

Технологии электромагнитной совместимости

Technologies of electromagnetic compatibility

2014. № 4(51).

emc-journal.ru
ISSN 1729-2670

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9669 от 24 августа 2001 года

Оформить подписку можно

по объединенному каталогу «Пресса России»:

10362 — полугодовой индекс;

в издательстве (предпочтительно) (8-985-134-4367).

Главный редактор журнала,

председатель редакционного совета

БАЛЮК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.

Зам. главного редактора журнала

КЕЧИЕВ ЛЕОНИД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.

ФАЙЗРАХМАНОВ НИКОЛАЙ ИСХАКОВИЧ,

Редакционный совет:

АКБАШЕВ БЕСЛАН БОРИСОВИЧ, д.т.н.

ВОРШЕВСКИЙ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ, д.т.н., проф.

КИРИЛЛОВ ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., проф.

КОСТРОМИНОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ,

д.т.н., проф.

КРИВОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ, д.т.н., проф.

МЫРОВА ЛЮДМИЛА ОШЕРОВНА, д.т.н., проф.

НЕФЕДОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ, д.т.н., проф.

НИКИТИНА ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВНА, д.мед.н., проф.

НИКИФОРОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, к.т.н.

ПОЖИДАЕВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ, д.т.н., проф.

САРЫЛОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

САХАРОВ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., с.н.с.

СУХОРУКОВ СЕРГЕЙ АРСЕНЬЕВИЧ, к.т.н., доцент

ТУХАС ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.

ФОМИНИЧ ЭДУАРД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.

ЧЕРМОШЕНЦЕВ СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ, д.т.н., проф.

ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

НОЧУ «Новая Инженерная Школа»

**Издается при содействии кафедры РЭТ
МИЭМ-НИУ ВШЭ.**

Главный редактор СТАСЬ Константин Николаевич

Исполнительный директор

Леонтьева Анна Анатольевна

Адрес: 105005, Москва, Наб. академика Туполева, 15,
стр. 29, оф. 117.

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ»

Редакция: тел./факс +7-985-134-4367,

e-mail: kln1940@gmail.com.

Статьи рецензируются. Статьи опубликованы в авторской редакции. Мнение членов редакционного совета может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Рукописи не возвращаются.

Подписано к печати 01.12.2014

Журнал включен в перечень ведущих журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Содержание

Памяти Арменского Е.В.

Памяти Стася К.Н.

Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям 5

Балюк Н.В., Дмитриева Н.Ю., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Пыж А.В., Сидорюк П.А. Применение теории многопроводных линий передачи для обоснования методов испытаний аппаратуры на устойчивость к радиочастотным кондуктивным помехам..... 17

Митрохин В.В., Полянов В.В. Применение вейвлет-преобразования для анализа внешних электромагнитных воздействий на цепи автоматики и связи 25

Иванов И.А., Полесский С.Н., Тихонов А.Н., Увайсов С.У. Чувствительность цифровых устройств к электростатическому разряду при оценке значимости диагностируемых электрорадиоэлементов..... 34

Нефедов В.Н., Назаров И.В., Симонов В.П. Методы снижения уровня побочных излучений микроволновых устройств термообработки листовых материалов..... 44

Борисов Н.И., Малина А.С., Востриков А.В., Кравченко Н.П. Разработка метода редукции модели линейной эквивалентной электрической схемы, построенной в однородном координатном базисе... 49

Михеев В.А., Семин В.Г. Разработка концепции политики безопасности инфокоммуникаций МИС ИС в условиях электромагнитных атак..... 58

Михеев В.А., Семин В.Г. Принципы и методы реализации политики безопасности системы обеспечения электромагнитной безопасности многофункциональных информационных сетей..... 62

Пилков А.В., Купцов Н.М., Радомский А.Н. Автоматизация измерений эффективности экранирования контейнеров в широком диапазоне частот с использованием векторного анализатора цепей..... 67

Николаев П.А. Устойчивость автомобилей к электромагнитному воздействию..... 72

ВСЕРОССИЙСКАЯ НТК «ТехноЭМС 2015»

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ «ИННОВАЦИОННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 681.3.06

Н.И. Борисов, А.С. Малина, А.В. Востриков, Н.П. Кравченко

Разработка метода редукции модели линейной эквивалентной электрической схемы, построенной в однородном координатном базисе

В данной статье рассматривается метод построения макромоделей линейных электрических эквивалентных схем в однородном координатном базисе. Подробно описан метод обращения полиномиальной матрицы второй степени, на котором основано построение макромоделей. Метод позволяет существенно снизить трудоемкость построения макромоделей схем, содержащих большое количество индуктивных элементов, и матрицы моделей которых близки к плотным.

