

ТЕХНОЛОГИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

*Алексей Лупачев¹⁾, Игорь Сапелкин²⁾, Николай Серов³⁾,
Юрий Бехтин⁴⁾, Александр Шостак⁵⁾*

1)...5) Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“, Институт автоматике и вычислительной техники,
Кафедра информационно-измерительной техники
111250 Россия, г. Москва, Красноказарменная ул. 14, Web address: www.mpei.ru
e-mails: ¹⁾LupachevAA@yandex.ru, ²⁾civ9019@mail.ru, ³⁾serna2004@list.ru,
⁴⁾yuri.bekhtin@yandex.ru, ⁵⁾shostak-93@mail.ru

Резюме: Рассматриваются критерии окончания переходного процесса в измерительной цепи, модель которой может быть представлена динамическим звеном первого порядка. Показано, что наибольшее распространение при построении цифровых измерительных приборов, например, измерителей сопротивления обмотки силового трансформатора постоянному току, получил стандартизированный критерий интервального вида, характеризуемый как эмпирический. Найдена зависимость, определяющая критическое значение максимальной постоянной времени измерительной цепи.

Ключевые слова: - измерительная цепь, анализ переходного процесса, критерии окончания переходного процесса, длительность интервала наблюдения за процессом, критическая постоянная времени

Введение

Применение цифровых методов обработки измерительной информации при создании эффективных специализированных средств измерения (СИ) [1] обусловило появление новых подходов к развитию метрологии – измерительных технологий, «как ключевого признака для описания и классификации методов измерений» [2].

Технология динамического измерения (ДИ) постоянной физической величины (ФВ) путём подачи в момент времени $T_0 = 0$ на инерционную измерительную цепь (ИЦ) [3] ступенчатого входного воздействия (скачка) ФВ, сигнала или энергии, предполагает наличие определённого критерия для определения момента T_y завершения переходного процесса (ПП) и времени установления показаний (выходного сигнала – для измерительного преобразователя). Измерительную информацию в данном случае несёт установившееся значение ПП.

Обеспечить высокие метрологические характеристики измерительных процедур позволяет использование априорной информации о модели объекта диагностики, датчика или измерительного сигнала, вид которого обусловлен физическими законами исследуемых процессов [4]. Алгоритмы динамических измерений, основанные на обработке мгновенных значений $A(t)$ ПП, применяются для получения оценки асимптоты ПП. В [5] приведены формулы для нахождения

оценки измеряемой величины (асимптоты) и погрешностей полученной оценки по измеренному значению на основе номинальной переходной характеристики для ряда динамических звеньев с типовыми передаточными функциями.

1. Модель измерительной цепи

Для повышения точности и быстродействия средств измерения большое значение имеет постулат о модели объекта измерения. В практике ДИ важную роль имеет модель объекта измерения в виде переходной характеристики представленной суммой экспонент [6]. Доминирующее значение среди этой суммы имеет составляющая, определяемая поведением динамического звена первого порядка с наибольшей постоянной времени [7-16].

Этим свойством обладает значительное число природных процессов [17]. В их основе лежит положение, что при нарушении равновесия в системе, в процессе релаксации величина отклонения будет уменьшаться, стремясь к нулю или новому установившемуся значению. Например, данную форму имеют процессы линейной неравновесной термодинамики [17] или радиоактивного распада [18]. При предположении, что скорость изменения отклонения от равновесия пропорционально отклонению от равновесия, получаем дифференциальные уравнения первого порядка:

1) $k \Delta a + d(\Delta a)/dt = 0$ с решением в виде

$$\Delta a(t) = \Delta a_0 \exp(-t/\tau);$$

2) $\Delta i + \tau d(\Delta i)/dt = I_0$ с решением в виде $\Delta i(t) = I_0 [1 - \exp(-t/\tau)]$, где Δa или Δi – величина отклонения от начального состояния;

k – эффективная константа скорости;

τ – время релаксации параметра a (постоянная времени процесса), $\tau = 1/k$;

Δa_0 или I_0 – начальные (максимальные) отклонение от равновесия.

Такие модели ИЦ широко используются в термометрии, например, при измерении температуры тела человека контактными цифровыми термометрами [12] или температурных режимов обмоток силовых трансформаторов при их испытаниях на нагрев [14] в регулярном режиме; при измерении сопротивления обмоток силовых трансформаторов постоянному току [7, 13]; при измерении параметров электрических двухполюсников и различных объектов, представленных двух-, трёх- или четырёхэлементными схемами замещения [6, 8-11].

Определение длительности переходного процесса, т.е. наступления установившегося значения, является актуальной задачей для многих отраслей знаний и продолжает рассматриваться в современных научных публикациях, например, в следующих работах [19-23]. В работе [24] отмечается сложность некоторых способов *«определения момента окончания переходного процесса ..., поскольку не предложено четких критериев, когда переходный процесс можно считать законченным»*.

2. Классификация критериев определения момента завершения переходного процесса

Одной из задач измерительных технологий является, согласно [2], разработка классификации критериев проведения измерений для обоснованного построения специализированных СИ. Рассмотрим одну из возможных классификаций критериев определения момента завершения (ОМЗ) ПП по мгновенным значениям $a_k = a(t_k)$ переходного процесса в равноотстоящие дискретные моменты времени $t = t_k = k \cdot \Delta T_D$; $\Delta T_D = t_k - t_{k-1}$; $1 \leq k \leq T_1/\Delta T_D + 1$.

Для построения классификации предлагается использовать такие известные классификационные признаки как:

- информации об ИЦ, используемая в критерии (априорная, текущая или апостериорная);

- уровень знаний об объекте, используемый в критерии (теоретический или эмпирический);
- форма представления критерия (абсолютная или относительная).

С математической точки зрения задача ОМЗ ПП не имеет однозначного решения, т.к. такие процессы сходятся в бесконечности ($t \rightarrow \infty$) и поэтому не имеют окончания. Объективный критерий имеет смысл только при заданном значении допустимой динамической погрешности (в абсолютной $\Delta_{D,0}$ или относительной $\delta_{D,0}$ формах).

