

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.317.7

DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-4

Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ, ТОЧНОСТЬ
И БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО И ЧАСТОТНОГО
МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ОБЪЕКТОВ СО СХЕМАМИ ЗАМЕЩЕНИЯ
В ВИДЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ**

D. A. Bobylev, L. P. Borovskikh

**NOISE IMMUNITY, ACCURACY AND SPEED OF PARAMETRIC
IDENTIFICATION OF OBJECTS WITH EQUIVALENT CIRCUITS
IN THE FORM OF A MULTIELEMENT TWO-PORT BY MEANS
OF PULSE AND FREQUENCY METHODS**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Цель работы заключается в сравнении основных характеристик – помехоустойчивости, точности и быстродействия – импульсного и частотного методов параметрической идентификации объектов с многоэлементной схемой замещения. **Материалы и методы.** Для анализа потенциальных возможностей рассматриваемых методов параметрической идентификации объектов с многоэлементной схемой замещения применялись методы математического моделирования. Широко использовались опубликованные результаты исследований различных авторов как в области исследования параметрических методов спектрального анализа, так и в области применения преобразования Фурье к решению указанной задачи. Учитывалась возможность применения современных средств вычислительной техники для выполнения необходимых преобразований в цифровой форме. **Результаты.** Показаны достоинства и недостатки методов преобразования при решении задач параметрической идентификации объектов с многоэлементной схемой замещения. **Выводы.** Выполненный анализ позволяет рационально выбрать метод решения задач указанного класса и может быть полезным при выборе направлений дальнейшего совершенствования методов.

A b s t r a c t. Background. The aim of the work is to compare the main characteristics – noise immunity, accuracy and speed – pulse and frequency methods. **Materials and methods.** Methods of mathematical modeling were used to analyze the potential of the considered methods of parametric identification of objects with a multielement equivalent circuit. The published results of researches of various authors, both in the field of research of parametric methods of the spectral analysis, and in the field of application of the Fourier transform to the solution of the specified problem were widely used. The possibility of using modern computer

© Бобылев Д. А., Боровских Л. П., 2019

technology to perform the necessary transformations in digital form was taken into account.

Results. The advantages and disadvantages of the transformation methods in solving the problems of parametric identification of objects with a multielement equivalent circuit are shown.

Conclusions. The analysis allows to choose the method of solving the problems of this class and can be useful in choosing the directions of further improvement of methods.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частотный и импульсный методы, преобразование, параметр, многоэлементный двухполюсник, быстродействие, помехоустойчивость, точность.

K e y w o r d s: frequency and pulse methods, transformations, parameter, multielement two-pole, speed, noise immunity, accuracy.

Введение

Для преобразователей параметров объектов со схемой замещения в виде линейного многоэлементного двухполюсника, применяемых в системах мониторинга, управления и контроля, помехоустойчивость и быстродействие – наиболее важные характеристики. Изначально в силу сложности самой задачи инвариантного преобразования параметров многоэлементных двухполюсников (ПМД) на первый план всегда выдвигалась реализуемость метода и поиск оптимальных вариантов реализации в смысле минимизации инструментальных погрешностей [1], а вопросы помехоустойчивости были на втором плане.

Однако сегодня помехоустойчивость и быстродействие становятся главными критериями оценки методов преобразования. Это связано с тем, что применение вычислительных средств в измерительной технике и развитие средств цифровой обработки сигналов позволяют реализовать вычислительные алгоритмы, о применении которых в реальных измерительных преобразователях еще не так давно не могло быть и речи, и различные преобразования аналоговых величин все больше уступают место цифровым процедурам [2, 3].

Безусловно, создание широкой и подробной картины свойств и возможностей различных методов преобразования ПМД – задача довольно сложная, которая должна решаться поэтапно. В рамках статьи можно решить существенно более скромную задачу: провести сравнительный анализ определенной пары хорошо известных методов, дуальных по определенному признаку, а именно: импульсного и частотного методов.

