

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОШИБОК САМОНАСТРОЙКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО АВТОКОМПЕНСАТОРА

УДК 621.396.98

С. М. Костромицкий, И. Н. Давыденко, А. А. Дятко, РУП «КБ РАДАР», г. Минск

Аннотация

В статье рассматривается методика анализа ошибок самонастройки многоканального автокомпенсатора помех с корреляционными обратными связями, реализующего критерий минимума выходной мощности. Методика основана на представлении автокомпенсатора в виде многомерного следящего измерителя весовых коэффициентов.

Введение

Система дифференциальных уравнений относительно весовых коэффициентов автокомпенсатора в соответствии с [1] имеет следующий вид (в качестве цепей сглаживания сигнала ошибки используется идеальный интегратор):

$$\frac{1}{K_s} \cdot \frac{dW}{dt} = K_a \cdot (W_{\text{из}} - W + \eta(t)), \quad (1)$$

где K_s – коэффициент преобразования интегратора по скорости;

K_a – коэффициент преобразования цепей корреляционной обратной связи;

$W = \{W_1, W_2, W_3, \dots, W_N\}^T$ – вектор комплексных весовых коэффициентов;

$K_a = K_a^* \cdot R$ – матрица крутизны многомерного дискриминатора измерителя;

$W_{\text{из}} = -R^T R_a$ – задающее воздействие измерителя;

$R = E^* E$ – корреляционная матрица сигналов, принятых компенсационными каналами;

$R_a = E_a^* E_a$ – вектор корреляции сигналов, принятых основными и компенсационными каналами;

$E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_N\}^T$ – вектор комплексных амплитуд сигналов, принятых компенсационными каналами;

$\eta(t)$ – случайное возмущающее воздействие измерителя.

Для анализа многомерной следящей системы вида (1) проводится матричное преобразование над исходными векторными переменными (W , E), при котором отдельные контуры самонастройки для преобразованных весовых коэффициентов W_k являются несвязанными [2]:

$$\frac{1}{K_k} \cdot \frac{dW_k}{dt} = K_{a_k} \cdot (W_{\text{из}} + \xi_k(t) - W_k), \quad (2)$$

$$\frac{1}{K_k} \cdot \frac{dW_k'}{dt} = K_{a_k} \cdot \lambda_k \cdot (W_k' + \xi_k'(t) - W_k'),$$

где $W_k' = U^{-1} W_k$; $\xi_k' = U^{-1} \xi_k$;

$W = U \cdot W'$; $G_{11}, G_{12}, \dots, G_{1N}$; W ;

$U = [G_{11}, G_{12}, \dots, G_{1N}]$ – квадратная матрица, столбцами которой являются нормированные собственные векторы матрицы R ;

$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ – диагональная матрица с элементами на главной диагонали, равными собственным значениям матрицы R .

Выражения для матриц корреляционных функций и спектральных плотностей случайного возмущающего воздействия измерителя после преобразования определяются следующим образом [1]:

$$R_k(\tau) = \eta^{*T}(t) \cdot \eta^T(t - \tau) = 2\sigma_{\eta}^2 \cdot r^2(\tau) \cdot \Lambda^{-1}, \quad (3)$$

$$S'_{\text{ш}} = S''_{\text{ш}} = \frac{2\sigma_{\eta}^2}{\beta \cdot \Delta f_{\text{ш}}} \cdot \Lambda^{-1}, \quad (4)$$

где $r^2(\tau)$ – нормированная корреляционная функция помех;

$2\sigma_{\eta}^2$ – удвоенная средняя мощность остатков компенсации;

$$\Delta f_{\text{ш}} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} |r(\tau)| d\tau \right)^{-1}$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{\infty} r^2(\tau) d\tau$$

– постоянный коэффициент.

На основе указанной математической модели получим общие выражения для ошибок переходного процесса и дисперсий флуктуационных ошибок измерения весовых коэффициентов.

Ошибки переходного режима многоканального автокомпенсатора

Для анализа ошибок переходного режима необходимо решить систему дифференциальных уравнений (1) относительно вектора весовых коэффициентов автокомпенсатора в предположении нулевого возмущающего воздействия. Данная система дифференциальных уравнений сводится к набору не связанных между собой дифференциальных уравнений 1-го порядка (2). Уравнение (2) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка с постоянными коэффициентами, решение которого известно [3]:

$$W_k'(t) = W_k'(\infty) + [W_k'(0) - W_k'(\infty)] \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{зам}}}\right), \quad (5)$$

где $W_k'(0)$ – значение весового коэффициента в исходный момент времени;

$T_{\text{зам}} = \frac{1}{K_{a_k} \cdot \lambda_k \cdot K_k}$ – эквивалентная постоянная времени замкнутого измерителя весового коэффициента.

