

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА РАБОТЫ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РОТОРА ЭЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ

В.В. Талов
(ОАО «НИИЭМ»)

Обосновываются введение изодромной отрицательной обратной связи по положению ротора электрошпинделя, а также необходимые и достаточные условия по выбору её параметров для реализации скользящего режима работы следящего электропривода позиционирования ротора электрошпинделя. Приведена математическая модель следящего электропривода и результаты её исследования.

Ключевые слова: скользящий режим, следящий электропривод, позиционирование ротора электрошпинделя, линейный магнитоэлектрический двигатель, двухпозиционное реле, изодромная отрицательная обратная связь, вырожденное характеристическое уравнение, математическая модель, фрезерование и сверление печатных плат.

В станках для сверления и фрезерования печатных плат используются электрошпиндели (ЭШ), закрепленные, как правило, по два или по четыре на несущей траверсе. Для обеспечения перемещения траверсы с частотой порядка 10 Гц необходимо использовать высокомоментные двигатели. Это требует достаточно больших энергетических затрат [1].

В связи с этим перспективным направлением является создание ЭШ с встраиваемым магнитоэлектрическим линейным двигателем, т. е. линейным двигателем постоянного тока с использованием постоянных магнитов для осевого перемещения ротора ЭШ совместно с инструментом для сверления или фрезерования.

Проблема создания электроприводов прецизионного позиционирования связана, во-первых, с обеспечением высокой статической точности воспроизведения заданного положения, а, во-вторых, с достижением заданного положения без перерегулирования.

Высокая статическая точность достигается при использовании цифровых методов измерения значений координат и вычисления и преобразования сигнала ошибки. Однако представление сигналов в дискретном виде приводит к ухудшению динамических свойств систем с цифровыми регуляторами положения по сравнению с непрерывными. Так как координаты двигателя как объекта управления (перемещение, скорость, ток якоря) принципиально полностью наблюдаемы, а время переходных процессов относительно мало, то для самого двигателя не требуется обязательного использования цифрового способа управления.

Достижение заданного положения без перерегулирования обеспечивается не только параметрами регулятора, но и заданием траектории движения определенной конфигурации, отвечающей двум

требованиям: равенству нулю первых производных по времени в начальной и конечной точках траектории движения и равенству нулю или конечной величине второй производной по времени в каждой точке траектории.

Вышеуказанные принципы были положены в основу разработки прецизионного следящего линейного электропривода позиционирования ротора ЭШ.

В соответствии с техническими требованиями точность позиционирования ротора ЭШ равна ± 50 мкм. В связи с этим в линейном электроприводе позиционирования ротора ЭШ задание траектории движения, измерение координаты движения с помощью датчика положения, вычисление и компенсация ошибки позиционирования производятся в аналоговой форме.

Электропривод включает в себя задающий генератор с регулируемой частотой, счётчик, определяющий порядок выборки данных из программируемого запоминающего устройства, программное запоминающее устройство, в котором в цифровой форме запрограммирована конфигурация траектории движения, цифроаналоговый преобразователь, регулятор, состоящий из регулятора положения и подчинённого ему регулятора тока, однофазный транзисторный инвертор, работающий в режиме широтно-импульсного преобразователя, и линейный магнитоэлектрический двигатель (ЛЭД), который по принципу управления адекватен двухпозиционному реле. В связи с этим целью работы является обеспечение работы ЛЭД и, следовательно, электропривода в скользящем режиме. Для этого регулятор положения принят релейным, работающим в скользящем режиме, а регулятор тока – релейным, работающим в автоколебательном режиме.

На рис. 1 представлена структурная схема системы автоматического регулирования (САР) следящего электропривода позиционирования ротора ЭШ. Все переменные в ней выражены в преобразованном по Лапласу виде: p – оператор Лапласа; $x^*(p)$ – заданное значение положения ротора ЭШ; $x(p)$ – истинное положение ротора ЭШ; РЭ1 – релейный элемент регулятора положения (РП) ротора ЭШ; T_n – постоянная времени фильтра РП; τ – постоянная времени звена обратной связи релейного элемента РЭ1; $i^*(p), i(p)$ – заданное и истинное значения тока обмотки статора ЛЭД; РЭ2 – релейный элемент регулятора тока РТ; ДТ – датчик тока обмотки статора; $T_{дт}$ – постоянная времени фильтра ДТ; ДП – датчик положения ротора ЭШ; θ – постоянная времени издромной отрицательной обратной связи по положению ротора ЭШ; T_1 – электромагнитная постоянная времени обмотки статора ЛЭД; T_v – кинетическая постоянная времени ЛЭД; T_m – электромеханическая постоянная времени ЛЭД.