В системах автоматического управления при анализе показателей качества ПП, для которого A_∞ известно, определение длительности ПП выполняется апостериорно по зарегистрированной кривой процесса как время достижения ПП заданной трубки точности ($1,00 \pm \Delta$), где Δ – допустимая переходная погрешность и $A_\infty = 1,00$ [25]. Обычно пределы такого приближения составляет 1...5 % от установившегося значения.

Установившееся значение A_∞ сигнала ПП в измерительной задаче априорно неизвестно и определяется в измерительном эксперименте. Следовательно, определить текущую динамическую погрешность $\Delta_{\text{дин}}(t) = A(t) - A_\infty$ нет возможности и её можно рассчитать только апостериорно.

Эта погрешность для аperiodического звена всегда отрицательна, но для упрощения записи последующих выражений будем определять её следующим образом:

$$\Delta_{\text{дин}}(t) = A_\infty - A(t)$$

или

$$\delta_{\text{дин}}(t) = 100[A_\infty - A(t)]/A_\infty, \% \quad (1)$$

Таким образом, заранее рассчитать момент ТПП завершения ПП с заданной динамической погрешностью по критериям (2) невозможно (соответственно в абсолютной или относительной формах):

$$T_{\text{ПП}} = \arg \{ \Delta_{\text{дин}}(t) \leq \Delta_{D,0} \}$$

или

$$T_{\text{ПП}} = \arg \{ \delta_{\text{дин}}(t) \leq \delta_{D,0} \}. \quad (2)$$

Примерами субъективных критериев ОМЗ ПП могут служить критерии для определения допустимого момента снятия отсчёта измерителя активного сопротивления обмотки силового трансформатора:

- *«самим пользователем устройства по прекращению изменений»* активного

сопротивления на дисплее прибора [31];

- «за установившийся принимается ток, при котором стрелка амперметра не изменяет своего положения в течение 1 минуты» [32].

3. Мгновенные критерии определения завершения переходного процесса

Из полной динамической характеристики $h(t)$ можно получить информацию о постоянной времени τ экспоненциального процесса - обобщённого параметра, характеризующего динамические свойства (инерционность) объекта исследования и имеющий размерность времени. Тогда время установления ПП определяется следующим образом [26, 27]:

$$T_Y \geq \tau \ln(1/\delta_{до}) = \tau \beta$$

и

$$T_{ПП.МГ} = \min\{T_Y\}, \quad (3)$$

где $\beta = \ln(1/\delta_{до})$ – множитель, зависящий от допустимой динамической погрешности.

Критерий (3) можно охарактеризовать как объективный, заданный в относительной форме при наличии априорной информации о динамических свойствах ИЦ. Стандартами нормируются номинальные динамические характеристики и наибольшие допустимые отклонения от них для СИ [27]. Современные технологии изготовления датчиков, например, датчиков температуры, не позволяют производить их с низкой себестоимостью и незначительным разбросом динамической характеристики, при этом получение индивидуальной динамической характеристики СИ является особенно дорогостоящим [28].

Примером нормирования времени установления показаний цифрового медицинского термометра является эмпирический критерий: $T_{ПП.ЭМ} = \max\{T_{Yi}\}$, основанный на регистрации минимального времени T_{Yi} достижения термического равновесия на базе результатов измерений температуры пациентов, по крайней мере, у $i = 10 \dots 20$ человек [29] и определения $T_{ПП.ЭМ}$ для данного типа СИ.

Критерий (3) может также использоваться и в случае получения текущей информации о $\tau(j)$ в ходе каждой измерительной операции (цикле измерения j), например, с использованием методов изложенных в работе [30], в которой также приведены оценки погрешности измерения постоянной времени измерительной цепи. При этом критерий (3) преобразуется к виду:

$$T_{Yj} = \tau(j)\beta. \quad (4)$$

Такие критерии (3) и (4), которые связывают длительность ПП с требуемой погрешностью установления процесса, можно назвать мгновенными.

4. Критерии определения момента завершения переходного процесса на основе анализа производных

Следующая группа объективных критериев связана с определением понятия «свободная составляющая». К концу ПП производные $d(\Delta a)/dt$ и $d^2(\Delta a)/dt^2$ обращаются в нуль и приращение координаты состояния прекращается. При этом должны быть заданы допустимые погрешности - пороги: $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$ - для принятия решения о ничтожности текущих значений производных от сигнала ПП. Такие признаки окончания ПП используются в алгоритмах, в которых проверяется одновременность наступления следующих событий:

- $|\Delta a(t)|_{t \geq t_0} \leq \Delta_0$,
 $|d(\Delta a)/dt|_{t \geq t_1} \leq \Delta_1$,
 $|d^2(\Delta a)/dt^2|_{t \geq t_2} \leq \Delta_2$ и $T_{ППa} = \min\{t_0 \& t_1 \& t_2\}$;
- $|d(\Delta a)/dt|_{t \geq t_1} \leq \Delta_1$,
 $|d^2(\Delta a)/dt^2|_{t \geq t_2} \leq \Delta_2$ и $T_{ППб} = \min\{t_1 \& t_2\}$;
- $|d(\Delta a)/dt|_{t \geq t_1} \leq \Delta_1$ и $T_{ППв} = \min\{t_1\}$;
- $|\Delta a(t)|_{t \geq t_0} \leq \Delta_0$ и $T_{ППг} = \min\{t_0\}$.

Критерии а) и г) могут быть использованы только для спадающих до нуля ПП; в) – для монотонных ПП [22, 37]. Критерии а) - г) являются формальными правилами, однако связь между значениями порогов $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$ и допустимой динамической погрешностью $\Delta_{до}$ можно установить только эмпирически [23] и для конкретного значения τ .

