



ПОЗИЦИОННО-БИНАРНЫЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КРИВЫХ

О. К. НУСРАТОВ

Предлагается позиционно-бинарный (ПБ) алгоритм анализа и идентификации циклических кривых, отображающих техническое состояние объекта. Показано, что высокая разрешающая способность ПБ разложения и простота реализации обеспечивают более эффективное его применение, чем спектрального разложения, для диагностики процессов, описываемых периодическими кривыми с крутыми перепадами уровней сигнала.

A positional-binary (PB) algorithm of analysis and identification of cyclic curves representing the technical condition of the object is proposed. It is shown that the high resolution of PB decomposition and simplicity of its implementation provide its more effective application than that of spectral decomposition, for diagnostics of processes described by periodic curves with abrupt gradients of signal levels.

Для описания циклических сигналов $x(t)$ с периодом T при диагностике технического состояния системы на практике часто используется метод спектрального анализа [1]. С этой целью исходный сигнал разлагается на гармонические составляющие в соответствии с выражением

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t), \quad (1)$$

т. е. функция $x(t)$ с периодом T представляется в виде разложения в ряд по ортогональным функциям $\sin n\omega t$ и $\cos n\omega t$ как сумма элементарных периодических кривых.

Требуемая степень достоверности обеспечивается условиями неравенства

$$\sum_{i=1}^N \lambda^2(i\Delta t) \leq S, \quad (2)$$

где $\lambda^2(i\Delta t)$ — квадраты отклонений между суммой правой части равенства (1) и отсчетами сигнала $x(t)$ в моменты дискретизации $t_0, t_1, \dots, t_n, \dots$ с шагом Δt ; S — допустимая величина среднеквадратичного отклонения; $N = T/\Delta t$.

Однако реальные сигналы ряда технологических систем и объектов имеют сложную форму с крутыми фронтами на отдельных участках кривой. Поэтому для адекватного описания этих кривых с использованием спектрального разложения необходимо большее количество гармонических составляющих, что приводит к существенному увеличению количества применяемых информативных признаков и усложнению процесса диагностики [2].

Предлагается ПБ алгоритм формирования пространства признаков и идентификации кривых с периодом T , позволяющий одновременно с уменьшением количества используемых информативных признаков повысить степень достоверности полученных результатов и упростить процедуру диагностики.

С этой целью исходный циклический сигнал в виде некоторой кривой $x(t)$, форма которой характеризует состояние системы, дискретизируется с заданным интервалом Δt и разлагается на ПБ составляющие $q_0(t), q_1(t), \dots, q_k(t), \dots, q_m(t)$. Раз-

рядность двоичного кода, необходимого для бинарного разложения, определяется максимально возможной амплитудой сигнала $x(i\Delta t) > 2^n$, где $n \geq \log_2(x_{\max}/\Delta x)$, Δx — шаг дискретизации. При этом в каждой из позиций q_k образуются (широко-импульсные сигналы) временные интервалы, длительность которых определяется количеством единиц, последовательно образуемых в данной позиции, а паузы образуются за счет следующих последовательно нулевых составляющих. Разложение исходного сигнала на ПБ составляющие проводится в процессе его аналого-цифрового преобразования и не требует дополнительных аппаратных средств [3]. При изменении состояния объекта и соответствующем изменении формы кривой $x(t)$ длительность временных интервалов в позициях q_k изменяется соответственно, поскольку меняются сочетания нулей и единиц в соответствующих позициях.

Таким образом, если изменение состояния объекта приводит к изменению формы кривой на величину, большую, чем шаг дискретизации Δx , то это изменение отображается на параметрах двоичной последовательности $q_k(i\Delta t)$, образуемых в каждой из позиций. Выбором шага дискретизации можно обеспечить необходимую чувствительность ПБ разложения к изменениям формы кривой, что позволяет при необходимости обнаружить даже небольшие изменения в состоянии объекта и прогнозировать возможность появления тех или иных неисправностей или аварийных ситуаций.

Составляющие ПБ разложения можно использовать в качестве информативных признаков в задаче распознавания кривых, отображающих ход циклических процессов.

