

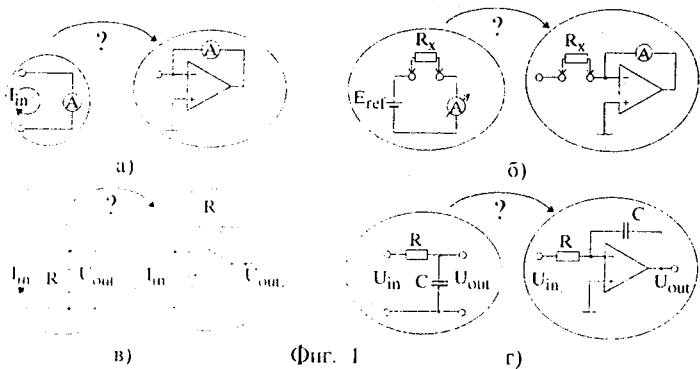
**ЕВРИСТИЧНИ МЕТОДИ ЗА ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ПАСИВНИ
АНАЛОГОВИ УСТРОЙСТВА В АКТИВНИ СХЕМИ С ОТРИЦАТЕЛНА
ОБРАТНА ВРЪЗКА**

гл. ас. инж. Кирил Светославов Мечков
Технически университет - София

SUMMARY: The principle of the negative feedback holds central position in the heuristic course on analogue electronics. An approach to its presenting is given in previous article where the "invention" of the series and parallel negative basic devices is illustrated by phenomenon well-known from common experience. In the present paper the author offers another two original methods with the help of which the passive analogue devices are "reborn" in a most natural way into negative feedback active circuits. The first method, figuratively called "destroying a disturbance by means of an antidisturbance" presents two possibilities for the use of a parallel negative feedback. The method "destroying the original without using the copy" is applied in the following way: 1) "inventing" a passive circuit in ideal working conditions; 2) connecting a load which causes "disturbing" voltage; 3) compensating the "disturbing" voltage by means of "antivoltage". In this way the passive voltage to current convertors and the resistance to voltage convertors, the real ampermeter etc. are converted into ideal ones. Then the method is further developed into "destroying the original by using the copy" by adding one more point: 4) using the compensating "antivoltage" as an output signal. This variant of the method allows a number of popular passive analogue devices to be converted into ideal current to voltage convertors and resistance to voltage convertors, parallel voltage summator, integrator and differentiator, logarithmator and antilogarithmator etc. With the help of this interpretation new viewpoints are given for presenting the inverting amplifier (inverting voltage divider, series connected ideal voltage to current and current to voltage convertors). The second method again figuratively called "copying without destroying the original" reveals the property of the series feedback not to influence the input generator. By using this method the passive noninverting resistive voltage summer, current integrator, exponential generator etc. become active which confirms the author's main idea that the active analogue devices are improved passive devices.

1. УВОД. Традиционните курсове по аналогова електроника са изградени върху класически „сценарий“, идеята на който най-общо се заключава в следното. Първо се „поднасят наготово“ пасивните аналогови устройства, анализират се с помощта на формални методи и се доказва колко несъвършени са те. След това се „сервират“ (отново в завършен и окончателен вид) активните схеми - аналози на същите устройства и пак с помощта на формални методи се доказва, че благодарение на

принципа на отрицателната обратна връзка те са почти идеални (примери за такива устройства са измервателен ток - фиг. 1а и съпротивление - фиг. 1б, преобразувателят ток-



напрежение - фиг. 1в, интеграторът на напрежение - фиг. 1г и много други). Парадоксалното в случая обаче е, че тези на пръв поглед прости, елементарни, красиво и икономично начертани в „рецептурните“ книги по електроника устройства остават в крайна сметка непонятни за студентите.

При това изкуствено разделяне на аналоговите устройства на пасивни и активни, съвсем основателно възникват и следните въпроси: „Не съществува ли някаква закономерна връзка между пасивните и активни схеми? Не можем ли да открием всеобщи методи, с помощта на които по един естествен начин да преобразуваме несъвършените пасивни аналогови устройства в аналогичните им активни схеми? Какъв вид отрицателна обратна връзка (паралелна или последователна) трябва да използваме във всеки от конкретните случаи? Отговори на тези въпроси ни дава настоящата статия, в която с помощта на принципите от евристичния курс по аналогова електроника [1] се доразвива еволюционния подход за изграждане на устройствата с ООВ [2].

