

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIV Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2021

Чебоксары
2021

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

Д44

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

Воробьев Е.С., Антонов В.И., Иванов Н.Г.,
Наумов В.А., Солдатов А.В.
(Чебоксары, ЧГУ, ООО НПП «ЭКРА»)

ОСНОВЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В информационной среде цифровой подстанции сигналы токов и напряжений существуют в виде данных SV -потока [1], свойства которого не могут быть предопределены алгоритмами цифровой обработки устройств релейной защиты. В связи с этим характеристики методов распознавания структуры цифрового сигнала обуславливаются только субстантивными свойствами структурных моделей и методов управления их размерностью [2].

Известно [3, 4], что одним из фундаментальных свойств, определяющих характеристики классической структурной модели, является кардинальная зависимость ее распознающей способности от потенциала фильтра шума. В то же время, фильтр шума для классической адаптивной структурной модели является лишь формальным понятием и как отдельный функциональный блок структурной модели может быть выделен лишь после полной настройки модели. Значит, классическая структурная модель, концентрируя в своем характеристическом полиноме всю информацию о характеристических параметрах сигнала, не имеет возможности представлять структуру сигнала в виде моделей с распределенными частями. Это ограничивает потенциал классической структурной модели, уменьшая ее быстродействие.

Совсем недавно обнаружилось [5], что дальнейшее совершенствование методов распознавания структуры сигнала связано с применением структурных моделей с распределенными частями. Именно этой теме посвящен настоящий доклад. В нем рассматриваются основы нового метода многоканального адаптивного структурного анализа, использующего распределенные структурные модели электрического сигнала.

Структурный анализ электрического сигнала предполагает представление сигнала суммой его компонентов [6]. Фильтр, заграждающий компонент сигнала, называется каноническим.

Так, аperiodическая составляющая

$$x(k) = e^{-aT_s k}$$

будет заграждена каноническим фильтром

$$e(k) = x(k) + a_1 x(k - 1), \quad a_1 = -e^{-aT_s}, \quad (1)$$

а затухающее колебание

$$x(k) = e^{-aT_s k} \sin(\omega T_s k + y) -$$

каноническим фильтром

$$e(k) = x(k) + a_1 x(k - 1) + a_2 x(k - 2), \\ a_1 = -2e^{-aT_s} \cos(\omega T_s), \quad a_2 = e^{-2aT_s}, \quad (2)$$

где T_s – период дискретизации, k – номер отсчета.

Следовательно, теоретически структурная модель представляет собой каскад фильтров, заграждающих компоненты сигнала [5, 6].

Классическая структурная модель представляет собой настроенный на заграждение сигнала адаптивный фильтр, часть характеристических корней которого согласована с компонентами сигнала. Другая часть его корней не ассоциирована с сигналом, но может содержать корни, которые в принципе не могут быть отделены от корней сигнала [2]. Вместе они образуют множество корней эффективного ядра модели [7]. Остальная часть корней, несогласованных с сигналом, образует фильтр шума. Поэтому настроенная на сигнал классическая структурная модель – эффективная структурная модель [5] – может быть представлена фильтром эффективного ядра и фильтром шума (рис. 1). В свою очередь фильтр эффективного ядра будет состоять из каскада канонических фильтров, определенных корнями, отнесенных к множеству корней сигнала (рис. 2).

Разделение классической структурной модели на фильтр эффективного ядра и фильтр шума условное, хотя оно и выполняется по вполне обоснованным правилам [2]. Такое представление модели важно чисто методически для формирования компонентной модели сигнала и объяснения фундаментальных свойств адаптивных структурных моделей [4]. К сожалению, классическая модель не может воспользоваться преимуществами такого разделения, поскольку его настройка ведется с учетом всех коэффициентов даже в случае, если модель представлена каскадом отдельных фильтров.

Именно это обстоятельство ограничивает предельное быстродействие классической адаптивной структурной модели.

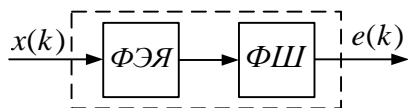


Рис. 1. Классическая адаптивная структурная модель

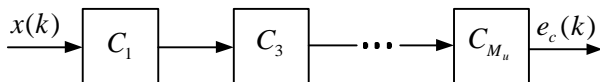


Рис. 2. Структура фильтра эффективного ядра: C_i – канонический фильтр i -го компонента, M_u – число компонентов

