

ОЗУ (4÷32 К). В настоящее время начаты работы по реализации трансляторов интерпретирующего типа с этого языка для ЭВМ М-400, М-6000 и СМ ЭВМ.

Язык ТЕСТ включает 18 операторов, которые позволяют эффективно отлаживать программы контроля, описывать процессы управления произвольным составом аппаратурных блоков систем и программировать задачи обработки информации в системах контроля и диагностики любой электронной аппаратуры (цифровой, аналоговой и аналого-цифровой). Кроме того, он может найти применение также в различных АСУ ТП и в системах автоматизации научных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бредихин С. В., Песляк П. М. Средства программирования для САМАС.— «Автометрия», 1974, № 4, с. 39—50.
2. Песляк П. М., Талныкин Э. А. Язык системного программирования для мини-ЭВМ.— «Автометрия», 1974, № 4, с. 50—61.
3. Талныкин Э. А. Модульное программирование в задачах сбора и обработки экспериментальных данных.— «Автометрия», 1976, № 1, с. 65—72.
4. Бредихин С. В., Песляк П. М. Методы программирования систем САМАС с помощью вычислительных машин класса PDP-8.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. (Материалы Всесоюзной конференции.) Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977, с. 88—90.
5. Головач В. И., Котельников Ю. Н. Каут — специализированный язык для группового управления процессами.— «Упр. сист. и маш.», 1976, № 2, с. 66—73.
6. Буровцев В. А., Ибрагимов К. Ш., Подзин А. Е. Управляемая малой ЭВМ система аппаратно-функционального контроля цифровых схем.— «Упр. сист. и маш.», 1976, № 3, с. 44—48.
7. Белов В. М., Буровцев В. А., Ибрагимов К. Ш., Подзин А. Е. Специализированный входной язык системы контроля БИС ЗУ.— «Автометрия», 1975, № 1, с. 80—86.
8. Ибрагимов К. Ш., Кириленко Б. З., Клиторин И. Ф., Подзин А. Е. Математическое обеспечение АСУ ТП контроля электронной аппаратуры.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. (Материалы Всесоюзной конференции.) Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977, с. 196—200.

Поступила в редакцию 15 декабря 1977 г.

УДК 621.375.132.087.9

В. Е. БУТТ, Б. Н. ПАНКОВ

(Новосибирск)

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА С МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В системах сбора и обработки измерительной информации широко используются операционные устройства (ОУ), у которых выходная величина (напряжение, ток) связана со входной линейной функцией, определяемой параметрами элементов цепи обратной связи (ОС). В повышении точности и расширении частотного диапазона ОУ имеются известные ограничения, связанные с обеспечением устойчивости. В определенной мере преодолеть эти ограничения позволяют методы структурной коррекции, предполагающие введение дополнительных каналов передачи сигнала и обеспечивающие при этом улучшение как статических, так и динамических характеристик ОУ [1, 2].

Цель настоящей работы — показать возможности применения некоторых методов структурной коррекции при построении ОУ, отличающихся стабилизируемым параметром (напряжение или ток), спосо-

бом суммирования сигналов ОС с входным сигналом (последовательный или параллельный), местом подключения нагрузки (соединяется или не соединяется с общей точкой схемы).

Примем следующий порядок изложения рассматриваемых вопросов: вначале — коротко о сути применяемых методов структурной коррекции, затем — о схемных решениях ОУ, при построении которых используются эти методы, и в заключение — о некоторых рекомендациях по практической реализации рассмотренных устройств.

На рис. 1 показан общий граф усилителя с одноканальной отрицательной обратной связью (ООС) (сплошные линии). Усилитель с коэффициентом усиления K_1 в разомкнутом состоянии охвачен цепью обратной связи β_1 . Здесь $U_{вх}$ и $U_{вых1}$ — соответственно входное и выходное напряжения*, а e — напряжение недокомпенсации усилителя с ОС. Предполагаем, что отрицательный коэффициент передачи по петле ОС создается за счет инверсии в усилителе (знак минус перед K_1). Из выражения для коэффициента передачи

$$\frac{U_{вых1}}{U_{вх}} = -\frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{1}{T_1}\right)$$

следует, что погрешность передачи определяется глубиной обратной связи $T_1 = 1 + K_1\beta_1$. Остановимся кратко на способах снижения погрешности коэффициента передачи усилителей с ОС.

Напряжение недокомпенсации e является сигналом рассогласования в замкнутой системе с ООС, который, как известно [3], может быть использован для формирования корректирующих воздействий с целью улучшения качественных характеристик системы с ООС.