Рассмотрим процесс формирования информативных признаков с помощью ПБ разложения сигнала на примере анализа ваттметрограмм, представляющих собой кривую мощности W на валу электродвигателя глубинного нефтяного насоса за период его работы $\phi = 360^\circ$. На рис. 1, a изображена ваттметрограмма, соответствующая нормальной бездефектной работе насоса. Для разложения этой кривой на ПБ составляющие при амплитуде сигнала, равной 25 единицам, потребуется $k \geq \log_2 25$, т. е. $k = 5$ двоичных разрядов q_4, q_3, \dots, q_0 . Результат



разложения на ПБ составляющие приведен на рис. 1, б. Как видно, частота встречаемости 1 и 0 и соответственно ширина единичных интервалов и нулевых пауз при заданном шаге дискретизации в позициях q_k определяются двоичным кодом амплитудного значения сигнала в моменты дискретизации. При этом в позициях q_k (например, в позиции q_3) образуются временные интервалы, соответствующие двоичной последовательности вида 1.1, 5.0, 4.1, 2.0, 2.1, 11.0, 5.1, 5.0, 5.1, 9.0, 7.1, где первые цифры означают длительность интервала, а вторые определяют, единицам или нулям соответствует этот интервал. Аналогичные широтно-импульсные сигналы и соответствующие им двоичные последовательности образуются и в других позициях.

На рис. 2, а изображена ваттметрограмма, соответствующая появлению неисправности вида «утечка в нагнетательном клапане» насоса. Как видно из рис. 2, б, в результате разложения этого сигнала на ПБ составляющие в позициях q_k образуется отличная от предыдущей последовательность временных интервалов и соответствующих им бинарных составляющих. Так, в той же позиции q_3 образуются временные интервалы и соответствующие им бинарные составляющие вида 8.0, 5.1, 7.0, 6.1, 6.0, 5.1, 15.0, 4.1, существенно отличающиеся от бинарных составляющих для случая «нормальная работа» насоса. Аналогичные изменения происходят и в других позициях.

Ваттметрограмма, изображенная на рис. 3, а, соответствует неисправности вида «утечка в приемном клапане» глубинного нефтяного насоса. Временные интервалы, образованные в соответствующих позициях, и бинарные составляющие (рис. 3, б), здесь также существенно отличаются от соответствующих величин, полученных для кривых на рис. 1, а и 2, а. При этом в позиции q_3 образуется последовательность вида 5.1, 3.0, 4.1, 4.0, 3.1, 5.0, 5.1, 9.0, 3.1, 3.0, 8.1, 4.0.

Таким образом, любые изменения технического состояния объекта или его технологических параметров, вызвавших изменение сигнала на величину, большую, чем шаг дискретизации, будут отражаться на длительности временных интервалов, а соответственно — и на бинарных составляющих в позициях q_k , что позволяет использовать эти бинарные составляющие в качестве информативных признаков.

С целью классификации видов неисправностей, соответствующих изменению формы кривой, воспользуемся таблицей, в которой приведено количество единиц, образуемых в каждой позиции. В столбце $\alpha_{н.р}$ таблицы представлено количество единиц для случая «нормальная работа», в столбце $\alpha_{у.н}$ — «утечка в нагнетательном клапане», в столбце $\alpha_{р}$ — разность единиц в этих позициях, $\alpha_{р} = \alpha_{н.р} - \alpha_{у.н}$. Аналогичные данные приведены для случая «утечка в приемном клапане»: $\alpha_{р} = \alpha_{н.р} - \alpha_{у.п}$.

