

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

**Материалы
X Всероссийской научно-технической
конференции**

ИТЭЭ–2016

*ЧЕБОКСАРЫ
2016*

УДК 621.3:681.518(043.2)

И74

Редакционная коллегия:

ректор А.Ю. Александров,
д-р техн. наук, профессор Г.А. Белов,
канд. техн. наук, доцент Н.М. Лазарева

*Печатается по решению Ученого совета
Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова*

Информационные технологии в электротехнике и электро-
И74 энергетике: материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф.
Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. 352 с.

ISBN 978-5-7677-2261-7

Обсуждаются вопросы информатизации в электротехнике и электроэнергетике, построения систем управления электротехническими объектами, проблемы математического моделирования процессов в электротехнических системах, цифровой обработки сигналов электротехники и радиоэлектроники, применения информационных технологий в высшем электротехническом и электроэнергетическом образовании.

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

ISBN 978-5-7677-2261-7

УДК 621.3:681.518(043.2)

© Издательство

Чувашского университета, 2016

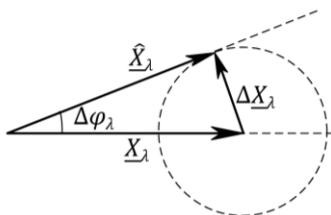


Рис. 2. Механизм возникновения максимальной фазовой погрешности оценки симметричных составляющих

ляется действующими значениями фазных величин и характеристиками точности тракта измерения.

2. Фазовая погрешность фильтра симметричных составляющих определяется отношением суммы действующих значений фазных величин к действующему значению выделяемой симметричной составляющей.

Литература

1. Charles L. Fortescue. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks // AIEE Transactions. Vol. 37. – P. II. – PP. 1027–1140.

2. IEEE C37.118.1-2011. IEEE Standart for Synchrophasor Measurements for Power Systems.

В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов,
А.В. Солдатов, А.А. Ильин, Д.А. Митин
(Чебоксары, ЧГУ,
ООО НПП «ЭКРА»)

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ В СРЕДЕ SIMULINK

Использование основной гармоники входных сигналов как носителя информации о состоянии электроэнергетической системы ограничивает функциональные возможности систем релейной защиты и автоматики (РЗА). Одним из путей дальнейшего совершенствования технических характеристик РЗА является более полное использование информации, заключенной в структуре сигнала и в его отдельных составляющих [1, 2]. Для распознавания структуры сигнала используется адаптивный структурный анализ.

Адаптивный структурный анализ – это идентификация структуры сигнала на множестве собственных мод реакции электрической системы. Основными операциями, выполняемыми при структурном анализе, являются [3]:

- 1) построение структурной модели на выделенном отрезке сигнала;
- 2) разделение структурной модели сигнала на эффективное ядро и ядро шума;
- 3) построение компонентной модели на выделенном отрезке сигнала;
- 4) формирование слагаемой сигнала.

С целью получения гибкого инструмента структурного анализа в среде Simulink была разработана специализированная библиотека. Разработка выполнялась совместными усилиями проблемной лаборатории «Искусственный интеллект в электротехнике и электроэнергетике» кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ и НПП ЭКРА. В данной статье описаны принципы работы и взаимодействия блоков этой библиотеки.

Блок построения структурной модели сигнала

Структурная модель цифрового сигнала $x(k)$ формируется как сумма взвешенных предыдущих отсчетов

$$a_0 x(k) = - \sum_{m=0}^M a_m x(k - mv), \quad k \geq Mv, \quad (2)$$

где a_m – искомые веса (коэффициенты) модели; M – порядок модели; v – коэффициент внутримодельной децимации (разрежения) отсчетов; k – номер отсчета. Коэффициент a_0 может быть произвольным. Меру близости модели к отсчету устанавливает невязка

$$e(k) = a_0 x(k) - a_0 x(k) = \sum_{m=0}^M a_m x(k - mv). \quad (3)$$

Искомые коэффициенты a_m определяются путем решения задачи МНК

$$\min_{a_m} \sum_{i=0}^{M+R-1} e^2(k-i) \quad (4)$$

на заданном отрезке сигнала размером $M(\nu+1)+R$, где R – избыточность уравнений. Для решения задачи (4) обычно применяется метод сингулярного разложения матрицы плана или метод наложения моделей [4].