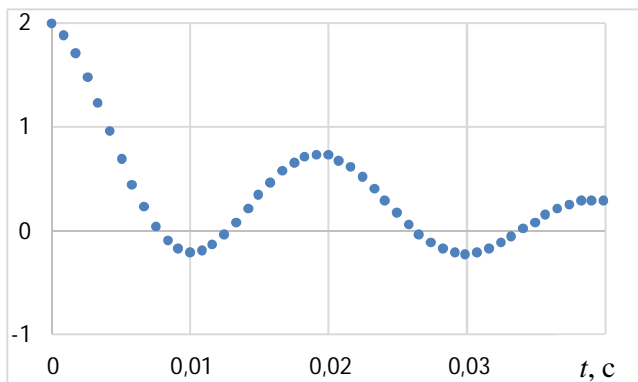
Составная модель слагаемой формируется как фильтр, создаваемый из множества корней структурной модели сигнала после исключения корня распознаваемой слагаемой [4]. Составной фильтр будет заграждать все компоненты сигнала, кроме компонента, корень которого отсутствует в его характеристическом полиноме. Поэтому сигнал на выходе составного фильтра будет пропорционален распознаваемой слагаемой.

В общем случае составной фильтр представляет собой каскад канонических фильтров компонентов сигнала (за исключением канонического фильтра распознаваемого компонента) и фильтра шума. Составной фильтр компонента удобен как инструмент оценки возможностей адаптивного фильтра при распознавании компонента и, кроме того, характеризует влияние канонических фильтров остальных компонентов и фильтра шума на данный компонент.

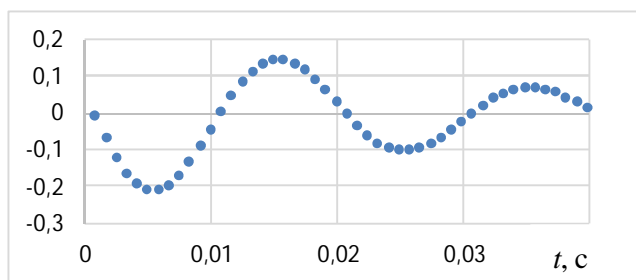
Рис. 3 иллюстрирует работу составных фильтров модели, образованной в виде каскада фильтров (1) и (2) для сигнала

$$x(k) = e^{-0,06k} + e^{-0,03k} \cos \frac{\pi}{12} k \frac{\ddot{\circ}}{\circ}$$

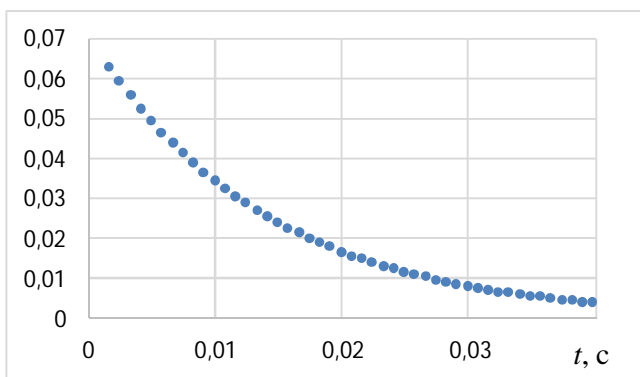
Реакция составных фильтров ярко иллюстрирует конкуренцию канонических фильтров (1) и (2): каждый из них существенно ослабляет компонент, заграждаемый другим.



a



б



в

Рис. 3. Выделение затухающего колебания (*б*) и аperiodической составляющей (*в*), составными фильтрами, полученными из модели в виде каскада фильтров (1) и (2) исходного сигнала (*a*)

Фильтр остаточного сигнала – фильтр, который настраивается на выходной сигнал каскада канонических фильтров. Интересно, что чем точнее настраивается канонический фильтр на заграждение своего компонента, тем лучшие условия создаются для настройки фильтра остаточного сигнала на компоненты, не предусмотренные в каскаде канонических фильтров. Верно и обратное утверждение, поскольку в этом случае фильтр остаточного сигнала ведет себя по отношению к каноническим фильтрам как составной фильтр, избирательно усиливая их компоненты.

Это свойство элементов многоканального адаптивного фильтра создает эффект положительной обратной связи, благодаря которому растет сходимость процедуры настройки отдельных частей распределенной структуры адаптивного фильтра. Как правило, число итераций σ не превышает 5.

Уникальность фильтра остаточного сигнала заключается еще и в том, что он берет на себя задачу заграждения компонентов, оставшихся свободными после работы канонических фильтров, и формирует в своей структуре фильтр шума, создавая тем самым прочную основу для распознавания всей структуры сигнала.

