

К. А. Анкудинов, А. И. Анкудинов, Н. С. Акиншин,
О. А. Глаголев, А. В. Емельянов, В. В. Мануйлов

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На основе математического анализа физических процессов пускового режима работы электропривода предложен способ измерения его электромеханической постоянной времени, технологическим признаком которого является однозначное соотношение времени достижения экстремального значения реакцией апериодического звена и постоянных времени электропривода и апериодического звена. Предложено устройство, реализующие разработанный способ измерения электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока.

Ключевые слова: электропривод, электромеханическая постоянная времени, апериодическое звено, передаточная функция.

Известны способы и устройства измерения постоянной времени одиночных экспоненциальных импульсов (ЭИ) [1—3] вида $u(t) = U \exp(-\alpha_{\text{ЭИ}}t) = U \exp(-t/T_{\text{ЭИ}})$, где U — амплитуда ЭИ, $\alpha_{\text{ЭИ}}$ — коэффициент затухания, $T_{\text{ЭИ}} = 1/\alpha_{\text{ЭИ}}$ — постоянная времени ЭИ.

При измерении электромеханических постоянных времени электроприводов постоянного тока возникают сложные сигналы, представляющие собой суперпозицию одиночного ЭИ и постоянной составляющей [4—6]:

$$u_1(t) = U_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + U_0 = U_0 \left[k \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + 1 \right], \quad (1)$$

где U_1 — амплитуда ЭИ (возникает за счет броска пускового тока электродвигателя — известная величина); T_1 — электромеханическая постоянная времени электропривода (искомая величина); U_0 — постоянная составляющая сигнала (известная величина); $k = U_1/U_0$ — постоянная величина, в зависимости от типа и мощности электродвигателя имеет значения $k \in [1, 10]$.

В настоящей статье рассматривается точный и высокопроизводительный способ измерения постоянной времени T_1 электропривода по времени достижения экстремума выходного сигнала (реакции) апериодического звена (АЗ) первого порядка. Предложено устройство, реализующее разработанный способ.

Рассмотрим математический аппарат предложенного способа. На вход АЗ поступает исследуемый сигнал (1), который после преобразований имеет изображение по Лапласу [7]

$$u_1(s) = U_0 \frac{1 + s(k+1)T_1}{s(1 + sT_1)}, \quad (2)$$

где s — оператор Лапласа.

Передаточная функция АЗ первого порядка с единичным коэффициентом передачи [8]

$$W(s) = \frac{1}{1 + sT_2}, \quad (3)$$

где T_2 — известная постоянная времени АЗ.

Перемножив выражения (2) и (3), после преобразований получим изображение по Лапласу реакции АЗ:

$$u_2(s) = U_0 \frac{1 + s(k+1)T_1}{s(1 + sT_1)(1 + sT_2)}. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение (4) имеет три корня:

$$s_1 = 0; \quad s_2 = -1/T_1; \quad s_3 = -1/T_2. \quad (5)$$

Применив для выражения (4) обратное преобразование Лапласа [7] для всех вариантов корней (5), получим оригиналы реакций АЗ $u_2(t)$:

— в общем случае для трех разных корней при $T_1 \neq T_2$

$$u_2(t) = U_0 \left[\frac{kT_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{(k+1)T_1 - T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) + 1 \right]; \quad (6)$$

— для нулевого и двух кратных корней при $T_1 = T_2 = T$ (в отличие от рассмотренных в работах [4—6])

$$u_2(t) = U_0 \left[\left(k \frac{t}{T} - 1 \right) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + 1 \right]. \quad (7)$$

Дифференцируя уравнения (6) и (7) по времени t , получаем выражения для производных от реакции АЗ:

— в общем случае при $T_1 \neq T_2$

$$\frac{du_2(t)}{dt} = U_0 \left[\frac{k}{T_2 - T_1} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2 - (k+1)T_1}{(T_2 - T_1)T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]; \quad (8)$$

