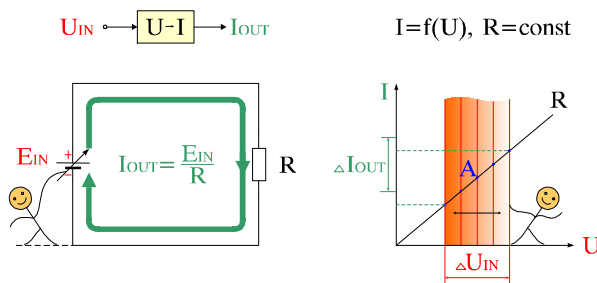
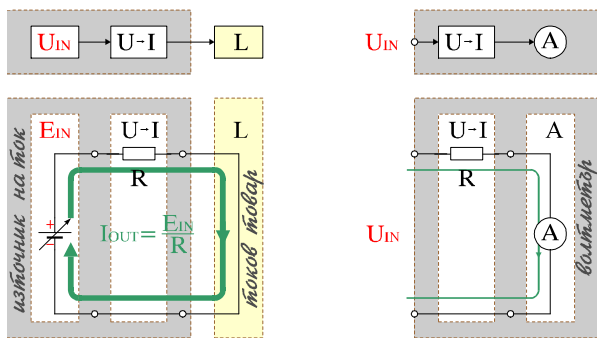


Статия 1: НАПРЕЖЕНИЕТО ПОРАЖДА ТОКА?

Нека първо се опитаме да "изобретим" най-елементарните аналогови устройства, които по-късно ще ни послужат като градивни елементи за "построяване" на по-сложни електронни схеми. За тази цел можем да използваме елементарната електрическа верига на Ом. Ако варираме с напрежението като входна величина при постоянно съпротивление и отчитаме тока като изходна величина, ще "изобретим" така необходимия ни преобразувател *напрежение-ток*. С него можем да изградим източник на ток чрез



източник на напрежение, да "построим" волтметър чрез амперметър и да решим множество практически задачи в схемо-



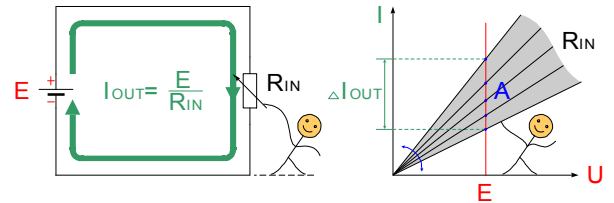
техниката.

Сега да разменим "ролите" - варираме със съпротивлението при постоянно напрежение и пак отчитаме тока като изходна величина. Така "изобретяваме" преобразувателя *съпротивление-ток*, с помощта на който пък можем да "построим" омметър чрез амперметър (за съжаление с нелинейна

Пасивни аналогови схеми.

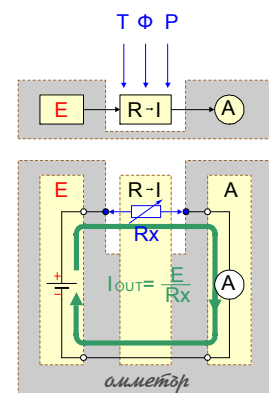
скала), схеми на резистивни сензори с токов изход за измерване на температура, светлина, налягане и други фи-

$$R_{IN} \rightarrow \boxed{R-I} \rightarrow I_{OUT} \quad I = f(U), R = \text{const}$$

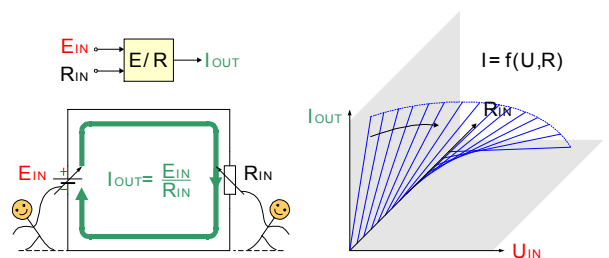


зически величини.

А ако варираме едновременно с на-



прежението и съпротивлението? Тогава получаваме ново аналогово устройство с два входа - делител *напрежение/съпротивление*. На негова основа например, можем по-късно да изградим един цифрово-аналогов преобразувател



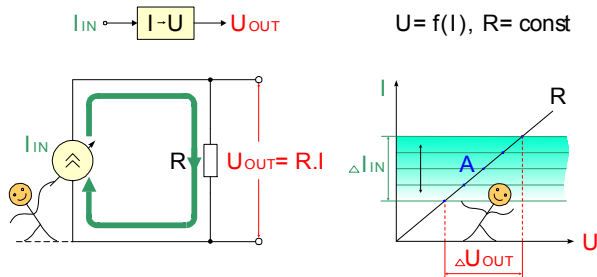
(DAC) с матрица R-2R.

До сега предполагаме, че устройствата работят при идеални условия (изходът им е даден "накъсо"). Какво ще стане обаче, ако все пак товарът има някакво съпротивление?

Статия 2: ТОКЪТ ПОРАЖДА НАПРЕЖЕНИЕТО?

