АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ СТРУКТУРНОЙ ИНФОРМАЦИИ
(Вычислительные системы)
1981 год Выпуск 85

УДК 681.3(0.75)

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ ПРИСОЕДИНЕННОЙ СХЕМЫ И ТЕОРЕМЫ О КОМПЕНСАЦИИ

В.В. Крутяков

Анализ чувствительности является необходимым этапом при проектировании радиоэлектронной аппаратуры, так как его результаты позволяют выяснить такие характеристики устройства, как точность и надежность.

В данной статье описывается построение алгоритма анализа чувствительности, основанного на использовании свойств присоединенной схемы и известной в теории цепей теоремы о компенсации. Предлагаемый алгоритм достаточно прост и экономичен и обладает весьма полезной для проектировщика наглядностью, позволяющей определить, чем обусловлена та или иная величина коэффициента чувствительности.

Применение теоремы о компенсации и линейных соотношений между токами и напряжениями [1] позволяет определить зависимость между приращением проводимости j-й ветви (Δy_j) и приращением напряжения i-й ветви (ΔV_i) в виде:

$$\Delta V_i = V_i - V_{i0} = -\frac{\Delta y_j \, z_{ij}}{1 + \Delta y_j \, z_{jj}} V_{j0}, \qquad (1)$$

где z_{jj} и z_{ij} - соответственно входные и взаимные сопротивления схемы, V_{j0} (V_{i0}) - напряжение j-й (i-й) ветви при $\Delta y_j = 0$. При выводе данного соотношения не накладывалось каких-либо ограничений на величину Δy_j. В случае нелинейных схем можно провести их линеаризацию в рабочей точке и использовать (1) для малых вариаций Δy_j.

Для применения данного соотношения при анализе чувствительности, очевидно, необходимо знать элементы матрицы полных входных и взаимных сопротивлений z. Наиболее часто при проектировании радиоэлектронной аппаратуры стоит задача определения вектора коэффициентов чувствительности в виде $S = \left\{\dfrac{\partial V_i}{\partial y_j}\right\}$, $j=\overline{1,m}$, и поэтому интерес представляют не все элементы матрицы $\underline{Z}$, а только элементы i-й строки $\underline{Z}_i = \{z_{ij}\}$, $j = \overline{1,m}$. Если вычислять взаимные сопротивления в соответствии с их определением [I], то потребуется m анализов исходной схемы, что существенно скажется на трудоемкости метода. Эффективность применения (I) можно повысить, используя свойства присоединенной схемы.

В соответствии с [I] матрицы входных и взаимных сопротивлений для соответственно исходной Q и присоединенной $\hat{Q}$ схем вычисляются следующим образом:

$$\underline{Z} = \underline{A}^T \underline{Y}_y^{-1} \underline{A}, \tag{2,а}$$

$$\hat{\underline{Z}} = \hat{\underline{A}}^T \hat{\underline{Y}}_y^{-1} \hat{\underline{A}}, \tag{2,б}$$

где $\underline{A}$ ($\hat{\underline{A}}$) - матрица инциденций схемы Q ($\hat{Q}$); $\underline{Y}_y$ ($\hat{\underline{Y}}_y$) - матрица узловых проводимостей схемы Q ($\hat{Q}$).

Согласно определению и свойствам присоединенной схемы [2], справедливы соотношения $\hat{\underline{A}} = \underline{A}$ $\hat{\underline{Y}}_y = \underline{Y}_y^T$, откуда следует $\hat{\underline{Z}} = \hat{\underline{A}}^T \hat{\underline{Y}}_y^{-1} \underline{A} = \underline{A}^T (\underline{Y}_y^T)^{-1} \underline{A}$. Проводя дальнейшие преобразования, получаем: $\underline{A}^T (\underline{Y}_y^T)^{-1} \underline{A} = (\underline{Y}_y^{-1} \underline{A})^T \underline{A} = [\underline{A}^T (\underline{Y}_y^{-1} \underline{A})]^T = \underline{Z}^T$.