— в частном случае (в отличие от работ [4—6]) при $T_1 = T_2 = T$

$$\frac{du_2(t)}{dt} = \frac{U_0}{T} \left[1 + k \left(1 - \frac{t}{T} \right) \right] \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (9)$$

Приравнявая выражения (8) и (9) нулю и решая их относительно t , находим моменты времени t_3 , в которые реакции АЗ $u_2(t)$ (формулы (6) и (7)) принимают экстремальные максимальные значения:

— в общем случае при $T_1 \neq T_2$

$$t_3 = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k T_2}{(k+1) T_1 - T_2}; \quad (10)$$

— в частном случае (в отличие от работ [4—6]) при $T_1 = T_2 = T$

$$t_3 = \frac{k+1}{k} T. \quad (11)$$

На рис. 1 представлено семейство зависимостей $u_2(t)$ АЗ, построенное в соответствии с выражениями (6) и (7) при $k = 5$, $T_2 = \text{const}$, $U_0 = \text{const}$ и различных соотношениях T_1 и T_2 : кривые 1, 3, 4 и 5 построены по выражению (6) при $T_1 \neq T_2$, а кривая 2 — по выражению (7) при $T_1 = T_2 = T$. Абсцисса t оцифрована в значениях постоянной времени T_2 АЗ, а ордината $u_2(t)$ — в значениях постоянной составляющей U_0 . Зависимости 1, 2 и 3 имеют экстремум и получены при $T_1 = 2T_2$, $T_1 = T_2$ и $T_1 = 0,5T_2$ соответственно, а зависимости 4 и 5 — экстремума не имеют и построены при $T_1 = (1/6)T_2$ и $T_1 = 0,1T_2$ соответственно.

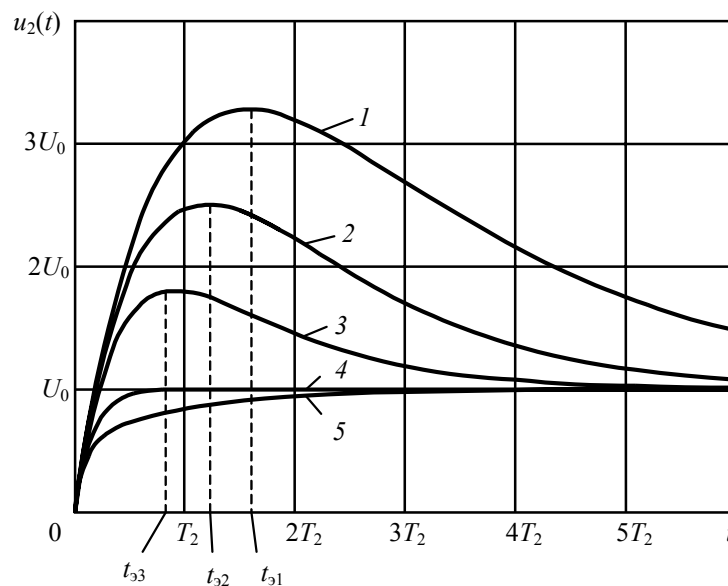


Рис. 1

Как видно из рисунка, сигнал $u_2(t)$ имеет экстремум не при всех соотношениях T_1 и T_2 . Условие существования экстремума зависимостей определяется положительным значением знаменателя функции под знаком логарифма в выражении (10):

$$T_1 > T_2 / (k+1). \quad (12)$$

Это условие для зависимостей 1—3 выполняется, и они имеют экстремум в моменты времени t_{31} , t_{32} и t_{33} соответственно, а для зависимостей 4 и 5 условие (12) не выполняется, причем зависимость 4 является критической, так как построена при $T_1 = T_2 / (k+1) = (1/6)T_2$.