В основу построения другого критерия ОМЗ ПП, который также анализирует производную (разделённую разность) сигнала ПП, в аналого-цифровой ИЦ положено наблюдение за динамикой ПП в каждый дискретный момент времени [21] с минимально возможным временным интервалом между выборками. При этом вычисляется разность $\Delta U(t_j)$ между текущим измеренным значением $U(t_j)$ и значением, измеренным на предыдущем шаге $U(t_{j-1})$, а максимальная разность ΔU_{MAX} запоминается. Завершением ПП считается момент ТПП, когда на очередном шаге j разность $\Delta U(t_j)$ не превышает 1 % от максимальной разности ΔU_{MAX} :

$$\Delta U(t_j) = U(t_j) - U(t_{j-1}),$$

$$\Delta U_{MAX} = \max\{\Delta U(t_j)\} \text{ и}$$

$$T_{ППП,PI} = \min \{ \arg [\Delta U(t_k) \leq 1\% \Delta U_{MAX}] \}.$$

Результаты исследования этого критерия показали, что длительность ПП колебательной формы определяется некорректно [21].

5. Интервальные критерии определения момента завершения переходного процесса

В стандарте ГОСТ 3484.1-88 [33] рассмотрен критерий окончания переходного процесса при отсутствии априорной информации о постоянной времени обмотки трансформатора и установившемся значении рабочего тока в измерительной цепи: «Установившимся показанием прибора следует считать показание, которое изменяется не более чем на 1 % отсчитанного значения в течение не менее 30 с». В более ранней редакции этого стандарта (ГОСТ 3484-77) указывалось, что «Установившимся показанием прибора следует считать показание, которое изменяется не более чем на 1 % отсчитанного значения в течение 30 с». Причём постоянная времени обмотки силового трансформатора в зависимости от его мощности описывается корреляционной зависимостью: $\tau(P) = 1.677P^{0.478}$; $R2 = 0.915$ и принимает значения от $\tau_1 \approx 8$ с при $P1 = 8$ кВА до $\tau_2 \approx 300$ с при $P2 = 60$ кВА [34].

Подобный вид критерия используется в процессе испытания трансформаторов на нагрев. Согласно ГОСТ 3484.2-88 [33] испытания необходимо проводить при установившемся тепловом режиме, который наступает, если контролируемое «превышение температуры изменяется не более чем на 1 °С в час в течение четырёх последовательных измерений, выполненных с интервалом не менее 1 час». Причём ориентировочная постоянная времени нагрева трансформаторов с естественным масляным охлаждением (при номинальной мощности в пределах от 0,001 до 1 МВА) принимается равной 2,5 часа, а за нормированное (базовое) значение температуры обмотки в наиболее нагретой точке принимается 98 °С [35].

Данные критерии [21, 33], которые могут быть определены как интервальные, и использующие информацию о допустимом значении изменения сигнала ПП на заданном интервале наблюдения за процессом. Интервальные критерии предполагают независимость результата от значения постоянной времени ИЦ. При этом предполагается, что производная ПП имеет монотонный и убывающий по модулю характер.

Обозначая постоянную длительность j -го интервала наблюдения за динамикой ПП через $\Delta T_H(j)$, как показано на рис. 1, а допускаемое изменение сигнала $A(t)$ на этом интервале по критерию через $\Delta A_H(j)$:

$$\Delta T_H(j) = \Delta T_H = t_k - t_n,$$

$$\Delta A_H(j) = \Delta A_H = B\% \Delta a_{KP} / 100, \quad (5)$$

где t_n – момент начала j -го интервала наблюдения; t_k – момент окончания j -го интервала наблюдения;

Δa_{KP} – абсолютное значение максимального отклонения; принимается в виде, например, максимального приращения сигнала ΔU_{MAX} ПП как в [21] или отсчитанный в момент t_n сигнал $a_j(t_n)$ ПП [33];

$B\%$ – назначенное по критерию максимальное относительное отклонение, $B\% = 1\%$ по [21, 33].

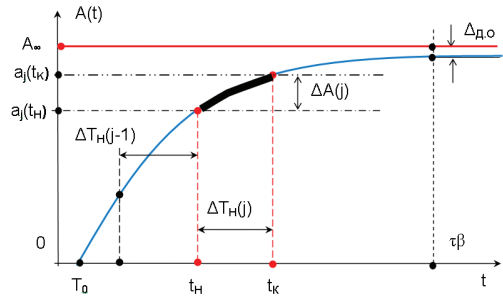


Рис. 1. Положение интервала наблюдения на кривой переходного процесса

Тогда момент установления переходного процесса $T_{ПП,ин}$, определяемый по интервальному критерию, можно приписать как началу t_n , так и концу t_k интервала наблюдения ΔT_H . Относительные приращения сигнала ПП за время равное ΔT_H можно определить для обоих концов j -го интервала наблюдения следующим образом:

$$\rho_{jn} = 100[a_j(t_k) - a_j(t_n)]/a_j(t_n)$$

и

$$\rho_{jk} = 100[a_j(t_k) - a_j(t_n)]/a_j(t_k), \quad (6)$$

причём имеем: $\rho_{jk} = \rho_{jn}/v_j$, $v_j = a_j(t_k)/a_j(t_n) > 1$. Установившееся значение ПП наступает при выполнении критерия $B\% \geq \rho_{jk}$ на интервале с номером j в момент времени ТПП.ИН.К (7). При этом $T_{ПП,ин,н} = \min \{ \arg [B\% \geq \rho_{jn}] \}$ или, что более правильно, так как всегда $\rho_{jk} \leq \rho_{jn}$:

$$T_{ПП,ин,к} = \min \{ \arg [B\% \geq \rho_{jk}] \}. \quad (7)$$

Процесс изменения приращения сигнала ρ_{jk} в зависимости от номера соседних не перекрывающихся интервалов наблюдения показан на рис. 2. При этом все кривые сведены к одной и той же точке абсциссы с номером $j(\tau)$, имеющей конкретное значение. Так для:

- $\tau_1 = 6,25c$ имеем $T_Y \geq 29c$ и следовательно установившееся значение будет достигнуто на втором интервале наблюдения и $j(\tau_1) = 2$;
- $\tau_2 = 12,5c$ имеем $T_Y \geq 57,5c$ и $j(\tau_2) = 3$ и т.д.

