

Авторы:

Воробьев Е.С.,
д.т.н. Антонов В.И.,
к.т.н. Наумов В.А.,
Солдатов А.В.,
Иванов Н.Г.
ООО НПП «ЭКРА»
- ЧГУ им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия.

Vorobyev E.S.,
D.Sc. Antonov V.I.,
Ph.D. Naumov V.A.,
Soldatov A.V.,
Ivanov N.G.
EKRA Research and
Production Enterprise LTD
- Chuvash State University,
Cheboksary, Russia.

Abstract: the electrical system signal is recognized by a structural model when it forms an effective core containing all the information about the characteristic parameters of the signal. The polynomial of such filter is divided

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗМЕРНОСТЬЮ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

PRINCIPLES OF STRUCTURAL MODELS DIMENSION CONTROLLING OF ELECTRICAL SIGNAL OF INTELLECTUAL ENERGY INDUSTRY

Аннотация: сигнал электрической системы распознается структурной моделью, если в ней формируется эффективное ядро, содержащее всю информацию о характеристических параметрах сигнала. Полином такого фильтра разделяется на полином эффективного ядра, корни которого согласуются с компонентами сигнала текущего режима электрической системы, и полином шума, корни которого формируют фильтр шума. В статье формулируются правила разделения множества корней первоначальной структурной модели, принципиально имеющей избыточный порядок, на подмножество корней эффективного ядра, используемое в компонентном анализе, и на подмножество корней, не участвующее на следующих этапах структурного анализа. Правила устанавливаются, что на первом этапе структурного анализа необходимо разделить корни на физически реализуемые (каузальные) и некаузальные корни. Физически реализуемые корни, в свою очередь, подразделяются на корни, согласованные и не согласованные с сигналом. Среди каузальных корней присутствуют корни, которые в принципе невозможно отличить от корней затухающих слагаемых сигнала, поскольку они следуют одним и тем же правилам, хотя корнями свободного процесса и не являются. Приводится пример структурного анализа сигнала, иллюстрирующий принципы управления размерностью модели сигнала.

Ключевые слова: адаптивный структурный анализ, эффективная модель сигнала, фильтр эффективного ядра, фильтр шума, управление размерностью модели сигнала.

into the effective kernel polynomial, whose roots are consistent with signal components of the electrical system mode, and the noise polynomial, whose roots form the noise filter. The article formulates the rules for dividing the roots set of the initial structural model which principally has the excessive order, into the roots subset of the effective kernel used in a component analysis, and into the roots subset that does not participate in the next stages of structural analysis. The rules state that at the first stage of structural analysis,

Введение

В информационной среде цифровой подстанции (ЦПС) сигналы токов и напряжений поступают ко входам интеллектуальных устройств РЗА, синхронных векторных измерений и т.д. в виде SV-потока по шине процесса с применением протокола МЭК-61850-9-2 (Sampled Values) [1]. При этом интеллектуальные устройства не имеют непосредственной связи с преобразователями аналоговых сигналов (Merging Units) и не могут взаимодействовать с ними и влиять на их характеристики. Поэтому свойства методов распознавания структуры цифрового сигнала (структурного анализа) определяются всецело субстантивными свойствами структурных моделей и методами управления их размерностью. Фундаментальные свойства структурных моделей, а также методы управления размерностью

структурной модели сигнала на разных стадиях структурного анализа излагались в работах [2, 3], но еще совсем недавно были обнаружены новые принципы в управлении размерностью модели, особенно на этапе компонентного анализа сигнала.

Именно этому обстоятельству обязана тема настоящей статьи, и посвящена она рассмотрению методов управления размерностью структурных моделей на этапе построения компонентной модели.

Статья построена следующим образом. В первом разделе излагается структура сигнала аварийного процесса и связь его компонентов с базисом собственных мод электрической системы. Раздел важен для понимания причины дискретности структуры сигнала аварийного процесса. Второй раздел устанавливает связь между компонентами сигнала и их каноническими филь-

it is necessary to divide the roots into causal and non-causal roots. Causal roots, in turn, are divided into roots that are consistent and not with the signal. Among the causal roots, some roots are inherently indistinguishable from the roots of the decaying components of the signal, since they follow the same rules, although they are not the roots of free process. An example of the signal structural analysis is given, illustrating the principles of controlling the signal model dimension.

Keywords: adaptive structural analysis, effective signal model, effective core filter, noise filter, signal models dimension controlling



Воробьев Евгений Сергеевич

В 2019 г. окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил степень бакалавра в 2017 г., защитил магистерскую диссертацию в 2019 г. по направлению «Автоматика энергосистем». Инженер 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».