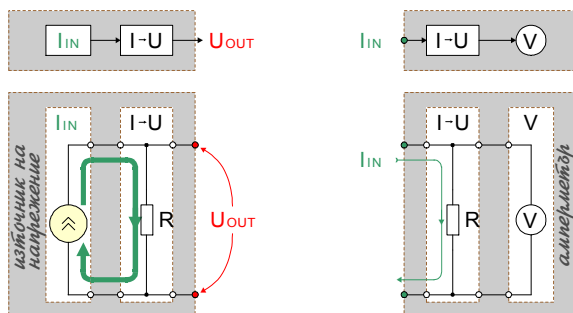
Като приехме, че напрежението поражда тока в основната електрическа верига на Ом (обичайната представа), успяхме да "изобретим" три изключително полезни аналогови устройства. Нека сега да обърнем причинно-следствената връзка и да приемем, че токът поражда напрежението - това означава да захраним веригата не от източник на напрежение, а от източник на ток.

Ако използваме "сценария" от миналата ни среща, първо започваме да варираме с тока при постоянно съпротивление и отчитаме напрежението като изходна величина. Така "изобретяваме" ценния за нас преобразувател *ток-напрежение*. С него можем да изградим източник на напрежение чрез



източник на ток (идеята на Нортън в електротехниката), да "построим" амперметър чрез волтметър и други.

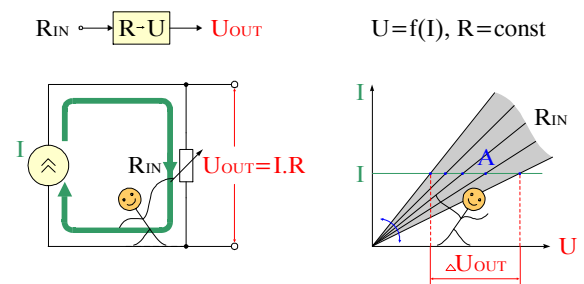
След това пак разменяме "ролите" - варираме със съпротивлението при



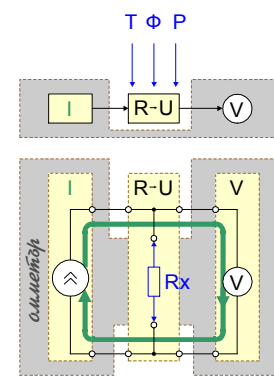
постоянен ток и отчитаме напрежението като изходна величина. В резултат на това получаваме преобразувател *съпротивление-ток*, с помощта

Пасивни аналогови схеми.

на който можем да "построим" омметър чрез волтметър (вече с линейна скала) и

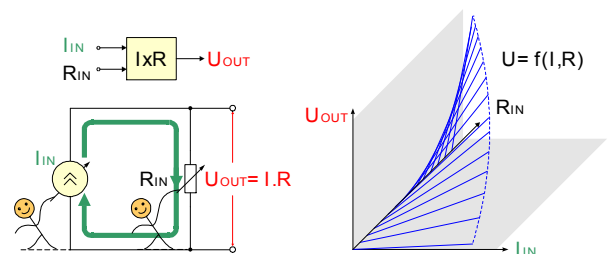


схеми на резистивни сензори с "напреженев" изход за измерване на разни



физически величини.

Накрая решаваме да варираме едновременно с тока и съпротивлението и получаваме отново едно екзотично аналогово устройство - умножител *ток x съпротивление*. На негова основа покъсно ще изградим още един вариант на цифрово-аналогов преобразувател с матрица R-2R.

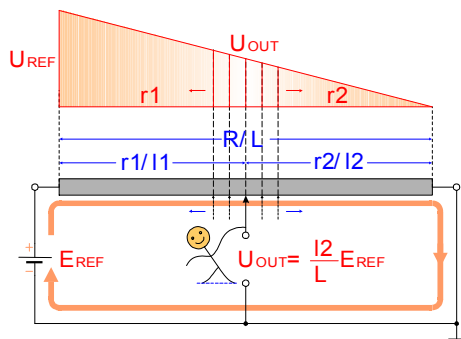


И отново пореден въпрос: "Какво ще стане, ако товарът не е идеален и има някакво съпротивление?"

Статия 3: РАЗХОЖДАЙКИ СЕ ПО СЪПРОТИВИТЕЛНИЯ СЛОЙ ...

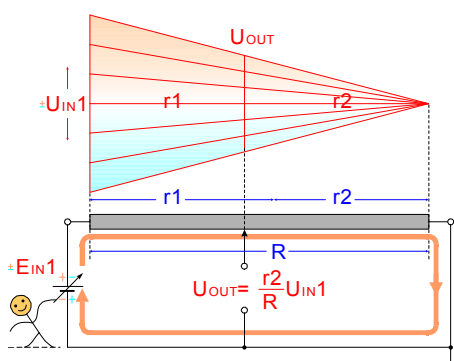
Преди повече от век и половина, с помощта на електроскоп, магнитна стрелка и много въображение, знаменитият Ом изследвал разпределението на потенциалите по дължината на електрически проводник. Ако повторим този прочут експеримент, с по-съвременни уреди и с не по-малко въображение, ще "изобретим" нови ценни аналогови устройства.

Първо захранваме един линеен резистор с постоянно напрежение и "опипваме" потенциалите по проте-



жение на резистивния слой - така получаваме чудесен линеен преобразувател *преместване-напрежение*.