Импульсный и частотный методы преобразования ПМД и два подхода к спектральному анализу

Универсальный подход к измерению параметров двухполюсника с известной схемой замещения заключается в получении некоторого числа скаляров – значений определенных функционалов иммитанса двухполюсника или его импульсной характеристики, по которым затем можно вычислить ПМД. Число скаляров при этом должно быть не меньше числа ПМД K , а функционалы должны быть линейно независимы [2].

Здесь следует выделить два в известной степени дуальных метода преобразования ПМД, которые условно можно определить как импульсный и частотный. В первом случае в качестве основной характеристики объекта исследования (ОИ) изначально рассматривается его импульсная характеристика, во втором случае – ее преобразование Фурье – иммитанс.

Импульсный метод, как правило, предполагает воспроизведение в виде сигнала переходной характеристики ОИ, представляющей собой сумму экспонент, и в качестве скаляров определение ее значений, взятых с некоторым равномерным шагом Δt .

Длительное время методы импульсной группы были мало востребованы. Для их эффективной реализации необходимы были вычислительные средства, а возможности аналоговых вычислений были невелики. В результате практическое значение могли иметь лишь отдельные решения, где простота вычислений, выполняемых в основном в аналоговом виде, обеспечивала относительную простоту реализации [1]. Об обеспечении помехоустойчивости, как правило, и речи не шло.

Все изменилось, когда средства вычислительной техники по-настоящему вошли в сферу техники измерительной. Импульсные методы теперь уже в практическом плане обрели свою вычислительно-алгоритмическую основу: параметрические методы спектрального анализа, прежде всего, метод Прони. Эти методы непосредственно ориентированы на определение параметров экспоненциальных составляющих сигнала, составляющих переходной характеристики.

Процедура Прони состоит из трех основных этапов [4–6]. Для конкретного случая, когда переходная характеристика ОИ представляет собой, например, сумму трех действительных экспонент, для идентификации их параметров достаточно шести эквидистантных отсчетов v_1, \dots, v_6 .

На первом этапе решается система уравнений

$$\begin{bmatrix} v_3 & v_2 & v_1 \\ v_4 & v_3 & v_2 \\ v_5 & v_4 & v_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

относительно коэффициентов c_0, c_1, c_2 характеристического полинома [4]. Затем необходимо определить его корни z_1, z_2, z_3 , решив уравнение $z^3 + c_2 z^2 + c_1 z + c_0 = 0$.

Получив значения корней, можно вычислить по ним постоянные времени экспонент: $\tau_1 = -\Delta t / \ln z_1, \tau_2 = -\Delta t / \ln z_2, \tau_3 = -\Delta t / \ln z_3$.

Затем из системы линейных уравнений можно найти амплитуды экспонент U_1, U_2 и U_3 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ z_1 & z_2 & z_3 \\ z_1^2 & z_2^2 & z_3^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Частотный метод предполагает измерение значений иммитанса $X(\omega)$ в некоторых точках частотного диапазона $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$. В качестве тестового сигнала здесь используется суперпозиция гармонических сигналов, реализованная последовательно или параллельно во времени.

В качестве скаляров выступают значения α_i и β_i составляющих иммитанса $X(\omega_i) = \alpha_i + j\beta_i$ на частотах ω_i тестового сигнала. Для определения ПМД был предложен достаточно простой алгоритм расчета коэффициентов дробно-рациональной функции, описывающей иммитанс ОИ. Метод сводится к решению системы K линейных уравнений [2]. Для рассматриваемого случая, когда импульсная характеристика ОИ состоит из суммы трех действительных экспонент, система имеет вид

