

Л. Ф. КУЛИКОВСКИЙ, М. Я. ЛИХТЦИНДЕР

(Куйбышев)

### КВАЗИАНАЛОГОВОЕ УСТРОЙСТВО СОВОКУПНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Проводится сравнительный анализ счетно-решающих устройств, предназначенных для решения систем линейных алгебраических уравнений. Описывается квазианалоговая модель, используемая при определении концентрации компонентов смеси *серная кислота — азотная кислота — вода*.

В измерительной технике большое распространение получили автоматические устройства, определяющие одновременно несколько неизвестных величин через функционально связанные с ними другие величины, более просто поддающиеся измерению. Метод осуществления такого рода измерений принято называть совокупным.

В ряде случаев зависимость неизвестных и измеряемых величин выражается в виде систем линейных уравнений. Поэтому при создании измерительных систем, осуществляющих метод совокупного измерения, возникает необходимость в счетно-решающих устройствах, определяющих корни систем линейных алгебраических уравнений.

Как известно, решение систем линейных алгебраических уравнений может быть осуществлено цифровыми или аналоговыми средствами. Цифровые устройства обеспечивают большую точность решения, но они более сложны. Аналоговые устройства проще цифровых. Однако с помощью элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$  аналоговыми средствами могут быть решены лишь системы линейных алгебраических уравнений с симметричной матрицей коэффициентов, так как система уравнений первого закона Кирхгофа, описывающих любую  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -цепь, имеет симметричную матрицу коэффициентов.

Системы линейных алгебраических уравнений с произвольной матрицей коэффициентов могут решаться с помощью операционных усилителей, трансформаторов, а также электромеханических счетно-решающих устройств. Однако количество операционных усилителей, из которых состоят аналоговые модели, достаточно велико. Как правило, оно больше числа неизвестных в системе уравнений [1].

Для создания трансформаторных моделей требуются идеальные трансформаторы, реализация которых весьма затруднительна [1].

Электромеханические счетно-решающие устройства обладают малым быстродействием и недостаточной надежностью из-за наличия подвижных частей. Кроме того, они весьма усложняются с увеличением числа неизвестных в системе уравнений [2]; при этом неизбежны большие затруднения, связанные с обеспечением устойчивости модели.

В автоматических приборах, осуществляющих совокупные измерения, нашли применение счетно-решающие устройства, механизмирующие результаты аналитического расчета [3, 4]. В этом случае система алгебраических уравнений решается аналитически по правилу Крамера и все неизвестные выражаются в виде линейной комбинации независимых переменных. Каждая из таких зависимостей реализуется с помощью усилителей, сумматоров, знакоинверторов, множительных и делительных устройств. Если при этом решение осуществляется с помощью операционных усилителей, то в общем случае их число может быть больше количества неизвестных в решаемой системе уравнений. Кроме того, известную трудность представляет раскрытие определителей высоких порядков при подготовке задачи. Указанные факторы в конечном счете снижают точность результатов переработки информации.

В последние годы была разработана теория квазианалогового моделирования [5]. Квазианалоговые модели в большинстве случаев являются наиболее простыми

устройствами для решения систем линейных алгебраических уравнений с произвольной матрицей коэффициентов. Некоторые квазианалоговые модели 1-го рода для своей реализации вообще не требуют ни усилителей, ни трансформаторов. Однако при этом точность решения не всегда оказывается

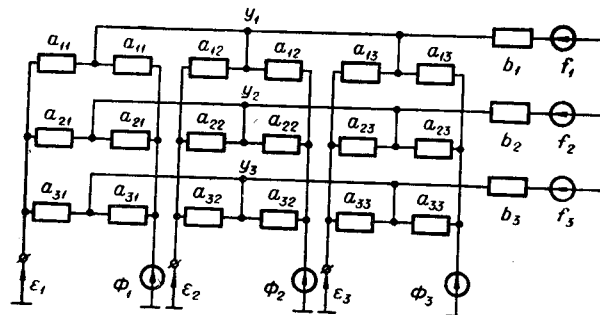


Рис. 1.

