

Ю. И. Барсуков, А. А. Болтянский, Ю. Н. Секисов,  
О. П. Скобелев

## МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ТЕСТОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Для большинства существующих измерительных преобразователей характерны инерционные свойства. При импульсном возмущении возникает переходный процесс, который может быть источником информации о параметрах системы. По сравнению с существующими преобразователями, использующими установившиеся или квазиустановившиеся режимы, преобразователи, основанные на тестовых переходных процессах, обладают рядом положительных качеств: повышением чувствительности, быстродействием, снижением влияния ряда мешающих факторов и другие. Наибольшее число публикаций с описанием подобных методов преобразований и их реализаций относится к последнему десятилетию. Однако лишь в ограниченном числе работ [1, 2] делались попытки обобщения и классификации методов преобразования, основанных на тестовых переходных режимах.

Настоящая статья восполняет существующий пробел. На основе известных публикаций и в значительной степени по работам авторов в этой области производится наиболее полная классификация методов, и дается анализ их возможностей.

Рассмотрим обобщенную систему первого порядка [3], в которой  $I$  и  $r$  соответственно инерционный параметр и параметр рассеяния энергии,  $\varepsilon$  — параметр источника энергии. Таковую систему можно считать приближенной моделью датчиков и измерительных цепей, но вполне достаточной для определения методов преобразования, классификации, анализа потенциальных возможностей и перспектив применения.

Переходный процесс в системе может быть вызван за счет изменения любого параметра  $I$ ,  $r$  или  $\varepsilon$ . Изменение одного из трех параметров определяет способ возбуждения переходного процесса, а закон изменения параметра во времени — форму воздействия. Рассматриваемые методы преобразования основаны на искусственно вызванных переходных процессах стандартным тестовым воздействием. Форма воздействия и способ возбуждения могут быть признаками классификации методов преобразования.

Форма воздействия выбирается достаточно простой. Она может иметь вид ступенчатой или экспоненциальной функции, единичного, трапецеидального или прямоугольного импульса,

линейно нарастающей функции и т. д. Наиболее просто реализуется ступенчатая форма воздействия

$$X = X_{\min} + \Delta X \cdot 1(t);$$

$$X = X_{\max} - \Delta X \cdot 1(t),$$

где  $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$ ;

$X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  — конечное и начальное значения возмущающей функции.

Ступенчатая форма воздействия положена в основу большинства методов преобразования.

Способ возбуждения может быть энергетическим и параметрическим. Параметрическое возбуждение возможно с помощью инерционного параметра или параметра рассеяния энергии.

Переходный процесс в системе описывается простейшим дифференциальным уравнением

$$I \frac{dy}{dt} + ry = \varepsilon, \quad (1)$$

где  $y$  — реакция системы.

При любых способах возбуждения и форме воздействия возможны различные приемы определения одного из параметров системы в переходном режиме при известных или неизменных прочих параметрах. Вид операции, выполненной в измерительном преобразователе, является основным классификационным признаком метода преобразования. В этой связи можно сформулировать следующие методы преобразования:

1. Метод мгновенных значений — параметры системы  $I$ ,  $r$  или  $\varepsilon$  преобразуются в мгновенное значение реакции в заданное время.

2. Метод постоянной времени — параметры системы преобразуются во временной интервал с момента подачи возмущения до момента сравнения реакции с заданным упорным уровнем [4].

3. Метод первой производной — параметры системы преобразуются в максимальное значение производной реакции.

4. Метод интегрального преобразования — параметры системы преобразуются в интегральное значение реакции в заданное время.

Методы преобразования в аналитическом виде для ступенчатой формы воздействия представлены в таблице 1. Таблица 2 иллюстрирует те же методы в графическом виде.

