

ЕВРИСТИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА ПРИНЦИПА НА ОТРИЦАТЕЛНАТА ОБРАТНА ВРЪЗКА В АНАЛОГОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА

гл. ас. инж. Кирил Светославов Мечков

Технически университет - София

SUMMARY: The present article offers the author's original approach to the "inventing" of the basic devices with negative feedback in conformity with the principles of the heuristic course in analogue electronics. The evolution of the negative feedback systems is treated in three logically connected parts each of them having the following structure: establishing associations with well-known everyday phenomena; inductive deriving of a schematic representation; deductive synthesis of the particular electronic device. In the first part of the publication the elementary feedback follower is built with the help of the "invented" at the beginning of the heuristic course "blocks". For this purpose the passive circuits series and parallel sumator are used which give the basic circuits voltage follower and voltage inverter. The next part treats of the phenomenal feature of the negative feedback systems to depress various disturbances. The study of one particular experiment - examining the disturbance of the load and the output resistance of the operational amplifier (multipliable influence) - is given in detail. In the last part of the paper we reach logically to the, at first sight, absurd idea that the "harmful" disturbances could be...useful. For this purpose again associations are called up with well-known everyday phenomena (e.g. compensatory mechanisms in psychology) in which a "disturbed" feedback follower becomes an amplifier system. In this way by means of a deliberate constant disturbance on the feedback follower and the inverter the inverting and noninverting amplifiers are "invented". By using this idea and applying double disturbance, basic devices with T-bridge in the feedback circuit and digitally controlled gain amplifiers are "build". This powerful idea becomes even more useful as the effect of the disturbance turns into an input signal. Thus active convertors are "invented" in which the sensors are connected to the feedback circuit (resistance to voltage convertors, R-2R digital to analogue convertor etc.) and some "recipes" for depressing the harmful and utilizing the useful disturbances are outlined.

1. УВОД. В традиционните курсове по аналогова електроника устройствата с отрицателна обратна връзка (ООВ) се представят като нещо свършено ново и непознато за студентите. Те се „поднасят наготово“, в техния завършен и окончателен вид, след което се анализират с помощта на сухи и аскетични формални методи. В същото време принципът на ООВ съществува навсякъде около нас в своите многообразни проявления. Защо тогава не пренесем естествено придобитите от нас житейски представи за този уникален феномен върху абстрактните електронни устройства и така да ги „изобретим“? Представени по този начин, те ще станат понятни, достъпни и елементарни за студентите.

В настоящата статия се предлага оригинален подход на автора за еволюционно изграждане на основните схеми с ООВ, съгласно принципите на евристичния курс по аналогова електроника [1].

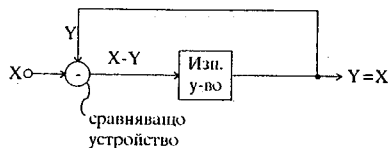
2. СИСТЕМА ПОВТОРИТЕЛ С ОТРИЦАТЕЛНА ОБРАТНА ВРЪЗКА.

2.1. ЖИТЕЙСКИ ПРИМЕРИ (АНАЛОГИИ) НА АКТИВНИ ПОВТОРИТЕЛИ.

Нека да разгледаме някои добре познати от ежедневието ни житейски ситуации, в които действа прословутият феномен:

Шофьорът сравнява мислено текущите скорост, дистанция и направление на автомобила със зададените стойности и като борави с „газта“ и волана ги поддържа равни на тях - това са примери за *система-повторител на скорост, дистанция и направление*. С помощта на везната продавачът сравнява еталонното с неизвестното тегло и ги изравнява - *повторител на тегло*. Като използва (подсъзнателно) вестибуларния си апарат всеки от нас сравнява положението на тялото си със зададеното и го коригира така, че да отговаря на него - *повторител на положение*. Когато говорим, ние сравняваме нивото на собствения си говор с едно предварително зададено ниво и го изравняваме с него - *повторител на говор*. Добрият преподавател сравнява непрекъснато нивото на знанията, постигнато от учениците със зададеното и продължава да преподава, докато не ги изравни - *копиране на знания*. Аналогично, чрез поощрения и наказания родителите се опитват да възпитат децата си по определен начин, шефовете - да „моделират“ поведението на подчинените си, силните личности - да „пречупят“ слабите (*копиране на поведение*) и т.н.