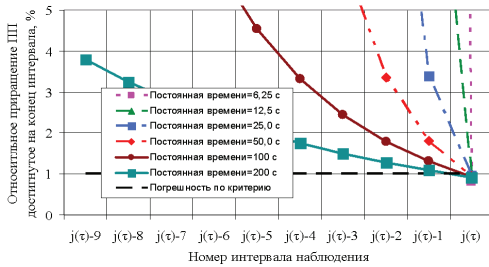


Рис. 2. Изменение приращения сигнала ПП на конец интервала наблюдения

Так как интервал наблюдения содержит M интервалов дискретизации, то на интервале установления процесса укладывается до $j \cdot M$ сдвинутых на ΔT_D (например, выберем $\Delta T_D = 1$ с) перекрывающихся интервалов наблюдения.

Интервальный критерий (7) можно преобразовать в критерий вида в) через определение допустимой производной $D_{KP}(j)$ сигнала ПП на интервале наблюдения:

$$D_{KP}(j) = D_{KP} = \Delta A_H(j) / \Delta T_H(j) \quad (8)$$

и текущую производную сигнала ПП на интервале наблюдения:

$$|d(\Delta a) / dt|_j = [a_j(t_k) - a_j(t_w)] / \Delta T_H = \Delta A(j) / \Delta T_H(j). \quad (9)$$

Тогда после выполнения условий критерия (10) в дальнейшем развитии сигнал ПП должен иметь производную $|d(\Delta a) / dt|_{t > tk}$ не более чем заданную в критерии D_{KP} :

$$T_{ПП, ПР2} = \min \{ \arg [D_{KP}(j) \geq |d(\Delta a) / dt|_j] \}. \quad (10)$$

Значения разделённой разности для последнего j и предпоследнего $j-1$ интервалов наблюдения, и его критериального значения $D_{KP} = 0,01/30 c^{-1}$, приведено на рис. 3.

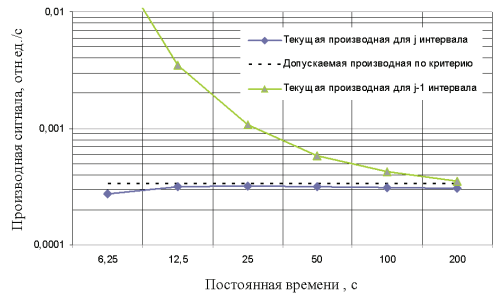


Рис. 3. Изменение разделённых разностей для соседних интервалов наблюдения

6. Связь интервального и мгновенного критериев

В работах [36, 38] решена задача преобразования для линейной ИЦ интервального критерия: «не более чем на 1 % отсчитанного значения в течение не менее 30 с» [33]:

$$B_{\%} \geq 100 [a_j(t_n + \Delta T_H) - a_j(t_n)] / a_j(t_n) \quad (11)$$

определения момента T_{YS} наступления установившегося значения переходного процесса в моментный критерий вида:

$$T_{YS} \geq \tau F(B_{\%}, \Delta T_H) = \tau \zeta, \quad (12)$$

где ζ – множитель, зависящий от параметров интервального критерия.

Для указанных в критерии [33] значений параметров функции $F(B_{\%}, \Delta T_H)$ критерий (12) имеет следующий вид [36]:

$$T_{YS} \geq -\tau \ln \{ 0,01 / [1,01 - \exp(-30/\tau)] \} \quad (13)$$

или

$$T_{YS} \geq -\tau \ln \{ 0,01 B_{\%} / [1 + B_{\%} / 100 - \exp(-\Delta T_H / \tau)] \}, \quad (14)$$

где $B_{\%} = 1 \%$; $\Delta T_H = 30$ с.

Однако, так как критерий (13) моментный, то для определения времени установления сигнала ПП необходимо знать постоянную времени измерительной цепи τ . При этом за установившееся значение ПП принимается мгновенное значение $a_j(t_n)$ в момент t_n [36, 38].

В случае нелинейной ИЦ кривая ПП, состоящая из нескольких экспоненциальных составляющих, например, как в [7], являясь монотонно возрастающей, имеет несколько пологих участков изменения. В связи с этим интервальные критерии на пологом участке близком к T_0 дают ложный результат определения ТПП [36].

$$\delta_k(\tau, j) = 100[A_\infty - a_j(t_{KR})]/A_\infty \quad (16)$$

Процесс изменения погрешности установления $\delta_k(\tau, j)$ в зависимости от номера соседних не перекрывающихся интервалов наблюдения показан на рис. 5. При этом все кривые (аналогично рис. 2) также сведены к одной и той же точке абсциссы с номером $j(\tau)$, данными в таблице 1.

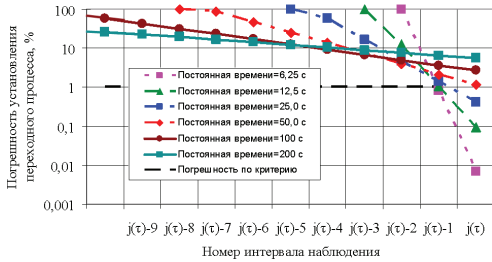


Рис. 5. Диаграмма изменения погрешности установления ПП

Достигнутая на конце интервала наблюдения погрешность $\delta_k(\tau, j)$ для анализируемого диапазона изменения τ представлена в таблице 1 и с погрешностью не более $\pm 1\%$ аппроксимируется линейной зависимостью:

$$\delta_k^*(\tau, j) = 0,0299\tau - 0,328, \%, \text{ при } \tau \geq 25c. \quad (17)$$

Таблица 1. Погрешность, достигнутая в конце интервала наблюдения

$\tau, c:$	6,25	12,5	25	50	100	200
$j(\tau)$	2	3	4	8	12	19
$\delta_k(\tau, j), \%$	0,0067	0,094	0,417	1,16	2,68	5,64
$T_{пп.ин.к}, c$	60	87	137	233	362	575

9. Ограничения в использовании интервального критерия

Таким образом, обнаружено ограничение на применение интервального критерия при постоянной времени ИЦ более некоторой критической τ_{KR} . В первом приближении найти эту критическую постоянную можно из зависимости (17) приравняв $\delta_k^*(\tau, j)$ допустимой относительной погрешности на конце интервала, т.е. $\delta_k^*(\tau_{KR}, j) = 1\%$. Получаем $\tau_{KR} = 44,4 c$. Найденное значение согласуется с результатом графического решения трансцендентного уравнения, связывающего время окончания ПП по классическому критерию (3) со временем окончания интервала наблюдения по интервальному критерию (7),

представленному на рис. 6.

