

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

П. А. МАТЕВОСЯН

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

При построении специализированных аналоговых вычислительных устройств (АВУ), предназначенных для решения систем алгебраических уравнений, в целом ряде случаев, как показывает практика, возникают трудности, связанные с обеспечением их работоспособности. Так, при построении специализированных АВУ, в схемах которых наряду с обратимыми метамеханическими и электромеханическими устройствами используются и необратимые, т. е. устройства направленного действия: самоторирующие червячные пары, следящие системы, кулачковые функциональные блоки и другие, в ряде случаев имеет место завышение [1, 3]. В АВУ, основанных на применении пассивных решающих устройств, в схемах которых используются необратимые операционные усилители постоянного тока, может иметь место неправильное или неустойчивое решение [1, 2, 4].

В статье рассматриваются необходимые условия построения АВУ, предназначенных для решения систем алгебраических уравнений, основанных на использовании как обратимых так и необратимых решающих устройств. Выполненное исследование основывается на работе академика Н. Г. Бруевича [1].

Процесс решения в АВУ осуществляется, как известно, в результате передачи информации* через связи между решающими устройствами. АВУ окажется неработоспособной при несомпадении направления передачи информации в какой-либо связи схемы с расположением в ней устройства направленного действия.

Таким образом, при построении схем АВУ необходимо предварительно выявить направления передачи информации между решающими устройствами.

Исследуемое АВУ может в общем случае содержать n решающих устройств с двумя, тремя и более присоединительными связями.

Система так называемых машинных уравнений, описывающая зависимость между входными и выходными параметрами решающих устройств схемы, в общем виде, может быть представлена так:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, b_i) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

где x_i — машинная переменная, которая может быть напряжением, скоростью, перемещением ($i = 1, 2, \dots, n$); b_i — входной параметр схемы АВУ.

* В статье применены термины «передача информации», а не «энергия», так как в схеме АВУ передаваемая энергия обычно имеет ничтожную величину. Каналы связи между решающими устройствами представляются не энергетическими, а информационными.

При изменении одного или одновременно нескольких выходных параметров на малую величину изменение всех машинных переменных можно будет установить из решения следующей системы линейных уравнений:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 - \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Delta x_2 - \dots - \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n = \frac{\partial f_1}{\partial b_i} \Delta b_i, \quad (2)$$

где Δb_i — приращение входного параметра.

В уравнениях (2) частные производные для случая нелинейных уравнений могут быть переменными коэффициентами, зависящими от машинных переменных исследуемого АВУ.

Корни уравнения (2) могут быть определены с помощью формулы Крамера:

$$\Delta x_i = \left(\sum_{l=1}^n A_{il} \frac{\partial f_l}{\partial b_i} \Delta b_l \right) \frac{1}{A}, \quad (3)$$

где A — определитель системы (2); A_{il} — адьюнкт элемента $a_{il} = \frac{\partial f_l}{\partial x_i}$.

Величину изменения или мощности, передаваемой через ij -ую соединительную связь i -го решающего устройства при изменении входных параметров модели, можно вычислить с помощью формулы:

$$\Delta P_{ij} = F_{ij} \left(\sum_{l=1}^n A_{il} \frac{\partial f_l}{\partial b_i} \Delta b_l \right) \frac{1}{A}, \quad (4)$$

где F_{ij} — величина тока (силы, момента), передаваемого через ij -ую соединительную связь i -го решающего устройства.

С помощью формулы (4) можно установить как знак, так и величину изменения передаваемой энергии (мощности) во всех связях между решающими устройствами схемы АВУ, т. е. установить входы и выходы всех решающих устройств. Однако, для определения направления передачи информации в связях АВУ, достаточно знать только знак ΔP_{ij} . Поэтому, с целью упрощения вычислений, сделаем следующие преобразования. Выделим в схеме исследуемой АВУ соединительную связь i -го решающего устройства, роль которой нужно установить. Разрежем эту связь и заземлим (остановим) вторую, не присоединенную к i -му решающему устройству, половину разрезанной связи, т. е. приравняем к нулю параметр $(x_{ij})'$. Тогда величину изменения $(x_{ij})'$ оставшейся свободной половины связи ij при тех же изменениях входных параметров исследуемого АВУ можно будет установить с помощью формулы:

$$(\Delta x_{ij})' = \left(\sum_{l=1}^n A_{il} \frac{\partial f_l}{\partial b_i} \Delta b_l \right) \frac{1}{a_{ij} A_{il}}, \quad (5)$$

В рассматриваемой преобразованной схеме АБУ величину мощности или энергии $(\Delta P_{ij})'$, передаваемой к нагрузке, подключенной к разрезанной половине связи $(ij)'$, можно будет установить с помощью формулы:

$$(\Delta P_{ij})' = (F_{ij})' \left(\sum_{i=1}^n A_{ij} \frac{\partial f_i}{\partial b_i} \Delta b_i \right) \frac{1}{a_{ij} A_{ij}}, \quad (6)$$

где $(F_{ij})'$ — значение тока (силы, момента), передаваемого в схеме преобразованного АБУ через $(ij)'$ -ую половину связи к подключенной к ней нагрузке.