трами заграждения, составляющими основу адаптивной структурной модели сигнала. В нем поясняется универсальность поведения канонических фильтров заграждения при распознавании компонентов сигнала, проявляющаяся в присущей им способности к заграждению компонентов с идентичными характеристическими параметрами, если даже они различаются амплитудой и (или) фазой. В третьем разделе рассматривается эффективный фильтр и его составляющие, одна из которых – модель эффективно-го ядра – формирует основу компонентной модели. В этом разделе формулируется фундаментальное свойство эффективно-го ядра, заключающееся в инвариантности его корней, независимо от порядка первоначального фильтра, обретшего эффективность. Четвертый раздел обобщает известные методы управления размерностью компонентной модели и формулирует новые правила декомпозиции эффективно-го фильтра. Статья завершается примером, иллюстрирующим применение принципов управления размерностью модели.

Базис собственных мод и сигнал аварийного процесса электрической системы

Сигнал аварийного режима включает в себя составляющие принужденного режима $x_s(t)$ и свободного движения электрической системы $x_f(t)$. Вид слагаемых принужденной составляющей полностью определяется источниками, действующими в электрической системе. Следовательно, компоненты принужденного режима характеризуют свойства системы в недостаточной мере. Эта задача возлагается на слагаемые свободного процесса, поскольку их характер полностью определяется корнями характеристического уравнения электрической системы

$$\Lambda_n(p) = (p - p_1) \dots (p - p_i) \dots (p - p_n) = 0. \quad (1)$$

Каждый корень уравнения (1) $p_i = \alpha_i + j\omega_i$ согласован с соответствующим компонентом свободного процесса

$$\underline{\phi}_i(t) = e^{p_i t} \quad (2)$$

и определяет его характеристические параметры (частоту ω_i и коэффициент затухания α_i). Компоненты свободного процесса все

вместе образуют базис собственных мод реакции электрической системы [4, 5]

$$\mathbf{V} = \{ \underline{\phi}_1(t), \dots, \underline{\phi}_n(t) \}.$$

Следовательно, сигнал свободного процесса представляет собой линейную комбинацию элементов базиса

$$x_f(t) = \underline{B}_1 \underline{\phi}_1(t) + \dots + \underline{B}_n \underline{\phi}_n(t) = \sum_{i=1}^n \underline{B}_i e^{p_i t}, \quad (3)$$

где амплитуды $\underline{B}_1 \dots \underline{B}_n$ являются, в общем случае, комплексными числами. Размер множества базисных сигналов \mathbf{V} , а значит, и порядок сигнала свободного процесса определяется порядком электрической системы n .

Экспонента

$$\underline{\phi}_i(t) = e^{-\alpha_i t}$$

согласована с вещественным корнем $p_i = -\alpha_i$ и формирует в сигнале (3) аперiodическую слагаемую

$$x_i(t) = \underline{B}_i \underline{\phi}_i(t) = B_i e^{-\alpha_i t}.$$

Комплексный корень $p_i = -\alpha_i + j\omega_i$ ассоциирован с комплексной колебательной составляющей

$$\underline{\phi}_i(t) = e^{(-\alpha_i + j\omega_i)t}. \quad (4)$$

Поскольку сигнал электрической системы является действительной функцией, то в решении уравнения (1) появляется комплексно-сопряженный корень $p_{i+1} = p_i^* = -\alpha_i - j\omega_i$. Поэтому в базисе (2) наряду с компонентом (4) присутствует комплексно-сопряженный компонент

$$\underline{\phi}_{i+1}(t) = \underline{\phi}_i^*(t) = e^{(-\alpha_i - j\omega_i)t}. \quad (5)$$

Собственные моды (4) и (5) вместе формируют в сигнале свободного процесса (3) затухающее колебание

$$x_i(t) = X_m e^{-\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \psi_i) = \underline{B}_i \underline{\phi}_i(t) + \underline{B}_i^* \underline{\phi}_i^*(t) = e^{-\alpha_i t} (c_i \cos \omega_i t - s_i \sin \omega_i t), \quad (6)$$

где $X_m = 2|B_i|$ – амплитуда, $\psi_i = \arg(B_i)$ – начальная фаза, $c_i = X_m \cos \psi_i$, $s_i = X_m \sin \psi_i$ – ортогональные составляющие.



Антонов

Владислав Иванович

Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматизации ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».