Многоканальный адаптивный фильтр (рис. 4) представляет собой совокупность каналов, предназначенных для настройки канонических фильтров компонентов C_i , и канала настройки фильтра остаточного сигнала F_n [5]. Число канонических фильтров в многоканальной системе задается исходя из априорной информации о структуре сигнала или следуя требованию о необходимости определения компонента непосредственно – без анализа корней характеристического уравнения адаптивного фильтра. Каждый канал имеет свой решатель, формирующий на текущем этапе σ либо оценку коэффициентов \mathbf{a}_i^σ канонического фильтра C_i , либо \mathbf{a}_n^σ фильтра остаточного сигнала F_n . Методы, используемые решателем для настройки фильтров, могут быть различными [5].

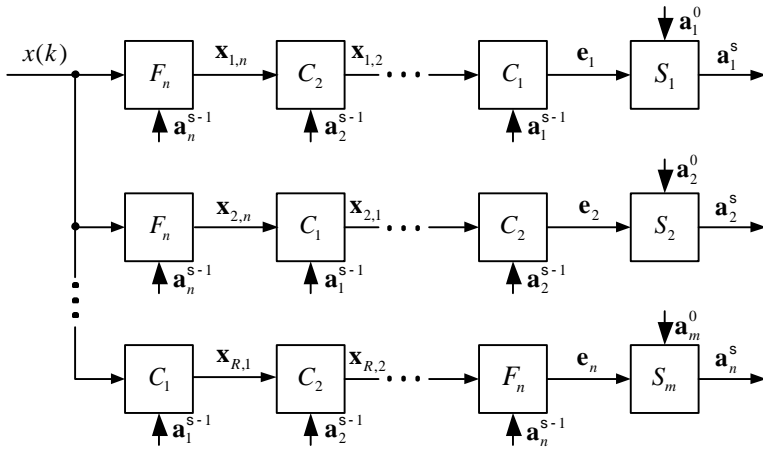


Рис. 4. Структура многоканального адаптивного фильтра

Важным преимуществом многоканального адаптивного фильтра является уменьшение общего порядка модели благодаря исключению внутренней конкуренции канонических фильтров компонентов за счет использования распределенной структуры адаптивного фильтра. Причём эту возможность фильтр приобретает именно из-за многоканальности и итеративности процедуры настройки фильтра. Каждая итерация усиливает роль фильтра остаточного сигнала, который в многоканальном фильтре, по сути, играет роль составной модели компонентов, распознаваемых предшествующими ему каноническими фильтрами. Поэтому все свойства составной модели слагаемой присущи и фильтру остаточного сигнала.

Выводы. Многоканальный адаптивный фильтр, заключая в себе каналы настройки канонических фильтров и фильтра остаточного сигнала, формирует распределенную систему распознавания структуры сигнала. Совершенство создаваемой им структурной модели обеспечивается возникновением положительной обратной связи между различными частями многоканальной системы, благодаря чему компоненты, распознаваемые каноническими фильтрами, не участвуют в конкурентной среде распознавания неизвестных компонентов фильтром остаточного сигнала.

нала. Именно это свойство многоканального адаптивного фильтра создает благоприятные условия для распознавания структуры сигнала на малом числе отсчетов фильтром невысокого порядка, повышая быстродействие релейной защиты, использующей распределенные структурные модели.

Литература

1. Функциональная совместимость устройств РЗА мультивендорных цифровых подстанций / Е. С. Воробьев [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 4(37). С. 42–45.

2. Принципы управления размерностью структурных моделей электрических сигналов интеллектуальной энергетики / Е. С. Воробьев [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 1(42). С. 30–37.

3. Фундаментальные свойства эффективных структурных моделей тока короткого замыкания электрической сети / В. И. Антонов [и др.] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Чебоксары: Рекламно-издательский центр «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управления в электроэнергетике», 2014. С. 18–29.

4. Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018.

5. Многоканальный структурный анализ / Е. С. Воробьев [и др.] // РЕЛАВЭКСПО-2021: сб. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 114–120.

6. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В. И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 2(35). С. 18–27.

7. Антонов В. И., Наумов В. А., Фомин А. И. Эффективные структурные модели входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики // Электричество. 2012. № 11. С. 2–8.

Научное издание

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции

Материалы публикуются в авторской редакции.

*Ответственность за достоверность цитат, имён, названий
и иных сведений, а также за соблюдение законов
об интеллектуальной собственности
несут авторы представленных статей*

Отв. за выпуск *А.В. Серебрянников*

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 28.05.2021. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 31,15. Уч.-изд. л. 30,88. Тираж 300 экз. Заказ № 604

Отпечатано в соответствии с представленным оригинал-матетом
в типографии Чувашского государственного университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15