_1 + t_2) + \frac{1}{3}t_1^2 - \frac{t_3 + 2t_2 + t_1}{t_5 + t_7} \left( t_7 \left( \frac{2t_7}{3} + t_5 \right) + \frac{1}{3}t_5^2 \right)} ;$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{t_7 + t_5}$