

1274



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Б.Ю. Семенов, Н.С. Фролов

1274

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ
РАСЧЕТА СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Дубна 1963

1274

Б.Ю. Семенов, Н.С. Фролов

1274

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ
РАСЧЕТА СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Дубна 1963

Структурная схема стабилизатора

Для питания разнообразных электронных схем широко используются стабилизаторы напряжения с обратной связью, выполняемые как на лампах, так и на полупроводниковых приборах. Обычно при анализе и расчете схем стабилизаторов используется весьма громоздкий аппарат: для каждой схемы составляются и решаются уравнения для токов и напряжений на основе законов Кирхгофа^{/1,2,3/}. Представляется целесообразным при рассмотрении схем стабилизаторов с обратной связью применить общий подход к схемам с различными элементами и анализировать их работу с помощью аппарата теории автоматического регулирования.

Чаще всего используются стабилизаторы напряжения последовательного типа. В состав такого стабилизатора входят регулирующий элемент, делитель выходного напряжения, источник опорного напряжения и инвертирующий усилитель цепи обратной связи /см., например, схему рис. 1/.

Стабилизатор должен представлять собой систему с отрицательной обратной связью, линейную в данной точке и ее окрестностях. Будем производить анализ системы без учета инерционности звеньев, т.е. в установившемся режиме. Кроме того, примем, как это обычно делается в теории авторегулирования, что каждое элементарное звено обладает "направленным" действием, т.е. выходная величина зависит от входной, а обратное воздействие не имеет места. Реакция последующего звена на предыдущее учитывается при определении соответствующих передаточных коэффициентов звеньев. Примем следующие обозначения:

- $U_{оп}$ - опорное напряжение;
- $U_{вых}$ - выходное напряжение;
- $U_{вх}$ - входное напряжение стабилизатора;
- $U_{вху}$ - напряжение питания усилителя в цепи обратной связи;
- t° - температура окружающей среды;
- I_n - ток нагрузки.

Отклонения величин от установившихся значений будем обозначать соответствующей буквой с приставкой " Δ ". Рассматриваемый стабилизатор как система авторегулирования может быть представлен структурной схемой рис. 2а. Звенья этой структурной схемы соответствуют определенным элементам электронной схемы /рис. 1/. Не следует отождествлять структурную схему системы с блок-схемой, рассматриваемой обычно при анализе стабилизаторов^{/1-3/}. Передаточные коэффициенты регулирующего элемента, делителя и усилителя обозначены соответственно как k_1 , k_2 и k_3 . Опорное напряжение прикладывается через звено с передаточным коэффициентом, равным - 1, ко входу усилителя.

Как известно из теории авторегулирования, любое возмущение можно приложить

в любую точку схемы, но практически точки приложения возмущений необходимо выбирать таким образом, чтобы получались наиболее простые выражения для передаточных коэффициентов. Структурная схема с указанием всех возмущающих факторов и передаточных коэффициентов, которые приводят возмущения к определенной точке структурной схемы, изображена на рис. 2б. Передаточные коэффициенты звеньев, через которые передаются возмущения, обозначены соответственно как:

- k_4 - передаточный коэффициент, который приводит изменение входного напряжения стабилизатора к входу регулирующего элемента /к базе триода Т1/;
- k_5 - передаточный коэффициент, который приводит изменение тока нагрузки к входу регулирующего элемента;
- k_6 - передаточный коэффициент, который приводит изменение напряжения питания усилителя к входу регулирующего элемента;
- k_7 - передаточный коэффициент, который приводит изменение температуры к входу усилителя.

Так как система линейна, то поведение ее по отношению к любому из возмущений можно рассматривать без учета всех других. Действие возмущения оценивается передаточным коэффициентом. Если $f(t)$ - возмущение, то передаточный коэффициент системы по возмущению $k_{f(t)} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{f(t)}$. Поэтому в дальнейшем, кроме передаточных коэффициентов отдельных звеньев $k_1 - k_7$, мы будем пользоваться передаточными коэффициентами системы по различным возмущениям: $k_{\text{ОП}}, k_{\text{ВХ}}, k_{\text{ВХУ}}, k_{\text{Н}}, k_{\text{Т}}$.

Рассмотрим влияние отдельных возмущений на выходное напряжение. Воспользуемся для этого методом эквивалентного преобразования схем /см., например, /4/ /.

