

Р. А. АМИРИКЯН

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА МАТРИЦ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

1. Матричные методы записи широко используются для описания электрических схем. В частности используются матрицы Y , I , Z и U уравнений узловых напряжений и контурных токов электрических схем. Для расчета и записи элементов этих матриц используются схемы замещения или графы в сочетании с некоторыми правилами, выработанными из определенного соответствия между структурой схемы и соответствующими матрицами. Эти правила оказываются легко реализуемыми в случае схемы с относительно небольшим числом узлов и контуров. В случаях схем сложной конфигурации, с числом узлов и контуров, достигающих нескольких десятков и сотен, возникает практическая необходимость автоматизации расчета и записи матриц этих уравнений [1-4]. В настоящей работе рассматривается задача автоматизации расчета и записи матрицы Z -уравнений контурных токов сложных электрических схем по заданной информации о системе в виде таблиц перечня ее присоединений (генераторов, трансформаторов, линий электропередач, нагрузок и т. д.) и их параметров. При этом не требуется построения схемы замещения. Отметим, что процесс нумерации узлов схемы производится ЭЦВМ. Отметим также, что расчет ведется без составления соответствующей матрицы совпадений и без предварительного приведения параметров схемы к одной, базисной ступени напряжения, т. к. коэффициенты трансформаций, отличные от единицы, учитываются в процессе расчета элементов матрицы Z . Основные положения предлагаемого метода сводятся к представлению исследуемой схемы и ее параметров в форме таблиц, удобных для ввода в ЭЦВМ: кодированию ЭЦВМ узлов элементов схемы; выбору ЭЦВМ главных ветвей дерева и соответствующих им независимых контуров схемы; автоматизации расчета и записи элементов матрицы Z уравнений контурных токов, с учетом коэффициентов трансформаций, отличных от единицы.

2. В качестве заданных принимаются: таблица перечня элементов системы с указанием взаимных связей их узлов; параметры z и соответствующие коэффициенты трансформации элементов системы. Требуется формировать матрицу Z уравнений контурных токов исследуемой системы, без использования для этой цели схемы замещения или ее графа. Требуется также учитывать коэффициенты трансформаций, отличные от

единицы. При решении поставленной задачи используются обычные условия представления схем электрических сетей с помощью уравнений контурных токов.

3. Исходные данные для расчета Z параметров уравнений контурных токов вводятся в ЭЦВМ в виде таблиц. Одна из них заменяет схему сети, а вторая представляет сопротивления ее отдельных элементов и соответствующие коэффициенты трансформаций. Формы заполнения таких таблиц приведены в [4]. На базе этих таблиц производится автоматизация процесса кодирования элементов и выбора информации о кодах и параметрах отдельных элементов системы. Алгоритм подпрограммы этой задачи приведен в [4]. Выбор главных ветвей дерева и соответствующих им независимых контуров производится согласно программе, алгоритмы которой описаны в [1]. Ниже приводится алгоритм программы расчета и записи элементов матрицы Z -уравнений контурных токов, с учетом коэффициентов трансформаций, отличных от единицы.

4. Математической основой формирования Z параметров уравнений контурных токов является свойство этой матрицы, заключающееся в следующем: полное сопротивление контура равно сумме сопротивлений ветвей, составляющих данный контур, а взаимное сопротивление — сумме сопротивлений ветвей, являющихся общими для рассматриваемых контуров. При этом, сопротивлениям ветвей, являющихся общими, присваиваются знаки $+$ или $-$, в зависимости от совпадения или несовпадения направлений контурных токов в них. В предлагаемом алгоритме не используются формулы [1 - 3]

$$Z = CZ.C, \quad \text{или} \quad z_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ijk}z_k,$$

требующие составления матрицы совпадений C . Однако, требуется составление таблицы, заменяющей такую матрицу. Строки этой таблицы (табл. 1) представляют независимые контуры, в столбцах которых записаны как норма ветвей, входящих в данный независимый контур, так и признаки направления этих ветвей. Столбцы с нечетными номерами представляют номера ветвей. Первый столбец представляет номера главных ветвей дерева.

Таблица 1

№ ветвей	Признаки направления	№ ветвей	Признаки направления	№ ветвей	Признаки направления
1	2	3	4	$m-1$	m

Столбцы с четными номерами представляют признаки направления соответствующих ветвей. Положительным направлением ветви принято направление от узла с меньшим номером к узлу с большим номером. Направление главной ветви дерева принимается как положительное направление контура — направление обхода контура. При совпадении положительного направления ветви с направлением обхода контура, ей при-

писывается положительный признак, что отмечается индексом «0». При несовпадении этих направлений, ветви приписывается отрицательный признак, что отмечается индексом «1». Отметим, что в одной неполной ячейке записываются номера двух ветвей данного контура и признаки направления этих ветвей. Последние записываются в разрядах, выделенных для регистрации знака и полноты ячейки.