В отличие от известного способа измерения электромеханической постоянной времени электропривода [4—6] рассмотренный математический аппарат учитывает все возможные варианты соотношений между постоянными времени электропривода и апериодического звена ($T_1 > T_2$, $T_1 < T_2$ и $T_1 = T_2$), тогда как в работах [4—6] ситуация при $T_1 = T_2$ не рассматривается.

Анализ семейства зависимостей АЗ (см. рис. 1) позволяет сформулировать суть предложенного способа измерения электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока как последовательность формальных действий следующего алгоритма.

1. Снять с датчика сигнала электродвигателя исследуемый сигнал с измеряемой электромеханической постоянной времени T_1 электропривода [6].

2. Подать данный сигнал (см. п.1) на АЗ первого порядка с единичным коэффициентом передачи и известной с заданной точностью постоянной времени T_2 , определяемой из условия (12), так как ожидаемый диапазон изменения измеряемой величины T_1 всегда известен.

3. Аппаратным путем зафиксировать и измерить время достижения экстремума реакцией АЗ (см. рис. 1), получив в результате $t_3 = t_{3,и}$.

4. Рассчитать значение искомой электромеханической постоянной времени T_1 по известным значениям $t_3 = t_{3,и}$, k и T_2 , для чего решить относительно T_1 одним из численных методов трансцендентное уравнение (10) при $T_1 \neq T_2$ или линейное уравнение (11) при $T_1 = T_2 = T$.

Одним из возможных вариантов реализации предложенного способа измерения постоянной времени T_1 по времени достижения экстремума $t_{3,и}$ реакцией АЗ является устройство контроля постоянной времени T_1 , функциональная схема которого представлена на рис. 2. Устройство контроля включает: ДС — датчик сигнала, ФИ — формирователь импульсов, АЗ — апериодическое звено первого порядка, МК — микроконтроллер, ИЭ — индикатор экстремума напряжения и ЗИ — знаковый индикатор.

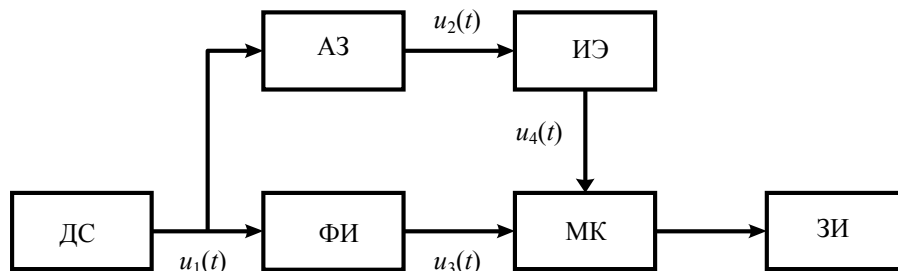


Рис. 2

Датчик сигнала, описанный в работе [6], представляет собой включенное в якорную обмотку электродвигателя активное сопротивление, значение которого на два-три порядка меньше сопротивления обмотки якоря, что исключает влияние ДС на режим работы электропривода. К датчику подключены входы АЗ и ФИ, который состоит из дифференцирующей цепи и усилителя-ограничителя [6]. Выходной сигнал АЗ подается на ИЭ [2, 4, 5]. Для решения трансцендентных уравнений вида (10) в устройстве применен МК фирмы “Atmel” серии ATtiny28L, в котором к портам, настроенным на вход, подключены выходы ФИ и ИЭ, а к портам, настроенным на выход, подключен четырехразрядный семисегментный ЗИ серии АЛС329Б.

