

УДК 621.317

А. Г. Дмитриенко, А. В. Ляшенко, Б. В. Цыпин

ВТОРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬЮ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

A. G. Dmitrienko, A. V. Lyashenko, B. V. Tsy-pin

SECONDARY CONVERTER AS PART OF AN INFORMATION-MEASURING SYSTEM WITH HIGHER NOISE IMMUNITY FOR SPEED OF ROTATION MEASUREMENT

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* К информационно-измерительным системам (ИИС) аварийной защиты ракет-носителей предъявляются жесткие требования по надежности, в том числе метрологической. Одним из важнейших параметров, измеряемых при пуске ракет-носителей, является частота вращения ротора турбоагрегата стартового двигателя. Исходя из результатов измерения формируются команды управления двигателем. Задача измерения усложнена тем, что в непосредственной близости от двигателя могут находиться электрические кабели систем управления двигателем, по которым осуществляется подача мощных сигналов, управляющих исполнительными элементами двигателя (ширококлапанами, электропневмоклапанами и др.), являющихся наряду с цепями питания бортовой электроники источниками мощных электромагнитных помех. *Материалы и методы.* Достигнутые к настоящему времени вычислительные возможности микроконтроллеров позволяют использовать эффективные способы анализа измерительных сигналов, основанные на аппроксимационных методах, методах регрессионного анализа и процедуры наименьших квадратов. Использованный в данной работе метод наименьших квадратов Прони для представления сигнала датчика $x[t]$ использует выборочные данные (дискретные отчеты сигнала, полученные аналого-цифровым преобразованием). Для описания сигнала используется наиболее естественная модель, представляющая собой сумму свободных и вынужденных затухающих колебательных составляющих разной частоты f_i с соответствующими амплитудами U_i , фазами Φ_i и затуханиями α_i . В основе определения этих параметров лежит более общая аппроксимация данных, описываемая авторегрессионным уравнением. *Результаты.* Рассмотрена задача измерения частоты вращения деталей и узлов энергонасыщенных объектов. Показано, что известные методы обеспечения помехоустойчивости, основанные на амплитудной и временной селекции, позволяют проводить измерения только при отношении амплитуд «сигнал–помеха», превышающем два. Приведено вербальное описание алгоритмов обработки сигналов, основанных на сочетании методов эмпирического модального разложения сигнала на колебательные компоненты и определения параметров компонент методом наименьших квадратов Прони. *Выводы.* Применение во вторичном преобразователе ИИС современных цифровых аппроксимационных методов обработки измерительных сигналов с последующим определением параметров сигнала методом Прони позволяет обеспечить высокую точность измерения частот вращения даже в случае действия мощных помех, значительно превышающих полезный сигнал.

A b s t r a c t. *Background.* Rigorous requirements and demands are applied to the data-measuring systems for launch vehicles emergency protection. One of the most important measured parameters while firing a launch vehicle is rotary speed (RPM) of turbogenerator set in the boost rocket motor. The measurement task becomes more complicated because electrical cables of motor control systems are located in close proximity to the boost motor and are used to transmit large signals in order to control motor actuating elements (pyrovalves, electro-pneumatic valves, etc.), thus generating strong electromagnetic interference alongside with the power supply circuits of onboard electronics. *Materials and methods.* Up-to-date computational capabilities of microprocessor control units provide us with powerful techniques for sensing signals analysis based on approximating methods, regression analysis methods and least squares methods. Prony least squares method, applied in this paper, uses sampling data (discrete signal reports, obtained by analog-to-digital conversion) for sensor $x[t]$ signal notation. A more natural model is used for signal description, it is basically a sum of unforced and forced dying oscillating terms of different frequencies f_i with the corresponding amplitudes U_i , phase angles ϕ_i and attenuations α_i . These parameters' estimating is based on more general data fitting governed by an autoregressive equation. *Results.* The task of speed of rotation measurement for parts and units in energy-saturated facilities is discussed. It's shown that previously known noise immunity methods, based on amplitude and temporal discrimination, enable measurements only provided that amplitude ratio of valid signal and noise disturbance is more than two. Verbal description of signal processing algorithms based on methods of empirical modal signal decomposition in oscillating components and component values estimating by Prony least squares method is given. *Conclusions.* The usage of advanced digital approximating methods for sensing signals processing techniques followed by signal data assortment by Prony method provides high accuracy for speed of rotation measurements even when noise disturbance far exceeds valid signal.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная система, частота вращения, индукционный датчик, вторичный преобразователь, измерительный сигнал, помехоустойчивость, погрешность, цифровая обработка, алгоритм, эмпирические моды, экстремальная фильтрация, метод Прони.