1. Опорное напряжение

Если в результате старения элементов и действия других факторов произошло изменение опорного напряжения, то это изменение можно рассматривать как возмущение. Определим передаточный коэффициент системы по этому возмущению $k_{\text{ОП}}$. Структурная схема для данного возмущения имеет вид, изображенный на рис. 3а. На рис. 3б, 3в, 3г для примера приведено последовательное преобразование структурной схемы для определения передаточного коэффициента $k_{\text{ОП}}$. В результате запишем выражение для этого коэффициента:

$$k_{\text{ОП}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ОП}}} = \frac{k_1 k_3}{1 + k_1 k_2 k_3} .$$

Если соблюдается соотношение /что имеет место практически во всех стабилизаторах/

$$k_1 k_2 k_3 \gg 1, \tag{1/}$$

тогда

$$k_{\text{ОП}} = \frac{1}{k_2} \tag{2/}$$

и

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{k_2} \Delta U_{\text{ОП}} .$$

2. Входное напряжение

Рассматривая структурную схему по возмущению $\Delta U_{\text{вх}}$ /изменение входного напряжения стабилизатора/, аналогично предыдущему найдем выражение для передаточного коэффициента $k_{\text{вх}}$ по этому возмущению:

$$k_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{k_1 k_4}{1 + k_1 k_2 k_3} .$$

С учетом соотношения /1/

$$k_{\text{вх}} = \frac{k_4}{k_2 k_3} ; \quad /4/$$

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{k_4}{k_2 k_3} \Delta U_{\text{вх}} . \quad /5/$$

3. Ток нагрузки

Структурная схема для расчета передаточного коэффициента $k_{\text{н}}$ по изменению тока нагрузки $\Delta I_{\text{н}}$ может быть составлена по рассмотренным правилам аналогично тому, как это сделано для расчета $k_{\text{оп}}$. Выражение для передаточного коэффициента $k_{\text{н}}$ имеет вид:

$$k_{\text{н}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I} = \frac{k_1 k_5}{1 + k_1 k_2 k_3} .$$

С учетом соотношения /1/ можно записать :

$$k_{\text{н}} = \frac{k_5}{k_2 k_3} ; \quad /6/$$

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{k_5}{k_2 k_3} \Delta I_{\text{н}} . \quad /7/$$

4. Напряжение питания усилителя

Структурная схема для расчета передаточного коэффициента $k_{\text{вху}}$ по возмущению $\Delta U_{\text{вху}}$ /изменение напряжения питания усилителя цепи обратной связи/ составляется по общим правилам. Выражение для коэффициента $k_{\text{вху}}$ имеет вид:

$$k_{\text{вху}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вху}}} = \frac{k_1 k_6}{1 + k_1 k_2 k_3} .$$

Учитывая выражение /1/, получим:

$$k_{\text{вху}} = \frac{k_6}{k_2 k_3} ; \quad /8/$$

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{k_6}{k_2 k_3} \Delta U_{\text{вху}} . \quad /9/$$

5. Температура

Изменение температуры окружающей среды, а также саморазогрев элементов схемы приводит к изменению их параметров, вследствие чего меняется выходное напряжение. Учет этого явления имеет особенно большое значение для схем на полупроводниковых триодах. Влияние Δt° на выходное напряжение характеризуется передаточным коэффициентом k_T , выражение которого найдем, применив правила эквивалентного преобразования схем:

$$k_T = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta t^\circ} = \frac{k_1 k_3 k_7}{1 + k_1 k_2 k_3} .$$

С учетом соотношения /1/ можно записать :

$$k_T = \frac{k_7}{k_2} ; \quad /10/$$

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{k_7}{k_2} \Delta t^\circ . \quad /11/$$

Определение передаточных коэффициентов системы по возмущениям через параметры элементов схемы последовательного стабилизатора на полупроводниковых триодах

Большинство передаточных коэффициентов звеньев / $k_1 - k_4$ и k_6 / не имеет размерности, соответствующие звенья являются усилителями напряжения. Поэтому при анализе работы схем стабилизаторов удобно пользоваться следующими параметрами транзисторов:

- B - коэффициент передачи тока базы;
- S - крутизна характеристики $I_k = I(U_B)$;
- $R_{\text{вх}}$ - входное сопротивление;
- R_k - динамическое сопротивление коллектора в схеме с общим эмиттером;
- μ - коэффициент усиления по напряжению.