Във всичките тези примери се извършва операцията „активно копиране“¹. Тя се реализира с помощта на най-елементарната *система-повторител* (фиг. 1), която има само два елемента - *изпълнително* и *сравняващо устройство*, и действа по следния начин.



Фиг. 1

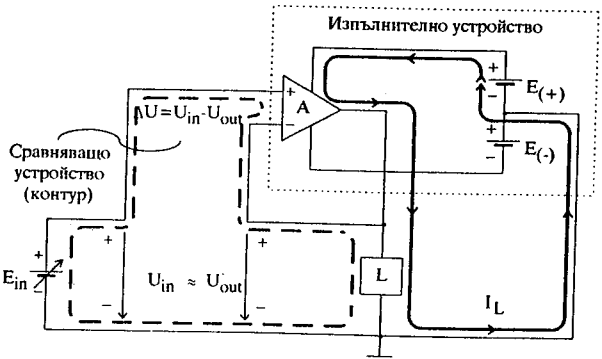
Изпълнителното устройство изработва изходната величина Y , сравнява я чрез изваждане с входната X , анализира резултата от сравнението и я изменя в съответната посока така, че разликата между двете величини да бъде винаги равна на нула. В резултат на тези целенасочени действия изходната величина Y повтаря входната X .

2.2. „ИЗОБРЕТЯВАНЕ“ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА СИСТЕМА-ПОВТОРИТЕЛ С ОТРИЦАТЕЛНА ОБРАТНА ВРЪЗКА. След като извлякохме индуктивно най-общата блокова схема на една система-повторител с ООВ нека сега да синтезираме дедуктивно електрически активни повторители.

2.2.1. ПОВТОРИТЕЛ НА НАПРЕЖЕНИЕ. За да изградим една електрическа система-повторител на напрежение се нуждаем първо от електрическо изпълнително устройство. Тази роля може да изпълнява един операционен усилвател A (фиг. 2), който регулира изходното напрежение U_{out} , приложено от захранващия източник E към товара L (изхождаме от функционалната представа за операционния усилвател като *источник на напрежение, управляван с напрежение*).

¹ наричана формално „принцип на отрицателната обратна връзка“.

Идея за възможно най-елементарното сумиращо, изваждащо и в крайна сметка сравняващо устройство на напрежения пък ни дава II закон на Кирхоф. За целта просто включваме последователно и противоположно в един контур източникът на входно U_{in} и изходно напрежение U_{out} . Изходът на това последова-



Фиг. 2

телно сравняващо устройство ($dU = U_{in} - U_{out}$) обаче е „плаващ“ - проблем, породен от общата „маса“ на входния източник, товара и захранващия източник. Това ни принуждава да използваме задължително операционен усилвател с диференциален вход. **Извод 1:** Простото последователно сравняващо устройство изисква сложен усилвател с диференциален вход.

Изходното напрежение трябва да има същата полярност като входното (за да се изважда в контура) и да клони към него. Тези изисквания ни принуждават да подадем входното напрежение U_{in} към неинвертиращия, а изходното U_{out} - към инвертиращия вход на операционния усилвател. **Извод 2:** Последователното сравняващо устройство прави схемата неинвертираща.

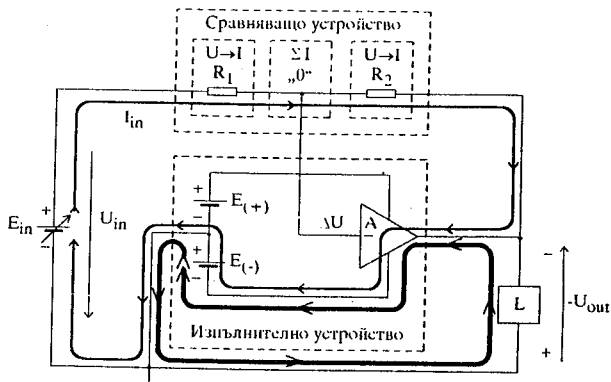
Операционният усилвател в тази схема действа подобно на героите от разгледаните вече житейски ситуации - при промяна на входното напрежение U_{in} (причината) той „усеща“ с помощта на електрическите си „сетива“ потенциалната разлика dU и започва да изменя изходното си напрежение U_{out} (следствието) в същата посока докато не го изравни с входното².