Методы преобразования при ступенчатой форме возбуждения

Способ возбуждения	Направление возбуждения	Метод мгновенных значений	Метод постоянной времени	Метод первой производной	Метод интегрального преобразования	
1	2	3	4	5	6	
Энергетический	$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\min} + \Delta \mathcal{E} \cdot 1(t)$	$y_{LU} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{z} (1 + \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\max}} e^{-\frac{tU}{\tau}})$ $\tau = \frac{1}{z}$	$\Delta t = \tau \ln \frac{\Delta \mathcal{E} / \mathcal{E}_{\max}}{1 - \frac{y_{LU}}{\mathcal{E}_{\max}}}$	$y'_{\max} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{I}$	$q = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{z} [t_U + \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\max}} \tau (1 - e^{-\frac{tU}{\tau}})]$	
	$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} - \Delta \mathcal{E} \cdot 1(t)$	$y_{LU} = \frac{\mathcal{E}_{\min}}{z} (1 + \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\min}} e^{-\frac{tU}{\tau}})$ $\tau = \frac{1}{z}$	$\Delta t = \tau \ln \frac{\Delta \mathcal{E} / \mathcal{E}_{\min}}{1 - \frac{y_{LU}}{\mathcal{E}_{\min}}}$	$y'_{\max} = -\frac{\Delta \mathcal{E}}{I}$	$q = \frac{\mathcal{E}_{\min}}{z} [t_U + \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\min}} \tau (1 - e^{-\frac{tU}{\tau}})]$	
Параметрический	Изменение 2	$z = z_{\min} + \Delta z \cdot 1(t)$	$y_{LU} = \frac{\mathcal{E}}{z_{\max}} (1 + \frac{\Delta z}{z_{\min}} e^{-\frac{tU}{\tau_{\min}}})$ $\tau_{\min} = \frac{1}{z_{\max}}$	$\Delta t = \tau_{\min} \ln \frac{\Delta z / z_{\max}}{1 - \frac{y_{LU}}{\mathcal{E}}}$	$y'_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{I} \frac{\Delta z}{z_{\min}}$	$q = \frac{\mathcal{E}}{z_{\min}} [t_U + \frac{\Delta z}{z_{\min}} \tau_{\min} (1 - e^{-\frac{tU}{\tau_{\min}}})]$
		$z = z_{\max} - \Delta z \cdot 1(t)$	$y_{LU} = \frac{\mathcal{E}}{z_{\min}} (1 + \frac{\Delta z}{z_{\max}} e^{-\frac{tU}{\tau_{\max}}})$ $\tau_{\max} = \frac{1}{z_{\min}}$	$\Delta t = \tau_{\max} \ln \frac{\Delta z / z_{\max}}{1 - \frac{y_{LU}}{\mathcal{E}}}$	$y'_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{I} \frac{\Delta z}{z_{\max}}$	$q = \frac{\mathcal{E}}{z_{\min}} [t_U + \frac{\Delta z}{z_{\max}} \tau_{\max} (1 - e^{-\frac{tU}{\tau_{\max}}})]$
	Изменение 1	$I = I_{\min} + \Delta I \cdot 1(t)$	$y_{LU} = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}} (1 + \frac{\Delta I}{I_{\max}} e^{-\frac{tU}{\tau_{\max}}})$ $\tau_{\max} = \frac{1}{I_{\max}}$	$\Delta t = \tau_{\max} \ln \frac{\Delta I / I_{\max}}{1 - \frac{y_{LU}}{\mathcal{E}}}$	$y'_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}} \frac{\Delta I}{I_{\max}}$	$q = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}} [t_U + \frac{\Delta I}{I_{\max}} \tau_{\max} (1 - e^{-\frac{tU}{\tau_{\max}}})]$
		$I = I_{\max} - \Delta I \cdot 1(t)$	$y_{LU} = \frac{\mathcal{E}}{I_{\min}} (1 + \frac{\Delta I}{I_{\min}} e^{-\frac{tU}{\tau_{\min}}})$ $\tau_{\min} = \frac{1}{I_{\min}}$	$\Delta t = \tau_{\min} \ln \frac{\Delta I / I_{\min}}{1 - \frac{y_{LU}}{\mathcal{E}}}$	$y'_{\max} = -\frac{\mathcal{E}}{I_{\min}} \frac{\Delta I}{I_{\min}}$	$q = \frac{\mathcal{E}}{I_{\min}} [t_U + \frac{\Delta I}{I_{\min}} \tau_{\min} (1 - e^{-\frac{tU}{\tau_{\min}}})]$

Наиболее традиционным способом возбуждения является увеличение энергии источника [1, 2] (строка первая табл. 1, 2). Так как в большинстве случаев предполагается, что максимальное и минимальное значения параметров существенно отличаются ( $x_{\max} \gg x_{\min} \frac{DX}{X_{\max}} \approx 1$ ), то в пределах переходного режима с момента появления скачка ( $t=0$ ) до момента измере-

Таблица 2

Графическая интерпретация методов преобразования при ступенчатой форме возбуждения

Способ и направление возбуждения	Метод мгновенных значений	Метод постоянной времени	Метод первой производной	Метод интегрального преобразования

ния ( $t_{II}$ ) функции  $y(t)$ ,  $yr(t)$ ,  $(qt)$  практически идентичны для увеличения  $\epsilon$  или  $I$  (строка первая, пятая) и уменьшении  $r$  (строка четвертая) при условии  $r_{\min}=r$ ,  $I_{\max}=I$ .