удовлетворительной. Автоматизированные квазианалоговые модели 2-го рода, как правило, содержат операционные усилители по числу неизвестных и обеспечивают вполне приемлемую точность решения.

Рассмотрим для примера одно из таких устройств, называемое сигма-аналоговой моделью (рис. 1). Система уравнений 1-го закона Кирхгофа для этой цепи имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}
 y_1 \beta_1 + y_2 0 + y_3 0 + \varepsilon_1 a_{11} + \varepsilon_2 a_{12} + \varepsilon_3 a_{13} &= b_1 f_1 - \Phi_1 a_{11} - \\
 &\quad - \Phi_2 a_{12} - \Phi_3 a_{13}; \\
 y_1 0 + y_2 \beta_2 + y_3 0 + \varepsilon_1 a_{21} + \varepsilon_2 a_{22} + \varepsilon_3 a_{23} &= b_2 f_2 - \Phi_1 a_{21} - \\
 &\quad - \Phi_2 a_{22} - \Phi_3 a_{23}; \\
 y_1 0 + y_2 0 + y_3 \beta_3 + \varepsilon_1 a_{31} + \varepsilon_2 a_{32} + \varepsilon_3 a_{33} &= b_3 f_3 - \Phi_1 a_{31} - \\
 &\quad - \Phi_2 a_{32} - \Phi_3 a_{33}; \\
 y_1 a_{11} + y_2 a_{21} + y_3 a_{31} + \varepsilon_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 0 + \varepsilon_3 0 &= 0; \\
 y_1 a_{12} + y_2 a_{22} + y_3 a_{32} + \varepsilon_1 0 + \varepsilon_2 \alpha_2 + \varepsilon_3 0 &= 0; \\
 y_1 a_{13} + y_2 a_{23} + y_3 a_{33} + \varepsilon_1 0 + \varepsilon_2 0 + \varepsilon_3 \alpha_3 &= 0,
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= -(a_{11} + a_{21} + a_{31}); & \alpha_2 &= -(a_{12} + a_{22} + a_{32}); \\
 \alpha_3 &= -(a_{13} + a_{23} + a_{33});
 \end{aligned}$$

$$\beta_1 = -(b_1 + 2a_{11} + 2a_{12} + 2a_{13}); \quad \beta_2 = -(b_2 + 2a_{21} + 2a_{22} + 2a_{23});$$

$$\beta_3 = -(b_3 + 2a_{31} + 2a_{32} + 2a_{33}).$$

Если подобрать значения потенциалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , при которых  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  обратятся в нули (а это всегда возможно), то потенциалы  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$  тоже станут равными нулю (см. последние 3 уравнения системы (2)). Такой процесс называется уравниванием квазианалоговой модели.

После уравнивания система уравнений (1) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 a_{11} + \Phi_2 a_{12} + \Phi_3 a_{13} &= b_1 f_1; \\ \Phi_1 a_{21} + \Phi_2 a_{22} + \Phi_3 a_{23} &= b_2 f_2; \\ \Phi_1 a_{31} + \Phi_2 a_{32} + \Phi_3 a_{33} &= b_3 f_3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Таким образом, с помощью рассмотренной электрической цепи решается система линейных алгебраических уравнений с произвольной матрицей коэффициентов. При этом неизвестные моделируются потенциалами  $\Phi_i$ , коэффициенты уравнений — проводимостями  $a_{ik}$ , правые части уравнений — токами  $b_i f_i$ .

Так как при выполнении условия уравнивания модели напряжения между узлами  $y$  и  $\varepsilon$  равны нулю, то точность реализации проводимостей ветвей между этими узлами не влияет на результат решения системы уравнений.

Процесс уравнивания квазианалоговой модели может быть легко автоматизирован. Для этого достаточно убрать источники напряжения  $\Phi$  и вместо них включить между точками  $\varepsilon_i$  и  $\Phi_i$  усилители, имеющие большой отрицательный коэффициент усиления.