В рассматриваемой схеме /рис. 1/ ввиду того, что выходное динамическое сопротивление стабилизатора мало /обычно сотые доли ома/, регулирующий трюд можно считать работающим по схеме с общим коллектором при сопротивлении в цепи эмиттера, равном нулю, которая эквивалентна схеме с общим эмиттером.

При построении стабилизаторов на значительные токи в качестве регулирующих трюдов используются составные трюды, представляющие собой совокупность двух или

трех триодов /транзисторы Т1, Т2, Т3/, при этом обеспечивается необходимый коэффициент усиления по току и увеличивается входное сопротивление регулирующего элемента /не происходит шунтирования усилителя/. Параметры составного транзистора / B_c , $R_{вхс}$, S_c , $R_{кс}$, μ_c /, в зависимости от параметров составляющих его триодов, могут определяться по формулам, приведенным, например, в /1/.

Выражение для передаточного коэффициента регулирующего элемента по входному сигналу можно записать как:

$$k_I = \frac{k}{1+k},$$

где

$$k = S_c R_H = \frac{B_c R_H}{R_H}.$$

R_H - сопротивление нагрузки, поэтому

$$k = \frac{B_c}{\frac{R_{вхс}}{R_H} + B_c}. \quad /12/$$

Если

$$B_c \gg \frac{R_{вхс}}{R_H}, \quad /13/$$

то $k_I = 1$.

Передаточный коэффициент делителя

$$k_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad /14/$$

Передаточный коэффициент усилителя в зависимости от параметров триода и входной цепи в случае разностного усилителя может быть определен как:

$$k_3 = \frac{S_y (R_y || R_{вхс})}{2} = \frac{B_y (R_y || R_{вхс})}{2 R_{вху}} = \frac{B_y R_y R_{вхс}}{2 R_{вху} (R_y + R_{вхс})}. \quad /15/$$

В формулу с индексом "у" входят величины, относящиеся к усилителю.

Передаточный коэффициент звена, через которое действует изменение входного напряжения $\Delta U_{вх}$ на вход регулирующего элемента /база Т1/, определяется как:

$$k_4 = \frac{1}{\mu_c} = \frac{1}{R_{кс} S_c}. \quad /16/$$

Передаточный коэффициент k_5 определяется из следующих соображений. Изменение тока нагрузки ΔI_H воспринимается как изменение напряжения на входе регулирующего элемента $\Delta U_{бс}$, но

$$S_c = \frac{\Delta I_{кс}}{\Delta U_{бс}} \approx \frac{\Delta I_H}{\Delta U_{бс}}.$$

Поэтому указанное возмущение прикладывается к данной точке контура через коэффициент, имеющий размерность сопротивления и равный

$$k_5 = \frac{1}{S_c}. \quad /17/$$

Передаточный коэффициент k_6 находится как коэффициент деления:

$$k_6 = \frac{R_{вхс}}{R_y + R_{вхс}}. \quad /18/$$

Прежде чем записать выражения передаточных коэффициентов, заметим следующее. Для стабилизатора важно знать гарантированные параметры, которые не должны быть меньше определенных значений во всем заданном диапазоне возмущений ΔI_H , $\Delta U_{ВХ}$, $\Delta U_{ВХУ}$, Δt° и других при предъявлении определенных требований к параметрам элементов /триодов, источника опорного напряжения и др./ . Поэтому в дальнейшем будем определять значения передаточных коэффициентов в наихудших режимах.

Пользуясь выведенными ранее соотношениями /2/, /4/, /6/, /8/, /10/, /14/, /15/, /16/, /17/, /18/, запишем выражения для передаточных коэффициентов по соответствующим возмущениям:

$$k_{ВХ} = \frac{1}{S_c R_{кс}} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{2R_{ВХУ}(R_y + R_{ВХС})}{B_y R_y R_{ВХС}} ; \quad /19/$$

$$k_H = \frac{1}{S_c} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{2R_{ВХУ}(R_y + R_{ВХС})}{B_y R_y R_{ВХС}} \text{ ом} ; \quad /20/$$

$$k_{ВХУ} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{2R_{ВХУ}}{B_y R_y} ; \quad /21/$$

$$k_{оп} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} ; \quad /22/$$

$$k_T = k_7 \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{\text{мВ}}{\text{град}} . \quad /23/$$