Для того чтобы вернуться к исходному вектору весовых коэффициентов W , воспользуемся обратным преобразованием (2) $W_k = \sum_{i=1}^N G_{ki}(k) \cdot W_k'$. В этом случае можно получить:

$$W_k(t) = W_k(\infty) + \sum_{i=1}^N [W_k'(0) - W_k'(\infty)] \cdot G_{ki}(k) \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{зам}}}\right), \quad (6)$$

или

$$W(t) = W_{\infty} + \sum_{i=1}^N [W_k'(0) - W_k'(\infty)] \cdot G_{ki} \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{зам}}}\right), \quad (7)$$

Учитывая, что в соответствии с (2) $W_k' = G_{ki}^{-1} W_k$, получим:

$$W_k'(0) = G_{ki}^{-1} W_k(0),$$

$$W_k'(\infty) = G_{ki}^{-1} W_k(\infty) = -G_{ki}^{-1} R^{-1} R_{\text{ш}} =$$

$$-G_{ki}^{-1} R^{-1} G_{ki} G_{ki}^{-1} R_{\text{ш}} = -\frac{1}{\lambda_k} G_{ki}^{-1} R_{\text{ш}}$$

Соответственно частное решение с учетом начальных условий совпадает с результатом, полученным в [4], и запишется следующим образом:

$$W(t) = W_{\text{из}} + \sum_{n=1}^N G_n^{-T} \left\{ W(0) - \frac{R_n}{\lambda_n} \right\} G_n \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{из}}}\right). \quad (8)$$

Практически интересен важный частный случай последнего выражения. Пусть имеется L внешних источников помех, сигналы которых сильно коррелированы по пространству антенны. В этом случае можно получить следующее выражение для переходного процесса:

$$W(t) = W_{\text{из}} + \sum_{n=1}^N G_n^{-T} \left\{ W(0) - \frac{R_0}{\lambda_0} \right\} G_n \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{из}}}\right) + \sum_{n=1}^N G_n^{-1} W(0) G_n \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{из}}}\right). \quad (9)$$

Соответственно, мощность остатков компенсации, обусловленная ошибками переходного режима, в последнем случае будет определяться выражением:

$$2\sigma_{\text{ост}}^2 = \Delta W^T(t) \cdot R \cdot \Delta W(t) = \sum_{n=1}^N \lambda_n \cdot \Delta W_n^T(0)^2 \cdot \exp\left(-\frac{2t}{T_{\text{из}}}\right) = \sum_{n=1}^N \lambda_n G_n^{-T} \left\{ W(0) - \frac{1}{\lambda_0} R_0 \right\} \exp\left(-\frac{2t}{T_{\text{из}}}\right). \quad (10)$$

Флуктуационные ошибки многоканального автокомпенсатора

Оценим флуктуационные ошибки самонастройки весовых коэффициентов. В соответствии с [5] запишем следующее выражение для корреляционной матрицы флуктуационных ошибок самонастройки:

$$D_{R_{\text{фл}}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\text{ф}}^*(i\omega) S_{\text{ф}}(i\omega) K_{\text{ф}}^T(i\omega) d\omega, \quad (11)$$

где $K_{\text{ф}}(i\omega) = [E + K(i\omega)]^{-1} K(i\omega)$ — матрица частотных характеристик замкнутого многомерного измерителя весовых коэффициентов;

$K(i\omega) = K_{\text{с}} K_{\text{ц}}(i\omega)$ — матрица частотных характеристик разомкнутого измерителя весовых коэффициентов;

$K_{\text{ц}}(i\omega)$ — частотная характеристика цепей сглаживания. Воспользуемся эквивалентными уравнениями многомерного измерителя (2). В этом случае можно записать:

$$D_{R_{\text{фл}}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\text{с}}^*(i\omega) S_{\text{ф}}^*(i\omega) K_{\text{с}}^T(i\omega) d\omega, \quad (12)$$

где $K_{\text{с}}^*(i\omega) = [E + K^*(i\omega)]^{-1} K^*(i\omega)$; $K(i\omega) = K_{\text{с}} \Lambda K_{\text{ц}}(i\omega)$.