Поэтому в большинстве случаев можно ограничиться только способом возбуждения переходного процесса путем увеличения  $\epsilon$  (строка I, табл. 1).

При построении измерительных преобразователей с электрическими параметрическими датчиками более экономичными являются такие устройства, в которых измерительные цепи нормально обесточены, а энергия потребляется только в момент опроса. Поэтому способ возбуждения переходного процесса путем уменьшения  $\epsilon$  (строка вторая табл. 1,2) не имеет практического значения для преобразования информации с параметрических датчиков, хотя известны отдельные примеры его использования для контроля параметров электрических цепей [3, 4].

Способы возбуждения за счет ступенчатого увеличения  $r$  и уменьшения  $I$  характеризуются резким уменьшением длительности переходного процесса (строка третья и пятая табл. 1,2). Это свойство затрудняет построение преобразователей, реализующих методы постоянной времени интегрального преобразования, но открывает новые возможности для методов первой производной и мгновенных значений в направлении повышения чувствительности и быстродействия. Наиболее интересные преобразования при рассматриваемом способе возбуждения отмечены звездочкой. Далее с учетом отмеченных ограничений дадим более подробную характеристику каждого метода преобразований.

**Метод мгновенных значений.** Использование для измерения амплитуды импульса  $\Delta y$  при скачкообразном уменьшении  $I$  позволяет значительно повысить быстродействие преобразования, поскольку измерительные операции будут закончены в самом начале переходного процесса (при  $t \rightarrow 0$ ). Так как величина  $\frac{\Delta I}{I_{\min}} \gg 1$ , то наряду с увеличением быстродействия это преобразование характеризуется повышенной чувствительностью к  $\epsilon$  ( $\Delta y / t \rightarrow 0 = \frac{\epsilon}{r} \cdot \frac{\Delta I}{I_{\min}}$ ). Зависимость  $\Delta y_{t_{II}} = t(\epsilon)$  — линейна.

Применительно к генераторным датчикам это дает возможность измерения малых э. д. с. и токов без применения усилительных устройств.

В цепях с параметрическими датчиками (например, индуктивными и емкостными) возможно линейное преобразование  $\frac{\Delta L}{L_{\min}}$  или  $\frac{\Delta C}{C_{\min}}$ . Подобные задачи встречаются при исследовании импульсных воздействий, преобразуемых в изменении  $\Delta L$  или  $\Delta C$ .

Для этой же цели может быть использовано преобразование при энергетическом воздействии вида  $\varepsilon = \varepsilon_{\min} + \Delta\varepsilon \cdot 1(t)$ , характеризующееся различной чувствительностью к инерционному параметру и параметру рассеяния энергии в зависимости от  $t_u$  (рис. 1а). Выбор  $t_u$  в области  $\tau$  позволяет при максимальной чувствительности сократить время преобразования инерционного параметра по сравнению с установившимся режимом и уменьшить влияние параметра рассеяния энергии на результат измерения.

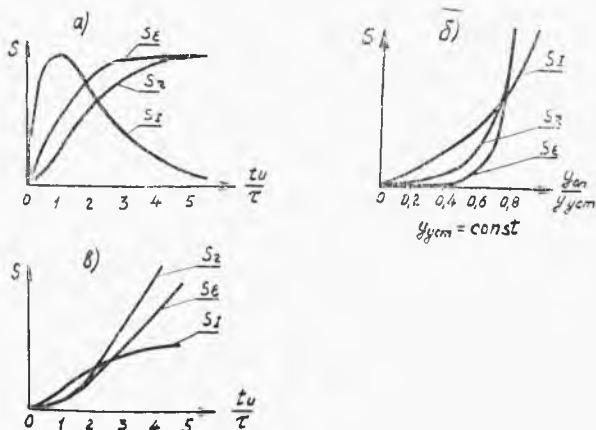


Рис. 1. Графики чувствительности преобразования параметров системы для методов: а — мгновенных значений; б — постоянной времени; в — интегрального преобразования

**Метод постоянной времени.** Временной интервал  $\Delta t$  находится при подстановке в выражение для реакции системы  $y = y_{оп}$  и решении его относительно времени (табл. 1).