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_1^2 & 0 & \beta_1 \omega_1 & \alpha_1 \omega_1^2 & -\beta_1 \omega_1^3 \\ \omega_1 & 0 & -\omega_1^3 & -\alpha_1 \omega_1 & \beta_1 \omega_1^2 & \alpha_1 \omega_1^3 \\ 0 & -\omega_2^2 & 0 & \beta_2 \omega_2 & \alpha_2 \omega_2^2 & -\beta_2 \omega_2^3 \\ \omega_2 & 0 & -\omega_2^3 & -\alpha_2 \omega_2 & \beta_2 \omega_2^2 & \alpha_2 \omega_2^3 \\ 0 & -\omega_3^2 & 0 & \beta_3 \omega_3 & \alpha_3 \omega_3^2 & -\beta_3 \omega_3^3 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_3^3 & -\alpha_3 \omega_3 & \beta_3 \omega_3^2 & \alpha_3 \omega_3^3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \alpha_3 \\ \beta_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где c_i – коэффициенты дробно-рациональной функции иммитанса.

Сегодня измерение значений иммитанса в нескольких точках частотного диапазона не составляет большой проблемы [2]. Воздействуя на ОИ полигармоническим тестовым сигналом, нетрудно определить действительную и мнимую составляющие тока и напряжения на каждой частоте ω_i : $\text{Re} \dot{I}_i, \text{Im} \dot{I}_i, \text{Re} \dot{U}_i, \text{Im} \dot{U}_i$ посредством фазочувствительного преобразования (ФЧП). И на основании полученных данных можно вычислить значения иммитанса

$$X(\omega_i) = \left[\frac{\text{Re} \dot{U}_i + j \text{Im} \dot{U}_i}{\text{Re} \dot{I}_i + j \text{Im} \dot{I}_i} \right]^{\pm 1}.$$

В данном случае ФЧП фактически представляет собой классический Фурье-анализ в указанных точках частотного диапазона, т.е. скалярное произведение дискретизированного тока, протекающего через ОИ, или напряжения на нем, и ортов $g_{\text{re}}(t)$ и $g_{\text{im}}(t)$ длительности T , образующих ортогональную систему координат для синусоидальных сигналов с частотой ω_i [2].

По сложности реализации рассматриваемые методы различаются не столь уж существенно, поскольку средства вычислительной техники и цифровой обработки сигналов необходимы в обоих случаях.

Однако уже здесь важно отметить следующее различие методов. Частотный метод позволяет заменить отклик ОИ, переходная характеристика которого представляет собой сумму в общем случае комплексных экспонент с неизвестными амплитудами, а, главное, с неизвестными постоянными времени и частотами, суммой комплексных незатухающих экспонент с известными частотами, но с неизвестными амплитудами. Более того, спектральные составляющие отклика при этом оказываются полностью когерентны всем тем сигналам, которые необходимы для их полноценного исследования, ибо и тестовый сигнал и вспомогательные сигналы формируются из одного и того же источника. Таким образом, временные параметры исследуемых сигналов (тока, протекающего через ОИ, и напряжения на нем) оказываются существенным образом определенными, хотя это и достигается благодаря применению более сложного, нежели единичный скачок, тестового воздействия. Это значительно упрощает задачу идентификации составляющих сигналов, несущих информацию о параметрах ОИ.

Таким образом, рассматриваемым дуальным методам преобразования ПМД органично соответствуют и два дуальных метода спектрального анализа, что во многом определяет возможности методов.

Важной характеристикой любого метода преобразования ПМД является степень влияния погрешностей скаляров на точность определения параметров экспонент импульсной характеристики (параметров простых дробей иммитанса) или коэффициентов дробно-рациональной функции иммитанса. Чем сильнее это влияние, тем слабее помехоустойчивость метода при прочих равных условиях.

Эти свойства для импульсного и частотного методов были исследованы посредством математического моделирования для самого простого случая, когда информационная избыточность, необходимая для обеспечения помехоустойчивости, отсутствует.

На рис. 1,а представлены графики зависимости погрешности определения постоянных времени трех действительных экспонент с единичными амплитудами от шага дискретизации Δt по шести эквидистантным отсчетам. При этом был выбран случай знакопеременной аддитивной погрешности отсчетов (наихудший случай), которая по абсолютной величине была принята равной 0,001 % от амплитуды экспоненты. Постоянные времени экспонент соотносились как $\tau_3 = 2\tau_2 = 4\tau_1$.