Ето как по един естествен, „човешки“ начин, изградихме най-елементарното устройство, представител на класа от схеми с последователна ООВ и изследвахме действието му. А сега нека решим същата задача като използваме операционен усилвател с обикновен (единичен, несиметричен) вход.

2.2.2. ИНВЕРТОР НА НАПРЕЖЕНИЕ. Очевидно, в този случай се нуждаем от сравняващо устройство с несиметричен изход. Това свойство притежава *паралелният суматор на напрежения*, който можем да вземем наготово от [2], или да изградим в следната последователност.

² Обратно на класическия, статичен анализ на схемата, тук приемаме, че по време на преходния процес операционният усилвател реагира с известно закъснение на промяната на входното напрежение (т.е. разглеждаме го по-скоро като интегрално, а не като пропорционално, безинерционно устройство). Това ни позволява да си представим действието на схемата не като застинала „снимка“, а „кинематографично“, в движение. При това качествено разглеждане пренебрегваме и така наречената *статична грешка* $dU = U_{out}/A$ (поради големия коефициент на усилване A).

II закон на Кирхоф ни даде идеята да използваме един контур като елементарен последователен суматор на напрежения. Аналогично, според I закон на Кирхоф, един възел може да играе ролята на *паралелен суматор на токове*. Достатъчно е да включим към входовете му преобразуватели *напрежение-ток* и



Фиг. 3

той се превръща в така необходимия ни *паралелен суматор на напрежения*. Следвайки идеята на блоковата схема от фиг. 1, добавяме като изпълнително устройство операционен усилвател с несиметричен вход и получаваме още един вариант на система-повторител с ООВ - фиг. 3. Извод 1: По-сложното паралелно сравняващо устройство изисква по-прост усилвател с несиметричен вход (възможно, но не и задължително е да се използва усилвател с диференциален вход като "излишния" му инвертиращ вход се дава на "маса").

За да изпълнява функциите на изваждащо (сравняващо) устройство, входното и изходното напрежение трябва да бъдат с различна полярност спрямо общата „маса“ (т.е., необходимо е да инвертираме едно от двете напрежения). Освен това, изходното напрежение трябва да се изменя в правилната посока (да клони по стойност към входното). Тези изисквания ни принуждават в крайна сметка да използваме инвертиращ операционен усилвател. Извод 2: Паралелното сравняващо устройство прави схемата инвертираща.

Нека да разгледаме „кинематографично“ действието и на тази схема като приемем, че в началото входното напрежение U_{in} е равно на нула. Системата е „отработила“ това задание ($U_{out} = 0, dA = 0$) и в схемата не текат никакви токове.

Ако входното напрежение (причината) рязко се повиши, операционният усилвател не успява да реагира в първия момент и изходното му напрежение остава равно на нула. От положителния полюс на входния източник „потича“ ток I_{in} в указаната на фиг. 3 посока. Потенциалът в изхода на сравняващото устройство се повишава моментално до стойност $dU = R_2 / (R_1 + R_2) \cdot U_{in}$. Операционният усилвател „усеща“ с помощта на инвертиращия си вход това положително разсъгласуване и започва да понижава изходното си напрежение U_{out} (следствието) докато напрежението dU не стане отново равно на нула. Процесите са аналогични и при отрицателно входно напрежение³.

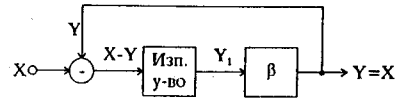
³ Действието на схемата може да се визуализира по един атрактивен начин чрез метода на потенциалната диаграма [2].

3. СИСТЕМА ПОВТОРИТЕЛ С ОТРИЦАТЕЛНА ОБРАТНА ВРЪЗКА В УСЛОВИЯТА НА СМУЩЕНИЯ. За да изясним смисъла от въвеждането на ООВ в системите-повторители нека ги подложим на смущаващи въздействия.