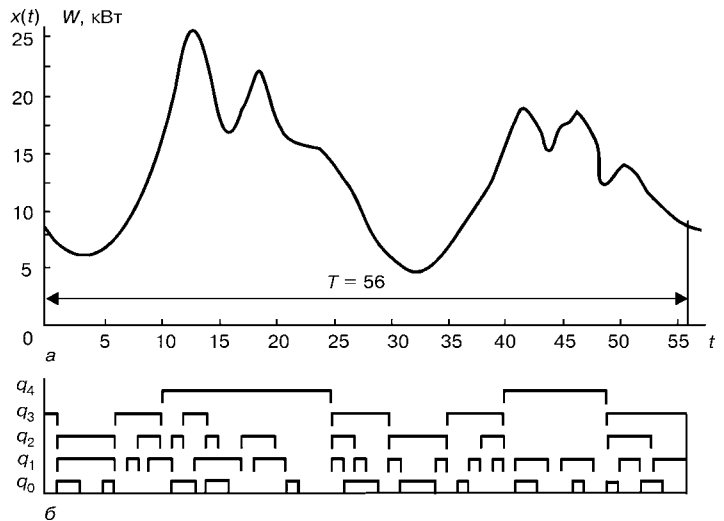


Рис. 1. Ваттметрограмма (а) и соответствующие ей ПБ составляющие (б) при нормальной работе насоса

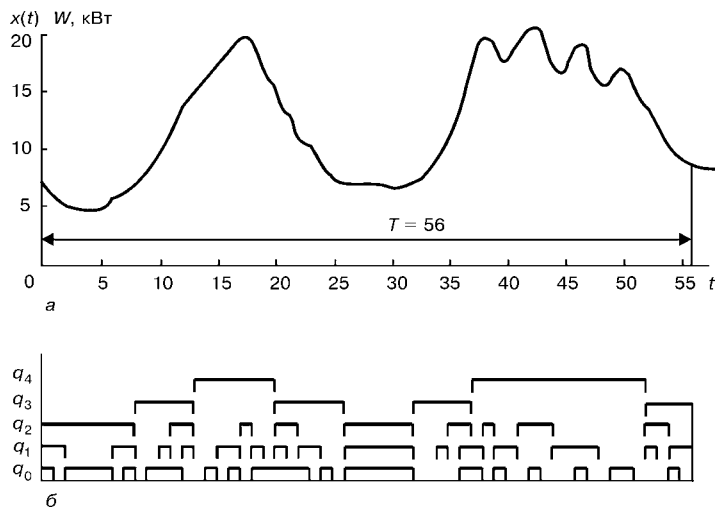


Рис. 2. Ваттметрограмма насоса (а) и соответствующие ей ПБ составляющие (б) для случая «утечка в нагнетательном клапане»

Каждая из позиций q_k имеет свой вес: чем больше индекс позиции q_k , тем больше его относительный и соответственно диагностический вес. При анализе данных таблицы можно сделать вывод о том, что возможно отнести текущие кривые, отображающие ход процесса, к одному из состояний системы, т. к. разность единиц α_p в каждой строке таблицы характеризует текущую кривую относительно кривой при «нормальной работе» системы.

С учетом диагностического веса каждой из позиций запишем выражение для разделения на классы неисправностей в виде

$$D = \sum_{k=0}^{n-1} (q_{k_i} - q_{k_j}) 2^k = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_p \cdot 2^k. \quad (3)$$

Здесь q_k, q_{k_j} — количество единиц в таблице соответственно для случая «нормальная работа» системы и для текущей кривой; k — количество позиций, используемых для бинарного разложения исходного сигнала; $k = 0, \dots, n - 1$; α_p — разность единиц в позициях таблицы.

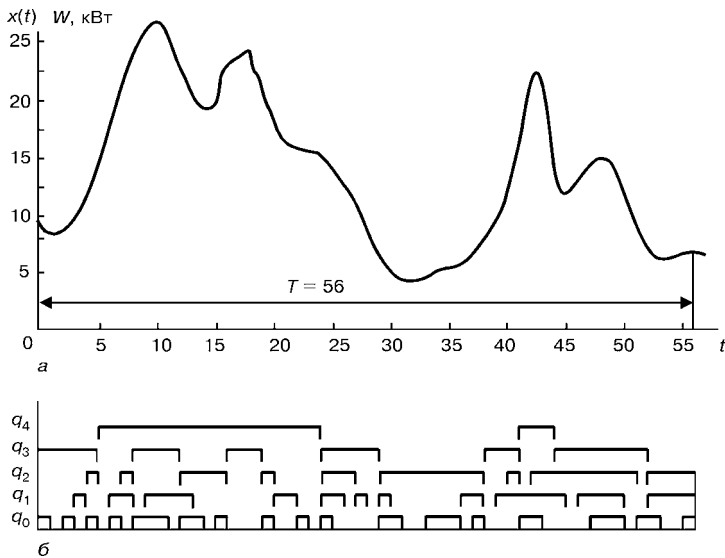


Рис. 3. Ваттметрограмма насоса (а) и соответствующие ей ПБ составляющие (б) для случая «утечка в приемном клапане»