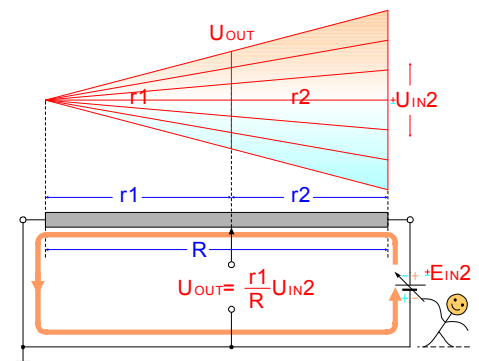
След това "застопоряваме" плъзгача и меним напрежението E_{IN1} - това пък е



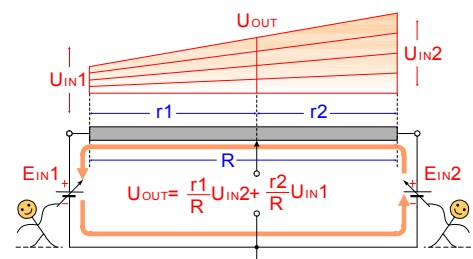
преобразувател *напрежение-напрежение* (делител на напрежение, управляван отляво). Същият резултат имаме и когато меним напрежението E_{IN2} - отново имаме делител на напрежение, но управляван отдясно.

Пасивни аналогови схеми.

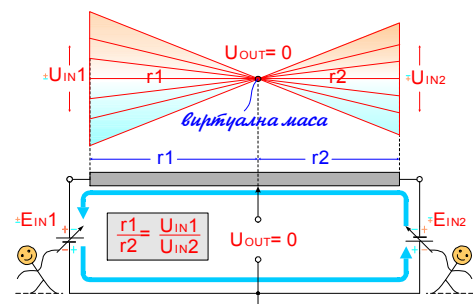
А ако меним едновременно и двете напрежения? Така пък "изобретяваме"



изключително ценния *резистивен суматор на напрежения*. Когато двете напрежения са разнополярни той се превръща в *изваждащо* и *сравняващо*



устройство, а върху резистивния слой се появява "вълшебната" точка с нулев потенциал, известна под името *виртуална маса*.

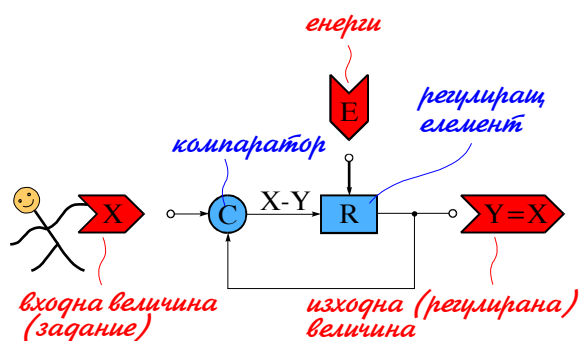


Този феномен ще използваме по-късно за да "изобретим" множество електронни аналогови устройства с паралелна отрицателна обратна връзка.

Статия 4: ПАСИВНО ИЛИ АКТИВНО КОПИРАНЕ?

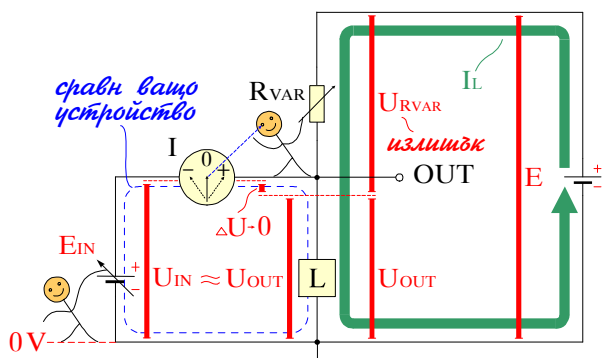
Да се заемем с една конкретна задача - *захранване на отдалечен товар от източник на напрежение*. Решаваме я по традиционния начин - свързваме източника и товара с проводник (най-простия "повторител" на напрежение). Но възниква проблем - част от напрежението се губи в съпротивлението на проводника (предполагаме, че в "масата" няма загуби).

Търсим решение на проблема в множество житейски ситуации, в които действа уникалният феномен *активно копиране*: шофьор кара автомобил; продавач тегли с везна; човек поддържа равновесие, температура и ниво на говор; преподавател обучава ученици; родител възпитава деца и т.н. Обобщаваме индуктивно примерите в блокова схема, а след това синтезираме



дедуктивно конкретни електрически повторители.

Първо сглобяваме един "ръчен" повторител - изработваме изходно нап-

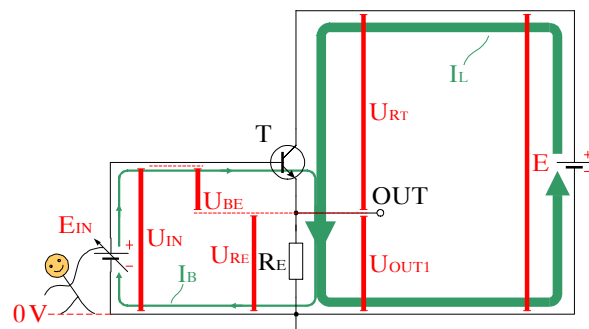


режение, сравняваме го с входното и го изменяме в съответната посока така, че

Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка.