Для характеристики параметров стабилизаторов часто пользуются не передаточными коэффициентами, а коэффициентами стабилизации по входному напряжению регулирующего элемента $\Theta_{ВХ}$, по входному напряжению питания усилителя $\Theta_{ВХУ}$ и внутренним сопротивлением стабилизатора. Зная передаточные коэффициенты, можно легко вычислить соответствующие величины:

$$\Theta_{ВХ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}} \cdot \frac{U_{ВХ}}{U_{ВЫХ}} = \frac{I_{ВХ}}{k_{ВХ}} \cdot \frac{U_{ВХ}}{U_{ВЫХ}} ; \quad /24/$$

$$\Theta_{ВХУ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХУ}} \cdot \frac{U_{ВХУ}}{U_{ВЫХ}} = \frac{1}{k_{ВХУ}} \cdot \frac{U_{ВХУ}}{U_{ВЫХ}} ; \quad /25/$$

$$R_i = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta I_H} = k_H . \quad /26/$$

З а к л ю ч е н и е

Применение аппарата теории автоматического регулирования для анализа схем стабилизаторов постоянного напряжения позволяет решить задачу в общем виде; дает возможность обходиться без громоздких уравнений, составляемых обычно на основании законов Кирхгофа, что значительно упрощает вычисления; позволяет проследить наглядно действие на систему различных возмущающих факторов.

Авторы приносят глубокую благодарность А.Н. Синаеву за ряд ценных советов и помощь при выполнении работы и М.Н. Омеляненко за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. С.Д. Додик. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока. Изд. "Советское радио", Москва, 1962.
2. А.А. Санин. Электронные приборы ядерной физики. Физматгиз, Москва, 1961.
3. Б.Н. Кононов. Стабилизаторы напряжения на полупроводниковых триодах. Приборостроение, № 10, стр. 9-12, 1956.
4. Н.Т. Кузовков. Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. Оборонгиз, Москва, 1960.
5. П.Г. Федосеев. Выпрямители и стабилизаторы. Изд. "Искусство", Москва, 1960.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 апреля 1963 года.