При энергетическом воздействии  $\varepsilon = \varepsilon_{\min} + \Delta\varepsilon \cdot 1(t)$  метод постоянной времени целесообразно использовать не только для измерения  $I$ ,  $r$ ,  $\Delta\varepsilon$ , но и для измерения начальных значений ( $\varepsilon_{\min}$ ) и опорного уровня. Зависимость  $\Delta t = f(I)$  линейна, преобразования других параметров нелинейны. Чувствительность в любом случае возрастает по мере приближения опорного уровня к установившемуся значению реакции системы ( $y_{уст}$ ) (рис. 1б). Однако в реальных условиях возможность повышения чувствительности за счет приближения опорного уровня к  $y_{уст}$  ограничена стабильностью  $y_{оп}$  и разрешающей способностью устройств сравнения.

При выборе  $\frac{y_{оп}}{y_{уст}} < 0,6 \div 0,7$  повышается быстродействие по сравнению с измерениями в установившемся режиме.

В области малых  $\frac{y_{оп}}{y_{уст}}$  снижается чувствительность к параметру рассеяния энергии по сравнению с чувствительностью к инерционному параметру. Это свидетельствует о возможности преобразования инерционного параметра при уменьшении влияния факторов рассеяния энергии.

Метод постоянной времени сравнительно широко распространен в электроизмерительной технике для контроля параметров электрических цепей [2,5]. Достоинства метода — в простоте реализации цифровых устройств и линейной зависимости выходного сигнала от параметров  $L$  и  $C$ .

В вычислительной технике, а также при измерениях неэлектрических величин представляет интерес функциональное преобразование  $r$  и  $\Delta \varepsilon$ . Метод постоянной времени лежит в основе логарифмических преобразователей [6] и преобразователей температуры с полупроводниковыми терморезисторами [7].

При малых  $y_{оп}$  ( $y_{оп} \ll y_{уст}$ ) зависимость  $\Delta t = f(y_{оп})$  приближается к линейной. Это свойство используется в преобразователях с датчиками э. д. с., в которых выходное напряжение генераторного датчика —  $y_{оп}$  [8].

Преобразование  $\varepsilon_{мин}$  во временной интервал реализовано в измерителях температуры с проволочными термосопротивлениями [1].

**Метод первой производной.** Закон изменения первой производной реакции системы в переходном режиме определяется следующим выражением:

$$y' = \frac{\varepsilon}{T} \cdot \delta X \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где  $\delta X$  — относительное изменение параметра, с помощью которого производится воздействие:

$\delta x = \frac{\Delta X}{X_{max}}$  — для переходных процессов, характеризующихся накоплением энергии в системе;

$x = \frac{\Delta X}{X_{min}}$  — для процессов, характеризующихся рассеянием энергии. Началу переходного процесса соответствует максимальное значение производной, которое согласно методу преобразования используется для целей измерения (табл. 1).

Это позволяет при любом способе возбуждения переходного процесса значительно уменьшить время преобразования по сравнению с измерениями в установившемся режиме, так как результат преобразования получается при  $t \rightarrow 0$ . Величина коэффициента  $\delta X$  при параметрических способах возбуждения переходного процесса может быть значительно больше единицы (табл. 1), и в этой связи метод преобразования обладает повышенной чувствительностью к параметрам  $\varepsilon$ ,  $I$ .

Кроме того, свойство подавления параметра рассеяния энергии в этом методе преобразования проявляется наиболее сильно,

так как параметр  $r$  не входит в выражение максимальной производной. Зависимость  $y'_m = f(\epsilon)$  линейна,  $y'_m = f(I)$  — нелинейна.

Применение метода в электрических измерительных цепях с параметрическими датчиками обеспечивает повышение быстродействия ( $i_u \rightarrow 0$ ) при одновременном подавлении влияния активного сопротивления в  $LR$  контуре и проводимости утечки в параллельном  $CR$  контуре [7]. В измерительных цепях с генераторными датчиками благодаря повышенной чувствительности к  $\epsilon$  обеспечивается преобразование малых напряжений и токов без применения усилителей.