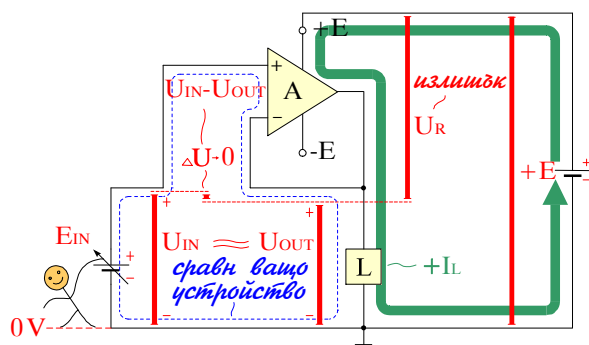
разликата между двете напрежения да бъде винаги равна на нула. Понеже сравняващото устройство е последователно (контур) получаваме повторител на напрежение с последователна отрицателна обратна връзка.

След това възлагаме тази рутинна работа на един транзистор и така получаваме прочутата схема на емитерен



повторител. Накрая усъвършенстваме схемата с помощта на операционен усилвател - това пък е идеален повторител на напрежение.

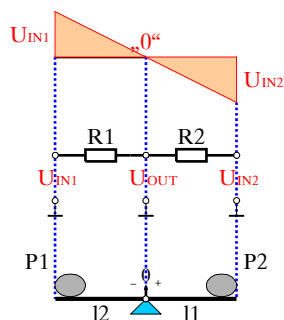
Изходът на последователното срав-



няващо устройство обаче е "плаващо", което ни принуждава да използваме задължително операционен усилвател с диференциален вход. На времето обаче не са съществували такива усилватели и все пак са успели да направят тази схема. Как? Възможно ли е да включим операционен усилвател с несиметричен вход? Отговор на този въпрос ще получим в следващата статия.

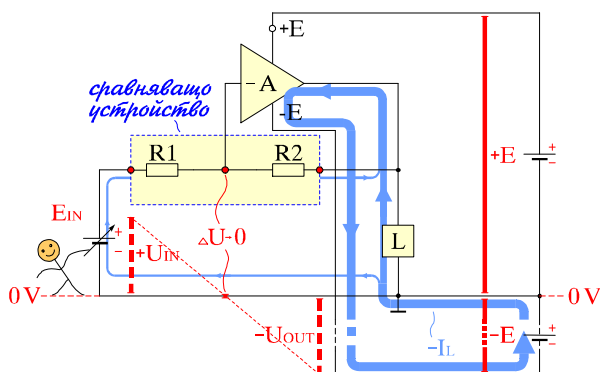
Статия 5: ПОСЛЕДОВАТЕЛНО ИЛИ ПАРАЛЕЛНО СРАВНЯВАНЕ?

Сега си поставяме задача да направим *повторител на напрежение чрез операционен усилвател с несиметричен вход*. Това изисква сравняващо устройство с несиметричен изход – за целта можем да използваме паралелния резистивен суматор на напрежения ("електрическата везна") от *статия 3*.



Добавяме като изпълнително устройство един най-обикновен операционен усилвател с несиметричен вход и получаваме още един вариант на активен повторител (този път с паралелна отрицателна обратна връзка).

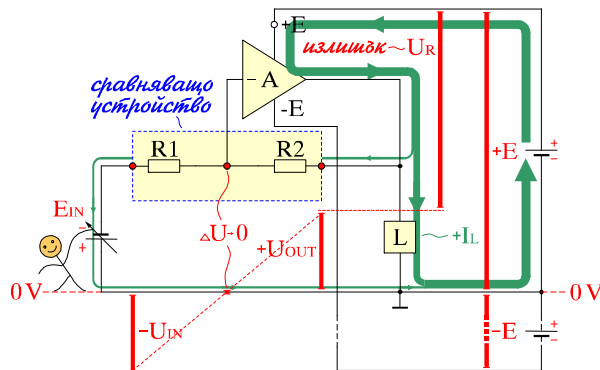
За да може резистивният суматор да сравнява входното и изходното напрежение, те трябва да са разнополярни. Това ни принуждава да инвертираме изходното напрежение - ето защо



вместо повторител получаваме инвертор.

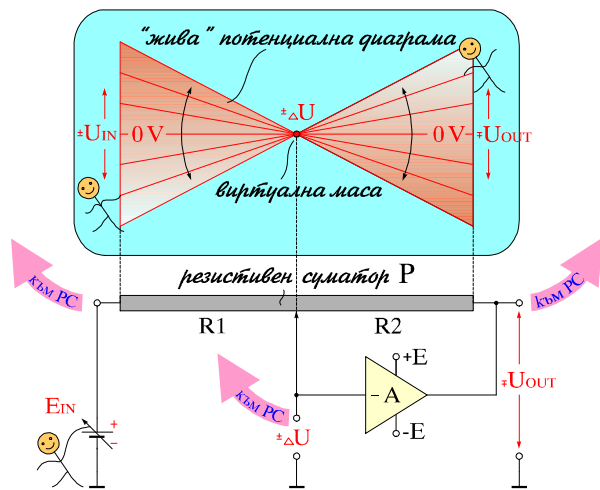
Когато входният източник повдига

потенциалната диаграма отляво, операционният усилвател "усеща" с инвертиращия си вход положителното отклонение



на виртуалната "маса" и започва да "спуска" потенциалната диаграма отдясно и обратно.