Наумов

Владимир Александрович

В 2001 г. окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2002 г. защитил магистерскую диссертацию. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор».

Заместитель генерального директора - технический директор ООО НПП «ЭКРА».

Кратные вещественные корни $p_i = p_{i+1} = -\alpha_i$ являются источниками собственных мод

$$\underline{\phi}_i(t) = e^{-\alpha_i t}, \quad \underline{\phi}_{i+1}(t) = t e^{-\alpha_i t},$$

проявляющих себя в сигнале как компонент критического режима свободного процесса

$$x_i(t) = \underline{B}_i \underline{\phi}_i(t) + \underline{B}_{i+1} \underline{\phi}_{i+1}(t) = e^{-\alpha_i t} (B_i + t B_{i+1}). \quad (7)$$

Распознаваемый сигнал содержит всю информацию о режиме электрической системы. Поэтому высшие гармоники $x_h(t)$, появляющиеся в сигнале из-за нелинейности электрической системы, также являются частью реакции системы и формально могут быть отнесены к базису собственных мод системы как частный случай компонентов вида (6):

$$x_h(t) = \sum_{i=n+1}^{M_s} \underline{B}_i \underline{\phi}_i(t) = \sum_{i=n+1}^{M_s} (c_i \cos \omega_i t - s_i \sin \omega_i t). \quad (8)$$

Здесь учтено, что порядок сигнала аварийного процесса увеличивается до M_s за счет добавления к ним гармоник (8).

В то же время, сигнал текущего режима электрической системы содержит наряду с составляющими полезного сигнала

$$x_c(t) = x_f(t) + x_h(t) = \sum_{i=1}^n \underline{B}_i e^{p_i t} + \sum_{i=n+1}^{M_s} (c_i \cos \omega_i t - s_i \sin \omega_i t)$$

еще и шум $w(t)$

$$x(t) = x_c(t) + w(t). \quad (9)$$

Преобразование непрерывного сигнала $x(t)$ в цифровой сигнал $x(k)$ не изменяет исходных положений задачи структурного анализа. Как и в случае непрерывного сигнала (9), искомыми переменными остаются число компонентов M_s и характеристические параметры самих слагаемых текущего режима

$$x_c(k) = x_f(k) + x_h(k) = \sum_{i=1}^n \underline{B}_i e^{p_i k T_s} + \sum_{i=n+1}^{M_s} (c_i \cos k \omega_i T_s - s_i \sin k \omega_i T_s), \quad (10)$$

а значит, и цифрового сигнала

$$x(k) = x_c(k) + w(k) \quad (11)$$

с шумом $w(k)$, где k – дискретное время (номер отсчета), T_s – период дискретизации.

Канонические фильтры компонентов и адаптивная модель цифрового сигнала аварийного процесса

Структура цифрового сигнала аварийного процесса (11) будет распознана, если для каждого компонента сигнала текущего режима (10) получится подобрать свой фильтр заграждения. Следовательно, любая модель сигнала текущего режима электрической сети может быть представлена как каскад канонических моделей, формирующих слагаемые сигнала на основе соответствующих заграждающих фильтров компонентов базиса собственных мод.

Так, например, цифровой сигнал экспоненты (2) заграждается каноническим фильтром

$$e_i(k) = x(k) + b_{1,i} x(k - \nu) \quad (12)$$

с единственным коэффициентом

$$b_{1,i} = -e^{p_i \nu T_s},$$

где ν – коэффициент внутримодельной децимации отсчетов, изменяющий масштаб времени внутри окна фильтра [6].

Канонический фильтр цифрового сигнала колебательной составляющей (6)

$$e_i(k) = x(k) + b_{1,i} x(k - \nu) + b_{2,i} x(k - 2\nu) \quad (13)$$

имеет два коэффициента

$$b_{1,i} = -2e^{-\alpha_i \nu T_s} \cos \omega_i \nu T_s, \quad b_{2,i} = e^{-2\alpha_i \nu T_s}.$$

Цифровой сигнал компоненты критического режима свободного процесса (7) заграждается каноническим фильтром (13), но его коэффициенты будут вычисляться иначе:

$$b_{1,i} = -2e^{-\alpha_i \nu T_s}, \quad b_{2,i} = e^{-2\alpha_i \nu T_s}.$$

Следуя основной идее структурного анализа, выражение для общего фильтра, заграждающего все компоненты сигнала текущего режима (10), получим с учетом выражений для канонических фильтров (12) и (13):

$$e(k) = \sum_{m=0}^M a_m x(k - \nu m), \quad (14)$$

где a_m – коэффициенты фильтра. В идеальном случае, когда шум $w(k)$ в сигнале (11) отсутствует, порядок фильтра $M = M_s$, иначе $M > M_s$. Учитывая, что при полной идентичности модели $\hat{x}(k)$ сигналу $x(k)$ невязка

$$e(k) = a_0 x(k) - a_0 \hat{x}(k) = 0,$$



Солдатов

Александр Вячеславович

В 2006 г. окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА».