Ключевые слова: линейные электрические эквивалентные схемы, макромоделирование, обращение полиномиальной матрицы высокой степени, анализ модели, однородный координатный базис, САПР

Постановка задачи

Пусть построена модель линейной эквивалентной электрической схемы в виде системы линейных алгебраических уравнений следующего вида

$$\begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p, \bar{Q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_1 \\ \bar{Y}_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\bar{X}_2 - (m \times 1)$ – подвектор «внешних» переменных, отражающих зависимость типа «вход/выход» исходной модели и, возможно, имеющий зависимость от варьируемых параметров модели $\bar{Q} = (q_1, \dots, q_{n_q})^T$, расположенных в небольшом количестве уравнений, $p = j\omega$ – переменная Лапласа. При условии, что порядок матрицы модели равен $N = M + m$, где $m \ll M$, становится актуальной задача фазовой редукции модели, позволяющая преобразовать ее в макромодель вида

$$[-A_{21}(p)A_{11}^{-1}(p)A_{12}(p) + A_{22}(p, \bar{Q})]\bar{X}_2 = \bar{Y}_2 - A_{21}(p)A_{11}^{-1}(p)\bar{Y}_1 \quad (2)$$

Из (2) видно, что макромодель может использоваться либо для оптимизации модели, либо служить в качестве элемента модели более высокого иерархического уровня. Кроме того, из (2) следует, что основной проблемой построения макромоделей является вычисление в аналитическом виде матрицы $A_{11}^{-1}(p)$.

Отметим, что порядок N матрицы системы (1) $A(p)\bar{X} = \bar{Y}$ зависит от того, в каком координатном базисе формировалась модель схемы.

Если модель схемы формировалась в расширенном однородном координатном базисе (РОКБ), то порядок N матрицы $A(p)$ равен сумме всех узлов схемы (кроме базового) и количеству индуктивных элементов. В этом случае матрица системы уравнений (1) является полиномиальной матрицей первой степени вида $C_p p + G_p$.

В ряде случаев для эквивалентных электрических схем, построенных на основе искусственных электроаналогий, например, в задачах механики, электродинамики и т.д., количество индуктивных элементов может существенно превышать количество узлов схемы, что приводит к большему порядку матрицы $A(p)$ и увеличивает трудоемкость вычисления от нее обратной матрицы. В этом случае модель схемы может быть построена в однородном координатном базисе методом узловых потенциалов, а порядок матрицы системы $A(p) = Cp + G + p^{-1}L$ равен количеству только лишь узлов схемы (без базового узла). С учетом сказанного выше рассмотрим процесс вычисления в аналитиче-

ском виде матрицы $A^{-1}(p) = [Cp + G + p^{-1}L]^{-1}$ и оценки трудоемкости процесса вычисления матрицы.

Теоретическое обоснование вычисления матрицы $[Cp^2 + Gp + L]^{-1}$

Поскольку вычисление матрицы $[Cp^2 + Gp + L]^{-1}$ почти соответствует вычислению матрицы $[Cp + G + p^{-1}L]^{-1}$, теоретической основой ее вычисления является следующее утверждение. Матрица $[-A_{21}(p)A_{11}^{-1}(p)A_{12}(p) + A_{22}(p)]^{-1}$ для некоторой полиномиальной матрицы первой степени $A(p)$ является нижним правым блоком матрицы $A(p)^{-1}$ [1]. Действительно, если $K(p) = A(p)^{-1}$, то в блочной форме этот факт записывается в следующей форме.

$$\begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11}(p) & K_{12}(p) \\ K_{21}(p) & K_{22}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 \\ 0 & E_{22} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} K_{11}(p) & K_{12}(p) \\ K_{21}(p) & K_{22}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & A_{22}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 \\ 0 & E_{22} \end{bmatrix}.$$

Перемножение матриц приводит к следующим матричным системам уравнений

$$\begin{cases} A_{11}(p)K_{11}(p) + A_{12}(p)K_{21}(p) = E_{11} \\ A_{11}(p)K_{12}(p) + A_{12}(p)K_{22}(p) = 0 \\ A_{21}(p)K_{11}(p) + A_{22}(p)K_{21}(p) = 0 \\ A_{21}(p)K_{12}(p) + A_{22}(p)K_{22}(p) = E_{22} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{11}(p)A_{11}(p) + K_{12}(p)A_{21}(p) = E_{11} \\ K_{11}(p)A_{12}(p) + K_{12}(p)A_{22}(p) = 0 \\ K_{21}(p)A_{11}(p) + K_{22}(p)A_{21}(p) = 0 \\ K_{21}(p)A_{12}(p) + K_{22}(p)A_{22}(p) = E_{22} \end{cases}. \quad (4)$$

Из второго уравнения первой системы следует, что

$$K_{12}(p) = -A_{11}^{-1}(p)A_{12}(p)K_{22}(p).$$

Подстановка этого выражения в четвертое уравнение системы (3) приводит к выражению

$$[-A_{21}(p)A_{11}^{-1}(p)A_{12}(p) + A_{22}(p)]K_{22}(p) = E_{22}.$$

Аналогичные рассуждения для системы (4) приводят к выражению

$$K_{22}(p)[-A_{21}(p)A_{11}^{-1}(p)A_{12}(p) + A_{22}(p)] = E_{22}.$$

Теперь получим такую полиномиальную матрицу первой степени порядка $2N$

$$\begin{bmatrix} U_{11}p + V_{11} & U_{12}p + V_{12} \\ U_{21}p + V_{21} & U_{22}p + V_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