Таким образом, предлагаемый алгоритм формирования матрицы Z уравнений контурных токов можно представить следующей формулой

$$z_{ij} = \sum_{\beta} (\pm z_{\beta}^i) \text{ при } \beta_{ik} = \beta_{jl}$$

где

i, j — номера строк табл. 1, совпадающие соответственно с номерами строк и столбцов матрицы Z . $i=1-n$ и для каждого i $j=i-n$, где n — число строк табл. 1, т. е. число независимых контуров:

β — номер ветви;

z_{β} — сопротивление ветви β , с учетом соответствующих коэффициентов трансформаций;

k, l — нечетные номера столбцов табл. 1: $k=1, 3, 5, \dots, (m-1)$ и для каждого k $l=1, 3, 5, \dots, (m-1)$, где m — число столбцов соответствующих строк табл. 1. Отметим, что для случаев $i=j$ индекс l превращается в индекс k , т. е. $l=k$;

β_{ik}, β_{jl} — номер ветвей, записанных в клетках ik или jl табл. 1. z_{β} берется со знаком $+$, если имеет место следующее равенство $\gamma_{l, k-1} = \gamma_{j, i-1}$, в противном случае z_{β} берется со знаком $(-)$. Здесь через γ обозначены признаки направлений ветвей (0° или 180°) и, следовательно, $\gamma_{l, k-1}$ и $\gamma_{j, i-1}$ представляют признаки направлений ветвей, номера (β) которых записаны соответственно в клетках ik и jl табл. 1.

Учет коэффициентов трансформаций при формировании матрицы Z уравнений контурных токов, позволяющий вести расчеты без предварительного приведения параметров схемы к одной базисной ступени напряжения, осуществляется следующим образом. Обозначим через m и k номера узлов ветвей, в которых содержится элемент трансформации. Принимая, что $m < k$ и коэффициенты трансформаций n определяются как $n = \frac{w_k}{w_m}$ для схемы рис. 1, можно написать следующие уравнения контурных токов:

$$U_1 = I_1 z_1 + I_1 z_{11} + \left(I_1 \frac{1}{n_1} + I_2 n_2 \right) z_2 \frac{1}{n_1} + \left(I_1 \frac{1}{n_1} z_3 \right) \frac{1}{n_2} + \left(I_1 \frac{n_2}{n_1} z_{31} \right) \frac{n_2}{n_1};$$

$$U_2 = I_2 z_1 + (I_2 n_2 z_{11}) \cdot n_2 + \left(I_2 n_2 + I_1 \frac{1}{n_1} \right) z_2 n_2 + (I_2 n_2 z_3) n_2;$$

или

$$U_1 = I_1 \left(z_1 + z_{11} + z_2 \frac{1}{n_1^2} + z_3 \frac{1}{n_1^2} + z_{31} \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) + I_2 z_2 \frac{n_2}{n_1} = I_1 z_{1,1} + I_2 z_{2,1};$$

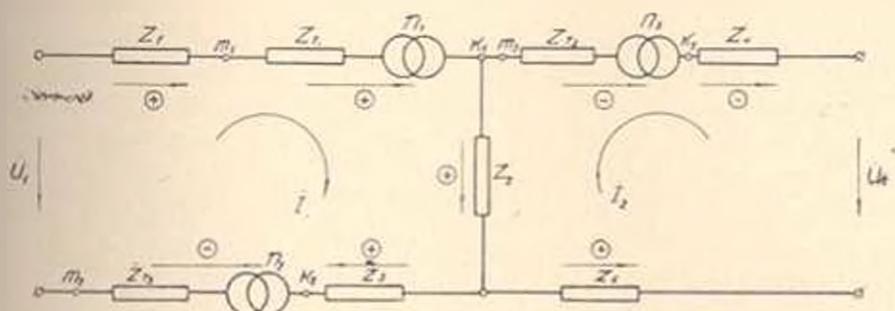


Рис. 1. Стрелки указывают положительное направление ветвей и контуров. Знаки + и - показывают при знаки направления соответствующих ветвей.

$$L^1_2 = I_1 x_1 \frac{n_2}{n_1} + I_2 (z_4 + z_{13} n_1^2 + z_2 n_1^2 + z_3 n_1^2) = I_1 z_{2,1} + I_2 z_{2,2}$$

где

$$z_{2,1} = z_1 + z_{11} + z_2 \frac{1}{n_1^2} + z_3 \frac{1}{n_1^2} + z_{12} \frac{n_2^2}{n_1^2};$$

$$z_{2,2} = z_4 + z_{13} n_1^2 + z_2 n_1^2 + z_3 n_1^2; \quad z_{1,2} = z_{2,1} = z_2 \frac{n_2}{n_1}.$$

Обобщая полученные выражения z_{ij} и имея в виду, что обход контура начинается с главной ветви дерева, можно сформулировать следующие правила:

1. При расчете собственного сопротивления контура, сопротивление ветви, содержащей элемент трансформации, в случае положительного признака направления остается без изменения. Сопротивления всех последующих ветвей данного контура необходимо умножить на коэффициент $\frac{1}{n^2}$. В случае отрицательного признака направления сопротивление как данного, так и всех последующих элементов необходимо умножить на коэффициент n^2 .