А на рис. 1,б представлены графики зависимости погрешности определения постоянных времени тех же экспонент импульсной характеристики частотным методом от частоты самой низкочастотной гармоники. При этом частоты верхних гармоник выбирались из условия: $f_2 = 1/(2\pi\tau_2)$, $f_3 = 1/(2\pi\tau_3)$, а нижняя частота f_1 варьировалась возле значения $f_0 = 1/(2\pi\tau_1)$. Относительные погрешности скаляров $\text{Re}[X(\omega_1)]$, $\text{Im}[X(\omega_1)]$, $\text{Re}[X(\omega_2)]$, $\text{Im}[X(\omega_2)]$, $\text{Re}[X(\omega_3)]$, $\text{Im}[X(\omega_3)]$ также взяты знакопеременными и по абсолютной величине равными 0,001 %.

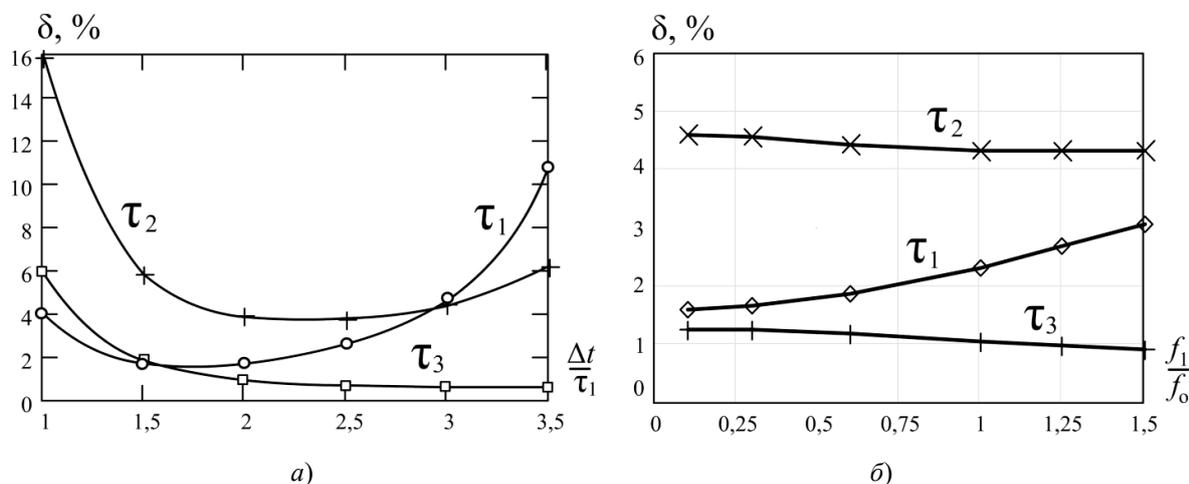


Рис. 1. Зависимости погрешности определения постоянных времени экспоненциальных составляющих импульсной характеристики двухполюсника по методу Прони (а) и частотным методом (б)

Приведенные графики отражают, прежде всего, высокую уязвимость точности методов преобразования ПМД от погрешностей получения скаляров, когда даже небольшие погрешности в данных могут значительно снижать точность преобразования. Это означает, что в простейшем своем варианте без дополнительных мер обеспечения помехоустойчивости такие методы практически не применимы.

Быстродействие

Быстродействие преобразователя ПМД определяется двумя факторами. Первый из них – это длительность $T_{ИХ}$ импульсной характеристики ОИ, а другой фактор – это время, необходимое для обеспечения помехоустойчивости.

Теоретически метод Прони позволяет идентифицировать параметры суммы экспоненциальных сигналов за время, существенно меньшее длительности $T_{ИХ}$ импульсной характеристики. Однако на практике это время должно быть соизмеримо с ее длительностью, равной $12-14 \tau_n$, где τ_n – постоянная времени самой медленной экспоненты импульсной характеристики ОИ, поскольку при уменьшении шага дискретизации Δt погрешности преобразования параметров экспонент резко возрастают, что хорошо видно на графиках (см. рис. 1,а).