Один из методов коррекции заключается в организации дополнительной связи в выходной контур. Коэффициент передачи устройства с дополнительной ветвью T_x определяется выражением

$$\frac{U_{\Sigma}}{U_{вх}} = -\frac{1}{\beta_1} \frac{K_1 - T_x}{K_1 + \frac{1}{\beta_1}},$$

из которого следует, что при выполнении условия $T_x = -1/\beta_1$ коэффициент передачи не зависит от глубины ООС. Таким образом, в усилителе с ООС для устранения погрешности коэффициента передачи необходимо сформировать напряжение поправки $U_{\Sigma} = e/\beta_1$ и добавить его к выходному напряжению усилителя.

В другом методе коррекции дополнительная связь организуется во входной контур. Поскольку само корректируемое устройство по графу рис. 1 (без дополнительных связей) имеет при достаточной глубине ОС коэффициент передачи, равный по модулю величине $1/\beta_1$, то существует возможность получить в выходном напряжении ОУ необходимую поправку U_{Σ} путем подачи напряжения e во входной контур последовательно с $U_{вх}$. Действительно, из коэффициента передачи ОУ (по рис. 1 с учетом дополнительной ветви T_k), определяемого выражением

$$\frac{U_{вых1}}{U_{вх}} = -\frac{1}{\beta_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{K_1\beta_1}(1 - T_k)},$$

* Параметр «напряжение» в качестве входной и выходной величин выбран для определенности. Все последующие рассуждения на уровне структурных схем справедливы и для случаев, когда входным или выходным параметром является ток.

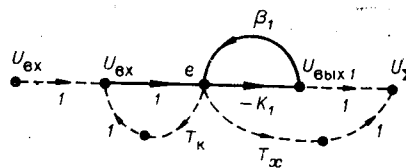


Рис. 1.

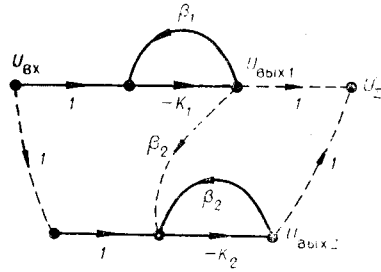


Рис. 2.

нала. На рис. 2 приведен граф итерационного двухканального усилителя (пунктиром показаны связи между усилителями, необходимые для выполнения алгоритма итерации). Здесь в дополнительном канале использован усилитель с двумя входами. Усилитель охвачен цепью ООС β_2 и имеет коэффициент усиления K_2 в разомкнутом состоянии.

Из выражения для коэффициента передачи

$$\frac{U_{\Sigma}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{1}{\beta_2} \left[1 - \frac{1 + K_1(\beta_1 - \beta_2)}{T_1 T_2} \right]$$

следует, что при согласованных цепях ОС, т. е. $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, погрешность коэффициента передачи

$$\frac{U_{\Sigma}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{1}{T_1 T_2} \right)$$

обратно пропорциональна произведению глубин ОС T_1 и T_2 усилителей основного и корректирующего каналов.

Перейдем теперь к схемным решениям ОУ, при построении которых используются рассмотренные выше методы структурной коррекции, а в качестве базового активного элемента — дифференциальный усилитель, имеющий два входа (инвертирующий и неинвертирующий), один выход и общий зажим.

В зависимости от стабилизируемого параметра ОС разделяют на связь по напряжению и по току. По отношению ко входному сигнал, передаваемый цепью ОС, включается либо параллельно, либо последовательно. Указанные два вида ОС (по напряжению и току), использующие параллельный или последовательный способы суммирования сигнала ОС со входным сигналом, нашли наибольшее распространение при разработке ОУ.

Таблица 1

Параллельная ОС	Последовательная ОС	Последовательная ОС
<p>1-1</p>	<p>1-2</p>	<p>1-3</p>
$\frac{U_H}{U_0} = -\frac{Z_2}{Z_1} \left(1 - \frac{1}{T_1} \right)$	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{1}{T_1} \right)$	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{1}{T_1} \right)$

Таблица 2

Параллельная ОС	Последовательная ОС	Последовательная ОС
<p>2-1</p>	<p>2-2</p>	<p>2-3</p>
$\frac{U_H}{U_0} = -\frac{Z_2}{Z_1} \frac{1}{\frac{1+K_1}{K_n+K_1} + \frac{Z_2}{Z_1} \frac{1-K_n}{K_n+K_1}}$	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta_1} \frac{1}{1 + \frac{1-K_n}{K_1 \beta_1}}$	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta_1} \frac{1}{1 + \frac{1-K_n}{\beta_1(K_1-K_n)}}$