2. При расчете взаимного сопротивления между двумя отдельными контурами, предыдущее правило остается в силе, только коэффициенты $\frac{1}{n^2}$ и n^2 заменяются соответственно коэффициентами $\frac{1}{n}$ и n , обусловленные элементами трансформации обоих рассматриваемых контуров.

Алгоритм и построенная на его основе программа учитывают симметричность матрицы Z . Основное отличие алгоритма и программы от существующих заключается в их рациональности с точки зрения вычислительных операций, а также в том, что не требуется предварительной подготовки схемы замещения сети и нумерации ее узлов, так как она производится ЭЦВМ. Программа составлена для ЭЦВМ «Урал-3». Внешние устройства машины в программе не используются. Предусмотрена возможность записи результатов расчета на магнитный барабан, с целью эквивалентирования Z -параметров уравнений контурных токов в многополюсник. Отметим, что генераторные и нагрузочные ветви,

которые согласно алгоритму и составленной на его основе программе выбираются как главные ветви дерева, представляются первыми номерами матрицы Z уравнений контурных токов, что облегчает задачу эквивалентирования полученных результатов в соответствующий многополюсник. Программа предусматривает возможность прерывания счета с запоминанием промежуточных результатов и вывода их на печать. Программа расчета и записи Z параметров уравнений контурных токов с выдачей результатов на печать занимает 320 неполных ячеек. Объем решаемой задачи ориентировочно определяется по выражению

$$(N - n) \frac{M}{8} + 9N - 4n < 3760,$$

где N — число ветвей, а n — число узлов схемы сети.

Проверка программы производилась на ряде примеров конкретных энергосистем с числом узлов до 15 и ветвей 83. Время счета, с учетом времени, потраченного на ввод перфокарт и выдачу результатов на печать, для реализованных примеров не превышало трех минут. Для указанных схем были составлены матрицы Z уравнений контурных токов по известным из теории линейных электрических цепей методом построения матричных уравнений схем. Кроме того, по полученным матрицам Z и Y одной и той же схемы были найдены параметры Z и Y эквивалентного многополюсника и произведены обращения матриц Z и Y , что дало совпадающие результаты.

Программа, составленная на основе предлагаемого алгоритма, может быть использована в ряде задач электроэнергетики и в частности, в расчетах установившегося режима электрических сетей, токов коротких замыканий, динамической устойчивости энергосистем, оптимизации режимов энергосистем.

АрмНИИЭ

Поступило 28.III.1969.

Ռ. Ա. ԱՄԻՐԺՅԱՆ

ՄԵԿԵՄԵՆԵՐԻ ՀԱՊԱՍՏԱՐՈՒԹՅՆԵՐԻ ԻՋԱՏԻՑԱԿՆԵՐԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑ-
ՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒԲՋԻ

Ա. Վ. Փ. Ա. Փ. Ո. Ի. Վ.

Իրավում է բարդ էլեկտրական համակարգերի կոնստրուկցիոն հոսանքների Z -պարամետրների հաշվման ավտոմատացման խնդիրը բազ համակարգի սխեմայի և նրա առանձին միացումների պարամետրների մասին համապատասխան աղյուսակների տեսքով արված ինֆորմացիայի: Ընդ որում չի պահանջվում հատուցել համակարգի փոխարինման սխեման կամ նրա պահիլիկոսիֆիմը և նրա չիման վրա կազմած ծրագիրը հաշվի են առնում տրանսֆորմացիայի էլեմենտ պարունակող յուրաքանչյուր ճյուղի տրանսֆորմացիայի գործակիցը: Ուրալ-3 էլեկտրոնային հաշվիչ մեքինայի համար կազմած ծրագիրը իրացվել է մի շարք գործող էներգահամակարգի սխեմաների օրինակների վրա՝ ստացյալնար սեմիմեների հաշվման խնդիրներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адоиц Г. Т., Амирян Р. А. Алгоритм записи уравнений контурных токов сложных электрических систем. "Электричество", № 12, 1966.
2. Горушкин В. И., Латчинова Т. С. и Трусова Л. А. Формирование матриц коэффициентов уравнений пассивных электрических сетей. "Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт", № 3, 1966.
3. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. "Энергия", 1968.
4. Адоиц Г. Т., Амирян Р. А. Алгоритмы записи уравнений узловых напряжений сложных электрических систем. "Электричество", № 3, 1966.