К e y w o r d s: information-measuring system, speed of rotation, inductance transducer, secondary converter, sensing signal, noise immunity, error, digital processing, algorithm, empirical modes, critical filtering, Prony filtration method.

К информационно-измерительным системам (ИИС) аварийной защиты ракет-носителей предъявляются жесткие требования по надежности, в том числе метрологической. Одним из важнейших параметров, измеряемых при пуске ракет-носителей, является частота вращения ротора турбоагрегата стартового двигателя. Исходя из результатов измерения формируются команды управления двигателем. Задача измерения усложнена тем, что в непосредственной близости от двигателя могут находиться электрические кабели систем управления двигателем, по которым осуществляется подача мощных сигналов, управляющих исполнительными элементами двигателя (пироклапанами, электропневмоклапанами и др.), являющихся наряду с цепями питания бортовой электроники источниками мощных электромагнитных помех.

Помехоустойчивость ИИС зависит от принятого способа обработки выходного сигнала датчика во вторичном преобразователе. Известные способы повышения помехоустойчивости ИИС основаны на формировании счетных импульсов из сигнала индукционного датчика частоты вращения с применением способов амплитудной, временной или комбинированной селекции [1–4]. Во вторичном преобразователе проводят анализ параметров одной или двух полуволн противоположной полярности каждого сигнала индукционного датчика частоты вращения, частоты и скорости ее изменения, и, если параметры удовлетворяют определенным требованиям, формируют счетные импульсы. Эти способы обработки сигналов успешно работают при отношении амплитуд «сигнал–помеха» свыше двух.

Вместе с тем достигнутые к настоящему времени вычислительные возможности микроконтроллеров позволяют использовать более эффективные способы анализа сигналов, основанные на аппроксимационных методах, методах регрессионного анализа и процедуры наименьших квадратов. Например, известен метод наименьших квадратов Прони, использующий для представления сигнала датчика $x[t]$ выборочные данные (дискретные отчеты сигнала, полученные аналого-цифровым преобразованием) [5]. Для описания сигнала используется наиболее естественная модель, представляющая собой сумму свободных и вынужденных затухающих колебательных составляющих разной частоты f_i с соответствующими амплитудами U_i , фазами φ_i и затуханиями α_i . В основе определения этих параметров лежит более общая аппроксимация данных авторегрессионным уравнением:

$$x_i = \sum_{j=1}^p a_j \cdot x_{i-j} = \sum_{j=1}^q A_j \cdot \exp(-\alpha_j \cdot t_i) \cdot \cos(2\pi f_j t_i + \varphi_j), \quad (1)$$

где $x_i, i = 1, \dots, N$, – дискретные отсчеты сигнала в моменты времени t_i ; $a_j, j = 1, \dots, p$, – коэффициенты линейного предсказания; p – порядок модели, зависящий от числа колебательных составляющих.

Метод Прони содержит три основных этапа:

1. Определение a_j из выражения (1).
2. Решение характеристического уравнения

$$z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p = 0, \quad (2)$$

в корнях которого

$$z_{i,i+1} = e^{(\alpha_i \pm j 2\pi f_i) \Delta t} \quad (3)$$

содержится информация о собственных частотах и коэффициентах затухания колебания.