Регистрация значений сигнала практически на всем протяжении ИХ – необходимое условие точного, помехоустойчивого преобразования ПМД. Попытка определить ПМД на интервале существенно меньшем ведет, как правило, к непропорциональному снижению точности преобразования.

К тому же необходимо учесть, что в системах мониторинга, управления и контроля быстродействие преобразователя ПМД характеризуется не временем, необходимым для получения одиночного измерения, а периодом повторения измерительных циклов, минимально возможным периодом обновления результатов измерения. Поэтому для импульсного метода тестовый сигнал будет иметь вид периодического импульсного сигнала с периодом $2T_{ИХ}$. «Отрицательный» его полупериод необходим для восстановления ОИ в исходное состояние.

При этом переходный процесс измерительной цепи по отрицательному перепаду тестового сигнала также необходимо использовать для получения информации. Исследование положительного и отрицательного откликов измерительной цепи дает дополнительные возможности для повышения помехозащищенности преобразования, позволяя простыми средствами устранить постоянную составляющую помехи и снизить влияние низкочастотных помех.

Если для определения ПМД используют информацию об отклике как на положительный, так и отрицательный перепад тестового сигнала, то интервал наблюдения будет составлять $2T_{ИХ}$, а минимально возможный период повторения циклов преобразования – $T_{ИХ}$ (рис. 2,а).

Что касается частотного метода, то первоначальное несовершенство средств измерения иммитанса, обладавших низким быстродействием, наложило свой отпечаток и на представление о быстродействии самого метода. На самом деле время, минимально необходимое для реализации частотного метода, также в целом определяется длительностью импульсной характеристики ОИ.

Время преобразования определяется здесь частотой (точнее, периодом) первой гармоники тестового сигнала. Результаты математического моделирования (см. рис. 1,б) показывают, что чем ниже частота f_1 тестового сигнала, тем меньше погрешность преобразования. Однако, если эта частота лежит в диапазоне от 0 до $f_1 = 1/(2\pi\tau_n)$, погрешность изменяется незначительно. Резкий рост погрешности начинается тогда, когда значение частоты первой гармоники начинает превышать значение $1/(2\pi\tau_n)$.

Таким образом, близким к оптимальному, в смысле компромисса между быстродействием и точностью, значением частоты первой гармоники тестового сигнала можно считать значение $1/(2\pi\tau_n)$ [7].

В результате при оценке быстродействия частотного метода период полигармонического тестового сигнала можно принять равным $6\tau_n$. В установившемся режиме при кратности частот полигармонического тестового сигнала частоте его низкочастотной гармоники для определения действительных и мнимых составляющих отклика на всех частотах достаточно одного периода тестового сигнала.

Тем не менее в общем случае необходимо учесть возможное наличие переходного процесса длительности $T_{ИХ}$ в начале процесса мониторинга или при резком изменении параметров

ОИ. В работе [8] показано, что, применяя специальные весовые функции, за время равное 3–4 периодам тестового сигнала можно обеспечить практическую инвариантность результата ФЧП к действительным экспонентам с любыми постоянными времени. Таким образом, время преобразования в целом не превысит $(18–24)\tau_n$. При этом характер амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ФЧП будет соответствовать характеру АЧХ полосового фильтра [8].