Позиционно-бинарные составляющие при утечке в нагнетательном (I) и приемном (II) клапанах

Позиция q_k	I			II		
	$\alpha_{н.р}$	$\alpha_{у.л}$	α_p	$\alpha_{н.р}$	$\alpha_{у.л}$	α_p
q_4	24	22	2	24	22	2
q_3	24	20	4	24	28	-4
q_2	25	27	-2	25	33	-8
q_1	32	30	2	32	29	3
q_0	21	31	-10	21	27	-6

Используя данные таблицы, определим по выражению (3) при $T = 56\Delta t$ значение числового показателя $D_{у.н}$ для случая «утечка в нагнетательном клапане»:

$$D_{у.н} = (2 \cdot 2^4) + (4 \cdot 2^3) + (2 \cdot 2^1) + (-10 \cdot 2^0) = 50.$$

Аналогично по данным таблицы для случая «утечка в приемном клапане»

$$D_{у.п} = (2 \cdot 2^4) + (-4 \cdot 2^3) + (-8 \cdot 2^2) + (3 \cdot 2^1) + (-6 \cdot 2^0) = -32.$$

В результате анализа ряда реальных кривых и проведенных вычислительных экспериментов выявлено, что при изменении величины утечки в нагнетательном клапане насоса пропорционально ей изменяется и значение показателя $D_{у.н}$, оставаясь при этом положительной величиной. При изме-

нении величины утечки в приемном клапане также пропорционально изменяется значение показателя $D_{у.п}$, оставаясь при этом отрицательной величиной. Для других видов неисправностей значение показателя D варьируется в иных пределах числовых значений.

С целью идентификации состояния системы по всем классам неисправностей используются результаты ПБ разложения для эталонных неисправностей, хранящихся в памяти. По результатам сравнения данных, образующихся в каждой позиции и соответствующих текущему состоянию системы, с эталонными проводится выявление и классификация неисправностей.

Требуемая разрешающая способность алгоритма к изменениям формы кривой обеспечивается за счет выбора шага дискретизации и соответственно разрядности позиционных сигналов q_k . Так, например, при двухкратном уменьшении шага дискретизации Δx ($T = 112\Delta t$) для приведенных кривых разрядность q_k увеличивается всего лишь на единицу, а при 4-кратном ($T = 224\Delta t$) — лишь на две единицы. При этом значения $D_{у.н}$, $D_{у.п}$ становятся равными: для $T = 112\Delta t - D_{у.н} = 185$, $D_{у.п} = -132$; для $T = 224\Delta t - D_{у.н} = 699$, $D_{у.п} = -535$.

Таким образом, высокая разрешающая способность ПБ разложения и простота его реализации создает возможность раннего обнаружения изменений в поведении объекта и способствует повышению достоверности диагностики. Максимально возможная чувствительность ПБ алгоритма к изменениям формы кривой определяется по существу разрешающей способностью АЦП. Увеличением разрядности q_k на единицу удается в два раза уменьшить шаг дискретизации Δx , что равносильно двухкратному уменьшению среднеквадратичного отклонения S , тогда как для достижения аналогичной чувствительности с применением спектрального разложения иногда требуется дополнительно использовать десятки или даже сотни гармоник. При этом алгоритм ПБ разложения реализуется с помощью простых программных и стандартных аппаратных средств.

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 236 с.
2. Алиев Т. А. Основы экспериментального анализа. — М.: Машиностроение, 1997. — 271 с.
3. Алиев Т. А., Нусратов О. К. Алгоритмы анализа циклических сигналов // Автоматика и вычислит. техника, Латвия, Рига. — 1998. — № 2. — С. 68–74.

Ин-т кибернетики АН Азербайджана,
Баку

Поступила в редакцию
23.04.2001