Синтез САР, приведённой на рис. 1, состоит из синтеза РТ и синтеза РП.

На рис. 2 приведена структурная схема РТ, полученная в результате проведения соответствующих преобразований схемы на рис. 1, где q_i и q'_i – коэффициенты гармонической линеаризации релейного элемента с гистерезисом [2].

Синтез РТ состоит в проверке выполнения необходимых и достаточных условий существования автоколебательного режима работы РТ [2] и в данной статье не приводится.

Синтез РП для обеспечения скользящего режима работы электропривода позиционирования ротора ЭШ проводился по методике, изложенной в [3].

Однако в рассматриваемой САР, кроме рекомендованного в [3] способа реализации скользящего режима с двухпозиционным релейным элементом РЭ1, потребовалось введение издромной отрицательной обратной связи по положению ротора ЭШ. Реализация скользящего режима осуществляется соответствующим выбором постоянных времени θ и τ .

Как следует из рис. 2, передаточная функция замкнутого РТ может быть представлена в виде:

$$W_{\text{зам. РТ}(p)} = \frac{pT_m(pT_{дт} + 1)}{\left[\frac{1}{q_i + jq'_i} (p^2T_1T_m + pT_m + 1)(pT_{дт} + 1) + pT_m \right]} \quad (1)$$

Коэффициенты гармонической линеаризации q_i, q'_i , рассчитанные исходя из параметров ЛЭД: $q_i = 186, q'_i = -31$.