Временные диаграммы работы предложенного устройства представлены на рис. 3. В момент времени $t = 0$ запускается электропривод постоянного тока и сигнал

$u_1(0) = U_1 + U_0 = U_0(k+1)$ поступает с ДС на АЗ и ФИ. На выходе АЗ $u_2(0) = 0$, а на выходе ФИ формируется короткий импульс $u_3(0) = U_{3\max}$, который подается на первый вход МК, где определяется время достижения реакцией АЗ экстремального значения. При $t \in (0; t_{э.и})$ сигнал $u_1(t)$ на выходе ДС уменьшается по экспоненте с постоянной времени T_1 , в пределе стремясь к величине U_0 ; реакция АЗ $u_2(t)$ аperiodически нарастает, оставаясь меньше экстремального значения $u_2(t \in (0; t_{э.и})) < U_{2э}$; МК осуществляет подсчет и хранение текущего времени достижения реакцией АЗ экстремального значения в SRAM-памяти. При $t = t_{э.и}$ реакция АЗ принимает экстремальное значение $u_2(t_{э.и}) = U_{2э}$, напряжение на выходе ИЭ скачком приобретает значение $u_4(t_{э.и}) = U_{4\max}$, а МК прекращает счет времени достижения реакцией АЗ экстремума и запоминает в SRAM-памяти значение времени $t = t_{э.и}$. Далее МК рассчитывает по заданному алгоритму искомую величину электромеханической постоянной времени T_1 , которая фиксируется на ЗИ.

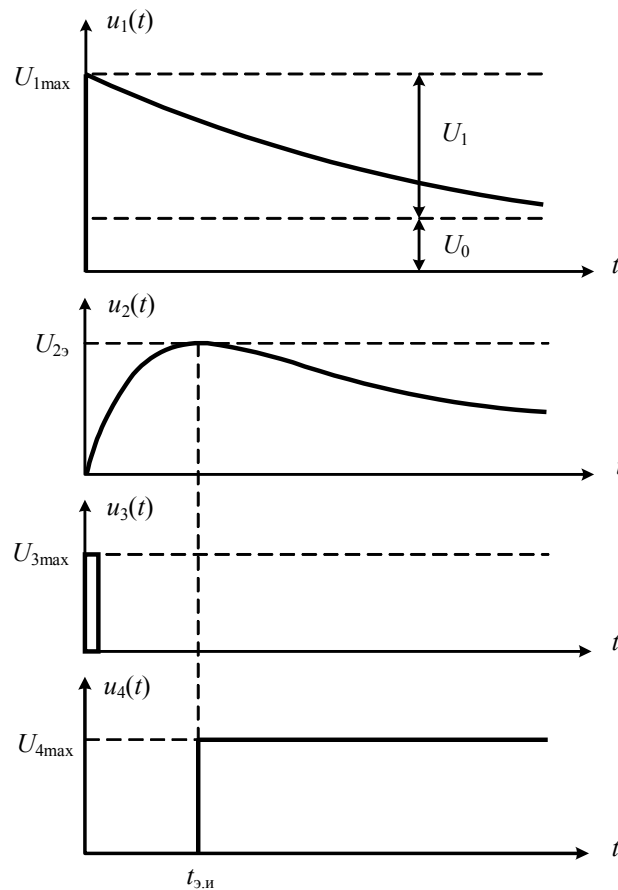


Рис. 3

Обобщенная структурная схема алгоритма работы МК представлена на рис. 4. В блоке 1 осуществляется инициализация МК. В FLASH-память программ заносятся значения T_2 , k , Δ и β , где Δ — заданная точность численного решения трансцендентного уравнения (10), β — признак расчетного времени достижения экстремума; осуществляется настройка портов на выполнение функций ввода — вывода, выделение в SRAM-памяти данных специальных регистров: измеренного $t_{э.и}$ и текущего расчетного $t_{э.р}$ времени достижения экстремумов, текущей расчетной величины электромеханической постоянной времени $T_{1р}$, текущих нижнего

$T_{1p.n}$ и верхнего $T_{1p.v}$ граничных расчетных значений постоянной времени электропривода, текущей расчетной точности $\Delta_p = T_{1p.v} - T_{1p.n}$ решения трансцендентного уравнения (10).