Иванов

Николай Геннадьевич

Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в 2013 г. на кафедре ТОЭ и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Руководитель группы разработки интеллектуальных электронных устройств департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».

из (14) получаем выражение для адаптивной структурной модели цифрового сигнала текущего режима (аварийного процесса)

$$a_0 \hat{x}(k) = - \sum_{m=1}^M a_m x(k - vm).$$

Эффективный фильтр и его составляющие

Связь между корнями p_i и z_i изображений непрерывного компонента (2) и его цифрового образа

$$\phi_i(k) = e^{p_i v T_s}$$

следует непосредственно из определения переменной Z -преобразования:

$$z = e^{p_i v T_s}.$$

Здесь учтено изменение масштаба времени внутри модели, в связи с чем дискретное время $t_k = kT_s$. Уравнение согласования характеристических параметров непрерывного сигнала с корнями изображения его цифрового образа будет следующим:

$$p_i v T = (\alpha_i + j\omega_i) v T = \ln z. \tag{15}$$

Передаточная функция фильтра (14)

$$H_M(z) = \sum_{m=0}^M a_m z^{-m}, \tag{16}$$

записанная с учетом замены

$$z = z^v,$$

имеет только нули. Поскольку фильтр (16) является заграждающим оператором и представляет собой каскад канонических фильтров заграждения компонентов сигнала, то структура сигнала будет распознана, если его передаточная функция $H_M(z)$ будет содержать нули, согласованные с корнями в изображении компонентов сигнала $x(k)$ или, что то же самое, с корнями канонических фильтров заграждения компонентов.

Поскольку сигнал (11) содержит шум $w(k)$, то порядок адаптивного фильтра M будет выше порядка сигнала текущего режима M_s , т.е. $M \geq M_s$. Поэтому среди нулей фильтра (16) будут присутствовать нули, неассоциированные с компонентами сигнала [7].

Наша задача заключается в определении правил отбора из избыточного множества корней фильтра тех, которые в той или иной мере согласованы с компонентами сигнала. Если по принятым правилам удастся упо-

рядочить нули настроенного на сигнал $x(k)$ фильтра (16) таким образом, чтобы первые M_c нулей были отнесены к нулям множества компонентов сигнала, то остальные $M - M_c$ нулей формально будут ассоциированы с шумом в цифровом сигнале (11). Тогда характеристический полином фильтра (16) можно разделить на два полинома

$$P_M(z) = P_{M_c}(z) P_{M-M_c}(z).$$

Первый из них –

$$P_{M_c}(z) = (z - z_1) \dots (z - z_{M_c})$$

в основном согласован с компонентами сигнала текущего режима и носит название полинома эффективного ядра [2].

Второй полином

$$P_{M_n}(z) = P_{M-M_c}(z) = a_0 (z - z_{M_c+1}) \dots (z - z_M)$$

не связан с компонентами сигнала и называется полиномом шума [2, 3].

Если эффективное ядро сформировано, то фильтр содержит всю информацию о структуре сигнала, и сигнал может быть распознан полностью. Хотя при этом общий порядок M начального фильтра (14) может быть различным, но важно лишь то, что он больше порядка M_s сигнала текущего режима (10). Поэтому у всех фильтров различных порядков, настроенных на заграждение всех слагаемых текущего режима (10), размер эффективного ядра M_c будет близок и не меньше порядка полезного сигнала, то есть $M_c \geq M_s$. Такая структурная модель называется эффективной [7], а размер его эффективного ядра M_c – эффективным порядком [2].