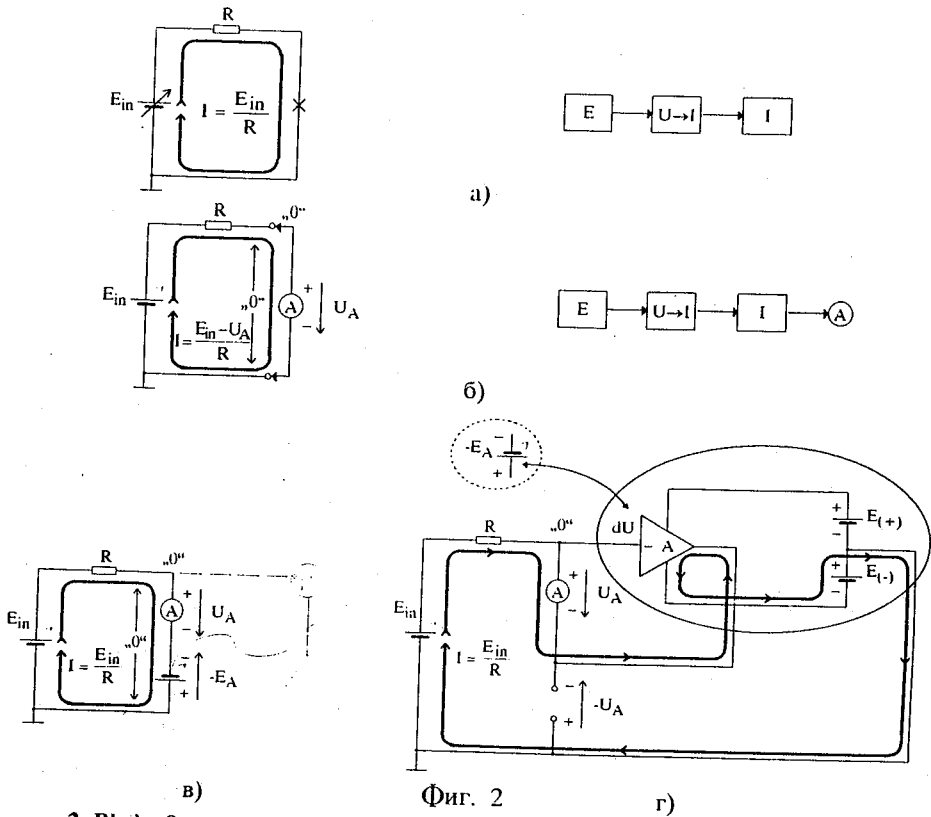
2. ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ПАСИВНИ СХЕМИ В АКТИВНИ ЧРЕЗ МЕТОДА „АКТИВНО КОПИРАНЕ С УНИЩОЖАВАНЕ НА ОРИГИНАЛА“.

2.1. МЕТОД „УНИЩОЖАВАНЕ БЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА КОПИЕТО“. Ако анализираме нашето поведение в редица житейски ситуации, ще открием следния основен феномен.

Когато при осъществяване на определена цел от нашето ежедневие се появи вредно смущение ние го унищожаваме като изработваме чрез „активно копиране“ равно по стойност полезно „антисмущение“, което изваждаме от вредното смущение. ПРИМЕРИ: разболяваме се - започваме да вземаме лекарства, докато възстановим здравето си; уморени сме - почиваме; огладняваме - храним се; изразходваме пари - работим усилено, за да ги възстановим; явява се конкурент в търговията - „унищожаваме“ го с дъмпинг на цените; появява се тегло в лявото блюдо на везната - „унищожаваме“ го с „антитегло“ в дясното блюдо; корабът се пълни с вода - изпомпваме я с помпа и т.н. Казано по друг начин: Ако едновременно с едно действие създаваме и „антидействие“, ефектът е нулев. ПРИМЕРИ: правим нарушение и си плащаме глобата; настъпваме някого (умишлено) и едновременно с това му се извиняваме и т.н.

Нека сега чрез този метод се опитаме да превърнем „пасивния“ амперметър от фиг. 1а в „активен“ като разсъждаваме в следната последователност.