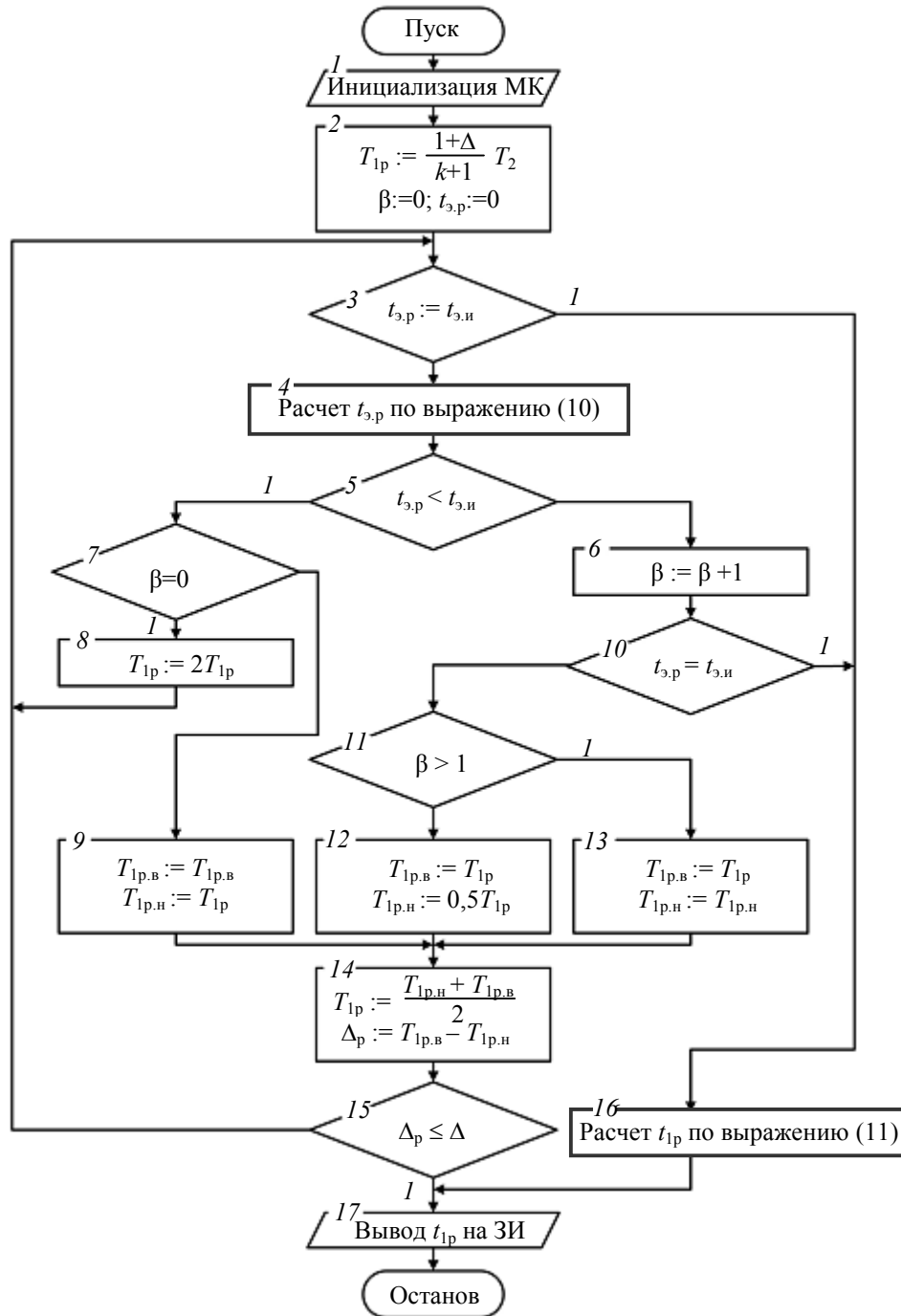


Рис. 4

В блоке 2 задаются начальные значения $T_{1p} = T_2 \left[\frac{1 + \Delta}{k + 1} \right]$, β и $t_{э,р}$. В блоках 3, 5, 7, 10, 11 и 15 выполняется проверка условий, указанных в этих блоках. В блоке 4 по уравнению (10) рассчитывается текущее значение $t_{э,р}$. В блоках 8 и 9 задаются текущие значения T_{1p} , $T_{1p.v}$ и $T_{1p.n}$ при выполнении условия $t_{э,р} < t_{э,и}$, а в блоках 12 и 13 — текущие значения $T_{1p.v}$ и $T_{1p.n}$ при $t_{э,р} > t_{э,и}$. В блоке 14 задаются текущее значение T_{1p} методом половинного

разбиения, а также значение Δ_p . В блоке 16 производится расчет значения T_{1p} по выражению (11) при $t_{э,р} = t_{э,и}$, а в блоке 17 значение T_{1p} выводится на ЗИ с точностью до 0,01 с.

Предложенный способ измерения электромеханической постоянной времени электропривода и устройство, реализующее этот способ, выгодно отличаются от известных [4—6] благодаря повышению на порядок производительности процесса измерений и обеспечению их достоверности при всех возможных вариантах соотношений постоянных времени электропривода и апериодического звена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ankudinov A. I., Kravets V. I., Semchenko M. Ya.* Damping factor meter for single exponential radio and video pulses // *Measurement Techniques*. 1988. Vol. 31. P. 776—779.
2. *Анкудинов А. И., Кравец В. И., Семченко М. Я.* Измеритель коэффициента затухания одиночных экспоненциальных радио- и видеоимпульсов // *Измерительная техника*. 1988. № 8. С. 36—37.
3. *Анкудинов А. И., Кравец В. И.* Измерение коэффициента затухания одиночных экспоненциальных видеоимпульсов по реакции резисторно-емкостного четырехполосника // *Изв. вузов СССР. Приборостроение*. 1989. Т. 32, № 1. С. 56—59.