Управление размерностью модели (правила разделения корней)

Теоретически компоненты сигнала текущего режима согласованы с корнями полинома эффективного ядра. Однако шум, присутствующий в сигнале, изменяет свойства корней эффективного фильтра и добавляет к ним корни лишних составляющих, не ассоциированных с сигналом. Поэтому с целью ограничения неоправданного роста размерности компонентной модели сигнала, корни, учитываемые ею, должны отбираться с учетом особенностей электрической сети и источников распознаваемого сигнала. Часть правил были сформулированы в монографии [3]. В настоящей рабо-

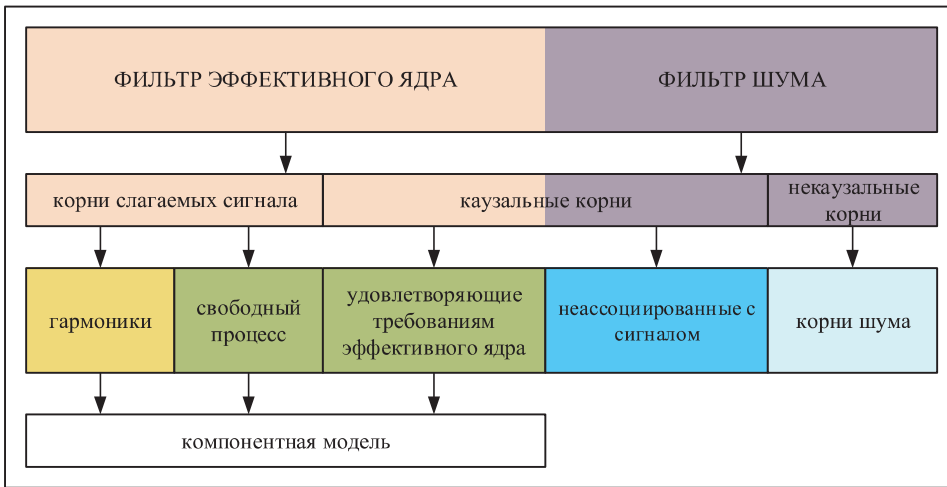


Рис. 1. Связь между эффективным фильтром и компонентной моделью. Нужное соответствие устанавливается корнями эффективного фильтра

те обобщаются известные критерии и создаются новые правила разделения множества корней эффективного фильтра на подмножества корней эффективного ядра, используемых непосредственно в компонентном анализе, и корней, не участвующих на следующих этапах структурного анализа [7].

Будем исходить из того положения, что компоненты сигнала физически обусловлены самим энергообъектом, в котором они действуют. Поэтому корни эффективного фильтра, согласованные с этими компонентами, характеризуют движение электрической

Таблица 1. Критерии разделения корней характеристического уравнения

Свойства корней	Природа корней	Правила разделения	Характеристика правил	Номер области
Корни слагаемых сигнала	Корни гармоник	$\begin{cases} \left \zeta_m - 1 \right < \xi \\ \Omega < \Omega_{\max} \end{cases}$	Область «притяжения» модуля корня $ \zeta_m \approx 1$	1
	Корни затухающих слагаемых сигнала (свободный процесс)	$\begin{cases} \zeta_{\min} < \zeta_m < 1 - \xi \\ \Omega < \Omega_{\max} \end{cases}$	Селекция корней составляющих по допустимым частоте и по коэффициенту затухания	2
Удовлетворяющие требованиям эффективного ядра				
Каузальные корни	Несо согласованные с сигналом	$(\zeta_m < \zeta_{\min}) \vee \begin{cases} \zeta_m < 1 \\ \Omega > \Omega_{\max} \end{cases}$	Селекция корней составляющих по частоте и затуханию, не существующих в свободном процессе электрической системы	3
	Некаузальные корни	Корни шума	$ \zeta_m > 1 + \xi$	Физически нереализуемые корни

системы на различных частотах. Именно с учетом этих свойств компонентов сигнала создаются правила отбора корней для компонентного анализа.

Весь свод правил, так или иначе формулирующий принципы управления моделью распознаваемого сигнала, приведен в табл. 1 и иллюстрируются рис. 1 и 2. Селекция и отнесение корней к той или иной области на комплексной плоскости осуществляется соответствующими правилами разделения. В дальнейшем для определенности правила будем нумеровать согласно номеру области.

Поясним основы, положенные

в принципы отбора корней.

Правила области 1. Корни, согласованные с гармониками, должны лежать на единичной окружности. Однако из-за вычислительных шумов и погрешности тракта АЦП в оценках корней компонентов принужденного режима может появиться смещение, и некоторые из оценок могут выйти за пределы единичного круга или, наоборот, могут оказаться внутри него.