Рассмотрим измерительную систему для определения состава раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—HNO}_3\text{—H}_2\text{O}$ , в которой в качестве устройства переработки информации используется квазианалоговая модель (рис. 2).

Зависимость концентрации компонентов тройной системы *серная кислота — азотная кислота — вода* от электропроводности и плотности раствора выражается следующей системой линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_1 A_{11} + x_2 A_{12} + x_3 A_{13} &= A_{см_1}; \\ x_1 A_{21} + x_2 A_{22} + x_3 A_{23} &= A_{см_2}; \\ x_1 + x_2 + x_3 &= 100, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — концентрация  $i$ -го компонента;

$A_{1i}$  — электропроводность чистого  $i$ -го компонента;

$A_{2i}$  — плотность чистого  $i$ -го компонента;

$A_{см_1}$  — электропроводность смеси;

$A_{см_2}$  — плотность смеси.

Схематическое изображение измерительной системы, реализующей систему уравнений (3), представлено на рис. 2.

Исследуемый раствор через трубы  $A$  поступает одновременно в два сосуда, имеющих тепловую изоляцию, затем, переливаясь через край стакана, вытекает через трубы  $B$ . Такая конструкция обеспечивает малые изменения уровней жидкости в стаканах.

Плотность раствора измеряется с помощью двух поплавковых датчиков, имеющих различные объемы, но одинаковые поперечные сечения

и поверхность, что достигается за счет дополнительных ребер на одном из поплавков. Поплавки при помощи штоков соединены с одинаковыми индуктивными датчиками, входные обмотки которых включены встречно. Это позволяет уменьшить погрешности измерения плотности раствора, возникающие из-за действия динамического напора жидкости, выпадения осадка и незначительного изменения уровня жидкости.