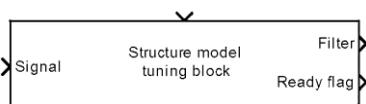


Рис. 1. Внешний вид блока построения структурной модели сигнала

Внутри блока формируются коэффициенты a_m фильтра (3) и синхронизирующий импульс завершения анализа.

В блоке предусмотрено задание следующих настроек:

- порядок модели M ;
- длина анализируемого отрезка сигнала $M(\nu+1)+R$ или избыточность уравнений R ;
- коэффициент внутримодельной децимации отсчетов ν ;
- метод решения задачи МНК: метод наложения моделей или метод сингулярного разложения матрицы плана и настройки выбранного метода.

Блок разделения структурной модели сигнала на эффективное ядро и ядро шума

Шум во входном сигнале ухудшает условия настройки модели (2), поэтому порядок модели M выбирают заведомо большим порядка сигнала M_s . Тогда полученная структурная модель (2) сигнала будет состоять из двух составляющих: фильтра, согласованного со слагаемыми во входном сигнале (фильтра эффективного ядра), и фильтра, направленного на преодоление шума в сигнале (фильтра шума).

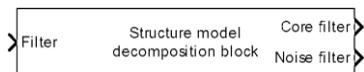


Рис. 2. Внешний вид блока разделения структурной модели сигнала на эффективное ядро и ядро шума

На вход блока построения структурной модели (рис. 1) подводится анализируемый сигнал. Выбор начала анализируемого отрезка сигнала выполняется при помощи синхронизирующего импульса. На выходе блока формируются

Шумы в сигналах проявляют себя как быстрозатухающие слагаемые, либо слагаемые с частотами, нехарактерными для наблюдаемой электрической се-

ти, либо как физически нереализуемые слагаемые. Поэтому в блоке разделения структурной модели (рис. 2) все слагаемые, удовлетворяющие условию

$$\begin{cases} A_{\min} \leq \alpha_l \nu T_s \leq A_{\max}, \\ \omega_l T_s \leq \Omega_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

включаются в фильтр эффективного ядра, а слагаемые, не удовлетворяющие этому условию, – в фильтр шума. Величины α_l и ω_l в (5) – коэффициент затухания и частота l -й слагаемой соответственно; A_{\min} , A_{\max} и Ω_{\max} задаются в настройках блока.

Блок построения компонентной модели сигнала

Компоненты настроенной на сигнал модели (2) определяются нулями фильтра (3), т.е. его характеристическим уравнением

$$P(\underline{z}) = a_0 (\underline{z} - \underline{z}_1) \dots (\underline{z} - \underline{z}_M) = 0. \quad (6)$$

Каждой паре комплексно-сопряженных корней \underline{z}_l и $\underline{z}_{l+1} = \underline{z}_l^*$ полинома (6) соответствует элементарный сигнал второго порядка – затухающая гармоническая слагаемая

$$x(k) = A_l e^{k\alpha_l \nu T_s} \cos(k\omega_l \nu T_s + \psi_l), \quad (7)$$

где A_l и ψ_l – амплитуда и начальная фаза слагаемой. Значения α_l и ω_l могут быть найдены по корням

$$(\alpha_l \pm j\omega_l) \nu T_s = \ln \underline{z}_l. \quad (8)$$

Паре кратных действительных корней соответствует сигнал критического режима системы второго порядка

$$x(k) = e^{k\alpha_l \nu T_s} (A_{l,1} k T_s + A_{l,0}), \quad (9)$$

где $A_{l,0}$ и $A_{l,1}$ – амплитуды слагаемых критического режима.