Можно показать, что существует связь $\Delta T_H = \lambda \tau_{KR}$ между длительностью интервала наблюдения и критическим значением максимальной постоянной времени, для которой ещё справедливо применение интервального критерия вида (7). Причём это отношение равно $\lambda = 30c/44,4c \approx 0,7$.

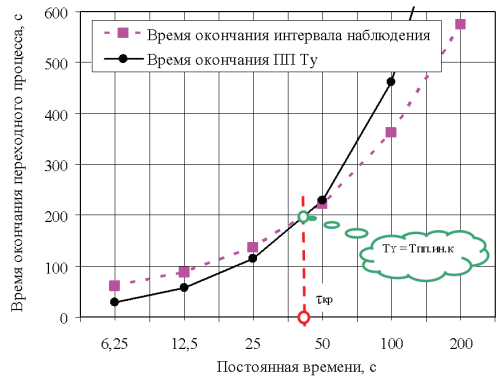


Рис. 6. Диаграмма для сравнения времён установления переходного процесса по классическому и интервальному критериям

Заключение

Проведена классификация известных критериев определения момента наступления установившегося режима в измерительной цепи с моделью в виде переходной характеристикой первого порядка. Большинство критериев носит эмпирический характер. Установлено, что интервальный критерий, рекомендуемый к использованию действующими стандартами, не обеспечивает определение требуемого момента во всём диапазоне возможных значений постоянной времени модели ИЦ.

Найдена связь между длительностью интервала наблюдения за переходным процессом в цепи и критическим значением постоянной времени, при превышении которого достоверность работы критерия не обеспечивается.

Литература

- [1] В.И. Калашников, Г.Г. Раннев, В.А. Суругина. Информационно-измерительная техника и технологии. М.: Академия. 2007. 512 с.
- [2] В.И. Колчков. Теория и методология измерительных технологий производственных процессов. М.: МАМИ. 2015.
- [3] РМГ 29-2013. Государственная система

обеспечения единства измерений. *Метрология. Основные термины и определения*. М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2014.

[4] **В.А. Грановский, Т.Н. Сирая**. *Проблема адекватности моделей в измерениях. Датчики и системы*, № 10, 2007. С. 52-62.

[5] **В.А. Грановский**. *Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения*. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 224 с.

[6] **Д.А. Бобылев**. Определение параметров многоэлементных двухполюсников по мгновенным значениям отклика на импульсное тестовое воздействие. *Датчики и системы*, № 1, 2014. С.18-23.

[7] **В.И. Диденко, А.А. Москвичев**. Патент РФ № 2491559. *Способ определения сопротивления и индуктивности рассеяния первичной обмотки трансформатора напряжения*. G 01R27/26. 27.08.2013.

[8] **М.Р. Сафаров, Л.В. Сарваров, Ю.Д. Коловертнов, Г.Ю. Коловертнов**. Патент РФ № 2491559. *Способ определения параметров двухполюсников*. G 01 R 27/00, G 01 R 27/26. 27.03.2002.

[9] **В.С. Мелентьев**. Методы повышения точности измерений параметров емкостных датчиков. *Измерительная техника*, №7, 2014. С.45-47.

[10] **И.П. Захаров, М.П. Сергиенко**. Идентификация переходных характеристик средств измерительной техники методом наименьших квадратов Прони. *Системы обработки информации*. Вып. 2(14). 2007. С. 142-145.

[11] **И.Н. Воротников, М.А. Мастепаненко**. Способы измерения электрической емкостности по параметрам переходного процесса. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. № 10, 2013. С. 60–65.

[12] **А.А. Мельников, А.А. Мельников (мл.), А.А. Мельникова**. *Измерение температуры биологических объектов*. М.: Спутник+, 2010. 303 с.

[13] **Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин**. Патент РФ № 2377586. *Способ определения индуктивности рассеяния трехфазной высоковольтной обмотки силового трансформатора*. G 01R 31/06, G01R27/26. 27.12.2009.

[14] **Г.И. Гарасько, И.Н. Дулькин**. Определение установившегося превышения температуры и постоянных времени по данным тепловых испытаний трансформаторов. *Электротехника*, № 4, 2010. С. 20-29.

[15] **С.А. Бугримов, И.В. Гуревич, Ю.П. Фомин**. Патент РФ № 2518631. *Способ измерения установившегося после включения питания значения постоянного электрического сигнала на*

выходе измерительного преобразователя. G 01R 19/00. 10.06.2014.

[16] **И.М. Белогурский, В.А. Казаков, А.И. Мартяшин, А.В. Светлов**. Патент РФ № 1029093. *Устройство для определения амплитуды установившегося переходного процесса*. G 01R 23/16. 15.07.1983.

[17] **А.И. Максимов**. *Введение в нелинейную физическую химию*. Иваново: Изд-во ИГХТУ, 2010. 174 с.

<http://www.twirpx.com/file/591648/>.

[18] **Д.В. Сивухин**. *Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. Том V*. М.: Физматлит, 2002. 784 с.

[19] **С.З. Шкундин, С.Я. Буянов, А.В. Воронцов, В.А. Румянцева**. Моделирование аэродинамических переходных процессов в аэродинамической установке. *Измерительная техника*, № 12, 2014. С.25-28.

[20] **А.А. Короновский**. К вопросу о зависимости длительности переходного процесса от точности ее определения в динамических системах, демонстрирующих квазипериодическое поведение. *Письма в ЖТФ*, Том 29, Вып. 19, 2003. С. 31–39.

[21] **Е.А. Ермоленко, А.Ф. Бондаренко**. Определение длительности переходного процесса в силовых полупроводниковых приборах. *Технічна електродинаміка*. Тем. вип. 2012. С. 159-162.

[22] **В.С. Поздеев**. Авторское свидетельство СССР № 1283815. *Устройство для определения окончания переходного процесса в диагностических системах*. G06K 9/00. 15.01.1987.