Резултатът - потенциалната диаграма се върти около точката с нулев потенциал, известна като "виртуална маса". Това можем да представим по атрактивен начин чрез една "жива" (интерактивна)

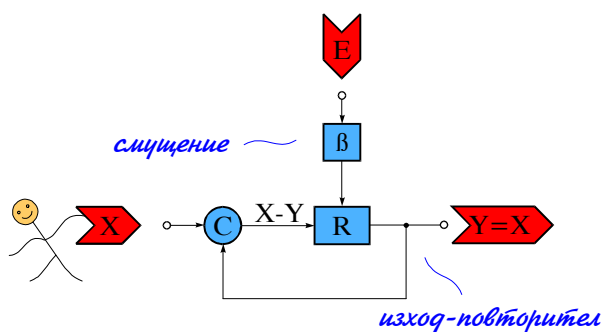


аналогия.

Картината на токовете пък илюстрира основното свойство на активните повторители - товарът консумира енергия не от входния, а от захранващия източник.

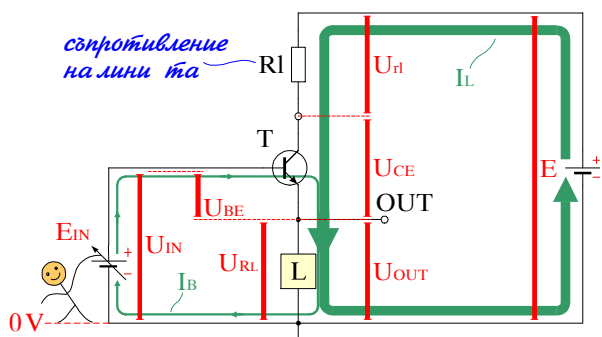
Статия 6: АКТИВНО КОПИРАНЕ В УСЛОВИЯТА НА СМУЩЕНИЕ

Накрая изследваме активните повторители в условията на смущение. Започваме с житейски ситуации: наклонът на пътя расте - натискаме "по-яко" педала на "газта"; автобусът прави завой - наклоняваме тялото си в обратната посока; поставяме слушалки на ушите си - започваме да говорим високо; студентите се разсейват - обясняваме повече и т.н. Обобщаваме примерите в блокова схема и правим



извод: с цената на допълнителни усилия активните повторители "повдигат" изходната си величина за да компенсират смущението. За да правят успешно това, те се нуждаят от достатъчно голям излишък от енергия.

Връщаме се отново към нашата конкретна задача - захранваме товар с помощта на емитерен повторител.



Смущаваме транзистора и наблюдаваме поведението му.

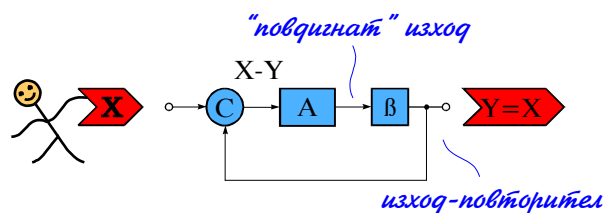
Ако съпротивлението на линията се увеличи, транзисторът намалява

Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка.

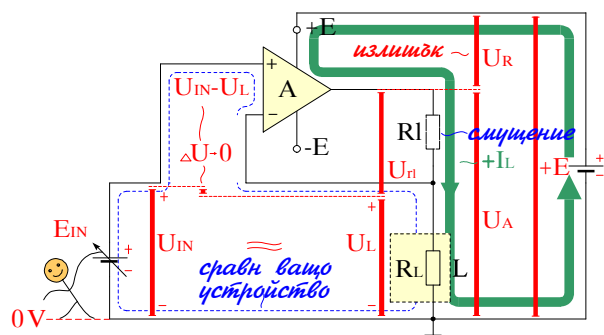
текущото си съпротивление R_{CE} , с което "подпомага" източника E. Напрежението върху транзистора U_{CE} допълва смущаващото напрежение U_{R1} и сумата им е неизменна.

Докато има дори минимален запас от съпротивление R_{CE} , съответно напрежение U_{CE} върху транзистора, напрежението върху товара стои неизменно. Когато обаче този излишък се "стопа" транзисторът изчерпва възможностите си да регулира тока във веригата ("насища" се), "магията" на активното копиране изчезва и напрежението върху товара започва да спада.