Коэффициент затухания α_l определяется из (8).

Действительный корень \underline{z}_l полинома (6) соответствует элементарному сигналу первого порядка – аperiodической слагаемой

$$x(k) = A_l e^{k\alpha_l \nu T_s}. \quad (10)$$

Коэффициент затухания α_l также определяется из (8).

После формирования эффективного ядра структурной модели настраивается компонентная модель сигнала

$$\begin{aligned}
 x(k) = & \sum_{l=1}^{N_p} e^{k\alpha_l \nu T_s} (C_l \cos k\omega_l \nu T_s - S_l \sin k\omega_l \nu T_s) + \\
 & + \sum_{l=N_p+1}^{N_p+N_c} e^{k\alpha_l \nu T_s} (A_{l,1} k T_s + A_{l,0}) + \sum_{l=N_p+N_c+1}^{M_s} A_l e^{k\alpha_l \nu T_s},
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

где $C_l = A_l \cos \psi_l$; $S_l = A_l \sin \psi_l$; N_p – число периодических слагаемых в эффективном ядре структурной модели; N_c – число пар слагаемых критического режима. Критерием близости модели (11) сигналу является невязка

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k). \tag{12}$$

Искомые параметры компонентной модели C_l , S_l , A_l , $A_{l,0}$ и $A_{l,1}$ определяются путем решения задачи МНК:

$$\min_{C_l, S_l, A_l, A_{l,0}, A_{l,1}} \sum_{i=0}^{M(v+1)+R} e^2(k-i). \tag{13}$$

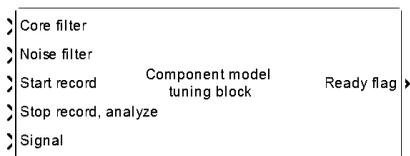


Рис. 3. Внешний вид блока построения компонентной модели сигнала

На вход блока построения компонентной модели (рис. 3) подводится анализируемый сигнал, коэффициенты фильтров эффективного ядра и шума. Выбор отрезка сигнала, на котором строится компонентная модель, выполняется при помощи синхронизирующих импульсов. Сформированная в блоке компонентная модель выводится на дисплей в табличном и/или графическом виде.

С целью повышения компактности полученной компонентной модели (11) из нее исключаются слагаемые, чьи амплитуды по отношению к амплитуде максимальной слагаемой ниже заданного порога R_{\max} .

Блок выделения слагаемой из сигнала

При структурном анализе часто возникает необходимость выделить или исключить из сигнала какую-либо слагаемую (например, при лестничной декомпозиции [5]). Эта задача решается в блоке выделения слагаемой (рис. 4).

На вход блока подводятся анализируемый сигнал, коэффициенты его структурной модели и управляющие импульсы начала и окончания анализируемого отрезка сигнала. Выбор выделяемой слагаемой из структурной модели осуществляется путем задания в настройках порядковых номеров корней характеристического полинома (6), соответствующих выделяемой слагаемой.

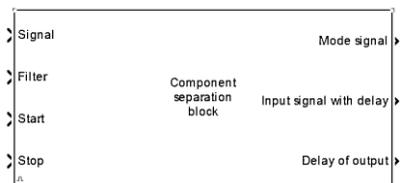


Рис. 4. Внешний вид блока выделения слагаемой

На первом этапе работы блока в память записываются отсчеты сигнала, полученного путем пропускания входного сигнала через составной фильтр выбранной слагаемой, и выполняется оценка комплексной амплитуды слагаемой. Затем из полученной комплексной амплитуды сигнала на выходе блока генерируются отсчеты слагаемой.

Выделенная слагаемая будет иметь временной сдвиг из-за необходимости записи сигнала и настройки компонентной модели. Поэтому, чтобы обеспечить возможность сопоставления исходного сигнала и компоненты в блоке предусмотрен вывод величины временного сдвига и исходного сигнала с этим временным сдвигом.