1. „Изобретяваме“ пасивната схема при идеални условия на работа. За целта можем да използваме най-елементарната пасивна схема - преобразувателя напрежение-ток R (фиг. 2а), която преобразува входното електродвижещо напрежение E_{in} в изходен ток I_{out} [1]. Идеалните условия за работа на това устройство се получават при даден „накъсо“ изход - тогава, съгласно закона на Ом, токът зависи само от съпротивлението и напрежението ($I_{out} = E_{in}/R$).



Фиг. 2

2. Включваме консуматор, който създава „смуцаващо“ напрежение. В конкретния случай решаваме да измерим тока чрез обикновен магнителектрически амперметър А (фиг. 2б). Върху неговото вътрешно съпротивление R_A обаче възниква вредно „смуцаващо“ напрежение U_A и токът намалява - $I_{out} = (E_{in} - U_A)/R$.

3. Компенсираме „смуцаващото“ напрежение чрез „антинапрежение“. За целта включваме последователно и противоположно на напрежението U_A обратно, компенсиращо напрежение $-E_A$ (фиг. 2в). Получаваме го от един регулируем източник, чието напрежение изменяме така, че потенциалът в горната част на амперметъра да бъде винаги равен на нула (така наречената „виртуална маса“). В резултат на това напрежението $-E_A$ на регулируемия източник представлява едно „активно копие“ на „оригиналното напрежение“ U_A , изработено чрез принципа на отрицателната обратна връзка. Преобразувателят *напрежение-ток* R е сякаш „излъган“ - той не „разбира“, че амперметърът продължава да е включен, а си „мисли“, че изходът му е даден „накъсо“ ($dU = U_A - E_A = 0$) и токът отново е $I_{out} = E_{in}/R$. Казано по друг начин:

Електродвижещото напрежение на регулируемия източник $-E_A$ се добавя към електродвижещото напрежение E_{in} на входния източник и по този начин компенсира загубите на електрическа енергия в амперметъра.

4. "Възлагаме" ролята на регулируем източник на един операционен усилвател. Като „наблюдава“ потенциала на „виртуалната маса“, операционният усилвател регулира изходното си напрежение $-U_A$ така, че то да бъде винаги равно на „вредното“ напрежение U_A (фиг. 2г). Нека да разгледаме „кинематографично“ действието на схемата като приемем, че в началото входното напрежение $E_{in} = 0$. Системата е „отработила“ това задание ($-U_A = 0, dU = 0$) и ток не тече.

Ако входното напрежение 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} през резистора R и амперметъра A , влиза в изхода на операционния усилвател, преминава през отрицателния хранващ източник $E_{(-)}$, отива в „истинската маса“ и оттам се връща до отрицателния полюс на входния източник. Потенциалът на „виртуалната маса“ се „повдига“ моментално до стойност $dU = R_A/(R + R_A) \cdot E_{in}$, но операционният усилвател „усеща“ това и го „издърпва“ обратно до нулевото положение.

Сега остава само да начертаем „красиво“ схемата като я изчистим от всички „излишни“ подробности. Така получаваме аскетичната фиг. 1а, която вече можем да поместим в една традиционна, „рецептурна“ книга по електроника.

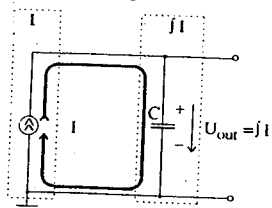
Други пасивни устройства, които може да се превърнат в активни с помощта на този метод, са например преобразувателят *съпротивление-ток* ($E_{in} = \text{const}$, $R = \text{var}$, т.е. *идеален олтметър* - фиг. 1б) и делителят *напрежение/ток* ($E_{in} = \text{var}$, $R = \text{var}$). Освен амперметър, консуматори могат да бъдат светодиоди, акумулатори и други устройства.

2.2. МЕТОД "УНИЩОЖАВАНЕ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА КОПИЕТО". В разгледаните до този момент примери ние само унищожаваме, компенсираме една величина с противоположната ѝ. В редица житейски ситуации обаче се интересуваме и от стойността на вредната величина.