3.1. ЖИТЕЙСКИ ПРИМЕРИ (АНАЛОГИИ) НА “СМУТЕНИ” ПОВТОРИТЕЛИ.

Да изберем някои от житейските ситуации (т.2.1.), в които принципът на ООВ действа в условията на смущения.

Ако наклонът на пътя пред автомобила започне да расте, шофьорът натиска „по-яко“ педала на „газта“ - с цената на допълнителна мощност двигателят компенсира спадането на скоростта. Когато автобусът прави завой, наклоняваме неволно тялото си в обратната посока за да запазим вертикалното му положение. Ако си сложим слушалки, без да съзнаваме това, започваме да говорим високо - така компенсираме смущението във веригата на акустическата обратна връзка, която ни позволява да поддържаме зададеното ниво на говора и т.н.

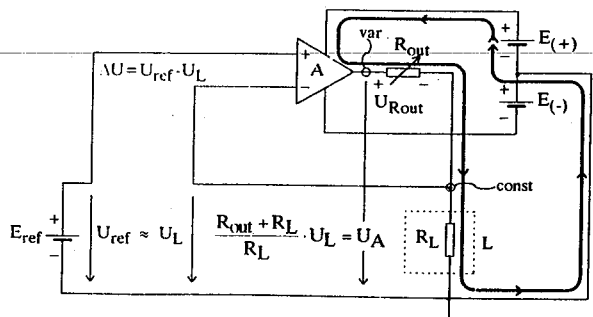


Фиг. 4

Във всичките тези примери изпълнителното устройство е принудено, с цената на допълнителни усилия, да “повдигне” изходната си величина Y_1 за да преодолее загубата, предизвикана от смущението β и да поддържа равенството $Y = X$ - фиг. 4. За да постигне това, то трябва да разполага с излишък от енергия.

3.2. “СМУТЕН” ПОВТОРИТЕЛ НА НАПРЕЖЕНИЕ. Подобно е поведението и на операционния усилвател в една електрическа система-повторител (например стабилизатор на напрежение), когато е принуден да компенсира смущението, предизвикано от изходното му съпротивление R_{out} (или съпротивлението на дългата съединителна линия) и съпротивлението R_L на товара - фиг. 5.

Ако обратната връзка е взета след това пропорционално (мултипликативно) смущение $\beta = R_L / (R_{out} + R_L)$, усилвателят го елиминира като „повдига“ $1/\beta$ пъти изходното си напрежение U_A^4 .



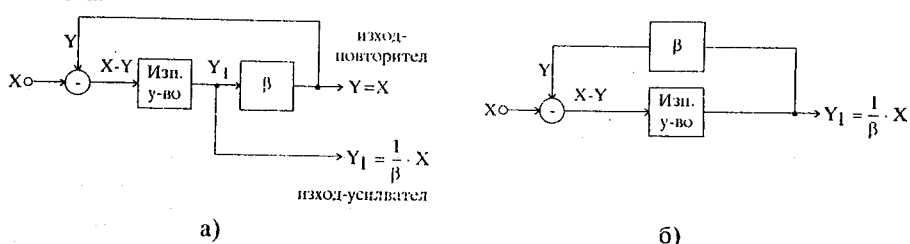
Фиг. 5

⁴ Този експеримент илюстрира и свойството на отрицателната обратна връзка да намалява изходното съпротивление на усилвателя (превръща го от реален в идеален източник на напрежение).

4. СИСТЕМА-УСИЛВАТЕЛ С ОТРИЦАТЕЛНА ОБРАТНА ВРЪЗКА.