Пример взаимодействия блоков

Модель, использованная для структурного анализа осциллограммы тока короткого замыкания, приведена на рис. 5. Кривая тока – на рис. 6.

Для анализа использовались следующие настройки блоков:

- длина отрезка сигнала $M(\nu + 1) + R = 35$;
- порядок структурной модели $M = 18$;
- коэффициент внутримодельной децимации $\nu = 1$;
- метод настройки структурной модели – метод наложения моделей;
- $A_{\min} = -0,2$; $A_{\max} = 0,01$;
- $\Omega_{\max} = \pi$;
- $R_{\max} = 0,01$.

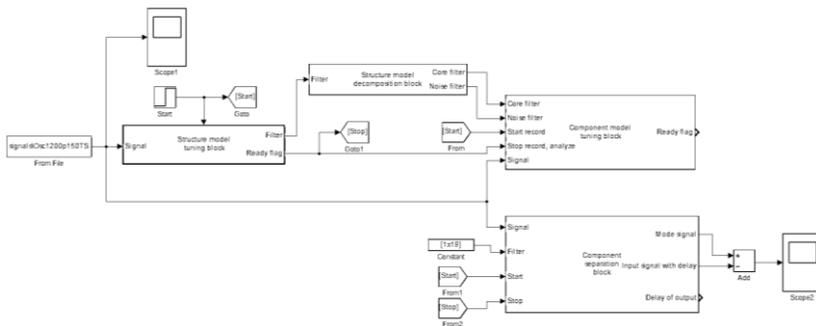


Рис. 5. Пример использования библиотеки структурного анализа в среде Simulink

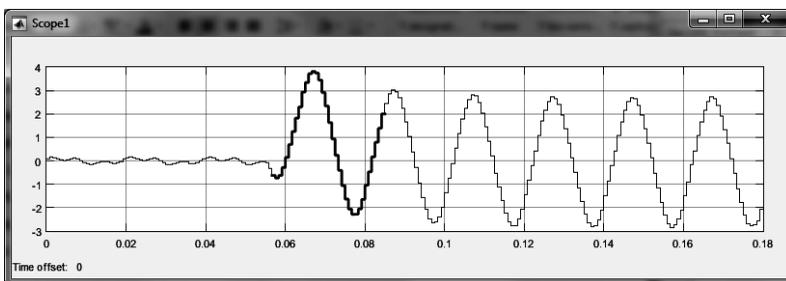


Рис. 6. Анализируемый сигнал. Выделен отрезок сигнала, на котором выполнялся структурный анализ

В результате настройки на выходе блока построения структурной модели сигнала был получен следующий фильтр:

$$e(k) = x(k-2) - 0,7573x(k-3) - 0,1454x(k-6) + \\ + 0,8785x(k-14) - 0,5478x(k-15) - 0,0777x(k-16) - \\ - 0,0260x(k-17) - 0,1436x(k-18).$$

Затем этот фильтр был разделен на фильтр эффективного ядра $e(k) = 0,0608x(k) - 0,2945x(k-1) + 0,6845x(k-2) - x(k-3) + 0,9939x(k-4) - 0,6714x(k-5) + 0,2842x(k-6) - 0,0573x(k-7)$ и фильтр шума

$$e(k) = 0,0848x(k) + 0,3460x(k-1) + 0,7228x(k-2) + \\ + x(k-3) + 0,9978x(k-4) + 0,7426x(k-5) + 0,4210x(k-6) + \\ + 0,1886x(k-7) + 0,0676x(k-8) + 0,0131x(k-9).$$

Далее при помощи блока построения компонентной модели была получена компонентная модель входного сигнала (рис. 7 и 8), а при помощи блока выделения слагаемой из входного сигнала была исключена аperiodическая слагаемая (рис. 9).