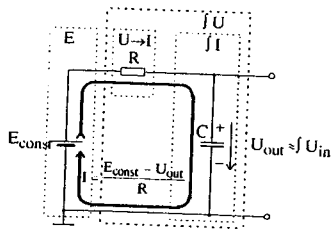
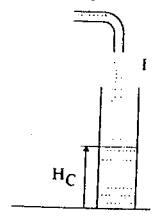
Представа за степента на едно вредно смущение получаваме като измерим косвено стойността на полезното „антисмущение“, чрез което сме го унищожили. ПРИМЕРИ: по количеството лекарства, които се принуждаваме да приемем, съдим за степента на нашето заболяване; доколко сме уморени се разбира от това, колко дълго почиваме; количеството храна, която поглъщаме, показва колко сме били огладнели; сумата от теглилките в дясното блюдо дава оценка на неизвестното тегло в лявото блюдо; колкото е по-голяма пробойната на кораба, толкова по-усилено изпомпваме водата и т.н.

Нека с помощта на този метод да превърнем пасивния интегратор на напрежение (фиг. 1г) в активен като илюстрираме разсъжденията си с ефектната хидравлическа аналогия - фиг. 3.

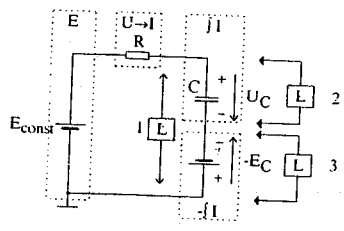
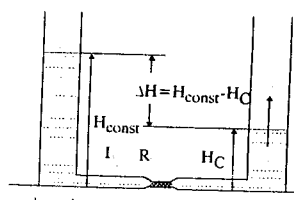
1. "Изобретяваме" пасивната схема при идеални условия на работа. Кондензаторът представлява идеален *интегратор на ток* (фиг. 3а), защото изходното му напрежение се изменя линейно във времето при постоянен входен ток



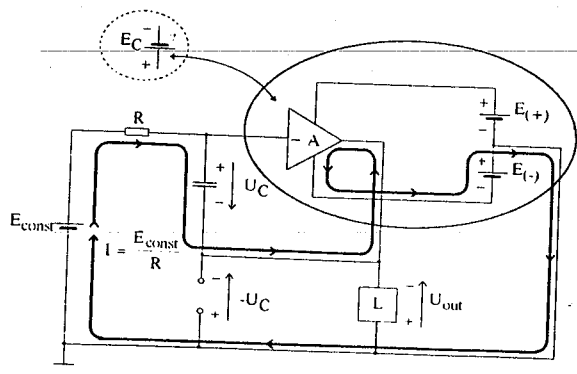
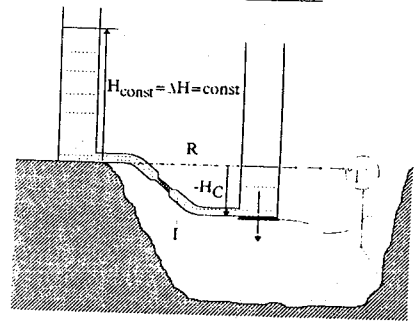
а)



б)



в)



г)
Фиг.3

(така, както нивото на водата в един цилиндричен съд расте линейно във времето при постоянен дебит на водната струя). За да го превърнем в *интегратор на напрежение* включваме на входа му преобразувател *напрежение-ток* R (фиг. 3б). Това устройство работи при идеални условия само в първия момент, когато кондензаторът е напълно разреден (тогава $I = E_{const}/R$).

2. Включваме консуматор, който създава „смущаващо“ напрежение. Кондензаторът започва да се зарежда, върху него възниква вредно „смущаващо“ напрежение $U_c = U_{out}$ и токът намалява - $I = (E_{const} - U_{out})/R$. Образно казано, напрежението върху кондензатора „обезсилва“ електродвижещото напрежение на входния източник, защото се изважда от него.

3. Компенсираме „смущаващото“ напрежение чрез „антинапрежение“. Като следваме познатата идея, включваме последователно и противоположно на напрежението U_c обратно, компенсиращо напрежение $-E_c$ (фиг. 3в). По този начин, когато напрежението U_c расте в положителна посока, неговото „активно копие“ $-E_c$ се изменя в отрицателна посока. Преобразувателят *напрежение-ток* R отново се „чувства комфортно“, защото „има чувството“, че изходът му е даден „накъсо“ и токът остава постоянен ($I = E_{const}/R$).