4.1. ЖИТЕЙСКИ ПРИМЕРИ НА СИСТЕМИ-УСИЛВАТЕЛИ. Нека продължим да анализираме поведението на „смутените“ системи-повторители. Например, да включим незабелязано за шофьора, в участъка между трансмисията и спидометъра на автомобила предавка, намаляваща два пъти оборотите. В стремежа си да компенсира това смущение той натиска педала на „газта“ докато не възстанови отново равновесието - автомобилът започва да се движи с двойно по-голяма скорост. Хората с увреден слух започват да говорят по-високо за да компенсират смущението във веригата на акустическата обратна връзка (същият ефект се получава, ако човек с нормален слух си постави слушалки на ушите). Ако пред едно живо същество, поставило си някаква цел, се изпречи препятствие, то усилва неговата енергия - така човек, преодолявайки препятствията в живота се усъвършенства. Следователно, в стремежа си да компенсират „вредните“ смущаващи въздействия системите-повторители с ООВ се превръщат в ... системи-усилватели. Ето я идеята за „изобретяване“ на усилвател с ООВ!

Системата-повторител превръщаме в система-усилвател като умислено включим във веригата на ООВ пропорционално смущение (затихване) β с неизменна стойност - фиг. 6а и вземем изходния сигнал Y_1 преди това смущение - фиг. 6б. При това системата-повторител с изход Y остава да съществува без да се използва.

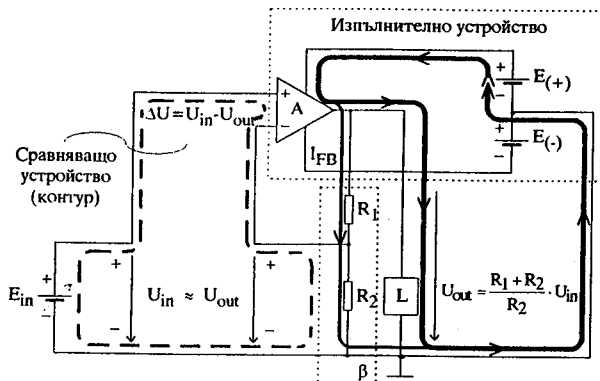


Фиг. 6

4.2. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СИСТЕМИ-УСИЛВАТЕЛИ. Сега остава просто да приложим тази „рецепта“ върху електрическите повторители и те ще се превърнат в усилватели.

4.2.1. НЕИНВЕРТИРАЩ УСИЛВАТЕЛ. Идеята за тази схема ни дава директно фиг. 4 - просто включваме едно затихващо устройство (делител на напрежение R_1-R_2) във веригата на отрицателната обратна връзка и получаваме *неинвертиращ усилвател* - фиг. 7. Операционният усилвател е „излъган“ и принуден да повиши

$(R_1+R_2)/R_2$ пъти изходното си напрежение U_{out} (сега то съвпада с напрежението на товара L)⁵.



Фиг. 7

4.2.2. ИНВЕРТИРАЩ УСИЛВАТЕЛ. Още по-просто се получава инвертиращ усилвател, защото при него „електрическата везна“ $R_1 - R_2$ изпълнява едновременно ролите на сравняващо и затихващо устройство - фиг. 3. Нещо повече - като променяме отношението R_2/R_1 на това уникално устройство получаваме *повторител* ($R_1 = R_2$), *усилвател* ($R_1 < R_2$) или *затихвател* ($R_1 > R_2$).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Формулираните в тази статия идеи могат да бъдат доразвити и обобщени в най-общи правила за потискане на вредни и използване на полезни смущаващи въздействия. С тяхна помощ могат да се „изобретяват“ и по-сложни аналогови електронни устройства като: схеми с Т-образен мост във веригата на ООВ; програмируеми усилватели; схеми, в които смущаващото въздействие се превръща във входен сигнал (преобразуватели *съпротивление-напрежение*, цифрово-аналогови преобразуватели с матрица $R-2R$, активни сензори) и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мечков, К. Евристичен курс по аналогова електроника. XXXII Научна сесия по комуникационни, електронни и компютърни системи, Технически университет - София, 16 май 1997.
2. Мечков, К. Интерактивна потенциална диаграма, използвана като метод за визуализация в евристичен курс по аналогова електроника. Научна сесия по комуникационни, електронни и компютърни системи, Технически университет - София, 16 май 1997.

⁵ Схемата може да се разглежда и като един „обърнат делител на напрежение“ (входното напрежение е приложено в изхода на делителя, а изходното се получава на входа му).