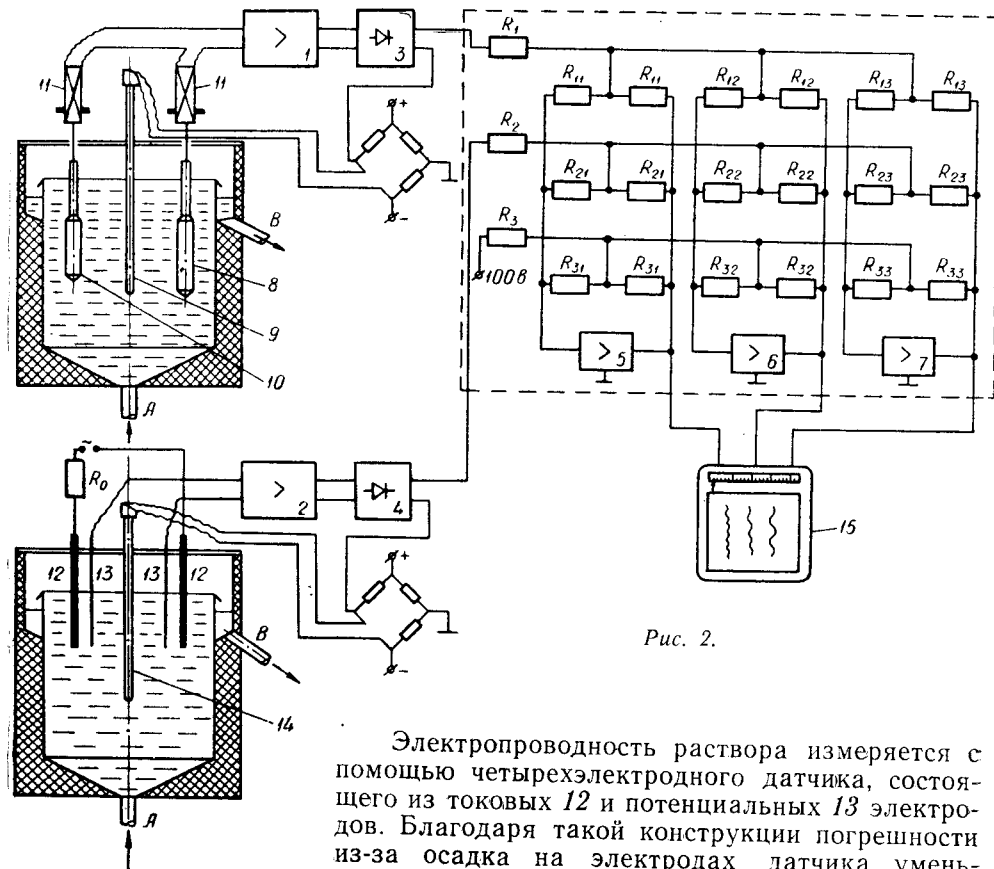


Рис. 2.

Электропроводность раствора измеряется с помощью четырехэлектродного датчика, состоящего из токовых 12 и потенциальных 13 электродов. Благодаря такой конструкции погрешности из-за осадка на электродах датчика уменьшаются.

Напряжения, пропорциональные плотности и электропроводности раствора, усиливаются усилителями 1, 2 и детектируются выпрямителями 3, 4. Температурная компенсация первичных преобразователей осуществляется с помощью термометров сопротивления 9 и соответствующих мостов компенсации. Далее эти напряжения поступают на входы квазианалоговой модели.

Коэффициенты системы уравнений (3) имеют следующие значения:  $A_{11}=0,821$ ;  $A_{12}=0,267$ ;  $A_{13}=2,410$ ;  $A_{21}=1,898$ ;  $A_{22}=1,618$ ;  $A_{23}=0,922$ ;  $A_{см1}=80 \div 75$  (соответствует изменению электропроводности смеси в пределах от 0,080 до 0,075  $ом^{-1} \cdot см^{-1}$ );  $A_{см2}=17,6 \div 18,0$  (соответствует изменению плотности смеси в пределах от 1,76 до 1,80  $г/см^3$ ). Для системы (3) масштабные коэффициенты выбираются равными

$$\Phi_{масш} = f_{масш} = 1в, a_{масш} = b_{масш} = 10 Мом^{-1},$$

а параметры модели —  $R_{11}=121,8 к$ ;  $R_{12}=374,5 к$ ;  $R_{13}=41,5 к$ ;  $R_{21}=52,7 к$ ;  $R_{22}=61,8 к$ ;  $R_{23}=108,5 к$ ;  $R_{31}=R_{32}=R_{33}=R_1=R_3=100 к$ ;

$R_2 = 10$  к. Напряжения источников:  $f_1 = 80 \div 75$  в;  $f_2 = 17,6 \div 18$  в;  $f_3 = 100$  в.

Для автоматизации процесса решения используются стандартные операционные усилители типа УПТ-4 (блоки 5, 6, 7). Напряжения, получаемые на выходах усилителей, численно равны значениям концентраций в процентах компонентов смеси.

К выходу квазианалоговой модели 16 подключается многоточечный автоматический компенсатор постоянного тока 15 типа ЭПП-0,6. Из этого прибора нормальный элемент удаляется, а измерительный мост подключается к выпрямленному напряжению сети. Это позволяет уменьшить погрешности измерительной системы, вызываемые изменением напряжения электрической сети.

Таким образом, при создании измерительных систем, осуществляющих совокупную переработку информации, весьма перспективным является использование квазианалоговых моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Тетельбаум. Электрическое моделирование. М., Физматгиз, 1959.
2. Р. Б. Попов. Автоматический анализ многокомпонентных производственных растворов. (Автореф. канд. дисс.). Киев, 1962.
3. В. И. Скугоров. Анализ многокомпонентных систем физико-химическими методами.— Приборостроение, 1959, № 8.
4. В. Б. Смоллов и др. Вычислительные машины непрерывного действия. М., изд-во «Высшая школа», 1964.
5. Г. Е. Пухов и др. Электрическое моделирование задач строительной механики. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.

*Поступила в редакцию  
2 марта 1965 г.,  
после переработки —  
24 мая 1965 г.*