для которой должно выполняться условие

$$\begin{aligned} & -(U_{21}p + V_{21})(U_{11}p + V_{11})^{-1}(U_{12}p + V_{12}) + U_{22}p + V_{22} = \\ & = Cp^2 + Gp + L. \end{aligned} \quad (6)$$

Ясно, что такой матрицей в данном случае может служить матрица

$$\begin{bmatrix} E & Ep \\ -Cp & Gp + L \end{bmatrix}, \quad (7)$$

в которой все блоки являются квадратными матрицами порядка N , E – обозначение единичной матрицы. Действительно,

$$-(-Cp)(E)^{-1}(Ep) + Gp + L = Cp^2 + Gp + L.$$

Таким образом, для вычисления матрицы $[Cp^2 + Gp + L]^{-1}$ необходимо вычислить в аналитическом виде матрицу, обратную от матрицы (7) и взять из нее правый нижний $(N \times N)$ – блок. Матрица (7) в силу указанной выше специфики задачи предполагается регулярной, что в данном случае соответствует условию $\det L \neq 0$.

Матрица, обратная от матрицы (7) имеет вид [1, 2, 3]:

$$\begin{bmatrix} E & Ep \\ -Cp & Gp + L \end{bmatrix}^{-1} = B(Dp + E_{2N})^{-1}S^T, \quad (8)$$

где B и S – матрицы правых и левых собственных векторов матрицы (7) соответственно, $D = -diag(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_{2N}^{-1})$ – диагональная матрица, состоящая из величин, обратных собственным значениям матрицы (7). При этом матрицы собственных векторов должны быть связаны условием нормировки

$$S^T \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} B = E_{2N}. \quad (9)$$

Вычисление матрицы $[Cp^2 + Gp + L]^{-1}$

Покажем, что вычисление матрицы $[Cp^2 + Gp + L]^{-1}$ может проводиться по самой матрице $Cp^2 + Gp + L$.

В первом случае для вычисления собственных значений матрицы $Cp^2 + Gp + L$ (совпадающих с собственными значениями матрицы (7)) может использоваться метод решения характеристического уравнения $\det[Cp^2 + Gp + L] = 0$, основанный на идее интерполяции, например метод Мюллера [4]. Основной и наиболее трудоемкой операцией в этом случае является вычисление определителя числовой матрицы $C(\lambda_i^k)^2 + G\lambda_i^k + L$, где λ_i^k – приближение к i -му корню характеристического уравнения ($i = 1, \dots, 2N$) на k -ой итерации. Как указывает Уилкинсон, требуется в среднем 7 итераций для вычисления одного корня. Для вычисления определителя числовой матрицы она подвергается нормализованному LQ – разложению

$$C(\lambda_i^k)^2 + G\lambda_i^k + L = (\Theta_i^k)^T L_i^k (Q_i^k)^T, \quad (10)$$

где Θ_i^k – матрица перестановок, определяющая порядок убывания норм строк исходной матрицы, L_i^k – треугольная либо трапециевидная матрица, Q_i^k – ортогональная (унитарная в комплексном случае) матрица.

Если $\text{rang} L_i^k = N$, то определитель с учетом перестановок равен произведению диагональных элементов матрицы L_i^k . Если $\text{rang} L_i^k = r < N$, то λ_i^k – корень характеристического уравнения, а последние $N - r$ столбцов ортогональной матрицы являются отвечающими ему линейно независимыми правыми собственными векторами. Если считать, что трудоемкость LQ – разложения вещественной числовой матрицы составляет примерно N^3 вещественных мультипликативных операций (ВМО), то общая трудоемкость процесса вычисления собственных значений и векторов матрицы составит примерно $7N^4$ ВМО.

Второй способ вычисления спектра матрицы $Cp^2 + Gp + L$ основан на предварительном построении полиномиальной матрицы первой степени порядка $2N$

$$\begin{bmatrix} 0 & E_N \\ -L^{-1}C & L^{-1}G \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} E_N & 0 \\ 0 & E_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

и вычислении ее собственных значений преобразованиями подобия, например, с помощью QR – алгоритма Френсиса-Кублановской [5]. Трудоемкость этого процесса составляет примерно N^4 ВМО. После этого вычисление собственных векторов проводится с помощью разложения (10) путем подстановки в матрицу $Cp^2 + Gp + L$ предварительно вычисленных ее собственных значений.