Во избежание подобных ситуаций такие корни корректируются по модулю, предполагается, что они не выходят за пределы допустимой полосы отклонений оценок корней шириной 2ξ

$$\left| |\zeta_m| - 1 \right| < \xi, \quad m = \overline{1, M}. \quad (17)$$

Ширина полосы 2ξ должна обеспечивать устойчивую селекцию корней, ассоциированных с составляющими принужденного режима электрической системы, но представленных в адаптивной структурной модели корнями затухающих или возрастающих по амплитуде компонентов с малыми коэффициентами затухания. Ширина полосы 2ξ определяется граничным значением коэффициента затухания α_{\min} компоненты:

$$|\zeta_\xi| = e^{-\alpha_{\min} \nu T_s}. \quad (18)$$

Как правило, такой слагаемой является аperiодическая составляющая, коэффициент затухания которой может быть от 6,67 до $2,86 \text{ c}^{-1}$ при КЗ на шинах электри-

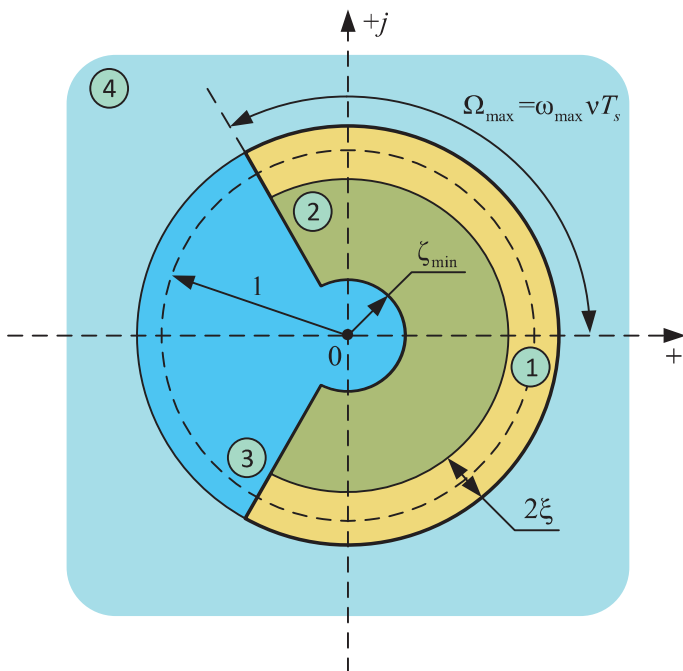


Рис. 2. Иллюстрация механизма декомпозиции структурной модели сигнала на эффективное ядро и фильтр шума на единичной окружности комплексной плоскости ζ : 1 – область «притяжения» модуля корней гармоник, 2 – корни слагаемых свободного движения электрической системы и подобных им компонентов, 3 – корни компонентов, не согласованных с реакцией электрической системы, 4 – физически нереализуемые корни (корни шума)

ческой станции, и от 50 до $12,5 c^{-1}$ – при КЗ на шинах ПС. При КЗ на ЛЭП коэффициент затухания еще больше. Поэтому минимальный коэффициент затухания должен быть принят равным $\alpha_{\min} = 2,86 c^{-1}$ [8]. Тогда из (17) и (18) следует, что порог

$$\xi = 1 - e^{-2,86vT_s} \quad (19)$$

Ограничиваясь линейной составляющей в разложении экспоненты в ряд, из (19) получаем простое равенство для выбора порога:

$$\xi = 2,86vT_s.$$

Порог ξ определяет ширину области «притяжения» корней, ассоциированных с гармониками или постоянной составляющей, к единичной окружности. Принимается, что смещение модулей $|\zeta_m|$ симметрично относительно единичной окружности.

Правила области 2. Шумы в сигнале приводят к появлению в модели высокочастотных составляющих, не согласованных с сигналом. Они могут быть ложно отнесены к высшим гармоникам или высокочастотным составляющим свободного процесса электрической сети. Для исключения таких составляющих из компонентной модели предлагается ограничить коэффициент затуха-

ния и частоту слагаемых верхними предельными значениями α_{\max} и ω_{\max} соответственно. На комплексной плоскости ζ (рис. 1) предельной частоте сигнала соответствует угловая длина дуги

$$\Omega_{\max} = \omega_{\max} v T_s,$$

а предельному коэффициенту затухания – минимальное значение модуля корня

$$\zeta_{\min} = |\zeta_{\min}| = e^{-\alpha_{\max} v T_s}.$$

Однако селекция корней компонентов сигнала по допустимым частоте Ω_{\max} и модулю корней ζ_{\min} не исключает включения в компонентную модель составляющих, не существующих в сигнале, но удовлетворяющих требованиям эффективного ядра. Просочившиеся таким образом лишние составляющие будут удалены на этапе настройки компонентной модели по критерию незначительности их амплитуд [3].