По същия начин и операционният усилвател в един повторител на напрежение компенсират смущенията, предизви-



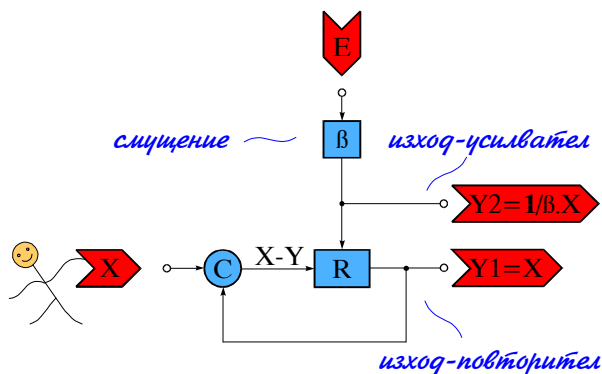
кани от съпротивлението R_L на дългата съединителна линия и съпротивлението R_L на товара. Трябва само да затворим веригата на отрицателната обратна връзка



след това пропорционално смущение $\beta = R_L / (R_1 + R_L)$ и усилвателят го елиминира като "повдига" $1/\beta$ пъти изходното си напрежение U_A преди смущението.

Статия 7: УСИЛВАНЕ ЧРЕЗ ... ЗАТИХВАНЕ!

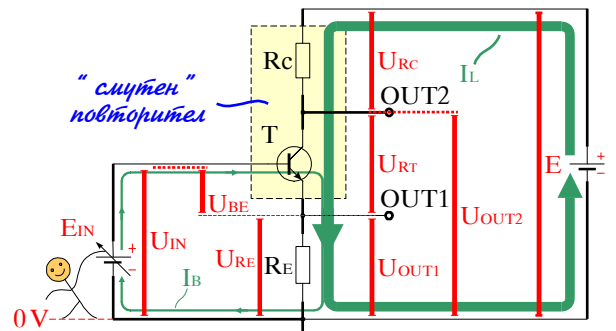
Следващият въпрос, която изниква логично пред нас е: *Как да превърнем активните повторители в усилватели?* Анализираме поведението на житейските активни повторители в условията на смущения и откриваме интересен феномен, който дава отговор на нашия въпрос. Примери: спидометърът на автомобила се е повредил и показанията му са два пъти по-малки от действителните - автомобилът се движи с двойно по-голяма скорост (получаваме *усилване на скорост*); удължаваме рамото на везната - *усилване на тегло*; запущваме си ушите - *усилване на говор*; определени обстоятелства ни пречат да осъществим целите си - преодоляваме ги като вършим подвизи. Следователно, в стремежа си да компенсират "вредните" смущаващи въздействия, активните повторители се превръщат в ... усилватели! Ето я идеята - активния повторител превръщаме в усилвател като го "смути" умишлено с пропорционално, неизменно по стойност смущение и използваме "смутения" изход!



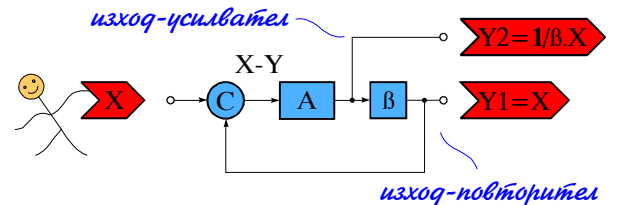
За да приложим тази идея на практика, в схемата на емитерния повторител просто включваме един "смущаващ" постоянен резистор R_C последователно на транзистора Т. Така получаваме по един естествен начин класическия транзисторен усилвател с отрицателна обратна връзка.

Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка.

В схемата на повторител с операционен усилвател пък включваме едно затихващо устройство (делител на напрежение

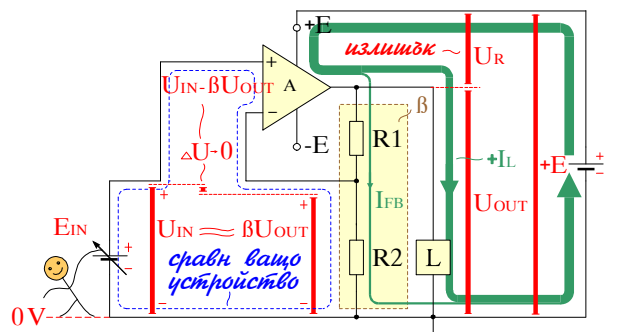


ние R_1-R_2) във веригата на отрицателната обратна връзка и така получаваме *неинвертиращ усилвател*. Операционният усилвател е "излъган" и принуден да повиши $(R_1+R_2)/R_2$ пъти изходното си напрежение U_{OUT2} , което сега съвпада с нап-



режението на товара L.

По аналогичен начин превръщаме инвертора в инвертиращ усилвател - като увеличаваме отношението R_2/R_1 затрудня-



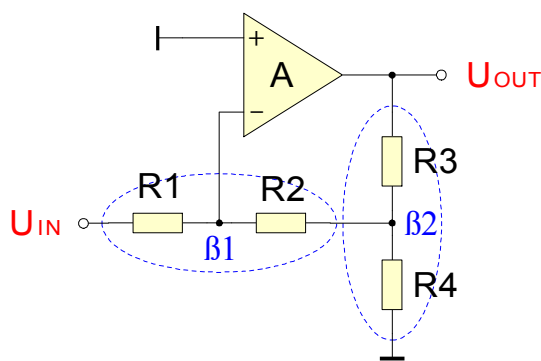
ваме операционния усилвател и го принуждаваме да увеличи R_2/R_1 пъти изходното си напрежение.

Интересно какво ще стане, ако намалим отношението R_2/R_1 ? Има ли смисъл от такава схема и къде можем да я приложим?