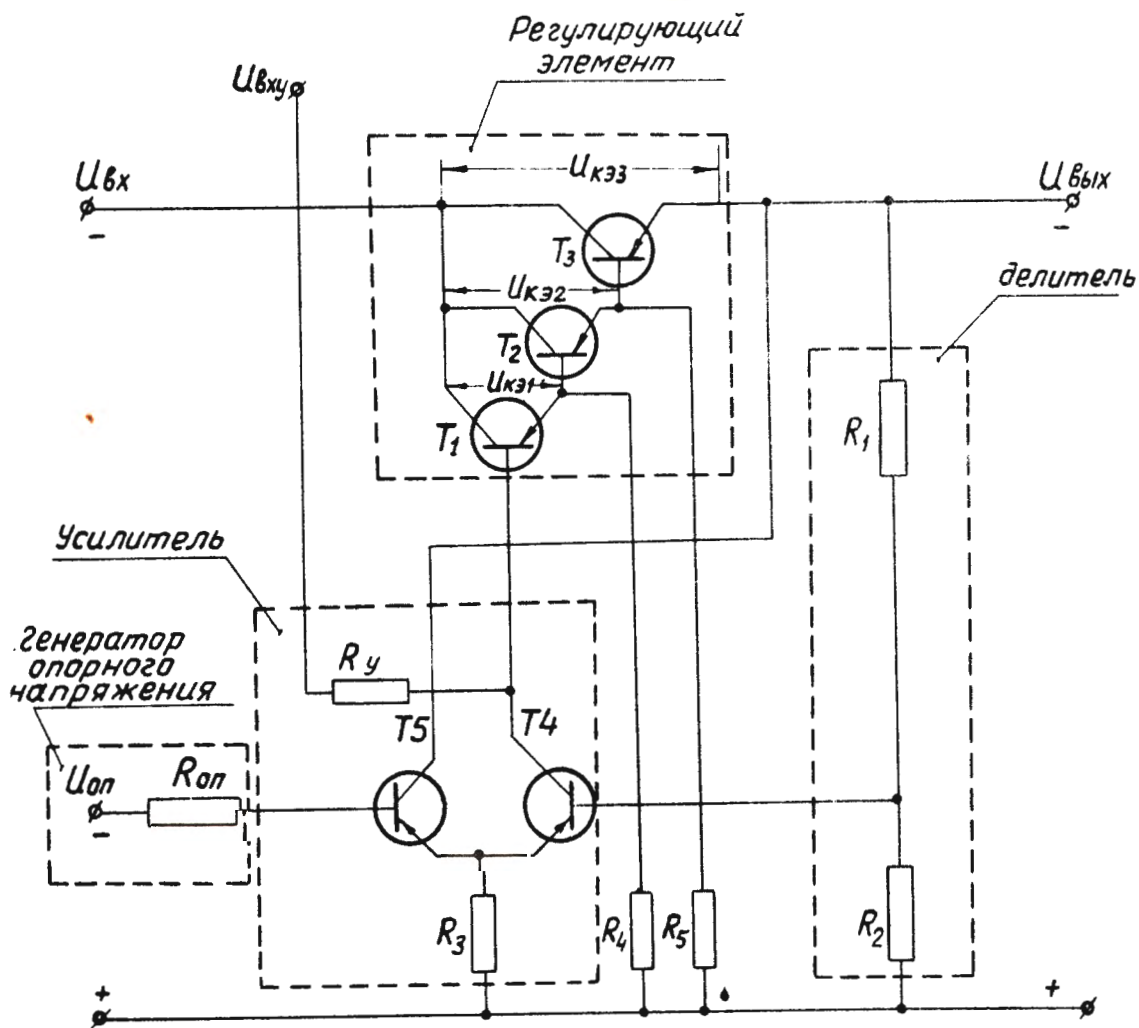


Рис. 1. Схема стабилизатора напряжения последовательного типа.