Положим измеритель узкополосным по сравнению с шириной энергетического спектра возмущающего воздействия ($S_{\text{ф}}(i\omega) = S_{\text{ф}}(\omega) = S_{\text{из}}(\omega)$), в соответствии с (4) последнее выражение преобразуем к следующему виду:

$$D_{R_{\text{фл}}} = \frac{2\sigma_{\text{из}}^2}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}}} \Lambda^{-1} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\text{с}}^*(i\omega)^2 d\omega = \frac{2\sigma_{\text{из}}^2}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}}} \Lambda^{-1} \cdot \Delta f_{\text{с}}. \quad (13)$$

где $\Delta f_{\text{с}} = \text{diag}[\Delta f_{\text{с}1}, \Delta f_{\text{с}2}, \dots, \Delta f_{\text{с}N}] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\text{с}}^*(i\omega)^2 d\omega$ — диагональная матрица эффективных полос пропускания замкнутых измерителей весовых коэффициентов $W_{\text{с}}$.

При использовании в качестве цепей сглаживания идеального интегратора $K_{\text{ц}}(p) = \frac{K_{\text{ц}}}{p}$ передаточная характеристика замкнутой следящей системы k -го контура самонастройки описывается выражением:

$$K_{\text{с}k}(p) = \frac{K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{ц}k}(p)}{1 + K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{ц}k}(p)} = \frac{K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{с}k}}{K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{с}k} + p} \quad (14)$$

В этом случае эффективная полоса пропускания k -го замкнутого измерителя весового коэффициента $W_{\text{с}}$ равна:

$$\Delta f_{\text{с}k} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{(K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{с}k})}{(K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{с}k}) + \omega^2} d\omega = \frac{K_{\text{с}k} \lambda_k K_{\text{с}k}}{2} = \frac{1}{2T_{\text{из}k}} \quad (15)$$

Итоговое выражение для матрицы дисперсий флуктуационных ошибок измерения вектора весовых коэффициентов W запишем в виде:

$$D_{R_{\text{фл}}} = \frac{2\sigma_{\text{из}}^2}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}}} \Lambda^{-1} \Delta f_{\text{с}} = \frac{K_{\text{с}} 2\sigma_{\text{из}}^2 K_{\text{с}}^T}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}} \cdot 2} E. \quad (16)$$

Произведем пересчет матрицы дисперсий флуктуационных ошибок:

$$D_{R_{\text{фл}}} = U^T D_{R_{\text{фл}}} U = \frac{K_{\text{с}} 2\sigma_{\text{из}}^2 K_{\text{с}}^T}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}} \cdot 2} E. \quad (17)$$

Таким образом, получены выражения для матриц дисперсий флуктуационных ошибок самонастройки весовых коэффициентов, которые согласуются с результатами, полученными с использованием других методов [2, 6]. Мощность остатков, обусловленная данными ошибками, определяется выражением:

$$2\sigma_{\text{ост}}^2 = \sum_{n=1}^N \lambda_n \cdot \Delta W_n^T(0)^2 = \frac{K_{\text{с}} 2\sigma_{\text{из}}^2 K_{\text{с}}^T}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}} \cdot 2} \sum_{n=1}^N \lambda_n = \frac{N \cdot 2\sigma_{\text{из}}^2}{2 \cdot \beta \cdot \Delta f_{\text{из}} \cdot T_{\text{из}}}. \quad (18)$$

где $T_{\text{из}} = \frac{N}{K_{\text{с}} \cdot K_{\text{с}}^T \cdot T \cdot R}$; $T \cdot R = \sum_{n=1}^N \lambda_n$ — след матрицы R .

Отношение мощности остатков компенсации, обусловленной флуктуационными ошибками, к минимальной мощности остатков имеет вид:

$$M = \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_{\text{из}}^2} = \frac{K_{\text{с}} T \cdot R K_{\text{с}}^T}{\beta \cdot \Delta f_{\text{из}} \cdot 2} = \frac{N}{2 \cdot \beta \cdot \Delta f_{\text{из}} \cdot T_{\text{из}}}. \quad (19)$$

Заключение

Таким образом, приведены оригинальные методики анализа ошибок переходного режима и флуктуационных ошибок самонастройки многоканального автокомпенсатора шумовых помех для цепей сглаживания сигнала ошибки в виде идеального интегратора. Результаты анализа доведены до выражений, позволяющих оценить вклад ошибок самонастройки в мощность остатков компенсации помехи.