3. Определение комплексных амплитуд $h_i = U_i e^{j\varphi_i}$ из решения системы уравнений

$$x_i = \sum_{j=1}^p U_j e^{\alpha_j |\Delta t|} e^{j(2\pi f_j \Delta t + \varphi_j)} = \sum_{j=1}^p U_j e^{j\varphi_j} \cdot e^{(\alpha_j \pm j 2\pi f_j) \Delta t} = \sum_{j=1}^p h_j z_j^i. \quad (4)$$

Применение процедуры Прони позволяет получить погрешности измерения частот колебательных компонент сигнала при действии стационарных и случайных помех и шумов на уровне сотых долей процента [6, 7].

Недостатком метода Прони является высокая трудоемкость и продолжительность расчетов, обусловленная необходимостью решения двух систем из большого числа уравнений и характеристического уравнения высокого порядка, что препятствует реализации способов на микроконтроллерах и использованию в составе мобильных систем реального времени. Анализ реального сигнала датчика частоты, полученного в сигнале датчика при стендовых испытаниях стартового двигателя [8], показал, что наблюдаются колебательные компоненты с помехами числом не менее четырех. При этом с учетом нормального шума и шумов квантования для обеспечения достаточной точности измерения параметров сигнала порядок аппроксимирующей модели должен быть не ниже двенадцатого ($p > 12$) [6, 7]. То есть необходимо решать системы из 12 уравнений и характеристическое уравнение двенадцатого порядка.

Существенно упростить задачу аппроксимации можно, используя предварительное выделение колебательных компонент из сигнала методами модального анализа с последующим определением параметров компонент методом Прони [9, 10].

Основанный на этом алгоритм измерения частоты вращения, реализуемый вторичным преобразователем, можно описать вербально следующим образом:

- 1) дискретизируют с постоянным шагом или представляют дискретными отсчетами непрерывный выходной сигнал датчика частоты вращения;
- 2) формируют кадр данных, накапливая дискретные отсчеты. При формировании первого кадра данных число накапливаемых дискретных отсчетов задается исходя из нижнего пре-

дела измерений. В дальнейшем оно изменяется пропорционально частоте вращения, полученной при обработке предшествующего кадра данных. При необходимости повышения быстродействия ИИС можно использовать скользящее формирование кадра данных;

- 3) выделяют из отсчетов колебательные составляющие;
- 4) рассчитывают амплитуды выделенных колебательных составляющих сигнала и выделяют колебательную составляющую сигнала с максимальной амплитудой;
- 5) рассчитывают частоту выделенной колебательной составляющей сигнала с максимальной амплитудой;
- 6) полученное значение частоты, пропорциональное частоте вращения, используют для задания количества дискретных значений сигнала в следующем кадре данных;
- 7) переходят к обработке следующего кадра данных.

Для выделения колебательных составляющих могут быть использованы, например, разложение дискретного ряда значений сигнала на эмпирические моды или экстремальная фильтрация данных.

При использовании разложения на эмпирические моды реализуется следующий алгоритм:

1. Выделяют экстремумы сигнала $\{M_n\}, n = 1, 2, 3, \dots; \{m_n\}, n = 1, 2, 3, \dots$ ($\{M_n\}$ и $\{m_n\}$ – набор максимумов и минимумов сигнала соответственно).
2. По максимумам на основе сплайн-интерполяции строят верхнюю огибающую $M(i) = f_M(M_n, i)$, а по минимумам – нижнюю огибающую $m(i) = f_m(m_n, i)$.
3. Формируют скользящее среднее значение огибающих $e(i) = 0,5[m(i) + M(i)]$.
4. Формируют из исходной последовательности отсчетов колебательную составляющую (моду) $h(i) = x(i) - e(i)$. Не рассматриваем случай, когда кандидат в моды – не мода, так как за счет итерационной процедуры повторным построением огибающих и вычитанием среднего кандидат на моду исключается.
5. Повторяют для скользящего среднего значения $e(i)$ пункты 1–4 как $h_n(i) = e_{n-1}(i) - e_n(i)$, где n – порядковый номер колебательной составляющей и среднего значения огибающих.