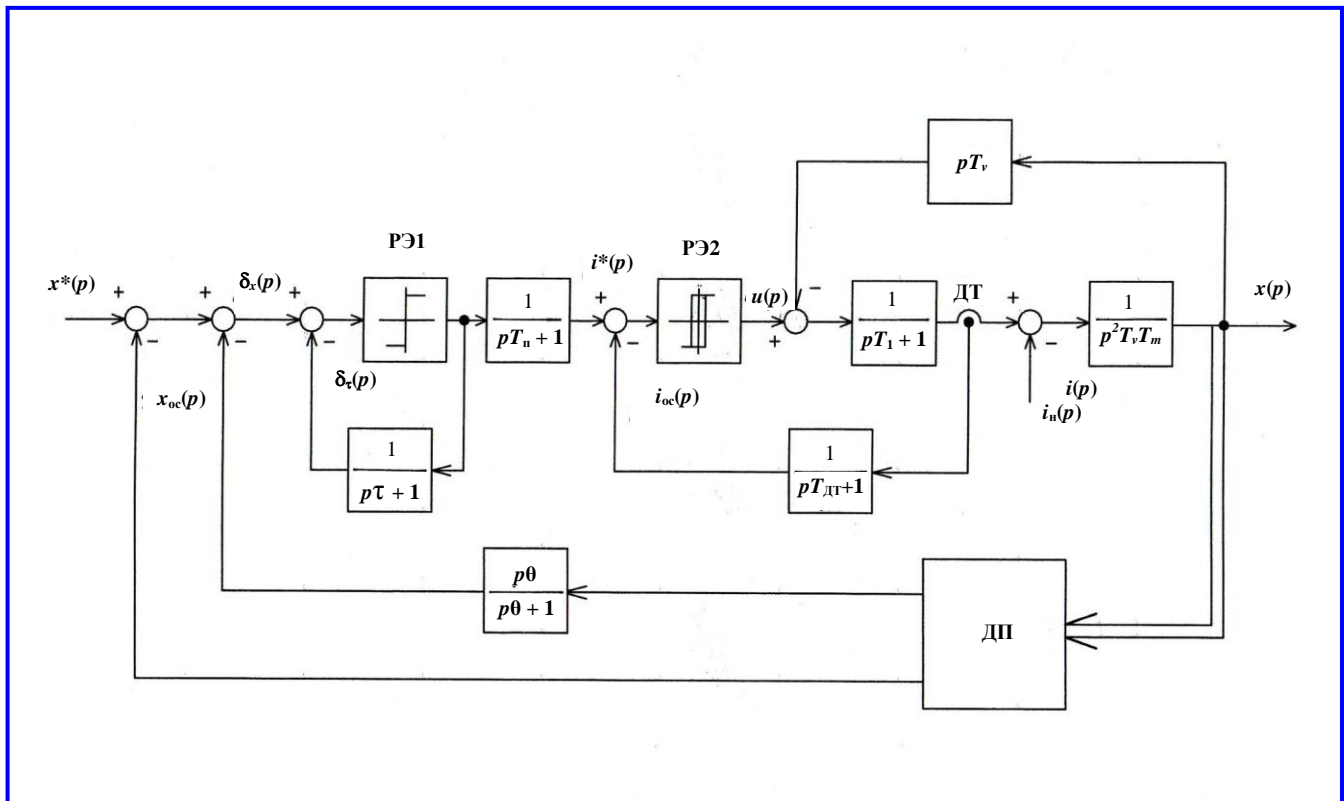


Рис. 1. Структурная схема САР следящего электропривода позиционирования ротора ЭШ