[23] **Т.Ю. Фомина**. Система последовательно упрощаемых математических моделей электроэнергетических систем для расчета электромеханических переходных процессов. *Электричество*, № 6, 2014. С. 20-24.

[24] **Н.И. Дудкин, М.Н. Дудкин, И.С. Адаев**. Патент РФ № 2427843. *Способ термоанемометрических измерений*. G 01 P 5/12, G 01 N 25/00. 27.08.2011.

[25] **А.Г. Щепетов**. Об оптимальных формах переходного процесса и амплитудно-частотной характеристики линейной динамической системы. *Проблемы управления*, № 3, 2008. С. 30–36.

[26] **П.П. Орнатский**. *Автоматические измерения и приборы*. Киев: Вища школа. 1980. 560 с.

[27] *Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84*. М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2010. Портал нормативных документов: OPENGOST.RU - www.OpenGost.ru.

[28] **Джелласти Седри, Голли Брюно**. Патент

РФ № 2507489. *Способ и система для оценивания температуры потока в турбореактивном двигателе*. G01K 7/42, G01K 13/02. 20.02.2014.

[29] *Термометры медицинские электрические с отсчетом максимального значения*. *Clinical electrical thermometers with maximum device*. Международный документ. OIML R 115:1995. Международная организация законодательной метрологии. 1995. 40 с. http://www.fundmetrology.ru/depositary/04_IntDoc_all/R%20115.pdf.

[30] **В.С. Мелентьев, В.И. Батищев**. *Аппроксимационные методы и средства измерения параметров двухполюсных электрических цепей*. М.: Физматлит, 2013. 200 с.

[31] **Н.А. Чернышёв**. Патент РФ №2480774. *Устройство для измерения активного сопротивления обмоток электротехнического оборудования*. G01R 27/08. 27.04.2013.

[32] *Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования*. Под ред. Ф.Л.Когана. Разд. 2: Методы Контроля состояния силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих и дуго-гасящих реакторов. М.: ОРГРЭС, 1998. 493 с.

[33] *Трансформаторы силовые. Методы испытаний и измерений*. М.: ИПК Изд-во Стандартов, 1996.

[34] **А.А. Лупачев, А.Н. Тимохин, Тан Тайк У**. Исследование быстродействующего измерителя активного сопротивления обмотки силового трансформатора. Сборник докладов. *23-th National Scientific Symposium with international participation "METROLOGY and METROLOGY ASSURANCE 2013"*, September 9-13, 2013. Sozopol, Bulgaria. С. 218-226.

[35] **А.В. Кабышев**. *Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования*. Томск: Изд-во ТПУ. 2007. 185 с.

[36] **В.С. Мелентьев**. *Методы и средства измерения параметров электрических цепей на постоянном токе*. Самара: СГТУ, 2004. 120 с.

[37] **Н.А. Чернышёв**. Патент РФ № 2531850. *Способ измерения сопротивления постоянному току у обмоток электротехнического оборудования*. G01R 27/08. 31.05.2014.

[38] **В.И. Батищев, В.С. Мелентьев**. Измерительно-моделирующие технологии определения параметров энергообъектов. *Известия вузов. Электромеханика*. № 4, 2003. С. 66-69.

[39] *Измеритель сопротивлений «ПФИ24-10Р»*. М.: ООО «НПФ ИНФРОХОМ-99». <http://www.infochrom.ru>.

[40] *Измеритель электрического сопротивления омметр «МИКО-2.3»*. Иркутск: СКБ Электротехнического приборостроения. <http://www.skbpribor.ru>.

[41] *Цифровой микроомметр «ПТФ-1»*. Екатеринбург: ООО «ЭЛТЕХ». <http://www.eltech-pribor.ru>.

[42] *Омметр «ВИТОК»*. Пенза: ФГУП «НИИЭМП». <http://www.penzapribor.ru>.

[43] *Прибор для испытания трансформаторов «ПИТ»*. Минск. http://www.tdtransformator.ru/articles/PIT_P.pdf.

Благодарность

Данная работа подготовлена в ходе выполнения ПНИ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы» по приоритетному направлению «Транспортные и космические системы». Соглашение о предоставлении субсидии от 19 июня 2014 г. № 14.574.21.0047. Авторы высказывают свою благодарность за финансовую помощь и поддержку.

Сведения об авторах

Лупачев Алексей Алексеевич. Тульский политехнический институт - автоматика и телемеханика (1974). К.т.н. (1985), с.н.с. (1992), Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“ (НИУ «МЭИ»), Институт автоматизации и вычислительной техники (АВТИ), Доцент - Кафедра информационно-измерительной техники (ИИТ). Научные интересы: разработка интеллектуальных средств измерений.

Сапелкин Игорь Викторович. НИУ «МЭИ», АВТИ (2013). Аспирант – Кафедра ИИТ. Научные интересы: цифровая обработка сигналов.

Серов Николай Андреевич. Московский энергетический институт (1971). К.т.н. (1985), доцент (1986); НИУ «МЭИ», АВТИ, Доцент - Кафедра (ИИТ). Научные интересы: аналоговые измерительные устройства.

Бехтин Юрий Станиславович. Рязанский радиотехнический институт (1983). Д.т.н. (2009), профессор (2013). Ведущий научный сотрудник кафедры ИИТ НИУ «МЭИ». Научные интересы: цифровая обработка сигналов.

Шостак Александр Владимирович. НИУ «МЭИ», АВТИ (2015). Бакалавр - кафедра ИИТ «НИУ «МЭИ». Научные интересы: цифровая обработка сигналов.