При использовании экстремальной фильтрации реализуется следующий алгоритм:

1. Выделяют экстремумы сигнала $\{x_{\mathcal{E}n}\}, n = 1, 2, 3, \dots$
2. Формируют скользящее среднее значение экстремумов вычислением среднего между средним значением текущего и предыдущего экстремумов и средним значением текущего и последующего экстремумов $e(i) = 0,25x_{\mathcal{E}n-1} + 0,5x_{\mathcal{E}n} + 0,25x_{\mathcal{E}n+1}$.
3. Формируют колебательную составляющую $h(i) = -0,25x_{\mathcal{E}n-1} + 0,5x_{\mathcal{E}n} - 0,25x_{\mathcal{E}n+1}$.
4. Повторяют для скользящего среднего пункты 1–3.

Для расчета параметров выделенных колебательных составляющих, например, может быть применен метод наименьших квадратов Прони, использующий модель второго порядка $p = 2$, или параметры могут быть рассчитаны непосредственно по значениям колебательных составляющих.

При использовании метода наименьших квадратов Прони реализуется следующая последовательность действий:

1. Составляют по методу наименьших квадратов систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=2}^N e[i]e[i-1] &= -\sum_{k=1}^2 a_k \sum_{i=2}^N e[i-1]e[i-k] \\ \sum_{i=2}^N e[i]e[i-2] &= -\sum_{k=1}^2 a_k \sum_{i=2}^N e[i-2]e[i-k] \end{aligned} \right\},$$

из решения которой находят коэффициенты авторегрессии a_1 и a_2 .

2. Подставляют значения коэффициентов авторегрессии a_1 и a_2 в характеристическое уравнение второго порядка $z^2 + a_1z + a_2 = 0$ и находят его комплексно сопряженные корни z_1 и z_2 .

3. Минимизируя сумму квадратов ошибок по каждому параметру h_k , составляют вторую систему двух уравнений и вычисляют ее комплексно сопряженные корни h_1 и h_2 :

$$\begin{aligned}\sum_{i=0}^{N-1} e[i] z_1^i &= \sum_{k=1}^2 h_k \sum_{i=0}^{N-1} (z_1 z_2)^i, \\ \sum_{i=0}^{N-1} e[i] z_2^i &= \sum_{k=1}^2 h_k \sum_{i=0}^{N-1} (z_2 z_2)^i.\end{aligned}\quad (5)$$

4. Рассчитывают параметры колебаний частоты:

$$f = \frac{1}{2\pi T} \left| \arctan \frac{\operatorname{Im} z}{\operatorname{Re} z} \right| \quad [\text{Гц}], \quad (6)$$

и амплитуды

$$A = |h| \quad [\text{В}]. \quad (7)$$

Выделение из сигнала датчика частоты вращения колебательной составляющей с максимальной амплитудой и нахождение ее частоты, по которой определяют частоту вращения, позволяет проводить измерение, если амплитуда полезного сигнала датчика частоты вращения превышает амплитуду помехи, хотя бы на несколько процентов, т.е. достаточно, чтобы отношение «сигнал–помеха» было больше единицы. Таким образом обеспечивается повышение помехоустойчивости.

Дальнейшее повышение помехоустойчивости актуально, если уровень помех существенно превышает уровень полезного сигнала. В этом случае требуется дополнительно применение частотной селекции. Для получения первого результата измерения исходя из конструктивных особенностей объекта априори задают диапазон ожидаемого значения частоты сигнала датчика и скорости ее изменения. Результат измерения, отличный от нулевого, появляется, когда одна из частот колебательных компонент сигнала попадает в заданный диапазон. В дальнейшем диапазон ожидаемых значений частоты задают исходя из результатов предыдущих измерений. В работе [11] показано, что обеспечение погрешности измерения на уровне десятых и сотых долей процента возможно даже в случае, когда амплитуда полезного сигнала на порядок меньше амплитуды помехи. Погрешность измерения в основном определяется уровнем нормального шума, для уменьшения которого могут быть приняты классические конструктивные и схемотехнические методы. В работе [11] также даны рекомендации по выбору сочетаний методов выделения колебательных компонент и определения их параметров в зависимости от уровня шумов и требуемой точности измерения.