Отсюда видно, что матрица полных и взаимных сопротивлений $\hat{\underline{Z}}$ присоединенной схемы совпадает с транспонированной матрицей полных и взаимных сопротивлений $\underline{Z}$ исходной схемы, т.е.:

$$\hat{\underline{Z}} = \underline{Z}^T. \tag{3}$$

В соответствии с (3) вектор-строка ($\underline{Z}_i = \{z_{ij}\}$, $j=\overline{1,m}$) матрицы $\underline{Z}$ совпадает с вектор-столбцом ($\hat{\underline{Z}}_j = \{\hat{z}_{ji}\}$, $j = \overline{1,m}$) матрицы $\hat{\underline{Z}}$. Последний может быть получен в результате однократного анализа схемы. Для этого в присоединенной схеме удаляются все источники (источники э.д.с. закорачиваются, а источники тока разрываются) и к i-й ветви подключается пробный единичный источник тока $\hat{J}_i = 1$. Тогда напряжения в j-х ветвях ($\hat{V}_j$, $j = \overline{1,m}$) равны искомым взаимным сопротивлениям, так как

$$\hat{V}_j = \hat{z}_{ji} \hat{J}_i. \tag{4}$$

Вычисление коэффициентов чувствительности согласно (I) удобнее вести в полулогарифмическом масштабе, полагая относительное изменение проводимости j-й ветви фиксированным и равным I% (δy_j = = I%). Тогда расчетное соотношение принимает вид:

$$S = \frac{\partial V_i}{\partial \ln y_j} = - \frac{z_{ij}}{100/y_j + z_{jj}} \; V_{j0} . \tag{5}$$

Структура соотношения (5), выражающего чувствительность изменений напряжения i-й ветви к изменению проводимости j-й ветви через собственную проводимость, входные и взаимные сопротивления, дает возможность разработчику более разумно подойти к проектированию электронной схемы, т.е. к выбору ее топологии, типа и номиналов элементов.

Теперь дадим схему алгоритма.

I-й шаг. Анализируем исходную схему Q и определяем напряжения в варьируемых ветвях V_j, $j = \overline{1,m}$.

2-й шаг. Строим присоединенную схему $\hat{Q}$ и на выходе схемы подключаем единичный источник тока ($\hat{J}_i = 1$), удаляя все остальные источники.

3-й шаг. Анализируем схему $\hat{Q}$ и определяем напряжения $\hat{V}_j$, $j = \overline{1,m}$.

4-й шаг. Используя (3) и (4), определяем элементы вектор-строки $\underline{Z}_i = \{z_{ij}\}$, $j = \overline{1,m}$.

5-й шаг. В соответствии с (5) рассчитываем искомые коэффициенты чувствительности.

В заключение отметим, что соотношение (5) в некоторых случаях позволяет снизить трудоемкость вычислений многопараметрической чувствительности. Так, если при составлении модели схемы Q строится матрица инциденций, то матрицу $\underline{Z} = \|z_{ij}\|$ можно получить, используя соотношение (2,а). В этом случае достаточно однократного анализа исходной схемы, в результате которого определяется необходимая обратная матрица $\underline{Y}_y^{-1}$. Если при анализе схемы используется LU-разложение ($\underline{Y}_y = \underline{LU}$), не требующее обращения матрицы $\underline{Y}_y$, то обратную матрицу $\underline{Y}_y^{-1}$ можно сравнительно легко определить, используя соотношение [3] $\underline{Y}_y^{-1} = \underline{U}^{-1}\underline{L}^{-1}$.

Литература

I. ИОНКИН П.А., МИРОНОВ В.Г. Теоретические основы электротехники. -М.: Высшая школа, 1976. - 544 с.

2. ЧУА Л.О., ПЕН-МИН ЛИН. Машинный анализ электронных схем. -М.: Энергия, 1980. - 640 с.

3. ДАНИЛИНА Н.И., ДУБРОВСКАЯ Н.С. Численные методы. - М.: Высшая школа, 1976. - 480 с.

Поступила в ред.-изд.отд.
10 октября 1980 года