TECHNOLOGY OF CONSTANT PHYSICAL QUANTITY DYNAMIC MEASUREMENT

*Alexey Lupachev¹⁾, Igor Sapelkin²⁾, Nicholay Serov³⁾,
Yuriy Bakhtin⁴⁾, Alexander Shostak⁵⁾*

^{1)...} National Research University "Moscow power Engineering Institute", Institute of Automatics and Computer Engineering, Department of Information-Measuring Technique
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250 Russia, Web address: www.mpei.ru
e-mails: ¹⁾LupachevAA@yandex.ru, ²⁾civ9019@mail.ru, ³⁾serna2004@list.ru,
⁴⁾yuri.bekhtin@yandex.ru, ⁵⁾shostak-93@mail.ru

Abstract: Discusses criteria for the end of the transition process in the measuring circuit, a model which can be represented by a dynamic element of the first order. It is shown that the most prevalent when building digital measuring devices, for example, a measure of the resistance winding of the power transformer DC, received a standardized criterion of interval type, characterized as empirical. The dependence, which determines the critical value of the maximum time constant of the measuring circuit.

Key words: measurement circuit, the analysis of the transition process, the criteria for the end of the transition process, the duration of the observation interval, the critical time constant

References

- [1] V.I. Kalashnikov, G.G. Rannev, V.A. Suragina. Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i tekhnologii. M.: Akademiya. 2007. 512 s.
- [2] V.I. Kolchikov. Teoriya i metodologiya izmeritel'nykh tekhnologiy proizvodstvennykh protsessov. M.: MAMI. 2015.
- [3] RMG 29-2013. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya. M.: IPK Izd-vo Standartov, 2014.
- [4] V.A. Granovskiy, T.N. Siraya. Problema adekvatnosti modeley v izmereniyakh. Datchiki i sistemy, № 10, 2007. S. 52-62.
- [5] V.A. Granovskiy. Dinamicheskiye izmereniya: Osnovy metrologicheskogo obespecheniya. L.: Energoatomizdat, 1984. 224 s.
- [6] D.A. Bobylev. Opredeleniye parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov po mgnovennym znacheniyam otklika na impul'snoye testovoye vozdeystviye. Datchiki i sistemy, № 1, 2014. S. 18-23.
- [7] V.I. Didenko, A.A. Moskvichev. Patent RF № 2491559. Sposob opredeleniya soprotivleniya i induktivnosti rassheyaniya pervichnoy obmotki transformatora napryazheniya. G 01R 27/26. 27.08.2013.
- [8] M.R. Safarov, L.V. Sarvarov, Yu.D. Kolovertnov, G.Yu. Kolovertnov. Patent RF № 2491559. Sposob opredeleniya parametrov dvukhpolyusnikov. G 01 R 27/00, G 01 R 27/26. 27.03.2002.
- [9] V.S. Melent'yev. Metody povysheniya tochnosti izmereniy parametrov yemkostnykh datchikov. Izmeritel'naya tekhnika, № 7, 2014. S. 45-47.
- [10] I.P. Zakharov, M.P. Sergiyenko. Identifikatsiya perekhodnykh kharakteristik sredstv izmeritel'noy tekhniki metodom naimen'shikh kvadratov Proni. Sistemy obrabotki informatsii. Vyp. 2(14). 2007. S. 142-145.
- [11] I.N. Vorotnikov, M.A. Mastepanenko. Sposoby izmereniya elektricheskoy yemkos-ti po parametram perekhodnogo protsesssa. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. № 10, 2013. S. 60-65.
- [12] A.A. Mel'nikov, A.A. Mel'nikov (ml.), A.A. Mel'nikova. Izmereniye temperatury biologicheskikh ob"yektov. M.: Sputnik+, 2010. 303 s.
- [13] G.M. Mikheyev, V.M. Shevtsov, S.N. Batalygin. Patent RF № 2377586. Sposob opredeleniya induktivnosti rassheyaniya trekhfaznoy vysokovol'tnoy obmotki silovogo transformatora. G 01R 31/06, G01R27/26. 27.12.2009.
- [14] G.I. Garas'ko, I.N. Dul'kin. Opredeleniye ustanovivshegosya prevysheniya temperatury i postoyannykh vremeni po dannym teplovykh ispytaniy transformatorov. Elektrotekhnika, № 4, 2010. S. 20-29.
- [15] S.A. Bugrimov, I.V. Gurevich, Yu.P. Fomin. Patent RF № 2518631. Sposob izmereniya ustanovivshegosya posle vklyucheniya pitaniya znacheniya postoyannogo elektricheskogo signala na vykhode izmeritel'nogo preobrazovatelya. G 01R 19/00. 10.06.2014.
- [16] I.M. Belogurskiy, V.A. Kazakov, A.I. Martyashin, A.V. Svetlov. Patent RF № 1029093. Ustroystvo dlya opredeleniya amplitudy ustanov-

vivshegosya perekhodnogo protsessa. G 01R 23/16. 15.07.1983.

[17] A.I. Maksimov. Vvedeniye v nelineynuyu fizicheskuyu khimiyu. Ivanovo: Izd-vo IGKHTU, 2010. 174 s. <http://www.twirpx.com/file/591648/>.

[18] D.V. Sivukhin. Obshchiy kurs fiziki. Atomnaya i yadernaya fizika. Tom V. M.: Fizmatlit, 2002. 784 s.

[19] S.Z. Shkundin, S.Ya. Buyanov, A.V. Vorontsov, V.A. Rumyantseva. Modelirovaniye aerodinamicheskikh perekhodnykh protsessov v aerodinamicheskoy ustanovke. Izmeritel'naya tekhnika, № 12, 2014. S.25-28.

[20] A.A. Koronovskiy. K voprosu o zavisimosti dlitel'nosti perekhodnogo protsessa ot tochnosti yeye opredeleniya v dinamicheskikh sistemakh, demonstriruyushchikh kvaziperiodicheskoye povedeniye. Pis'ma v ZHTF, Tom 29, Vyp. 19, 2003. S. 31–39.

[21] YE.A. Yermolenko, A.F. Bondarenko. Opredeleniye dlitel'nosti perekhodnogo protsessa v silovykh poluprovodnikovyykh priborakh. Tekhnichna yelektro dinamika. Tem. vip. 2012. S. 159-162.

[22] V.S. Pozdeyev. Avtorskoye svidetel'stvo SSSR № 1283815. Ustroystvo dlya opredeleniya okonchaniya perekhodnogo protsessa v diagnosticheskikh sistemakh. G06K 9/00. 15.01.1987.