При обратной связи по напряжению сигнал, подаваемый в цепь ОС, пропорционален выходному напряжению (на сопротивлении нагрузки), которое является стабилизируемым параметром. Операционные устройства с ООС по напряжению предназначены для преобразования входных сигналов в зависимости от функции преобразования цепи ОС (умножение на число, интегрирование, дифференцирование и т. д.). В табл. 1 приведены схемы распространенных ОУ с параллельной и последовательной ОС и их коэффициенты передачи* по напряжению. В выражениях для коэффициентов передачи $T_1 = 1 + K_1 \beta_1$ — глубина ООС, K_1 — коэффициент усиления усилителя Y_1 , $\beta_1 = Z_1 / (Z_1 + Z_2)$ — коэффициент передачи цепи ОС.

В табл. 2 приведены ОУ с многоканальной ОС на основе схем табл. 1, в которых для снижения погрешностей коэффициента передачи, вызванных конечной глубиной ООС, применена коррекция по графу рис. 1 путем подачи напряжения недокомпенсации e усилителя Y_1 во входной контур. Корректирующая единичная связь (см. ветвь T_n на рис. 1) осуществляется с помощью повторителя напряжения, выполненного на дифференциальном усилителе Y_2 и имеющего коэффициент передачи $K_n = 1 - 1/T_2$. В схеме 2-2, предложенной в работе [6], напряжение e между входами усилителя Y_1 с помощью повторителя напряжения включается последовательно с входным напряжением U_0 . Для инвертирующей схемы 1-1 включение напряжения e последовательно с U_0 не приводит к исключению погрешности передачи Y_1 , поскольку коэффициент передачи этой схемы, равный отношению Z_2/Z_1 (в идеальном случае), не равен величине $1/\beta_1$. Поэтому для исключения погрешностей в инвертирующей схеме должна быть еще дополнительная единичная связь в выходной контур [7]. На схеме 2-1 такая связь осуществляется за счет последовательного соединения выходных цепей усилителя Y_1 и повторителя напряжения.

Как следует из выражений для коэффициентов передачи, приведенных в табл. 2, погрешность исключается при выполнении условия $K_n \rightarrow 1$. Введение подобных корректирующих связей не требует включения дополнительных элементов цепей ООС. Это является достоинством схем, поскольку любое из сопротивлений Z_2 и Z_1 может служить

* Здесь и далее приведены формулы для усилителей с коэффициентами усиления по напряжению K , бесконечно большими входными и бесконечно малыми выходными сопротивлениями.

Таблица 3

Параллельная ОС	Последовательная ОС
$\frac{U_H}{U_0} = -\frac{Z_2}{Z_1} \left(1 - \frac{1}{T_1 T_2}\right),$ $\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{Z_2'}{Z_1'}$	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{1}{T_1 T_2}\right),$ $\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{Z_2'}{Z_1'}$

в качестве датчика системы сбора информации. Как видно из графа рис. 1, введение дополнительной ветви T_k образует контур с положительным петлевым усилением. Поскольку указанную единичную связь можно осуществить практически лишь с использованием активных элементов, то очевидно, что в таких устройствах необходимо согласование частотных характеристик усилителя $U1$ и повторителя напряжения.

При способе коррекции путем включения в выходной контур напряжения поправки U_n , сформированного из напряжения недокомпенсации e , на графе (см. ветвь T_k на рис. 1) не образуется дополнительных контуров и в этом случае основной и корректирующий каналы взаимонезависимы. В табл. 3 приведены ОУ, у которых в корректирующем канале включен неинвертирующий усилитель $U2$ с коэффициентом передачи $1/\beta$.

Приведенные в табл. 3 ОУ без использования дополнительных суммирующих устройств пригодны лишь для случаев, когда сопротивление нагрузки Z_H не соединено с общей точкой схемы. При использовании специальных схемных решений [8] операционные устройства с такой коррекцией могут применяться и для заземленного сопротивления нагрузки.

ОУ с коррекцией по графу рис. 2 приведены в табл. 4. Здесь в дополнительном канале использован усилитель $U2$ с двумя входами, а его выходное напряжение, являющееся напряжением поправки для усилителя $U1$, формируется из входного и выходного напряжений основного усилителя. Это итерационные устройства с последовательным суммированием выходных напряжений основного и корректирующего каналов [9, 10].

ОУ 4—3 целесообразно использовать в случаях, когда имеется дуальный выход у источника входного сигнала (например, две обмотки трансформаторного датчика с одинаковыми числами витков).