Аналогично, при условии $(\Delta x_{ij})'' = 0$ и нагружении второй половины разрезанной связи имеем:

$$(\Delta x_{ij})'' = \left(\sum_{i=1}^n A_{ij} \frac{\partial f_i}{\partial b_i} \Delta b_i \right) \frac{1}{A - a_{ij} A_{ij}} \quad (7)$$

и

$$(\Delta P_{ij})'' = (F_{ij})'' \left(\sum_{i=1}^n A_{ij} \frac{\partial f_i}{\partial b_i} \Delta b_i \right) \frac{1}{A - a_{ij} A_{ij}}. \quad (8)$$

Выражения $(\Delta P_{ij})'$ и $(\Delta P_{ij})''$ имеют положительный знак, так как в рассмотренных преобразованных схемах всегда имеет место передача энергии к подключенной нагрузке.

Разделим (6) и (8) на (4). Тогда выражения для определения знака ΔP_{ij} можно представить в виде:

$$\text{sign} \left[\frac{(\Delta P_{ij})'}{\Delta P_{ij}} \right] = \text{sign} \left[\frac{(F_{ij})'}{F_{ij}} \frac{A}{a_{ij} A_{ij}} \right] \quad (9)$$

и

$$\text{sign} \left[\frac{(\Delta P_{ij})''}{\Delta P_{ij}} \right] = \text{sign} \left[\frac{(F_{ij})''}{F_{ij}} \frac{A}{A - a_{ij} A_{ij}} \right]. \quad (10)$$

Если $\text{sign} \left[\frac{(\Delta P_{ij})'}{\Delta P_{ij}} \right] < 0$, то через $(ij)'$ -ую часть присоединительной связи ij информация поступает в i -ое решающее устройство, т. е. эта часть связи является входом i -го решающего устройства. Если же $\text{sign} \left[\frac{(\Delta P_{ij})'}{\Delta P_{ij}} \right] > 0$, то имеем выход. Аналогично, если $\text{sign} \left[\frac{(\Delta P_{ij})''}{\Delta P_{ij}} \right] < 0$, то часть $(ij)''$ является входом и, наконец, если $\text{sign} \left[\frac{(\Delta P_{ij})''}{\Delta P_{ij}} \right] > 0$, то часть $(ij)''$ присоединительной связи ij является выходом.

Применим формулы (9) и (10) к некоторым типам АБУ, построенным на применении механических, электрических и электронных решающих устройств.

Рассмотрим в первую очередь АВУ, построенное на механических решающих блоках. Для применения условий (9) и (10) рассмотрим некоторые особенности механических АВУ.

Если к какой-либо q -ой присоединительной связи i -го решающего устройства, имеющего n степеней свободы, приложена внешняя сила или момент F_{iq} , то, согласно [6], уравнение баланса элементарных работ приведенных сил (моментов) $(F_{ij})_{пр}$ представится в виде:

$$\sum_{j=1}^n (F_{ij})_{пр} \Delta x_j + (F_{ib})_{пр} \Delta b_i = F_{iq} \Delta x_q. \quad (11)$$

Для i -го решающего блока зависимость между изменениями машинных переменных (2) можно представить иначе:

$$\Delta x_q = - \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{a_{iq}} \Delta x_j + \left(\frac{\partial f_i}{\partial b_i} \right) \frac{1}{a_{iq}} \Delta b_i. \quad (12)$$

Подставив полученное значение изменения параметра Δx_q q -ой присоединительной связи (11), получим:

$$\sum_{j=1}^n (F_{ij})_{пр} \Delta x_j + (F_{ib})_{пр} \Delta b_i = - F_{iq} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{a_{iq}} \Delta x_j - F_{iq} \left(\frac{\partial f_i}{\partial b_i} \right) \frac{1}{a_{iq}} \Delta b_i. \quad (13)$$

Согласно [6] и (13) находим соотношения между приведенными силами (моментами):

$$(F_{ij})_{пр} = - F_{iq} \frac{a_{ij}}{a_{iq}}. \quad (14)$$

Для обеспечения равновесия к присоединительным связям рассматриваемого i -го решающего устройства должны быть приложены внешние силы (моменты) F_{iq} , равные по величине и противоположные по направлению ранее найденным приведенным силам (моментам), т. е. согласно (14) можно написать:

$$F_{iq} = F_{ib} \frac{a_{ib}}{a_{iq}}, \quad (15)$$

Уравнение сил (моментов), приложенных к присоединительным частям q -ой связи, можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n F_{iq} = F_{eq}, \quad (16)$$

где F_{iq} — сила (момент), приложенная к q -ой связи через присоединительную связь i -го решающего устройства; F_{eq} — внешняя сила (момент).