Таким образом, применение во вторичном преобразователе ИИС современных цифровых аппроксимационных методов анализа измерительных сигналов позволяет обеспечить высокую точность измерения частот вращения даже в случае действия мощных помех, значительно превышающих полезный сигнал.

Список литературы

1. Патент 2352058 Российская Федерация. Способ формирования импульсов из сигналов индукционных датчиков частоты вращения / Мурашко Н. А., Мурашко О. А. – Опубл. 10.04.2009.
2. Патент № 2399153 Российская Федерация. Способ формирования импульсов из сигналов индукционных датчиков частоты вращения / Мокров Е. А., Елизаров В. П., Мельников А. А., Цыпин Б. В. – 2010, БИ № 25.
3. Патент № 2399154 Российская Федерация. Формирователь импульсов из сигналов индукционных датчиков частоты вращения / Мокров Е. А., Елизаров В. П., Мельников А. А., Цыпин Б. В. – 2010, БИ № 25.
4. Патент № 2400929 Российская Федерация. Формирователь импульсов из сигналов индукционных датчиков частоты вращения / Мокров Е. А., Елизаров В. П., Орлов В. Н., Мельников А. А., Цыпин Б. В. – 2010, БИ № 27.

5. Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл. – М. : Мир, 1990.
6. Мясникова, М. Г. Преобразование Прони в задаче измерения параметров гармонических сигналов в шумах / М. Г. Мясникова, Б. В. Цыпин, П. Г. Михайлов // Датчики и системы. – 2007. – № 4. – С. 19–22.
7. Цыпин, Б. В. Применение методов цифрового спектрального оценивания в задаче измерения параметров сигнала / Б. В. Цыпин, М. Г. Мясникова, В. В. Козлов, С. В. Ионов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 26–30.
8. Ляшенко, А. В. Виды помех и способы борьбы с ними в сигнале индукционного датчика частоты вращения в системах аварийной защиты энергонасыщенных объектов / А. В. Ляшенко, Д. В. Пена, М. В. Чернов // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий : тезисы докладов V Всерос. науч.-техн. конф. (5–7 июня 2012 г.). – М. : Радиотехника, 2012. – С. 186.
9. Патент № 2549 519 Российская Федерация. Способ и устройство для сжатия и восстановления сигналов / Мясникова Н. В., Мясникова М. Г., Терехина А. В., Цыпин Б. В. – Н03М7/30. – Оpubл. 20.04.2015, БИ № 12.
10. Ломтев, Е. А. Совершенствование алгоритмов сжатия-восстановления сигналов для систем телеизмерений / Е. А. Ломтев, М. Г. Мясникова, Н. В. Мясникова, Б. В. Цыпин // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 11–14.
11. Терехина, А. В. Повышение метрологических характеристик информационно-измерительных систем путем совершенствования методов сжатия-восстановления сигналов на основе процедуры Прони : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16, 05.11.01 / Терехина А. В. – Пенза, 2014. – 168 с.

Дмитриенко Алексей Геннадиевич

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Dmitrienko Aleksey Gennadievich

candidate of technical sciences,
director general,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ляшенко Антон Валерьевич

начальник отдела центра 1,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Lyashenko Anton Valer'evich

head of Department Center 1,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Tsy-pin Boris Vul'fovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and aviation instrument,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Дмитриенко, А. Г.

Вторичный преобразователь информационно-измерительной системы с повышенной помехоустойчивостью для измерения частоты вращения / А. Г. Дмитриенко, А. В. Ляшенко, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 31–36.