Из выражений для коэффициента передачи устройств табл. 4 следует, что в этих устройствах может быть достигнута высокая точность преобразования при выполнении согласований между элементами цепей ООС отдельных каналов, т. е.

$$\Delta = 1 - Z_2 Z_1' / Z_1 Z_2' = 0.$$

Таблица 4

Параллельная ОС	Последовательная ОС	Последовательная ОС
<p>4-1</p>	<p>4-2</p>	<p>4-3</p>
$\frac{U_H}{U_0} = -\frac{Z_2}{Z_1} \left(1 - \frac{1}{T_1 T_2}\right)$ <p style="text-align: center;">$\Delta = 0$</p>	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta} \left(i - \frac{1}{T_1 T_2}\right)$ <p style="text-align: center;">$\Delta = 0$</p>	$\frac{U_H}{U_0} = \frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{1}{T_1 T_2}\right)$ <p style="text-align: center;">$\Delta = 0, U_0' = U_0$</p>

Важное достоинство устройств табл. 4 — полная взаимнезависимость между основным и корректирующим каналами и отсутствие сумматора как отдельного элемента схемы.

При обратной связи по току сигнал, подаваемый в цепь ООС, пропорционален току в нагрузке Z_H . Ток в этом случае является стабилизируемым параметром, а погрешность задания (установки) тока в Z_H зависит от глубины ОС. Место включения сопротивления Z_H во многом определяет вид ОС (по току или напряжению). Например, все схемы, приведенные в табл. 1 и 2, будут устройствами с ОС по току, если сопротивление Z_2 цепи ООС является сопротивлением нагрузки. При этом погрешность задания тока в нагрузке будет равна погрешности передачи выходного напряжения в этих устройствах, определяемой из приведенных в таблицах формул. В идеальном случае ток нагрузки $I_H = U_0/Z_1$. В дополнение к таким схемам в табл. 5 приведены устройства со стабилизацией тока в нагрузке, которая либо изолирована от общей точки схемы, либо соединена с ней.

Таблица 5

<p>5-1</p>	<p>5-2</p>
$I_H = \frac{U_0}{Z_1} \frac{1 + \frac{K_H}{K_1}}{1 + \frac{K_H}{K_1} + \frac{1}{K_1 \beta_1} (K_H - 1)}$	$I_H = \frac{U_0}{R_3} \left(1 - \frac{Z_H}{R_4} \frac{1}{\beta T_1 T_2}\right)$

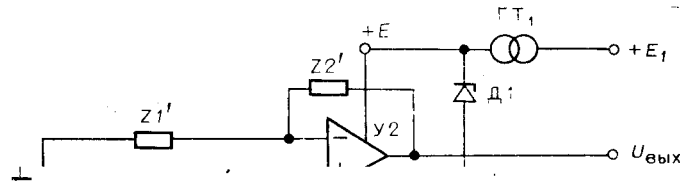


Рис. 3.

ОУ 5—1 с последовательной ООС по току выполнено на дифференциальном усилителе У1 с коэффициентом усиления K_1 . В корректирующем канале использован повторитель напряжения с коэффициентом передачи K_n , реализуемый на дифференциальном усилителе У2. Как следует из выражения для тока нагрузки I_n , при выполнении условия $K_n \rightarrow 1$ погрешность установки тока не зависит от глубины ООС усилителя У1 и $I_n = U_0/Z1$. Заметим, что при тех же условиях, т. е. $K_n = 1$, погрешность коэффициента передачи по напряжению в этой схеме полностью не исключается, что видно из приводимого ниже выражения

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_0} = \frac{1}{\beta_1} \frac{1}{1 + \frac{K_n}{K_1} + \frac{1}{K_1 \beta_2} (K_n - 1)},$$

где $\beta_1 = Z1/(Z_n + Z1)$.

В устройстве стабилизации тока 5—2 сопротивление нагрузки Z_n соединено с общей точкой схемы. При выполнении условия согласования между сопротивлениями, т. е. $R2/R1 = R2'/R1' = R4/R3$, погрешность задания тока в Z_n уменьшается в T_2 раз по сравнению с одноканальной схемой стабилизации тока [11]. В выражении для тока нагрузки I_n T_1 и T_2 — глубины ООС в усилителях У1 и У2, а $\beta = R1/(R1 + R2)$.