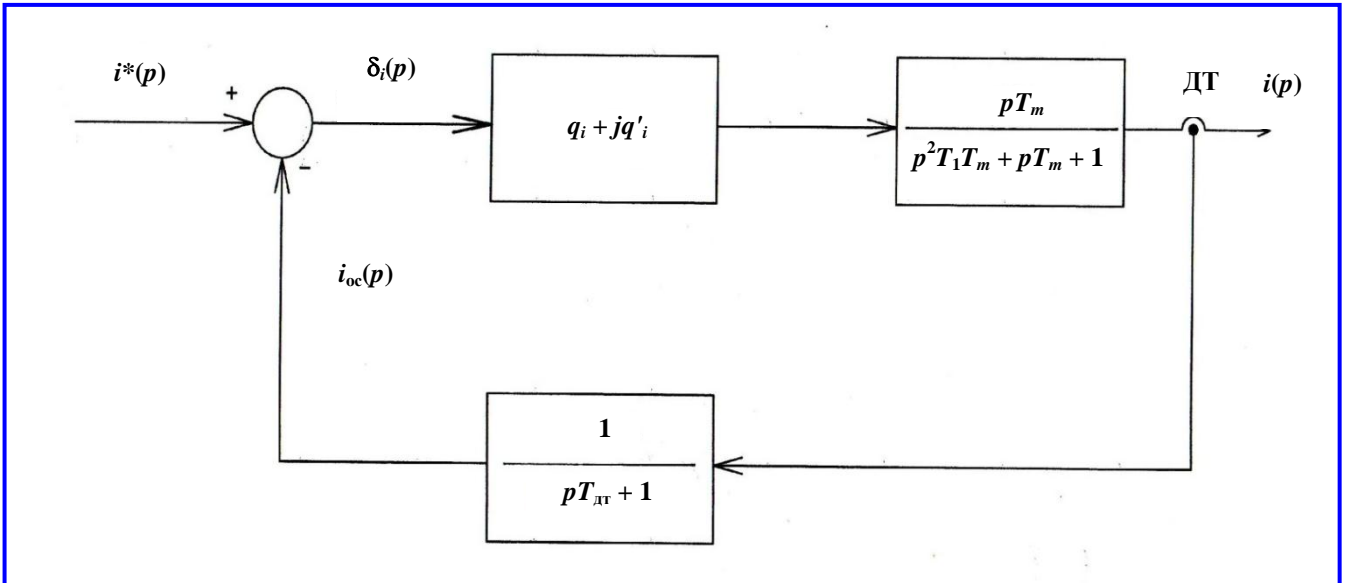


Рис. 2. Структурная схема регулятора тока РТ

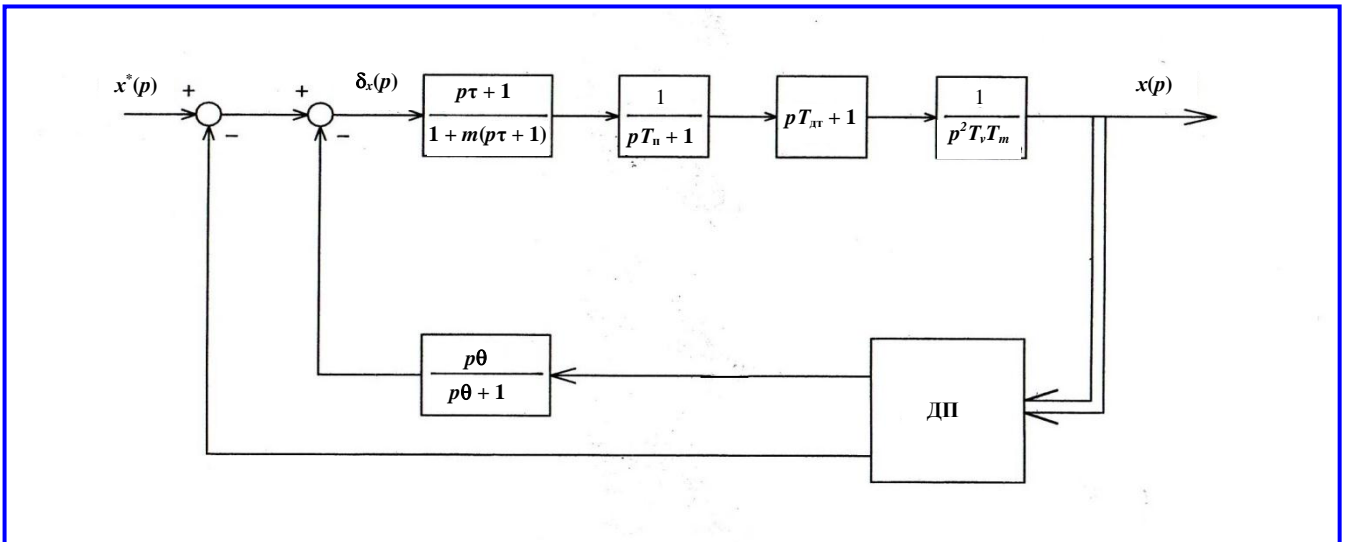


Рис. 3. Структурная схема САР с преобразованным контуром реле РЭ1

Поскольку q_i, jq'_i находятся в квадрате и $|q_i| \gg |q'_i|$, можно принять $q_i + jq'_i \approx q_i$.
 Введём параметр $l = 1/q_i$ и, поскольку $q_i \gg 1$, то $l \ll 1$.
 Тогда из уравнения (1) следует:

$$W_{\text{зам. РТ}(p)} = \frac{pT_m(pT_{\text{дт}} + 1)}{1(p^2T_1T_m + pT_m + 1)(pT_{\text{дт}} + 1) + pT_m} \quad (2)$$

В результате передаточную функцию замкнутого РТ (2) можно в первом приближении привести к виду:

$$W_{\text{зам. РТ}(p)} = pT_{\text{дт}} + 1. \quad (3)$$

Произведём свёртку контура с релейным элементом РЭ1, заменив релейный элемент усилите-

лем с бесконечно большим коэффициентом усиления $K_{\text{рэ1}}$ и введя параметр $m = 1/K_{\text{рэ1}}$.

В результате свёртки после введения параметра m передаточная функция контура с релейным элементом РЭ1 может быть представлена в виде:

$$W_{\text{рэ1}}(p) = \frac{p\tau + 1}{1 + m(p\tau + 1)}. \quad (4)$$

Учитывая выражения (4) и (3), структурная схема САР, приведённая на рис. 1, после свёртки контура с РЭ1 может быть представлена в виде, приведённом на рис. 3.