Нормирование собственных векторов в выражении (9) предполагает длину векторов равную $2N$. Т. е. если нормируются левый и правый собственные векторы, отвечающие простому собственному значению λ_i , то за счет выбора длин векторов должно выполняться условие

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{1i}^T & \bar{S}_{2i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B}_{1i} \\ \bar{B}_{2i} \end{bmatrix} = 1. \quad (12)$$

При этом по матрице $Cp^2 + Gp + L$ вычисляются собственные векторы в два раза меньшей длины N \bar{S}_{2i}^T и \bar{B}_{2i} . В этом случае условие нормировки может быть преобразовано следующим образом.

Из определения правого собственного вектора матрицы (7), отвечающего собственному значению λ_i

$$\begin{bmatrix} E & E\lambda_i \\ -C\lambda_i & G\lambda_i + L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B}_{1i} \\ \bar{B}_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

следует, что $\bar{B}_{1i} = -\bar{B}_{2i}\lambda_i$. Аналогично, из определения левого собственного вектора

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{1i}^T & \bar{S}_{2i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & E\lambda_i \\ -C\lambda_i & G\lambda_i + L \end{bmatrix} = [0 \quad 0]$$

вытекает, что $\bar{S}_{1i}^T = \bar{S}_{2i}^T C\lambda_i$. Подстановка соответствующих выражений в условие нормировки (12), позволяет получить новое условие нормировки следующего вида

$$\bar{S}_{2i}^T [-C\lambda_i^2 + L] \bar{B}_{2i} = 1. \quad (13)$$

Если собственное значение λ_i имеет геометрическую кратность $k > 1$ и ему соответствуют k линейно независимых левых $\bar{S}_{2i1}, \dots, \bar{S}_{2ik}$ и правых $\bar{B}_{2i1}, \dots, \bar{B}_{2ik}$ собственных векторов, то нормированные собственные векторы определяются выражениями [6]:

$$\bar{F}_{2i1} = \alpha_{11} \bar{S}_{2i1} + \dots + \alpha_{1k} \bar{S}_{2ik}$$

...

$$\bar{F}_{2ik} = \alpha_{k1} \bar{S}_{2i1} + \dots + \alpha_{kk} \bar{S}_{2ik}$$

Нормирующие множители α_{lt} ($l = \overline{1, k}; t = \overline{1, k}$) определяются в итоге решения СЛАУ:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{2i1}^T (-C\lambda_i^2 + L) \bar{B}_{2i1} & \dots & \bar{S}_{2ik}^T (-C\lambda_i^2 + L) \bar{B}_{2i1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{S}_{2i1}^T (-C\lambda_i^2 + L) \bar{B}_{2ik} & \dots & \bar{S}_{2ik}^T (-C\lambda_i^2 + L) \bar{B}_{2ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{k1} & \dots & \alpha_{kk} \end{bmatrix} = E_k$$

Построение макромодели матрицы $Cp + G + Lp^{-1}$ в однородном координатном базисе

Пусть исходная модель линейной эквивалентной электрической схемы, построенная в однородном координатном базисе, имеет вид:

$$[Cp + G + Lp^{-1}] = \bar{Y} \quad (14)$$

Умножив обе части выражения на p получим модель следующего вида:

$$[Cp^2 + Gp + L] \bar{X} = p \bar{Y}$$

Исходя из предположения, что количество варьируемых параметров схемы много меньше общего количества уравнений, исходную модель можно представить в блочном виде:

$$\begin{bmatrix} C_{11}p^2 + G_{11}p + L_{11} & C_{12}p^2 + G_{12}p + L_{12} \\ C_{21}p^2 + G_{21}p + L_{21} & C_{22}(\bar{Q})p^2 + G_{22}(\bar{Q})p + L_{11}(\bar{Q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \bar{Y}_1 \\ \bar{Y}_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

где: \bar{X}_1 - (M^*1) – вектор «внутренних» переменных; \bar{X}_2 - (m^*1) – вектор «внешних» переменных схемы, отражающих соотношения

типа «вход-выход»; $M \gg m, m + M = N$.

Макромодель схемы (14), содержащая только «внешние» переменные, имеет вид:

$$[-(C_{21}p^2 + G_{21}p + L_{21})[\bar{B}_{21} \dots \bar{B}_{2M}][D_{2M}p + E_{2M}]^{-1}[\bar{S}_{21} \dots \bar{S}_{2M}]^T \times \\ \times (C_{12}p^2 + G_{12}p + L_{12}) + C_{22}(\bar{Q})p^2 + G_{22}(\bar{Q})p + L_{22}(\bar{Q})\bar{X}_2 = \tag{16} \\ = p\bar{Y}_2 - (C_{21}p^2 + G_{21}p + L_{21})[\bar{B}_{21} \dots \bar{B}_{2M}][D_{2M}p + E_{2M}]^{-1}[\bar{S}_{21} \dots \bar{S}_{2M}]^T p\bar{Y}_1$$