[23] T.Yu. Fomina. Sistema posledova-tel'no uproshchayemykh matematicheskikh modeley elektroenergeticheskikh sistem dlya rascheta elektromekhanicheskikh perekhodnykh protsessov. Elektrichestvo, № 6, 2014. S. 20-24.

[24] N.I. Dudkin, M.N. Dudkin, I.S. Adayev. Patent RF № 2427843. Sposob termoanemometricheskikh izmereniy. G 01 P 5/12, G 01 N 25/00. 27.08.2011.

[25] A.G. Shchetov. Ob optimal'nykh formakh perekhodnogo protsessa i amplitudno-chastotnoy kharakteristiki lineynoy dinamicheskoy sistemy. Problemy upravleniya, № 3, 2008. S. 30–36.

[26] P.P. Ornatkiy. Avtomaticheskiye izmereniya i pribory. Kiyev: Vishcha shkola. 1980. 560 s.

[27] Metodicheskiy material po prime-neniyu GOST 8.009-84. M.: IPK Izd-vo Stan-dartov, 2010. Portal normativnykh dokumen-tov: OPENGOST.RU - www.OpenGost.ru.

[28] Dzhelasti Sedri, Golli Bryuno. Patent RF № 2507489. Sposob i sistema dlya otsenivaniya temperatury potoka v turboreaktivnom dvigatele. G01K 7/42, G01K 13/02. 20.02.2014.

[29] Termometry meditsinskiye elektri-cheskiye s otschetom maksimal'nogo znacheniya. Clinical electrical thermometers with maximum device. Mezhdunarodnyy dokument. OIML R 115:1995. Mezhdunarodnaya organizatsiya zakonodatel'noy

metrologii. 1995. 40 s. http://www.fundmetrology.ru/depository/04_IntDoc_all/R%20115.pdf.

[30] V.S. Melent'yev, V.I. Batishchev. Approksimatsionnyye metody i sredstva izmereniya parametrov dvukhpolyusnykh elekt-richeskikh tsepey. M.: Fizmatlit, 2013. 200 s.

[31] N.A. Chernyshyov. Patent RF №2480774. Ustroystvo dlya izmereniya aktivnogo soprotivleniya obmotok elektrotekhnicheskogo oborudovaniya. G01R 27/08. 27.04.2013.

[32] Sbornik metodicheskikh posobiy po kontrolyu sostoyaniya elektrooborudovaniya. Pod red. F.L.Kogana. Razd. 2: Metody Kont-rol'ya sostoyaniya silovykh transformatorov, avtotransformatorov, shuntiruyushchikh i dugo-gasyashchikh reaktorov. M.: ORGRES, 1998. 493 s.

[33] Transformatory silovyye. Metody ispytaniy i izmereniy. M.: IPK Izd-vo Standartov, 1996.

[34] A.A. Lupachev, A.N. Timokhin, Tan Tayk U. Issledovaniye bystrodeystviyushchego izmeritelya aktivnogo soprotivleniya obmotki silovogo transformatora. Sbornik dokladov. 23-th National Scientific Symposium with international participation "METROLOGY and METROLOGY ASSURANCE 2013", September 9-13, 2013. Sozopol, Bulgaria. S. 218-226.

[35] A.V. Kabyshev. Elektrosnabzheniye ob"yektov. Ch.1. Raschet elektricheskikh nagruzok, nagrev provodnikov i elektrooborudovaniya. Tomsk: Izd-vo TPU. 2007. 185 s.

[36] B.C. Melent'yev. Metody i sredstva izmereniya parametrov elektricheskikh tsepey na postoyannom toke. Samara: SGTU, 2004. 120 s.

[37] N.A. Chernyshyov. Patent RF № 2531850. Sposob izmereniya soprotivleniya postoyannomu toku u obmotok elektrotekhnicheskogo oborudovaniya. G01R 27/08. 31.05.2014.

[38] V.I. Batishchev, V.S. Melent'yev. Izmeritel'no-modeliruyushchiye tekhnologii opredeleniya parametrov energoob"yektov. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. № 4, 2003. S. 66-69.

[39] Izmeritel' soprotivleniy «PFI24-10R». M.: OOO «NPF INFROKHOM-99. <http://www.infochrom.ru>.

[40] Izmeritel' elektricheskogo soprotivleniya ommetr «MIKO-2.3». Irkutsk: SKB Elektrotekhnicheskogo priborostroyeniya. <http://www.skbpribor.ru>.

[41] Tsifrovoy mikroometr «PTF-1». YEkatereburg: OOO «ELTEKH». <http://www.eltech-pribor.ru>.

[42] Ommetr «VITOK». Penza: FGUP «NIEMP». <http://www.penzapribor.ru>.

[43] Pribor dlya ispytaniya transformatorov «PIT». Minsk. http://www.tdtransformator.ru/articles/PIT_P.pdf.

ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ДИНАМИЧНО ИЗМЕРВАНЕ НА ПОСТОЯННА ФИЗИЧЕСКА ВЕЛИЧИНА

*Алексей Лупачев¹⁾, Игорь Сапелкин²⁾, Николай Серов³⁾,
Юрий Бехтин⁴⁾, Александр Шостак⁵⁾*

*^{1)...5)} НИУ „МЭИ“, 111250 Россия, г. Москва, Красноказарменная ул. 14
e-mails: ¹⁾LupachevAA@yandex.ru, ²⁾civ9019@mail.ru, ³⁾serna2004@list.ru,
⁴⁾yuri.bekhtin@yandex.ru, ⁵⁾shostak-93@mail.ru*

Резюме: В доклада се разгледат критериите за завършване на преходния процес в измервателна верига, моделът на която може да бъде представен с динамично звено от първи ред. Показано е, че най-голямо разпространение при изграждането на цифрови измервателни уреди, например, уред за измерване на съпротивлението на намотка на силов постояннооток трансформатор е получил стандартизиран интервален критерий, характеризиращ се като емпиричен. Получена е зависимостта, която определя критичната стойност на максималната времеконстанта на измервателната верига.

Ключови думи: измервателна верига, анализ на преходния процес, критерии за завършване на преходния процес, продължителност на интервала на наблюдение на процеса, критична времеконстанта.