Выберем постоянную времени фильтра на выходе регулятора положения $T_{\text{п}} = T_{\text{дт}}$ для компенсации

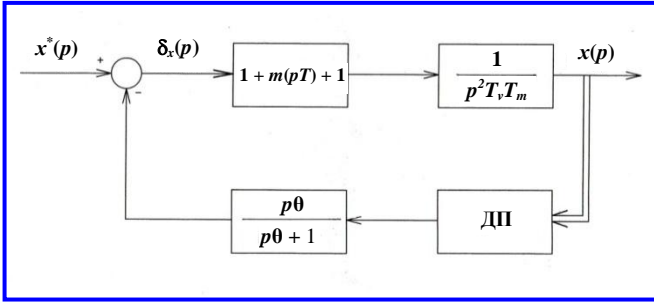


Рис. 4. Структурная схема САР с компенсацией постоянной времени фильтра РТ

времени фильтра регулятора тока $T_{дт}$.

С учётом этого преобразуем структурную схему САР, приведённую на рис. 3, в структурную схему, приведённую на рис. 4. Передаточная функция замкнутой САР (см. рис. 4) может быть представлена в виде:

$$W_{зам.}(p) = \frac{(p\tau + 1)(p\theta + 1)}{m[p^4 T_v T_m \tau \theta + p^3 T_v T_m (\tau + \theta) + p^2 T_v T_m] p^3 T_v T_m \theta + p^2 (T_v T_m + 2\tau\theta) + p(\tau + 2\theta) + 1}$$

Характеристическое уравнение замкнутой САР:

$$D_{зам.}(p) = m[p^4 T_v T_m \tau \theta + p^3 T_v T_m (\tau + \theta) + p^2 T_v T_m] + p^3 T_v T_m \theta + p^2 (T_v T_m + 2\tau\theta) + p(\tau + 2\theta) + 1 = 0. \quad (5)$$

Очевидно, что при $K_{РЭ1} \rightarrow \infty$,

$$m = \lim_{K_{РЭ1} \rightarrow \infty} \frac{1}{K_{РЭ1}} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Тогда из (5) получаем вырожденное характеристическое уравнение замкнутой САР:

$$D_{зам. вып}(p) = p^3 T_v T_m \theta + p^2 (T_v T_m + 2\tau\theta) + p(\tau + 2\theta) + 1 = 0. \quad (7)$$

Для реализации скользящего режима работы ЛЭД и электропривода необходимо выполнить четыре условия [3]:

- вырожденное характеристическое уравнение замкнутой САР должно удовлетворять условиям устойчивости;

- порядок уравнения при коэффициенте m в характеристическом уравнении замкнутой САР должен быть на один порядок выше вырожденного характеристического уравнения;

- должно выполняться условие $A_0/B_0 > 0$, где A_0 – коэффициент старшего члена в полиноме вырожденного характеристического уравнения замкнутой

САР; B_0 – коэффициент старшего члена в полиноме уравнения при коэффициенте m ;

- скорость изменения сигнала $\delta_\tau(t)$ должна быть больше скорости изменения сигнала $\delta_x(t)$, т. е. $\delta'_\tau(t) > \delta'_x(t)$ для любого момента времени, в том числе и для $t = 0$ (см. рис. 1).

Анализируя характеристическое уравнение замкнутой САР (5) и вырожденное характеристическое уравнение (7), констатируем, что условия (1) – (3) реализации скользящего режима выполняются.

Чтобы выполнить четвёртое условие, потребовалось введение издромной отрицательной обратной связи по положению ротора ЭШ (рис. 1). Определим скорости изменения сигналов $\sigma_\tau(t)$, $\sigma_x(t)$.

Для контура с релейным элементом РЭ1 (см. рис 1.):

$$\sigma_\tau(p) = X_{вых. РЭ1}(p) \frac{1}{p\tau + 1},$$

где $X_{вых. РЭ1}(p)$ – выходной сигнал РЭ1 в виде, преобразованном по Лапласу. Поскольку, независимо от величины входного сигнала, кроме $X_{вх. РЭ1}(t) = 0$:

$$X_{вх. РЭ1}(t) = \text{const}; X_{вых. РЭ1}(p) = 1/p.$$

Тогда
$$\sigma_\tau(p) = \frac{1}{\tau} \frac{1}{p(p + \frac{1}{\tau})}.$$

Перейдя от преобразования по Лапласу к временной функции, получаем

$$\sigma_\tau(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Отсюда
$$\sigma'_\tau(0) = \frac{1}{\tau}.$$

Для определения сигнала $\sigma_x(t)$ используем структурную схему САР на рис. 4.