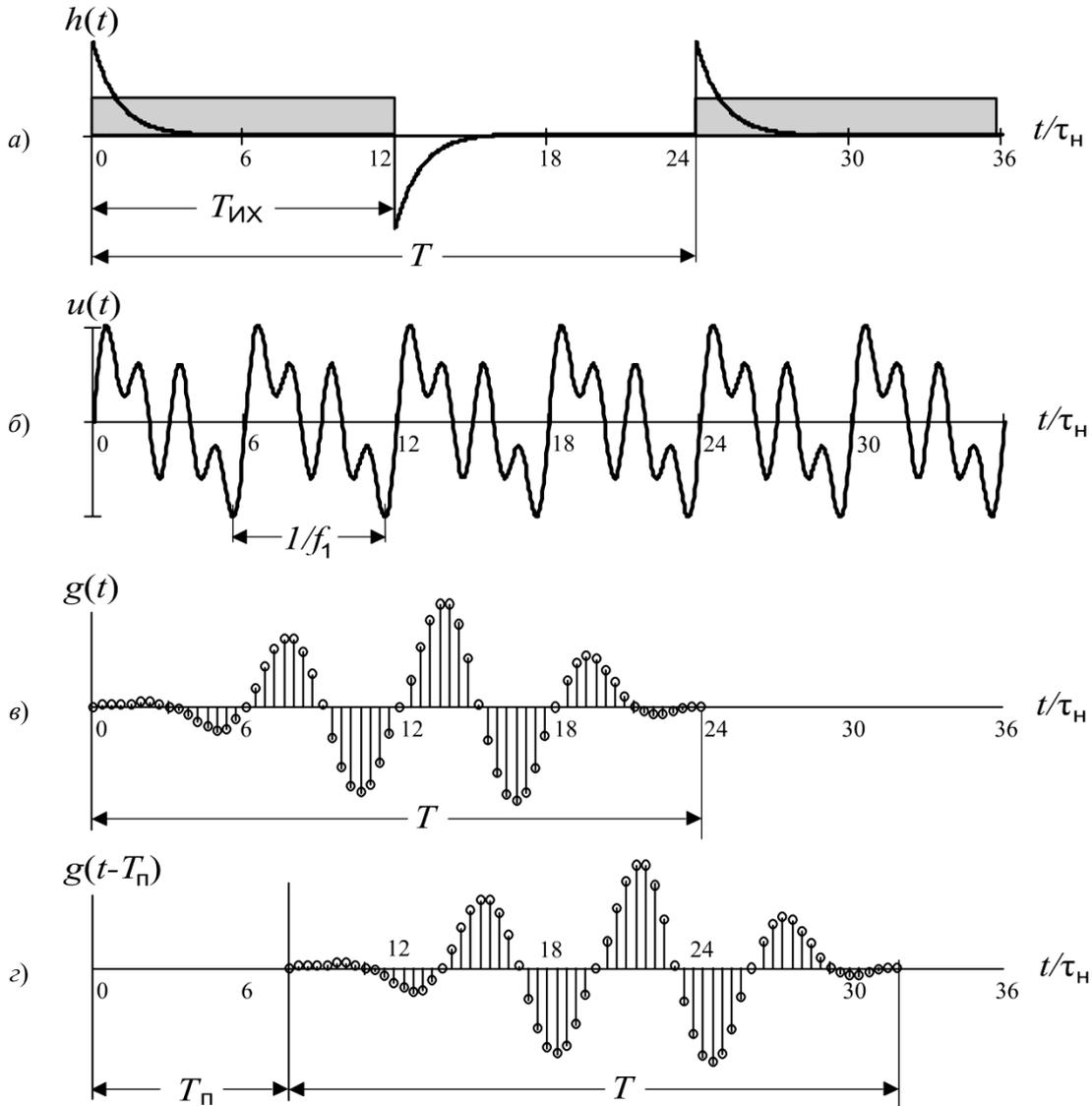


Рис. 2. Импульсное тестовое воздействие и переходная характеристика ОИ (а); полигармоническое напряжение на ОИ (б); опорный сигнал (в); опорный сигнал следующего цикла преобразования (г)

Отметим, что параметры переходного процесса во многом будут определяться параметрами самого ОИ, что облегчает подавление паразитной экспоненциальной составляющей отклика [9].

Здесь предполагается, что процедура дискретизации тока, протекающего через ОИ, и напряжения на нем осуществляется параллельно двумя дискретизирующими устройствами или одним дискретизирующим устройством – квазипараллельно. В этом случае период T_n повторения циклов преобразования может быть и существенно меньше, нежели длительность интервала наблюдения T .