С помощью формул (15) и (16) можно установить величины и знаки всех сил и моментов, приложенных к присоединительным связям решающих устройств. Согласно (15) и (16), соотношения сил (моментов) зависят только от a_{ij} . Но значения a_{ij} остаются неизменными и при разрезании отдельных связей, поэтому останутся и неизменными соотношения сил (моментов) при разрезании связи между решающими устройствами и замене внутренней силы (момента) внешней, т. е. можем написать:

$$\operatorname{sign} \left[\frac{(F_{ij})'}{F_{ij}} \right] > 0 \quad \text{и} \quad \operatorname{sign} \left[\frac{(F_{ij})''}{F_{ij}} \right] > 0. \quad (17)$$

Тогда применительно к АВУ, построенным на механических решающих устройствах, (9) и (10) представляются в виде:

$$\operatorname{sign} \left[\frac{(P_{ij})'}{P_{ij}} \right] = \operatorname{sign} \left[\frac{A}{a_{ij} A_{ij}} \right] \quad (18)$$

и

$$\operatorname{sign} \left[\frac{(P_{ij})''}{P_{ij}} \right] = \operatorname{sign} \left[\frac{A}{A - a_{ij} A_{ij}} \right]. \quad (19)$$

С целью изучения полученных условий (11) и (12) были изготовлены модели для решения систем двух и трех алгебраических уравнений, в которых для выполнения действия суммирования использовались конические зубчатые дифференциалы. В качестве устройства направленного действия применялась специально изготовленная, самотормозящая червячная пара с передаточным отношением 1:1.

На рис. 1 приведена схема модели для решения системы трех уравнений с тремя неизвестными вида:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= b_3 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В построенной модели коэффициенты решаемых уравнений имели значения: $a_{11} = a_{22} = 0,4$; $a_{13} = a_{23} = 0,21$; $a_{33} = 0,12$; $a_{12} = a_{21} = a_{31} = a_{32} = 1$.

На рис. 2 стрелками показаны входы и выходы в присоединительных связях устройства, установленные с помощью формул (18) и (19) в соответствии с принятыми значениями коэффициентов уравнений (20). Блоки I, II, III (рис. 2) соответствуют суммирующим устройствам 1, 2, 3 (рис. 1). Самотормозящая червячная пара устанавливалась последовательно на участках связей между точками d_2 и d_{12} , d_1 и d_{31} , d_2 и d_{32} , d_3 и d_{33} . Во всех случаях при включении в связь устройства направленного действия в соответствии с направлением передачи информации испытываемая модель работала нормально, неза-

висимо от значений b_1 , b_2 и b_3 . При установке же против направления, указанного стрелками, модель не приводилась в действие — заклинивалась.

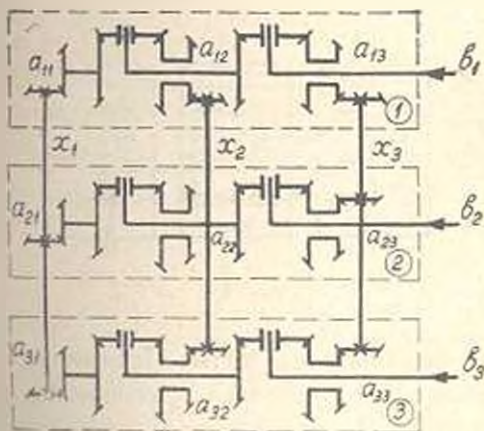


Рис. 1.

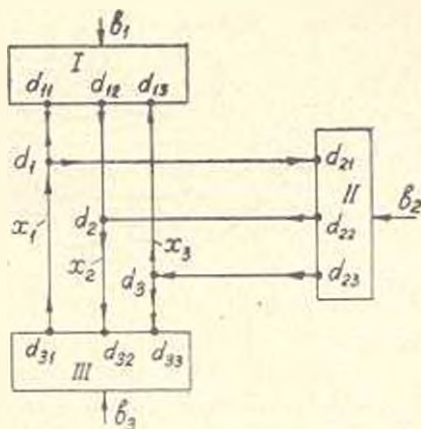


Рис. 2.

Аналогичные устройства были испытаны и при других значениях коэффициентов уравнений (20). Во всех случаях результаты опытов не противоречили полученным условиям (18) и (19).

На рис. 3 приведена схема модели для решения системы двух алгебраических уравнений, построенной на ячейках, состоящих из элементов L и C , используемых в машине типа „Analag“ [5]. С целью испытаний схема была собрана на пассивных элементах L и C модели сети переменного тока типа РС-2, работающей на частоте 400 гц. Суммирующие устройства рассматриваемой схемы обладают свойством полной обратимости.