Тогда с учётом (6) получим

$$\sigma_x(p) = X^*(p) \frac{p(p + \frac{1}{\theta})}{p^2 + p(\frac{1}{\theta} + \frac{\tau}{T_v T_m}) + \frac{1}{T_v T_m}}.$$

Наибольший интерес представляет случай, когда $X^*(t)$ является единичным скачком. Тогда $X^*(p) = 1/p$.

В результате получаем

$$\sigma_x(p) = \frac{p + \frac{1}{\theta}}{p^2 + p(\frac{1}{\theta} + \frac{\tau}{T_v T_m}) + \frac{1}{T_v T_m}}. \quad (8)$$

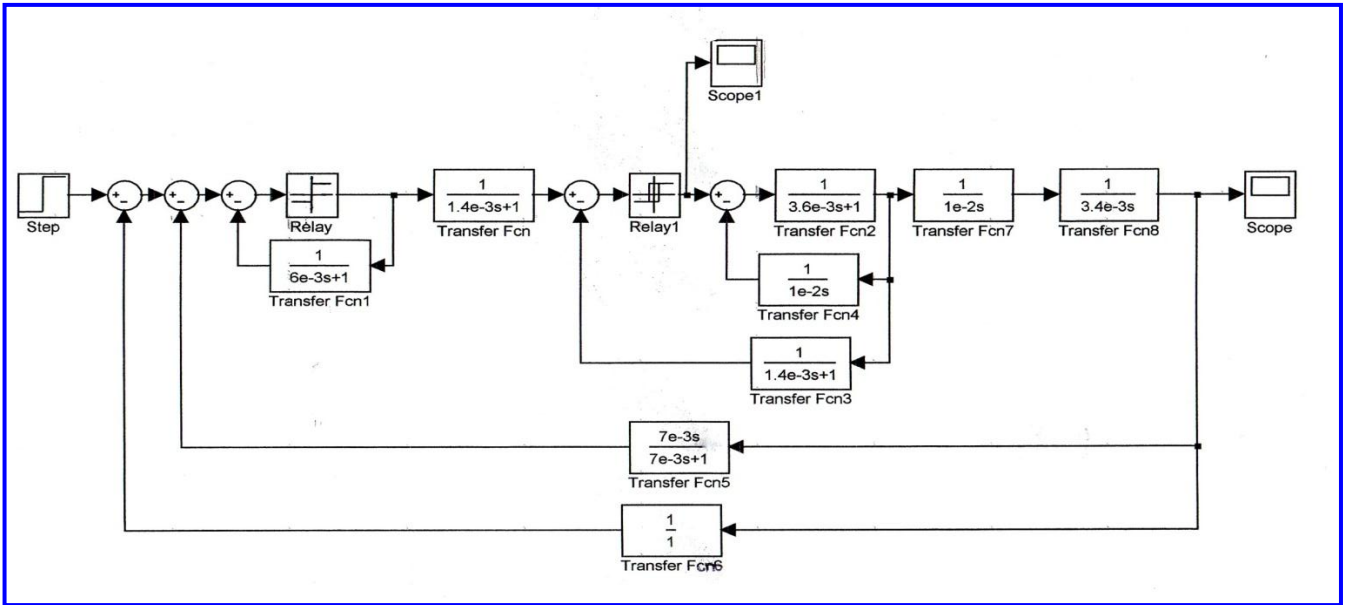


Рис. 5. Модель САР следящего линейного электропривода

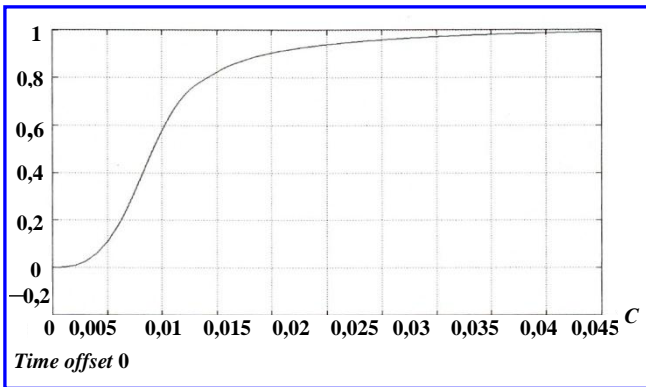


Рис. 6. Реакция САР следящего линейного электропривода на единичный скачок заданного положения ротора ЭШ