Статия 8: ЕДИНИЧНО, ДВОЙНО ... МНОГОКРАТНО СМУЩЕНИЕ!

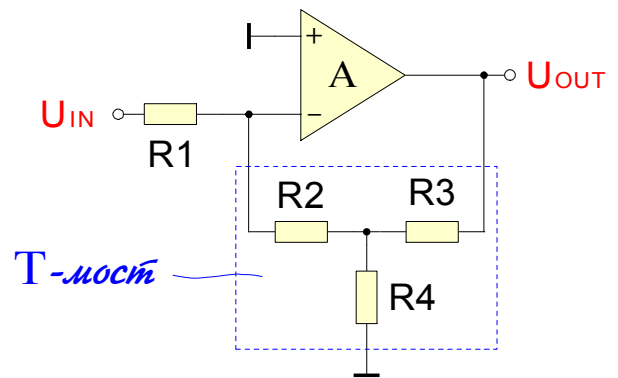
За да направим инвертиращ усилвател с голям коефициент на усилване k , трябва да увеличим значително отношението на съпротивленията $R2/R1$. Резисторът $R1$ определя входното съпротивление на схемата (понеже отдясно е "замасен виртуално") и затова е желателно да има сравнително голямо съпротивление. Това автоматично води до неприемливо голяма стойност на съпротивлението $R2$. Как можем да решим този проблем?

Като увеличавахме отношението $R2/R1$ ние смущавахме умишлено действието на инвертора [статия 7] и го принуждавахме да усилва. Аналогично, като включим делител на напрежение във веригата на отрицателната обратна връзка на един повторител, ние го "смущаваме" и също принуждаваме да усилва. А защо да не обединим двете смущения в една обща схема? Така ще



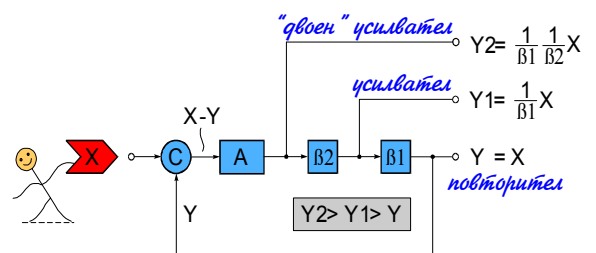
получим голямо усилване при разумни стойности на съпротивлението $R2$. Ако групираме резисторите така, че да се образува Т-образен мост, получаваме класическия вид на тази полезна схема.

В няколко поредни статии подложихме активните повторители на всевъзможни вредни и полезни смущения. Сега ще формулираме няколко **универсални правила** за използване на полезни и елиминирание на вредни



смущения в системите с отрицателна обратна връзка:

1. Затваряме веригата на отрицателната обратна връзка след последното смущение.
2. Ако дадено смущение е полезно, вземаме изходния сигнал преди него.



Тогава той ще зависи от смущението като го отразява адекватно.

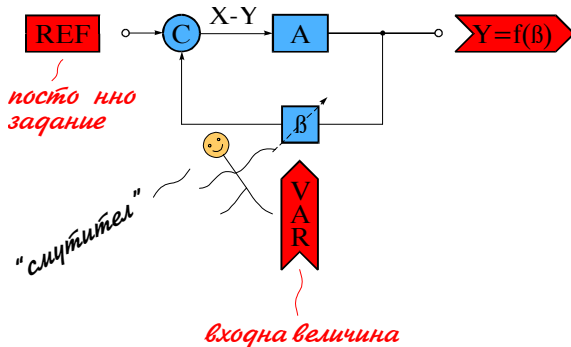
3. Когато едно смущение е вредно, тогава вземаме изходния сигнал след него. В този случай той няма да зависи от смущението - то е подтиснато, неутрализирано.

Нека си припомним отново основното изискване към системите с отрицателна обратна връзка. За да компенсира многократните смущения, изпълнителното устройство трябва да разполага с достатъчно голям излишък от енергия - в противен случай се "насища".

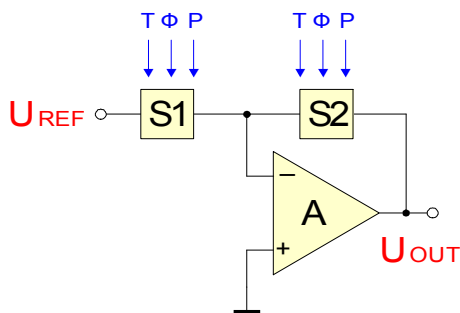
Статия 9: СМУЩЕНИЕТО - ВХОДЕН СИГНАЛ?

Вече наблюдавахме как в стремежа си да компенсира постоянно по стойност пропорционално смущение активният повторител се превръща в усилвател. А какво ще стане, ако започнем да варираме със смущението β при постоянно задание X на входа?