В общем случае, при моделировании нелинейных уравнений, в схемах АВУ рассматриваемого типа наряду с обратимыми могут быть использованы и устройства, не обладающие свойством полной обратимости. Например, множительные и функциональные блоки, применяемые в машине „Analag“. Таким образом, и здесь, аналогично предыдущему, при построении схемы АВУ, могут возникать вопросы, связанные с направлением передачи информации.

В качестве устройства направленного действия были использованы два последовательно подключенных усилителя типа УПТ-4, собранных по схеме инвертора. Во всех случаях при включении устройства направленного действия против направления потока информации решение получилось неправильным.

На рис. 4 приведена схема модели для решения уравнений (20), построенной на обратимых суммирующих устройствах, основанных на использовании усилителей постоянного тока [2]. При построении схем АВУ рассматриваемого типа оказывается целесообразным совместное использование обратимых суммирующих устройств и необратимых ре-

шающих суммирующих усилителей постоянного тока. И в этом случае возникают вопросы правильного применения устройств направленного действия.

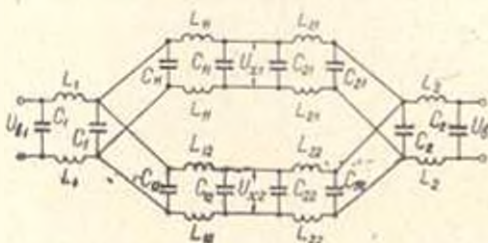


Рис. 3.

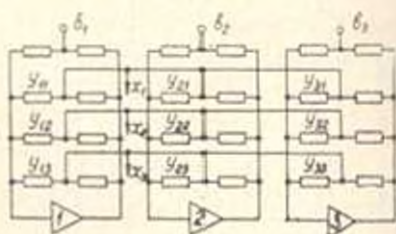


Рис. 4.

Модель была построена на базе машины типа МН-7. Параметры рассматриваемой схемы были приняты в соответствии с значениями коэффициентов уравнений (20). В качестве устройства направленного действия, аналогично предыдущему, были использованы для последовательно подключенных усилителя постоянного тока, собранных по схеме инвертора. Испытания работы схемы с применением устройства направленного действия показали те же результаты, что и при испытании устройства по схеме рис. 1.

Выводы

Направление передачи информации в связях между решающими устройствами схемы АБУ можно установить с помощью выражений (9) и (10). При построении схемы АБУ устройства направленного действия следует устанавливать в соответствии с направлением передачи информации между решающими устройствами схемы. Это условие является необходимым для обеспечения работоспособности АБУ.

АрмНИИЭ

Поступило 17.X.1968.

©. П. МАТЕВЕВИЧ

ԱՆԱԼՈՒԿԱՅԻՆ, ՀԱՇՎԻԶ ՍԽԵՄՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՄԱՆ ՀԱՐՅԻ ԱՌԻԻԿԷ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հաղվածում քննարկվում են զեային և ոչ-զեային հանրահաշվական հալմասարումների սխեմաների լուծման համար եախատեալող աշխատանաֆ անալոգային հաշվիչ սարքերի (ԱՀՎ) կառուցման անհրաժեշտ պայմանները: Ընդ որում, ԱՀՎ-ում օգտագործվում են ինչպես հակադարձելի, այնպես էլ ունհակադարձելի լուծող սարքեր: Մեխանիզմաեան, էլեկտրական և էլեկտրոնային լուծող սարքերի կիրառմամբ կառուցված ԱՀՎ-երի օրինակների վրա ցուցադրվում են դրանց աշխատեանակաթյունն ապահովող պայմանները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бруевич Н. Г. К вопросу о входах и выходах сложных устройств непрерывного действия. Сб. „Вопросы синтеза и точности сложных устройств непрерывного действия“. Изд. АН СССР, М., 1958.
2. Пухов Г. Е. Избранные вопросы теории математических машин. Изд. АН УССР, Киев, 1964.
3. Матвеев П. А. Определение мощности и направления передачи энергии в связях сложных устройств. „Труды института машиноведения. Семинар по точности в машиностроении и приборостроении“. Вып. 13, Изд. АН СССР, М., 1959.
4. Матвеев П. А. Некоторые вопросы построения электронных устройств для решения алгебраических уравнений. „Труды института машиноведения. Семинар по точности в приборостроении и машиностроении“. Вып. 15, Изд. АН СССР, М., 1961.
5. Шилейко А. В. Основы аналоговой вычислительной техники. Изд. „Энергия“, М., 1967.
6. Артоболевский И. И. Теория механизмов. Изд. „Наука“, М., 1965.