**Метод интегрального преобразования.** Чувствительность преобразования различных параметров зависит от времени интегрирования (рис. 1в). Область больших значений  $\frac{t_u}{\tau} \left( \frac{t_u}{\tau} > 1 \right)$  может быть использована для преобразования любого из параметров системы ( $I, r, \epsilon$ ). Область малых  $\frac{t_u}{\tau} \left( \frac{t_u}{\tau} < 1 \right)$  характеризуется значительно меньшей чувствительностью к параметру рассеяния энергии по сравнению с чувствительностью к инерционному параметру может быть использована для уменьшения влияния параметра рассеяния энергии на результат измерения при преобразовании инерционного параметра. В этом случае целесообразно использовать многократное интегрирование реакции системы на неизменное воздействие с суммированием результатов интегрирования от каждого воздействия, так как чувствительность при этом возрастает пропорционально числу единичных интегрирований. Зависимость интегрального значения от инерционного параметра и параметра рассеяния энергии нелинейна,  $q \neq f(r)$  — линейна.

Применительно к электрическим измерительным цепям метод интегрального преобразования может быть эффективно использован для повышения чувствительности устройств, предназначенных для измерения малых изменений параметров датчиков [9] и малых напряжений или токов [10], исключением является преобразование при воздействии  $r = r_{\min} + \Delta r \cdot I(t)$ .

Таким образом, наибольшей эффективностью для повышения быстродействия преобразования в инерционных системах с параметрическими датчиками обладают метод первой производной и метод мгновенных значений при возбуждении переходного процесса за счет изменения инерционного параметра. Для этих случаев время измерения меньше в  $10^3 \div 10^4$  раз по сравнению с длительностью переходного процесса в системе. Метод мгновенных значений при других способах возбуждения и метод постоянной времени обеспечивают повышение быстродействия в  $3 \div 10$  раз.

Свойство подавления параметра рассеяния энергии присуще всем методам преобразования кроме метода первой производной при воздействии  $r = r_{\min} + \Delta r \cdot I(t)$ . Степень подавления тем

выше, чем меньше время измерения по отношению к длительности переходного процесса.

Повышение чувствительности преобразования в методах первой производной и мгновенных значений присуще параметрическим способам возбуждения переходных процессов, связанных с рассеянием предварительно накопленной энергии. В методе интегрального преобразования повышение чувствительности достигается за счет увеличения времени интегрирования или за счет суммирования результатов многократного интегрирования реакции.

Все методы преобразования при воздействиях  $\epsilon = \epsilon_{\min} + \Delta\epsilon \cdot I(t)$  и  $r = r_{\max} - \Delta r \cdot I(t)$  обеспечивают пониженное энергопотребление, так как воздействие после получения результата измерения снимается до следующего опроса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Д. И. Частотные и время-импульсные датчики для систем обогачающего контроля. Приборы и средства автоматизации, № 11, 1962.
2. Болтянский А. А., Райков Б. К., Скобелев О. П., Старобинский Н. М. Построение преобразователей при использовании свойств переходных процессов. Измерительная техника, № 4, 1969.
3. Гарднер М. Ф., Бернс Дж. Л. Переходные процессы в линейных системах. М, 1961.
4. Мирский Г. Я. Радиоэлектронные измерения. М. Л., 1963.
5. Шляндин В. М., Рыжевский А. Г., Чернецов К. Т., Тощев А. В. Время-импульсные преобразования электрических параметров. «Электронизаторская техника», вып. 3. Приволжское книжное издательство, 1966.
6. Петров Б. К. и др. Время-импульсный логарифмический преобразователь, на транзисторах. Измерительная техника, № 9, 1963.
7. Болтянский А. А., Райков Б. К., Скобелев О. П., Старобинский Н. М. Многоканальная измерительная система с дифференциальными параметрическими первичными преобразователями. Измерительная техника, № 11, 1970.
8. Новиков А. И. Экспоненциальные время-импульсные преобразователи. Автоматика и телемеханика, т. XVIII, № 8, 1957.
9. Болтянский А. А., Иоффе В. Г., Секисов Ю. Н., Старобинский Н. М. Способ преобразования разности двух параметров. Авторское свидетельство № 227134. Бюллетень изобретений, № 29, 1968.
10. Маханов В. Д., Милохин Н. Г. Устройство частотного и время-импульсного преобразования, М. 1970.

А. А. Болтянский, Н. Н. Васин, В. К. Компанец,  
А. А. Кондоров, Б. К. Райков, Ю. Н. Секисов, О. П. Скобелев

## СТРУКТУРА МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕСТОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Большинство существующих многоканальных преобразователей строится по принципу разделения каналов во времени