Принципиальная возможность обновления результатов преобразования с периодом менее длительности ИХ объекта выгодно отличает частотный метод преобразования от импульсного, однако в этом случае результаты соседних циклов будут коррелированы тем больше, чем меньше отношение T_n/T .

Тем не менее в целом с точки зрения быстродействия рассматриваемые методы представляются равноценными.

Помехоподавление

Результаты многочисленных подробных исследований возможностей метода Прони, например [4–6], а также возможностей линейных преобразований, например, [4, 8, 9] позволяют выполнить краткий сопоставительный анализ помехоустойчивости рассматриваемых методов преобразования ПМД.

На основании изложенного выше можно ориентировочно определить минимальное значение времени преобразования, уменьшение которого влечет за собой непропорциональное снижение точности и создает большие проблемы с обеспечением помехоустойчивости. Это значение составляет примерно $2T_{\text{ИХ}}$, причем для обоих методов.

Можно выделить три основных вида актуальных помех:

- случайные помехи (шум квантования, шумы электронных компонентов);
- периодические помехи, например, сетевая;
- различные сложные тренды.

Частотный метод позволяет обеспечить подавление помех на стадии ФЧП, которое эквивалентно линейной цифровой фильтрации. Составляющие комплексных сигналов на разных частотах определяются как взвешенные суммы отсчетов. Формируя определенным образом весовую функцию, представляющую собой фактически импульсную характеристику ФЧП, можно относительно простыми средствами добиваться самых разнообразных селективных эффектов. При этом процедура определения параметров дробно-рациональной функции иммитанса, требующая решения системы линейных уравнений, остается неизменной. Ее порядок определяется только числом ПМД, а вся тяжесть достижения необходимой избирательности ложится на простую в реализации линейную процедуру взвешенного суммирования.

Существенно сложнее обстоит дело при реализации импульсного метода. Здесь в общем случае практически все помехи должны быть учтены в модели метода Прони. Чем выше требования к помехоустойчивости, тем сильнее будет «разбухать» нелинейная процедура Прони. Например, сетевая помеха представляет собой широкополосный периодический сигнал (необходимо учитывать полтора-два десятка гармоник). Это уже существенным образом усложняет модель.

При этом необходимо учитывать девиацию частоты и амплитуды помехи, приводящие к размыванию ее спектра. В связи с этим возникают дополнительные трудности, в то время как применение преобразования Фурье в рамках частотного метода позволяет реализовать ФЧП с АЧХ, эквивалентной АЧХ полосового фильтра, и девиация параметров сетевой помехи здесь не создает особых проблем.

Наличие в сигнале сложного по форме паразитного тренда также приводит к определенным трудностям при реализации импульсного метода – тренд нужно представить в экспоненциальном виде. В то время как инвариантность ФЧП к помехе, представимой полиномом определенной степени, легко достигается посредством несложной модификации весовой функции.

Для минимизации влияния случайных помех и, прежде всего, шума квантования необходима информационная избыточность. При реализации импульсного метода использование этой избыточности должно быть «зашиито» в процедуру Прони. Для этого на первом и третьем этапах алгоритма оптимизируют решения систем уравнений по методу наименьших квадратов, используя указанную информационную избыточность. Однако возможности подавления случайной помехи здесь ограничены [6], в то время как линейные преобразования позволяют подавить случайные помехи пропорционально \sqrt{N} , где N – число отсчетов, используемых при реализации ФЧП, которое ограничено только возможностями применяемых аппаратных средств.

Необходимо указать еще на одно качественное различие двух методов спектрального анализа применительно к задаче преобразования ПМД.

Параметрические методы спектрального анализа требуют определения параметров всех составляющих сигнала, из которых в рассматриваемом нами случае информативной является только их малая часть.

В то время как посредством ФЧП необходимо определить лишь комплексные амплитуды нескольких гармоник с известной и стабильной частотой. Все остальные многочисленные составляющие отклика рассматриваются как паразитные, подлежащие подавлению. Это существенно более простая задача.