Правила области 3. В этой области находятся физически реализуемые корни составляющих, не учитываемых в компонентной модели из-за их информационной незначительности. Границы области задаются правилами, сформулированными в таблице 1.

Правила области 4. Область содержит физически нереализуемые корни адаптивной модели, относящиеся к фильтру шума. Ее границы очерчены с учетом полосы корректировки (17) для корней гармонических составляющих.

Пример управления размерностью модели сигнала

Продемонстрируем применение правил управления размерностью модели на примере декомпозиции структурной модели и построения компонентной модели сигнала аварийного процесса. Отсчеты сигнала взяты из работы [3].

Порядок полезного сигнала $M_s = 5$ (сигнал содержит первую и третью гармоники и аperiodическую составляющую). Порядок адаптивной структурной модели ($M = 19$) намеренно взят намного больше порядка полезного сигнала с целью иллюстрации применения правил управления размерностью модели. В правиле области 1 при селекции корней гармоник ширина полосы 2ξ принята равной 0,004 (минимальный коэффициент затухания $\alpha_{\min} = 2,4 c^{-1}$ для расчета порога ξ), а предельная относительная частота компонентов сигнала $\Omega_{\max} = 0,5\pi$ (предельная частота компонентов в сигнале $f_{\max} = 300$ Гц). Уставка ζ_{\min} , исключающая быстро затухающие колебания в правиле области 2, принята с учетом предельного коэффициента затухания $\alpha_{\max} T_s = 0,06$. Правила областей 3 и 4 формулируются в терминах областей 1 и 2.

При настройке адаптивного фильтра и декомпозиции его, уже настроенного на сигнал, применялась интерактивная среда адаптивного структурного анализа,

описанная в [3]. Необходимые параметры интерактивной среды приведены в табл. 2. Характеристики использованного метода настройки начального адаптивного фильтра рассматриваются в работе [9].

Таблица 2. Параметры блока структурной модели

Параметр	Значение
Интервал дискретизации, T_s	1/1200с
Длина настройки сигнала, L	39
Порядок структурной модели, M	19
Коэффициент внутримодельной децимации, ν	1
Метод настройки структурной модели	TLS-решение с минимальной нормой (Total Least Squares Method– общий метод наименьших квадратов)

Характеристики адаптивной структурной модели представлены в табл. 3. Оценки частоты и коэффициенты затухания составляющих распознаваемого сигнала определены по уравнению согласования корней (15). Отнесение корней к той или иной области выполнено по правилам табл. 1. Характеристика компонента, оказав-

шая решающее влияние на выбор области, выделена в табл. 3 цветом, совпадающим с цветом области на рис. 2.

Первые четыре корня были отнесены правилами к области 1. Они согласованы с основной и третьей гармониками, при этом их модули скорректированы согласно критерию (17). Можно было бы предположить, что корни с номерами 6 – 9 адаптивного фильтра ассоциированы с гармониками частот около 212 и 250 Гц, но из-за значительных коэффициентов затухания (285,7 и 238,1 c^{-1}) они были отнесены правилами к области 3. Остальные затухающие колебания компонентной модели правилами также определены как несогласованные с сигналом из-за их высокой частоты и отнесены к области 3. Среди корней адаптивной структурной модели физически нереализуемые корни не обнаружались (кроме 3-го и 4-го корней, скорректированных до корней 3-й гармоники).

Таким образом, правила управления размерностью модели определили порядок сигнала с учетом только первых пяти корней:

$$P_{M_c}(\underline{\zeta}) = 1 - 4,285\underline{\zeta}^{-1} + 7,876\underline{\zeta}^{-2} - 7,794\underline{\zeta}^{-3} + 4,146\underline{\zeta}^{-4} - 0,9406\underline{\zeta}^{-5},$$