Компонентный состав сигнала:

№	Частота, Гц	Постоянная времени, с	Амплитуда	Фаза, град
1	0.000	-0.014	2.147	0.00
2	50.173	Inf	2.725	263.78
3	148.696	Inf	0.085	254.75

Рис. 7. Табличное представление компонентной модели

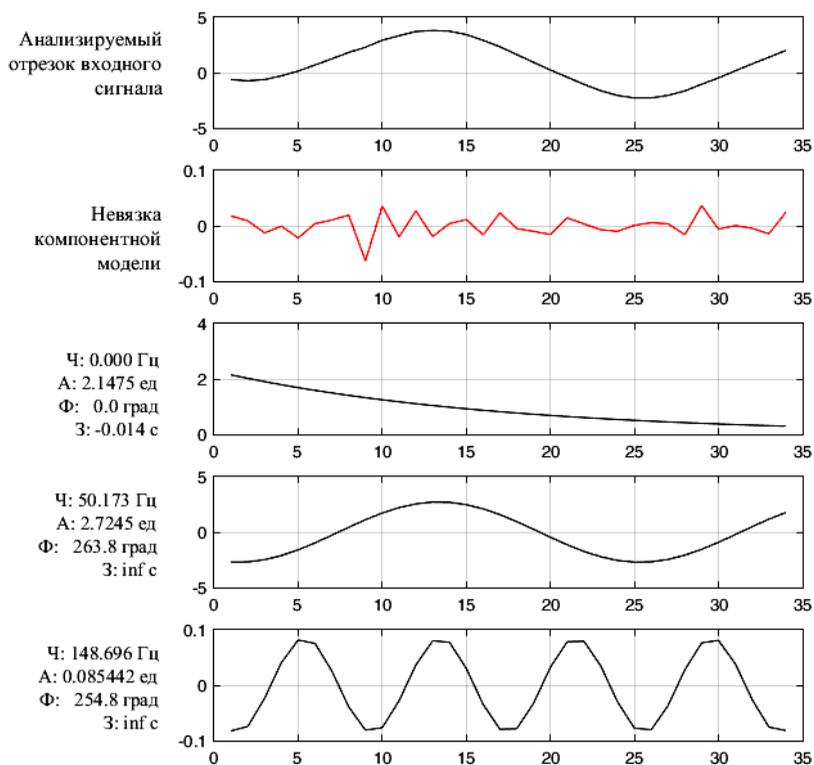


Рис. 8. Графическое представление компонентной модели

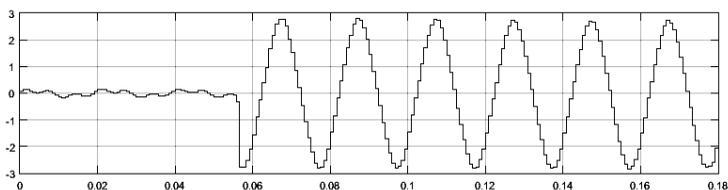


Рис. 9. Исходный сигнал после исключения аperiodической слагаемой

Порядок полученной компонентной модели ниже порядка эффективного ядра на 2, поскольку одна из периодических слагаемых была исключена из компонентной модели из-за малости амплитуды.

Таким образом, использование средств визуального программирования позволило реализовать мощную и гибкую графическую среду структурного анализа сигналов. Разработанная среда не требует от пользователя высоких способностей в области программирования.

Литература

1. Антонов В.И. Структурный анализ входных сигналов цифровых систем релейной защиты и противоаварийной автоматики / В.И. Антонов // Электротехника. – 1995. – № 6.

2. Антонов В.И. Адаптивные структурные модели входных сигналов релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, А.А. Ильин, Н.М. Лазарева // Электротехника. – 2012. – № 1.

3. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.И. Фомин, А.В. Солдатов // Электротехника. – 2015. – № 7.

4. Антонов В.И. Эффективные структурные модели входных сигналов релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.И. Фомин // Электричество. – 2012. – № 11.

5. Антонов В.И. Лестничная декомпозиция сигналов – эффективный метод структурного анализа входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.А. Ильин, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докладов 5-й Междунар. науч.-техн. конф. 2015.