Заключение

Основные достоинства рассматриваемых методов преобразования ПМД жестко связаны со свойствами применяемых методов спектрального анализа. Метод Прони представляет собой альтернативу классическому спектральному анализу, основанному на преобразовании Фурье, ибо он позволяет преодолеть те ограничения, которые заложены в последнем. Именно поэтому преимущества метода Прони при решении многих задач неоспоримы, несмотря на отсутствие у него важных достоинств преобразования Фурье.

Однако необходимое при реализации частотного метода измерение иммитанса на нескольких частотах – это задача, при современной реализации которой по-настоящему не проявляется ни один из недостатков преобразования Фурье. Зато все его достоинства выявляются в полной мере. Частоты гармоник тестового сигнала известны и стабильны. Их периоды кратны периоду самой низкочастотной гармоники. Период полигармонического тестового сигнала кратен интервалу наблюдения. И дискретизирующие последовательности когерентны тестовому сигналу.

Что же касается импульсного метода, то здесь наряду с достоинствами метода Прони проявляются и его недостатки. Перспективы применения импульсного метода связаны, прежде всего, с совершенствованием вычислительных алгоритмов и развитием вычислительных средств.

Библиографический список

1. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. Бобылев, Д. А. Универсальный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских // Датчики и системы. – 2013. – № 12. – С. 7–12.
3. Мелентьев, В. С. Аппроксимационные методы и средства измерения и контроля параметров двухполюсных электрических цепей / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев. – Москва : Физматлит, 2012. – 198 с.
4. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – Москва : Мир, 1990. – 265 с.
5. Кузнецов, С. А. Выбор методов спектрального оценивания для систем контроля динамических характеристик датчиков давления / С. А. Кузнецов, М. Г. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 45–51.
6. Цыпин, Б. В. Применение метода спектрального оценивания Прони для измерения параметров цепей переменного тока / Б. В. Цыпин // Датчики и системы. – 2003. – № 1. – С. 20–24
7. Бобылев, Д. А. Оценка быстродействия помехозащищенных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев // Датчики и системы. – 2015. – № 12. – С. 3–8.
8. Бобылев, Д. А. Фазочувствительные преобразования сигналов, обеспечивающие высокое подавление экспоненциальных помех / Д. А. Бобылев // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 2–8.
9. Бобылев, Д. А. Применение адаптивной весовой функции для определения составляющих периодического сигнала на фоне экспоненциальной помехи / Д. А. Бобылев // Датчики и системы. – 2016. – № 12. – С. 16–21.

References

1. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determining the parameters of multi-element two-poles]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Bobylev D. A., Borovskikh L. P. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2013, no. 12, pp. 7–12. [In Russian]
3. Melent'ev V. S., Batishchev V. I. *Approksimatsionnye metody i sredstva izmereniya i kontrolya parametrov dvukhpolyusnykh elektricheskikh tsepey* [Approximation methods and tools for measuring and controlling parameters of two-pole electric circuits]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 198 p. [In Russian]
4. Marpl-ml. S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir, 1990, 265 p. [In Russian]

5. Kuznetsov S. A., Myasnikova M. G., Panov A. P., Tsypin B. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 2 (12), pp. 45–51. [In Russian]
6. Tsypin B. V. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2003, no. 1, pp. 20–24 [In Russian]
7. Bobylev D. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2015, no. 12, pp. 3–8. [In Russian]
8. Bobylev D. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2011, no. 2, pp. 2–8. [In Russian]
9. Bobylev D. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2016, no. 12, pp. 16–21. [In Russian]

Бобылев Дмитрий Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: dabobyl@ipu.ru

Bobylev Dmitry Alekseevich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Боровских Леонид Петрович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: borovski@ipu.ru

Borovskikh Leonid Petrovich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Бобылев, Д. А. Помехоустойчивость, точность и быстродействие импульсного и частотного методов параметрической идентификации объектов со схемами замещения в виде многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 34–42. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-4.