4. *Ankudinov A. I., Kravets V. I., Ankudinov K. A.* Measurement of the electromechanical time constant of DC electric drives // *Measurement Techniques*. 1990. Vol. 33. P. 1229—1231.
5. *Анкудинов А. И., Кравец В. И., Анкудинов К. А.* Измерение электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока // *Измерительная техника*. 1990. № 12. С. 31—32.
6. А. с. 1557633 СССР. Устройство контроля электропривода / *А. И. Анкудинов, В. И. Кравец, М. Я. Семченко и др.* // Б. И. 1990. № 14.
7. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
8. *Анкудинов А. И., Кравец В. И., Анкудинов К. А.* Искажения фронта и амплитуды экспоненциальных видеоимпульсов электронным усилителем // *Изв. вузов СССР. Приборостроение*. 1990. Т. 33, № 9. С. 59—64.

Сведения об авторах

- Константин Александрович Анкудинов** — канд. техн. наук, доцент; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра радиоэлектронных устройств и систем управления; E-mail: aai_tula@mail.ru
- Александр Иванович Анкудинов** — канд. техн. наук; Тульский артиллерийский инженерный институт; нач. бюро военно-технической информации
- Николай Степанович Акиншин** — д-р техн. наук, профессор; Тульский артиллерийский инженерный институт; ст. науч. сотр. НИИ
- Олег Анатольевич Глаголев** — канд. техн. наук, доцент; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра радиолокационного вооружения
- Алексей Владимирович Емельянов** — канд. техн. наук; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра специального электрооборудования и систем автоматического регулирования
- Владимир Владимирович Мануйлов** — адъюнкт; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра радиоэлектронных устройств и систем управления

Рекомендована кафедрой радиоэлектронных устройств и систем управления

Поступила в редакцию 07.07.08 г.