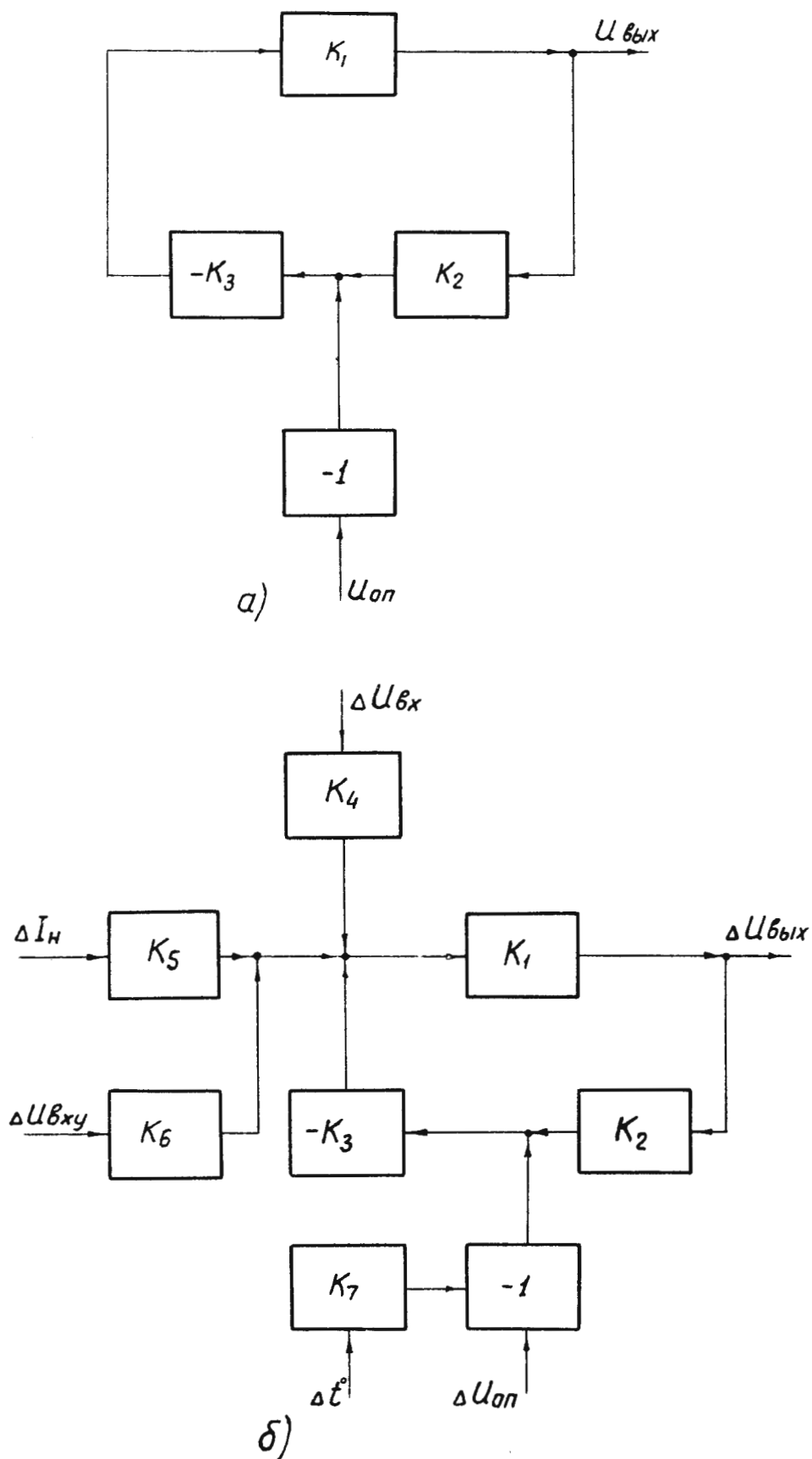
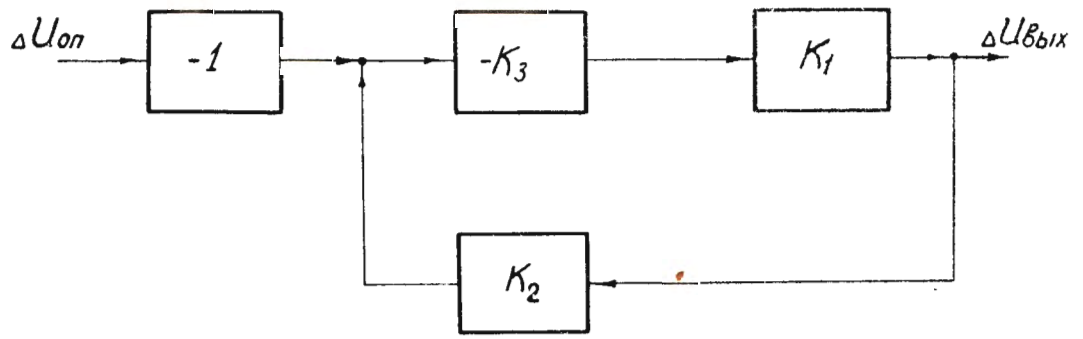
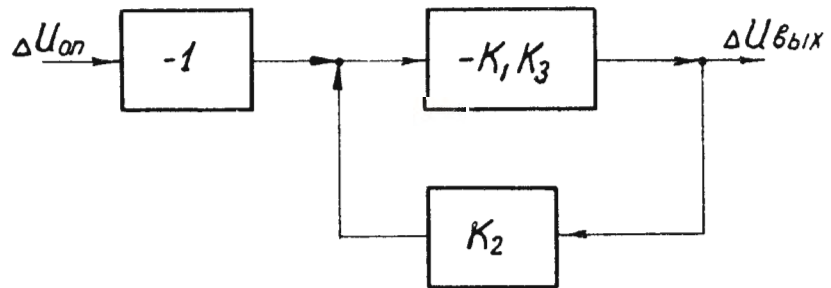


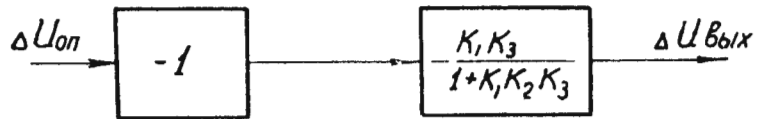
Рис. 2. Структурная схема стабилизатора.



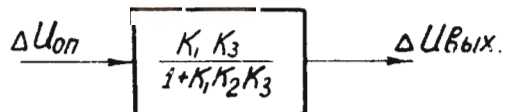
a)



δ)



β)



2)

Рис. 3. Преобразование структурной схемы стабилизатора для определения передаточного коэффициента по возмущению $\Delta U_{он}$.