Макромодель (16) получена при помощи алгебраического исключения вектора \bar{X}_1 , содержащего внутренние переменные модели. Исключение основано на обращении полиномиальной матрицы

$$C_{11}p^2 + G_{11}p + L_{11} \tag{17}$$

Обратная матрица $[C_{11}p^2 + G_{11}p + L_{11}]^{-1}$ согласно выражению (8) равна $[\bar{B}_{21} \dots \bar{B}_{2M}][D_{2M}p + E_{2M}]^{-1}[\bar{S}_{21} \dots \bar{S}_{2M}]^T$, где $[\bar{B}_{21} \dots \bar{B}_{2M}]$ – матрица правых собственных векторов матрицы (17), $[\bar{S}_{21} \dots \bar{S}_{2M}]$ – матрица левых собственных векторов матрицы (17), правые и левые собственные векторы связаны условием нормировки (13), $D_{2M} = -diag(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_{2M}^{-1})$ – диагональная матрица, состоящая из величин, обратных собственным значениям матрицы (17), E_{2M} – единичная матрица, также должно выполняться условие $\det C_{11} \neq 0$. Случай $\det C_{11} = 0$ в данной статье не рассматривается.

С учетом перемножения матриц блоков выражения (15) на матрицы собственных векторов, выражение (16) можно записать в виде:

$$[-(W_{21}p^2 + U_{21}p + V_{21})[D_{2M}p + E_{2M}]^{-1} \times \\ \times (W_{12}p^2 + U_{12}p + V_{12}) + C_{22}(\bar{Q})p^2 + G_{22}(\bar{Q})p + L_{11}(\bar{Q})\bar{X}_2 = \tag{18} \\ = p\bar{Y}_2 - (W_{21}p^2 + U_{21}p + V_{21})[D_{2M}p + E_{2M}]^{-1}[\bar{S}_{21} \dots \bar{S}_{2M}]^T p\bar{Y}_1.$$

Трудоемкость вычисления одной частотной характеристики по макромодели (18) составляет $T \sim 2m^3 + 2m^2$ ВМО ($2m^3$ – LQ-разложение числовой матрицы макромодели, $2m^2$ – решение СЛАУ с треугольной матрицей).

Рассмотрим числовой пример на рис.1. Пусть дана линейная электрическая эквивалентная схема, содержащая 3 узла:

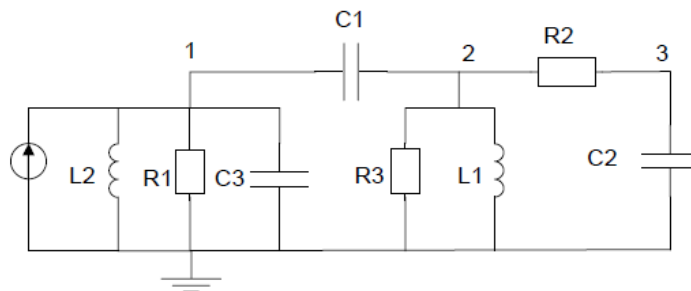


Рис.1. Пример линейной электрической эквивалентной схемы, содержащей 3 узла.

Пусть номиналы элементов заданы значениям: $R1 = 0,01$; $R2 = 0,05$; $R3 = 0,02$; $C2 = 20$; $C3 = 50$; $L1 = 0,01$; $L2 = 0,02$; $L2 = 0,02$.

Далее представлена модель схемы, построенная в расширенном однородном координатном базисе.

Матрица С построенной модели:

6,00000000000000E+1	-1,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
-1,00000000000000E+1	1,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	2,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	-1,00000000000000E-2	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	-2,00000000000000E-2

Матрица G построенной модели:

1,00000000000000E+2	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	-1,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	7,00000000000000E+1	-2,00000000000000E+1	-1,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	-2,00000000000000E+1	2,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	-1,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
-1,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0

Пусть задано внешнее воздействие:

$Re_Y[1]=1,00000000000000E+0$ $Im_Y[1]=0,00000000000000E+0$
 $Re_Y[2]=0,00000000000000E+0$ $Im_Y[2]=0,00000000000000E+0$
 $Re_Y[3]=0,00000000000000E+0$ $Im_Y[3]=0,00000000000000E+0$
 $Re_Y[4]=0,00000000000000E+0$ $Im_Y[4]=0,00000000000000E+0$
 $Re_Y[5]=0,00000000000000E+0$ $Im_Y[5]=0,00000000000000E+0$

Решение системы уравнений модели в частотной точке 1,00000000000000E+1:

$Re_X[1]=5,080166078047778E-4$ $Im_X[1]=-1,753957300431541E-3$
 $Re_X[2]=1,268741516006887E-3$ $Im_X[2]=-9,440625453724438E-4$
 $Re_X[3]=-8,090974195759951E-5$ $Im_X[3]=-1,349651257964487E-4$
 $Re_X[4]=9,440625453724438E-3$ $Im_X[4]=1,268741516006887E-2$
 $Re_X[5]=8,769786502157702E-3$ $Im_X[5]=2,540083039023889E-3$

Далее представлена **модель схемы**, построенная в **однородном координатном базисе**:

Матрица C построенной модели:

6,00000000000000E+1	-1,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0
-1,00000000000000E+1	1,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	2,00000000000000E+1

Матрица G построенной модели:

1,00000000000000E+2	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	7,00000000000000E+1	-2,00000000000000E+1
0,00000000000000E+0	-2,00000000000000E+1	2,00000000000000E+1

Матрица L построенной модели:

5,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	1,00000000000000E+2	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0

Внешнее воздействие:

$Re_Y[1]=1,00000000000000E+0$ $Im_Y[1]=0,00000000000000E+0$
 $Re_Y[2]=0,00000000000000E+0$ $Im_Y[2]=0,00000000000000E+0$
 $Re_Y[3]=0,00000000000000E+0$ $Im_Y[3]=0,00000000000000E+0$

Решение системы уравнений модели в частотной точке 1,00000000000000E+1:

$Re_X[1]=5,080166078047778E-4$ $Im_X[1]=-1,753957300431541E-3$
 $Re_X[2]=1,268741516006887E-3$ $Im_X[2]=-9,440625453724438E-4$
 $Re_X[3]=-8,090974195759951E-5$ $Im_X[3]=-1,349651257964487E-4$

Построим по схеме на рис.1 **макромодель в РОКБ**. Будем считать 3-й узел выходным. Тогда

обращаемая матрица A_{11} из выражения (2) имеет вид:

Матрица C:

6,00000000000000E+1	-1,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
-1,00000000000000E+1	1,00000000000000E+1	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	-1,00000000000000E-2	0,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	-2,00000000000000E-2

Матрица G:

1,00000000000000E+2	0,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0	1,00000000000000E+0
0,00000000000000E+0	7,00000000000000E+1	1,00000000000000E+0	0,00000000000000E+0

0,000000000000000E+0	1,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
1,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0

Собственные значения матрицы A_{11} :

$Re = -1,567559054816045E+0$ $Im = 0,000000000000000E+0$

$Re = -7,108033949719730E+0$ $Im = 0,000000000000000E+0$

$Re = -8,622034977321126E-1$ $Im = -3,925415670390951E-1$

Коэффициенты нормировки левых собственных векторов:

$Re = -9,98949204624365891E-3$ $Im = 0,000000000000000E+0$

$Re = 2,27444666960046802E-1$ $Im = 0,000000000000000E+0$

$Re = -8,22209980254985094E-3$ $Im = 9,55174234973148494E-3$

Матрица правых собственных векторов действительная часть:

-9,063219427484243E-3	-1,502445919431030E-2	-1,622802202261549E-2	-1,622802202261549E-2
-1,500377127395879E-2	-7,049632204553150E-2	4,392069115488421E-4	4,392069115488421E-4
9,571423308016619E-1	9,917836991804347E-1	9,639484566167345E-2	9,639484566167345E-2
2,890870171569971E-1	1,056864619709836E-1	9,410912029218047E-1	9,410912029218047E-1

Матрица правых собственных векторов мнимая часть:

0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-7,388832662123966E-3	7,388832662123966E-3
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-3,168616826066720E-3	3,168616826066720E-3
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	3,236158280151626E-1	-3,236158280151626E-1
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	2,808801475492106E-5	-2,808801475492106E-5

Матрица нормированных левых собственных векторов действительная часть:

9,072753034417078E-1	1,501955375158505E+0	-9,581491494971213E+1	-2,893911079950279E+1
-6,605764555890647E-2	-3,099493296007462E-1	4,360549369815088E+0	4,646688945647982E-1
3,956982020942400E-1	-2,132793398497193E-1	1,447082395901578E+1	-4,871279580744047E+1
3,956982020942400E-1	-2,132793398497193E-1	1,447082395901578E+1	-4,871279580744047E+1

Матрица нормированных левых собственных векторов мнимая часть:

0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
1,358344000314439E+0	1,376080989615939E-1	-2,254828455291042E+1	-5,659383537988684E+1
-1,358344000314439E+0	-1,376080989615939E-1	2,254828455291042E+1	5,659383537988684E+1

Диагональная матрица $D = -diag(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_{2N}^{-1})$ действительная часть:

-2,398309145348071E-2	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	-3,356547621189105E-1	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-4,434918756737567E-2	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	3,254208333696913E-2

Диагональная матрица $D = -diag(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_{2N}^{-1})$ мнимая часть:

1,529964142645660E-1	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	4,722188505193414E-1	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	7,928430863372501E-2	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	9,266356987342897E-2

Решение системы уравнений модели в частотной точке $1,000000000000000E+1$:

$Re_X[1] = -8,090974195759954E-5$ $Im_X[1] = -1,349651257964487E-4$

Построим по схеме на рис.1 **макромодель в ОКБ**. Будем считать 3-й узел выходным. Тогда обращаемая матрица A_{11} из выражения (2) имеет вид:

Матрица C :

6,000000000000000E+1	1,000000000000000E+1
1,000000000000000E+1	1,000000000000000E+1

Матрица G :