Литература:

1. Костромичий, С. М. Математическая модель многоканального автокомпенсатора помех / С. М. Костромичий, И. Н. Давыденко, А. А. Дятко // *Электроника инфо.* Минск. — 2010. — №3. — С. 64-66.
2. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер // *М.: Радио и связь.* 1986. — 446 с.
3. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн // *М.: Наука.* 1974. — 832 с.
4. Nobuyoshi, K. Effect of Initial Values of Adaptive Arrays/K. Nobuyoshi // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* — V. 22, 1986. — №6. — P. 688-694.
5. Бакут, П. А. Вопросы статистической теории радиолокации / П. А. Бакут, И. А. Большаковы. Т. II. Под ред. Г. П. Тартаковского // *М.: Советское радио.* 1964. — 1079 с.
6. Пистолькорс, А. А. Введение в теорию адаптивных

антенна / А. А. Пистолькорс, О. С. Литвинов. // М: Наука, 1991. 200 с.

Abstract

The methods are proposed for analyzes the errors of a

multi-channel canceller, which implements the criterion of the output power minimum. The report consists of canceller's transient processes expression, expression for the fluctuation self-adjustment errors array.

Поступила в редакцию 22.12.2010.

ТРЕБОВАНИЯ К НАУЧНЫМ СТАТЬЯМ, ПУБЛИКУЕМЫМ В РАЗДЕЛЕ «РЕЦЕНЗИРУЕМЫЕ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ»

1. Научная статья – законченное и логически цельное произведение по раскрываемой теме – должна соответствовать одному из следующих научных направлений: информационные технологии и системы, оптоэлектроника, микро- и наноэлектроника, приборостроение.

2. Объем научной статьи не должен превышать 0,35 авторского листа (14 тысяч печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и другие), что соответствует 8 страницам текста, напечатанного через 2 интервала между строками (5,5 страницы в случае печати через 1,5 интервала).

3. Статьи в редакцию представляются в двух экземплярах на бумаге формата А4 (220х15, г. Минск, пр. Пушкина, 29Б), а также в электронном виде (e-mail: sadov@bsu.by). К статье прилагаются сопроводительное письмо организации за подписью руководителя и акт экспертизы. Статья должна быть подписана всеми авторами.

Статьи принимаются в формате doc, rtf, pdf. Каждая иллюстрация (фотографии, рисунки, графики, таблицы и др.) должна быть представлена отдельным файлом и названа таким образом, чтобы была понятна последовательность ее размещения. Фотографии принимаются в форматах tif или jpg (300 dpi). Рисунки, графики, диаграммы принимаются в форматах tif, cdr, eps или jpg (300 dpi, текст в кривых). Таблицы принимаются в форматах doc, rtf или Excel.

4. Научные статьи должны включать следующие элементы:

- аннотацию;
- фамилию и инициалы автора (авторов) статьи, ее название;
- введение;
- основную часть, включающую графики и другой иллюстративный материал (при их наличии);
- заключение;
- список цитированных источников;
- индекс УДК;
- аннотацию на английском языке.

5. Название статьи должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким, содержать ключевые слова, позволяющие индексировать данную статью.

6. Аннотация (100-150 слов) должна ясно излагать содержание статьи и быть пригодной для опубликования в аннотациях к журналам отдельно от статьи.

В разделе «Введение» должен быть дан краткий обзор литературы по данной проблеме, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована цель работы.

Основная часть статьи должна содержать описа-

ние методики, аппаратуры, объектов исследования и подробно освещать содержание исследований. Полученные результаты должны быть обсуждены с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными. Основная часть статьи может делиться на подразделы (с разъяснительными заголовками).

Иллюстрации, формулы, уравнения и сноски, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте.

В разделе «Заключение» должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможности применения.

Список цитированных источников располагается в конце текста, ссылки нумеруются согласно порядку цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]).

В соответствии с рекомендациями ВАК Республики Беларусь от 29.12.2007г. №29/13/15 научные статьи аспирантов последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к рецензируемым научным публикациям.

Новые возможности
по изготовлению печатных плат!

ЭЛЕКТРООКТИНЕНТ

- Производство одно- и двухсторонних печатных плат по 3-му, 4-му классам точности.
- Срочное производство опытных партий – от 3-х дней.
- Серийное производство одно- и двухсторонних печатных плат – от 2-х недель.
- Все виды монтажа печатных плат.

г. Минск, пр. Базарный, 6, пом. 35, 4-й этаж
Тел: +375 (212) 204-40-00, 204-40-04
Fax: +375 (212) 204-40-04
E-mail: info@elcent.com