Таблица 3. Декомпозиция адаптивной структурной модели

№	Корень адаптивной модели $\underline{\zeta}_i$	Модуль корня $ \underline{\zeta}_i $	Относительная частота $\Omega = \omega T_s$, эл.град.	Оценка частоты \hat{f}_i , Гц	Коэф. затухания $\hat{\alpha}_i, c^{-1}$	Область
1	0,9654 ± j0,26	0,9998	±15,1	50,24	0,02	1
2						
3						
4						
5	0,9406	0,9406	0	0	73,5	2
6	0,3511 ± j0,7074	0,7898	±61,6	212,02	285,7	3
7						
8						
9	0,2107 ± j0,7927	0,8202	±75,1	250,38	238,1	
10	-0,0754 ± j0,8393	0,8202	±95,1	317,11	204,1	3
11						
12	-0,3432 ± j0,7703	0,8433	±114,0	380,04	204,1	3
13						
14						
15	-0,5765 ± j0,6171	0,8445	±133,1	443,51	204,1	
16	-0,7414 ± j0,3982	0,8419	±151,8	505,91	208,3	3
17						
18	-0,8300 ± j0,1347	0,8409	±170,8	569,28	208,8	3
19						

выделяя его из полинома общей адаптивной структурной модели

$$P_{M-M_c}(\zeta) = 1 - 0,2772\zeta^{-1} - 0,1462\zeta^{-2} - 0,0535\zeta^{-3} - 0,0241\zeta^{-4} - 0,0631\zeta^{-5} - 0,1229\zeta^{-6} - 0,1377\zeta^{-7} - 0,0854\zeta^{-8} + 0,03693\zeta^{-9} + 0,1588\zeta^{-10} + 0,2444\zeta^{-11} + 0,2372\zeta^{-12} + 0,1401\zeta^{-13} + 0,0011\zeta^{-14} - 0,1082\zeta^{-15} - 0,1492\zeta^{-16} - 0,1222\zeta^{-17} - 0,0769\zeta^{-18} - 0,0714\zeta^{-19}.$$

Как видно, сформулированные правила управления размерностью модели позволили уменьшить порядок модели от 19 до 5.

Выводы

1. Интеллектуальные устройства РЗ, управления и мониторинга, функционирующие в информационной среде ЦПС, получают сигналы в виде SV-потока, в связи с чем методы обработки сигналов не могут влиять на характеристики преобразования измеряемых токов и напряжений электрической системы. Поэтому эффективность методов структурного анализа полностью определяется свойствами структурных моделей.

2. Структура сигнала свободного движения электрической системы определяется базисом собственных мод электрической системы, в то время как структура сигнала принужденного режима детерминирована источниками энергосистемы. Тем не менее, для структурного анализа удобно рассматривать составляющие принужденного режима как часть собственных мод электрической системы.

3. Рассматривая первоначальный адаптивный фильтр как заграждающий оператор сигнала, состоящий из каскада канонических фильтров заграждения собственных мод электрической системы, можно оценить характеристические параметры компонентов сигнала текущего режима по нулям канонических фильтров.

4. С целью управления размерностью модели сигнала с шумом, необходимо выделить множество корней эффективного ядра – множества компонентов сигнала, используя правила разделения корней. Принципы, положенные в основу правил разделения, должны учитывать особенности источника сигнала и специфику целей распознавания самого сигнала. В общем случае можно сформулировать 4 правила, разделяющих корни настроенного фильтра на корни гармоник, корни составляющих свободного процесса, корни составляющих с невысокой информационной ценностью и корни шума. Приведенный в статье пример показывает эффективность изложенных принципов управления

размерностью моделей – в примере удалось снизить порядок модели с 19 до 5.

Литература

1. Воробьев Е.С. Функциональная совместимость устройств РЗА мультивендорных цифровых подстанций / Е.С. Воробьев и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №2. – С. 42–45.
2. Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г. Фундаментальные свойства эффективных структурных моделей тока короткого замыкания электрической сети // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 3. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ». – 2014. – С.18–29.
3. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике // Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018.
4. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.Н. Кудряшова и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №2. – С. 18–28.
5. Антонов В.И., Наумов В.А., Фомин А.И., Солдатов А.В. Адаптивный структурный анализ входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики. // Электротехника. – 2015. – № 7. – С. 28–35.
6. Антонов В.И., Наумов В.А., Фомин А.И. Солдатов В.А. Обработка сигнала с высокой частотой дискретизации в цифровой релейной защите и автоматике. // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 2. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2013. С.12–21.
7. Антонов В.И. Эффективные структурные модели входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.И. Фомин // Электротехника. – 2012. – №11. – С. 2–8.
8. Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г. Особенности структурного анализа тока сетей 110 – 750 кВ // Материалы 9-й Всерос. НТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». Чебоксары. Изд-во Чуваш. ун-та. – 2014. – С. 240–242.
9. Антонов В.И. Характеристики методов настройки адаптивных структурных моделей аварийных сигналов электрической сети / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – №1. – С.23–30. 