1,000000000000000E+2	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	7,000000000000000E+1

Матрица L:

5,000000000000000E+1	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	1,000000000000000E+2

Собственные значения матрицы A11:

$$\text{Re} = -1,567559054816045E+0 \quad \text{Im} = 0,000000000000000E+0$$

$$\text{Re} = -7,108033949719730E+0 \quad \text{Im} = 0,000000000000000E+0$$

$$\text{Re} = -8,622034977321125E-1 \quad \text{Im} = -3,925415670390952E-1$$

Коэффициенты нормировки левых собственных векторов - получены в соответствии с выражением (13):

$$\text{Re} = 5,09645528084928885E+1 \quad \text{Im} = 0,000000000000000E+0$$

$$\text{Re} = -3,11172179339615983E+2 \quad \text{Im} = 0,000000000000000E+0$$

$$\text{Re} = -2,76307756401137565E+1 \quad \text{Im} = 2,36679905732350148E+1$$

Матрица правых собственных векторов действительная часть:

5,170504797186460E-1	2,084426584707071E-1	2,810150639761597E-1	2,810150639761597E-1
8,559549061853189E-1	9,780345894341693E-1	1,765828176282212E-1	1,765828176282212E-1

Матрица правых собственных векторов мнимая часть:

0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-9,433181024113516E-1	9,433181024113516E-1
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0

Матрица нормированных левых собственных векторов действительная часть:

1,014529611711776E-2	1,679510285122486E-2
-6,698627715147085E-4	-3,143065654229757E-3
-2,273371535598106E-2	-3,686156377441512E-3
-2,273371535598106E-2	-3,686156377441512E-3

Матрица нормированных левых собственных векторов мнимая часть:

0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
1,466686085652409E-2	-3,157490601389308E-3
-1,466686085652409E-2	3,157490601389308E-3

Диагональная матрица $D = -diag(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_{2N}^{-1})$ действительная часть:

-1,529964142645660E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	-4,722188505193414E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-7,928430863372500E-1	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-9,266356987342897E-1

Диагональная матрица $D = -diag(\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_{2N}^{-1})$ мнимая часть:

-2,398309145348071E-1	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	-3,356547621189105E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	-4,434918756737568E-1	0,000000000000000E+0
0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	0,000000000000000E+0	3,254208333696914E-1

Решение системы уравнений модели в частотной точке 1,000000000000000E+1:

$$\text{Re}_X[1] = -8,090974195759951E-5 \quad \text{Im}_X[1] = -1,349651257964487E-4$$

Выводы

Метод построения макромоделей линейных электрических эквивалентных схем в однородном координатном базисе позволяет существенно сократить трудоемкость процесса построения макромоделей схем, содержащих огромное количество индуктивных элементов (характерно для некоторых задач ЭМС), и матрицы моделей которых близки плотным.

Необходимо отметить следующие свойства построенных макромоделей:

1. По макромоделю могут быстро вычисляться частотные характеристики схемы, она может использоваться для ее оптимизации;
2. По матрице макромоделю интерполяционным методом могут вычисляться собственные значения матрицы модели, определяющие собственные резонансные частоты схемы, ее устойчивость и запас устойчивости, длительность переходного процесса.

Эффективность полученной макро модели проявляется в процессе ее построения, но проигрывает в эффективности ее использования по сравнению с макро моделью схемы, построенной в расширенном однородном координатном базисе.

Список литературы

1. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук Борисов Н.И. «Исследование и разработка методов снижения размерности и трудоемкости задач анализа и оптимизации линейных эквивалентных электрических схем на основе макро моделирования в САПР», 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования», МИЭМ, Москва, 1996. – 207 с.
2. Борисов Н. И. «Некоторые аспекты макро моделирования объектов с распределенными параметрами» // Межвуз. сб. науч. трудов: Теория, математическое моделирование и САПР ОИС СВЧ. – М.: Изд. МИЭМ, 1991. – С. 83–86.
3. Борисов Н.И., Шрамков И.Г. «Метод построения фазовых макро моделей линейных эквивалентных схем» // Математическое моделирование в САПР: Межвуз. сборник науч. трудов. – М.: Изд. МИЭМ, 1990. – С. 169 –178.
4. Уилкинсон Дж.Х. Алгебраическая проблема собственных значений. – М.: Наука, 1970 – 564 с.
5. Кублановская В. Н., Михайлов В. Б., Хазанов В. Б. К проблеме собственных значений нерегулярной λ -матрицы. – Зап. научн. сем. «ЛОМИ», Ленинград, 1976, том 58. – С. 80–92.
6. Борисов Н. И., Кожевников А.М., Олейник А.В. Разработка методов блочно-иерархической редукции динамических моделей для обеспечения качества продукции на этапе проектирования. – М.: МИЭМ, 2003. – 45 с.

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2014 году.

The study was implemented in the framework of the Basic Research Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE) in 2014.

*Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики
Статья поступила 12.07.2014.*

Borisov N.I., Malina A.S., Vostrikov A.V., Kravchenko N.P.

Development of a method of reduction of the equivalent model of a linear electric circuit built in a homogeneous coordinate basis

This article discusses a method of constructing macromodels of linear electrical equivalent circuits in a homogeneous coordinate basis. Here is described in details the method of inversion of a polynomial matrix of the second degree, which is the base of the construction of the macromodel. The method can significantly reduce the complexity of building macromodels of circuits containing a large number of inductive elements, and their matrix are close to dense.

Key words: linear electrical equivalent circuits macrosimulations, handling a high degree of a polynomial matrix, analysis of the model, the homogeneous coordinate basis, CAD.

National Research University Higher School of Economics

АВТОРЫ НОМЕРА

ВНИМАНИЕ! ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

«ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ»

Объединенный каталог «Пресса России» агентства «Книга-Сервис»

10362 – полугодовой индекс. Через редакцию – (на любой срок) по тел.: 8-985-134-4367.

Балюк Николай Васильевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, balyknwwa@mail.ru.

Борисов Николай Иванович, д.т.н., профессор каф. ИТАС НИУ ВШЭ, тел.: 8-905-580-44-96; borisov@itas.miem.edu.ru.

Востриков Александр Владимирович, к.т.н., старший преподаватель каф. ИТАС НИУ ВШЭ, тел.: 8-926-566-3550; avostrikov@hse.ru.

Дмитриева Наталия Юрьевна, младший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Дубровин Евгений Александрович, к.т.н., начальник НИЦ, заместитель начальника института по научно-испытательной работе ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Иванов Илья Александрович, к.т.н., старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», тел. +7(926)383-07-40, i.ivanov@hse.ru.

Кечиев Леонид Николаевич, д.т.н., профессор каф. РЭТ НИУ ВШЭ, kln1940@gmail.com.

Кравченко Наталья Павловна, к.т.н., доцент каф. РЭТ НИУ ВШЭ, nkravchenko@hse.ru.

Крохалев Дмитрий Иванович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, kroha-68@mail.ru.

Купцов Николай Михайлович, ведущий инженер отдела реализации испытаний по ЭМС и обеспечения стойкости к спецвоздействиям, ОАО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», nkupcov@rti-mints.ru, тел. 8-495-612-99-99, доб.2363.

Малина Анна Сергеевна, аспирант каф. ИТАС НИУ ВШЭ, тел.: 8-916-511-54-62; malinaannn@yandex.ru.

Митрохин Валерий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность» Омского государственного университета путей сообщения, e-mail: mitrokhin@list.ru.

Михеев Вячеслав Алексеевич, к.т.н., ОАО «Инженерно-маркетинговый центр Концерта «Вега», тел. (499) 155-43-03, mikheev@imc-vega.ru.

Назаров Игорь Васильевич, к.т.н. НИУ ВШЭ, доцент, E-mail: inazarov@hse.ru.

Нефедов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор НИУ ВШЭ, профессор, тел. 926-603-43-48, 6034348@mail.ru.

Николаев Павел Александрович, д.т.н., ОАО «АВТОВАЗ», Отдел исследований электромагнитной совместимости, главный специалист, тел. 8-917-1224690, пра690@yandex.ru.

Пилков Александр Валерьевич, начальник комплексного отдела ЭМС РЭС и обеспечения стойкости к спецвоздействиям, ОАО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», apilkov@rti-mints.ru, тел. 8-495-612-99-99, доб. 1116.

Полесский Сергей Николаевич, к.т.н., доцент, НИУ «Высшая школа экономики», тел. +7(926)563-70-04, spolessky@hse.ru.

Польянов Валерий Валерьевич, аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность» Омского государственного университета путей сообщения, инженер отдела эксплуатации электросвязи Новосибирской дирекции связи Центральной станции связи – филиала ОАО «РЖД», тел. +7-965-990-4000, polyanovvv@wsg.ru.

Пыж Александр Викторович, старший инженер-испытатель ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Радомский Андрей Николаевич, ведущий инженер отдела ЭМС РЭС и обеспечения стойкости к спецвоздействиям, ОАО «Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца», тел. 8-495-612-99-99, доб.2363, aradomskiy@rti-mints.ru.

Семин Валерий Григорьевич, д.т.н., профессор НИУ ВШЭ, 8-915-215-1333, semin_valeriy@mail.ru.

Сидорюк Павел Александрович, к.т.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Симонов Валентин Павлович, д.т.н., с.н.с., Координатор Научного фонда НИУ ВШЭ по направлению «Физика, новые материалы и электроника» НИУ ВШЭ, профессор, vsimonov@hse.ru.

Тихонов Александр Николаевич, академик РАО, д.т.н., профессор, директор, научный руководитель МИЭМ, Национальный исследовательский университет «ВШЭ», тел. +7(495) 917-9089, atikhonov@hse.ru.

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», тел. +7-903-203-0503, s.uvaysov@hse.ru.