В заключение дадим несколько рекомендаций, которые целесообразно учитывать при реализации рассмотренных выше ОУ. Среди этих устройств имеются такие, в которых общий зажим усилителя не соединяется с общей точкой схемы (например, у усилителя У2 в итерационных устройствах с последовательным суммированием выходных напряжений, приведенных в табл. 4). В таких случаях для питания усилителя постоянным током требуется, как правило, изолированный источник питания. Однако за счет некоторого усложнения в схемах с «плавающим питанием» можно использовать и заземленные источники питания. В качестве примера на рис. 3 приведена схема итерационного усилителя с использованием управляемых источников [12]. Здесь генераторы тока ГТ1 и ГТ2 и стабилитроны Д1 и Д2 создают эквивалент незаземленного источника питания (+E, -E) для усилителя У2 корректирующего канала.

При практической реализации итерационных устройств к усилителю основного канала особых требований не предъявляется. Что же касается усилителя корректирующего канала (в схемах табл. 4), то, во-первых, усилитель обязательно должен иметь дифференциальный вход (это необходимо для выполнения алгоритма итерации), во-вторых, для достижения высокой точности целесообразно использовать усилитель с полевым или МДП-транзисторами на входе.

Выше рассмотрены некоторые подходы к построению высокоточных и широкополосных устройств безотносительно к тому, для выполнения

каких линейных операций они предназначены. Что же касается ОУ, реализующих конкретные линейные операции: суммирования, вычитания, интегрирования, дифференцирования и т. п., то реализовать их нетрудно, если применять к рассмотренным схемам обычные правила построения таких устройств (см., например, [13]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Волгин Л. И. Аналоговые операционные преобразования с компенсацией методической погрешности.— ИКА, 1975, № 2 (4), с. 29.
2. Волгин Л. И. Операционные преобразователи с компенсацией методической погрешности последовательным включением управляемых источников тока и напряжения.— «Радиотехника», 1977, т. 32, № 3, с. 74.
3. Шаталов А. С. Структурные методы в теории управления и электроавтоматике. М.— Л., Госэнергиздат, 1962.
4. Hallstein C. P. Electric energy amplifying circuit arrangements.— United States Patent, № 3422336, кл. Н 03f 1/02, January 14, 1969.
5. Осмоловский П. Ф. Итерационные многоканальные системы автоматического управления. М., «Сов. радио», 1969.
6. Попов В. С., Ямпольский Ю. С. Высокостабильный измерительный усилитель.— «Приборы и системы управления», 1972, № 2, с. 24.
7. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Об использовании усилителей с обратной связью для улучшения характеристик широкополосных измерительных цепей уравнивания.— В кн.: Материалы Всесоюзной конференции по измерительным системам «ИИС-77». Баку, изд. АЗИНЕФТЕХИМ, 1977.
8. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Усилительное устройство. Авт. свид-во, № 400972, ОИПОТЗ, 1973, № 40.
9. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Усилительное устройство. Авт. свид-во, № 382220, ОИПОТЗ, 1973, № 22.
10. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Об использовании метода итерации для улучшения характеристик операционных усилителей.— В кн.: Системы сбора и первичной обработки измерительной информации. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1973.
11. Гутников В. С. Применение операционных усилителей в измерительной технике. Л., «Энергия», 1975.
12. Касперович А. Н., Литвинов Н. В., Попов Ю. А., Прокопенко В. И., Солоненко В. И., Слуев В. А. Крейт измерительной системы сбора данных в стандарте САМАС.— «Автометрия», 1976, № 1, с. 7.
13. Проектирование и применение операционных усилителей. Под ред. Грэма Дж., Тоби Дж., Хьюлсмана Л. М., «Мир», 1974.

Поступила в редакцию 27 февраля 1978 г.

УДК 681.3.00 : 621.38

В. В. ЕФИМЕНКО, А. С. ЗАГОРУЙКО, Ю. А. СТУКАЛИН

(Новосибирск)

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЧЕТА РАЗРЕЖЕННОСТИ МАТРИЦ ПРИ АНАЛИЗЕ СХЕМ НА ЭВМ

Для электронных (электрических) схем характерна разреженность матриц [1—3] межузловых динамических проводимостей. Это свойство особо проявляется в схемах, содержащих несколько десятков узлов и более. При анализе на ЭВМ таких схем, например, узловым методом, основные затраты времени и памяти уходят на решение линейных уравнений вида

$$AX=B, \quad (1)$$

где A — квадратная матрица межузловых динамических проводимостей размера $N \times N$; X , B — векторы размерности N (соответственно приращений узловых потенциалов и узловых токов).

В настоящее время для решения системы (1) предложен ряд алгоритмов [3, 4], учитывающих свойство разреженности матрицы A .