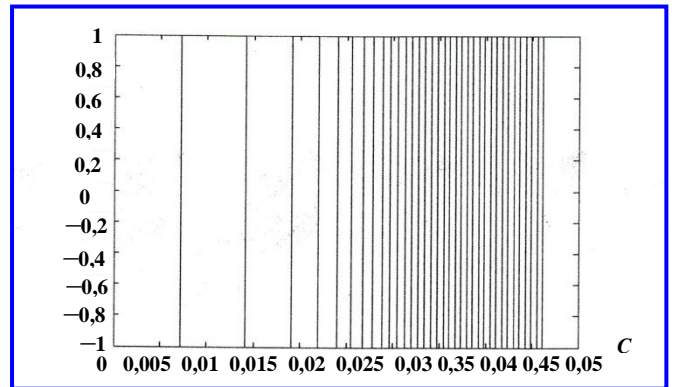


Рис. 7. Автоколебательный режим работы регулятора тока

Преобразуем $\sigma_x(p)$ (8) во временную функцию $\sigma_x(t)$ и из неё определим $\sigma'_x(0)$:

$$\sigma'_x(0) = \sqrt{\frac{\theta - \tau}{T_v T_m \theta}} \tag{9}$$

Ранее было сформулировано четвёртое условие обеспечения скользящего режима работы ЛЭД и электропривода позиционирования ЭШ в виде $\delta'_x(0) > \delta_x(0)$, т. е. должно быть

$$\frac{1}{\tau} > \sqrt{\frac{\theta - \tau}{T_v T_m}}$$

Отсюда следует, что выполнение четвёртого условия существования скользящего режима заключается в выполнении неравенства:

$$\theta < \frac{\tau^3}{\tau^2 - T_v T_m} \tag{10}$$

Из выражений (9) и (10) сформулируем необходимые и достаточные условия выбора постоянных времени τ и θ в виде:

$$\tau > \sqrt{T_v T_m},$$

$$\tau < \theta < \frac{\tau^3}{\tau^2 - T_v T_m}$$

Критерием правильного выбора величины постоянных времени τ и θ является реакция САР следящего линейного электропривода без перерегули-

рования на единичный скачок заданного положения ротора ЭШ.

Это исследовалось на модели САР, приведённой на рис. 5. На рис. 6 приведена реакция САР следящего линейного электропривода на единичный скачок заданного положения ротора ЭШ, а на рис. 7 показан автоколебательный режим работы регулятора тока.

На основе теоретических изысканий, изложенных в настоящей статье, был разработан и испытан макетный образец следящего линейного электропривода позиционирования ротора ЭШ со следующими параметрами:

Рабочий ход ротора, мм	15
Усилие, развиваемое ЛЭД, Н	100
Частота осевого перемещения ротора, Гц	0 – 10
Точность установки ротора в требуемом положении, не хуже, мм	0,05
Максимальная скорость перемещения ротора, м/с	0,4

Выводы

1. Исследование следящего линейного электропривода позиционирования ротора ЭШ на модели подтвердило правильность рекомендаций по выбору величин постоянных времени τ и θ .

2. Введение изодромной отрицательной обратной связи по положению ротора ЭШ наряду с рекомендациями [2] позволило обеспечить скользящий режим работы следящего линейного электропривода.

3. Полученные результаты могут быть использованы при разработке следящих электроприводов прецизионного позиционирования с линейными магнитоэлектрическими двигателями.

Литература

1. Сверление и фрезерование проводниковых плат / пер. с нем. – А-75001. – М. : ВЦП, 1978.
2. Попов Е. П., Пальтов П. Т. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем / Е. П. Попов, П. Т. Пальтов. – М. : ГИФМЛ, 1960. – 790 с.
3. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности / М. В. Мееров. – М. : Наука, 1967. – 424 с.

Поступила в редакцию 27.06.2011

Владислав Васильевич Талов, канд. техн. наук,
начальник лаборатории, e-mail: info@niiem.ru,
т. (495) 994-53-27.