В хидравличната аналогия това означава да спускаме десния съд-кондензатор под земята така, че нивото на течността в него да стои винаги на нивото на земната повърхност. Тогава разликата в двете нива и дебитът на течността, протичаща през свързващата тръбичка, остават постоянни.

Сега остава да решим откъде да вземем изходния сигнал. В изхода на преобразувателя *напрежение-ток* R (положение 1) напрежението е „унищожено“ и затова там е безсмислено да включваме товара L . Върху кондензатора C има необходимото ни линейно изменящо се напрежение, но ако включим към него товара L (положение 2) възникват два проблема. Първо, товарът ще отклонява през себе си част от тока (особено, ако е нискоомен). Второ, товарът е „плаващ“ (няма връзка с общата „маса“). Остава последното решение - да използваме като изходен сигнал компенсиращото „антинапрежение“ (положение 3) и тези недостатъци са отстранени.

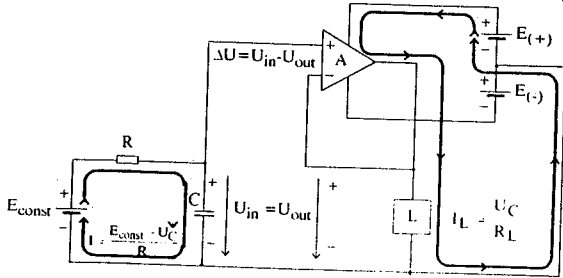
4. „Възлагаме“ ролята на регулируем източник на един операционен усилвател като неговото напрежение става изходно.

Множество други пасивни устройства може да се превърнат в активни с помощта на този метод - *диференциатор*, преобразуватели *ток-напрежение* (фиг. 1в) и *съпротивление-напрежение*, делител *напрежение/ток* и умножител *ток x съпротивление*, логаритмично и антилогаритмично устройство, и др.

Не е трудно да се забележи, че и двата метода се основават на използването на паралелна отрицателна обратна връзка. Следователно, паралелната отрицателна обратна връзка има свойството да компенсира енергийните загуби в пасивната верига с помощта на допълнително „инжектиране“ на енергия. Тя просто добавя толкова електрическа енергия, колкото се губи в допълнително включения елемент и по този начин поддържа неизменен тока, протичащ през него.

3. ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ПАСИВНИ СХЕМИ В АКТИВНИ ЧРЕЗ МЕТОДА „АКТИВНО КОПИРАНЕ БЕЗ УНИЩОЖАВАНЕ НА ОРИГИНАЛА“. В някои житейски ситуации извършваме „активно копиране“, но без да унищожаваме изходната величина („оригинала“). **ПРИМЕР:** стремим се да постигнем това, което друг е постигнал, но без да го ощетяваме или да му помагаме (т.е. без да му въздействаме).

В аналоговата схемотехника също не винаги е необходимо или дори не е желателно да се компенсират загубите в пасивната верига. Така например, ако се нуждаем от експоненциално, а не от линейно изменящо се напрежение във времето, веригата от фиг. 3б си върши добре работата. В този случай напрежението върху кондензатора U_C не е вредно, а полезно за нас. Затова няма да го „унищожаваме“, а само ще го „изкопираме“ върху товара L с последователна отрицателна обратна връзка - фиг. 4.



Фиг. 4

Системите с последователна отрицателна обратна връзка не компенсират енергийните загуби в пасивните вериги. Те просто „наблюдават“ напрежението върху допълнително включения елемент и го „копират“ върху товара.

Сега вече можем да направим следния генерален извод:

Ако напрежението върху допълнително включения в пасивната верига елемент е вредно за нас, ние го „унищожаваме“ чрез система с паралелна отрицателна обратна връзка, а когато е полезно - просто го буферираме чрез система с последователна отрицателна обратна връзка.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Съвкупността от предложените в [2] и настоящата статия методи позволяват устройствата с отрицателна обратна връзка да бъдат „изобретени“ по един естествен и понятен за човешкото мислене начин. Те не дават готова информация, а формират мисловния „инструментарий“ на студентите.

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. Евристично представяне на принципа на отрицателната обратна връзка в аналоговата електроника. Шеста национална научно-приложна конференция ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА - „ЕТ'97“, 24-26 септември 1997 г., Созопол.