Изпълнявайки функциите на ста-

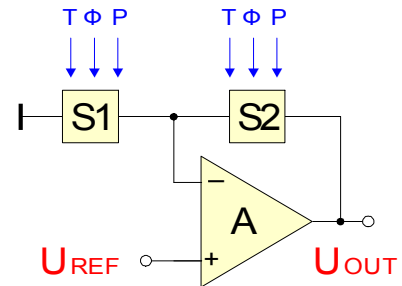


билизатор, активният повторител реагира на нашата интервенция като мени изходната си величина Y адекватно на смущението - т.е. превръща се в преобразувател от типа $\beta \rightarrow Y$. Ето как можем да изградим ефектни схеми на различни видове *резистивни сензори* (термо-, фото-, за налягане, преместване, звук и др.), включени не към традиционния вход, а във веригата на отрицателната обратна връзка на един повторител или инвертор! Така опростяваме схемите и



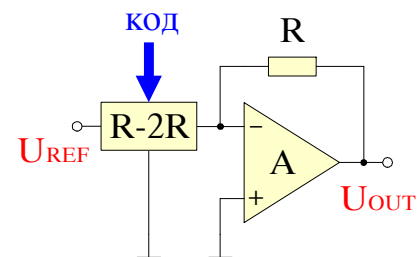
получаваме допълнителни "входни

точки", чрез които можем да им въздействаме.



По този начин можем да изградим (засега само идейно, на ниво "блокова схема") един умножаващ цифрово-аналогов преобразувател с *матрица $R-2R$* :

- ◆ "сглобяваме" един инвертор
- ◆ подаваме на входа му постоянно



(опорно) напрежение

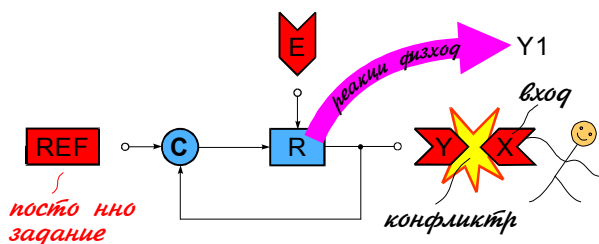
- ◆ "атакуваме" го с "цифрово-управлявано" смущение
- ◆ използваме реакцията му на това смущение като изходен сигнал.

А какви устройства ще получим, ако изменяме входното напрежение при постоянно смущение (постоянен цифров код), или меним едновременно и двете?

Статия 10: УСИЛВАНЕ ЧРЕЗ ... КОНФЛИКТ НА ПОТЕНЦИАЛИ!

Какво правим, ако действията на определен човек не ни се нравят? Убеждаваме го да промени поведението (заданието) си. Пример: искаме да преминем напред в автобуса, но някой ни пречи - молим го учтиво да ни направи път и той услужливо се отмества. Изводът: като променяме заданието X на един активен повторител ние управляваме по косвен начин изходната му величина Y .

Какво става обаче, ако се опитаме не така "елегантно", а *директно* да променим сигнала Y като атакуваме "силово" изхода на системата с величината X при постоянно задание на входа Y ? Тя реагира на това като се превръща в ... усилвател (ако напри-

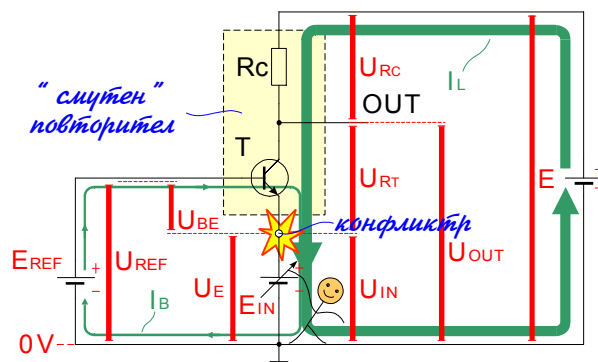


мер, вместо да помолим човека да ни направи път, просто го ... отместим от пътеката в автобуса, можем да отнесем някоя плесница). Настъпило е разместване на сигналите в блоковата схема: сега смущаващото въздействие X в изхода на системата-стабилизатор става входен сигнал на новата система-усилвател, а реакцията Y на това смущение - изходен сигнал $Y1$! Добре, а каква е ползата от всичко това?

По този начин, като "смути" в изхода една схема *общ колектор*, можем да "изобретим" класическата схема *обща база*. Транзисторът T "копира" постоянно задаващо напрежение U_{REF} в емитера си. Ние се опитваме да го променим чрез входното напреже-

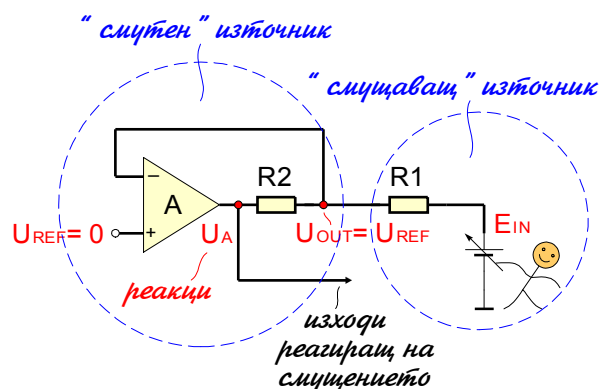
Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка.

ние U_{IN} . В резултат на това възниква конфликт между двата източника на



напрежение. Транзисторът реагира на нашата интервенция като променя тока I_{OUT} във веригата, с което се опитва да възстанови предишната стойност на U_E . Тази токова реакция се преобразува от резистора R_C в потенциална U_{OUT} и това се явява изходната величина за новата схема.

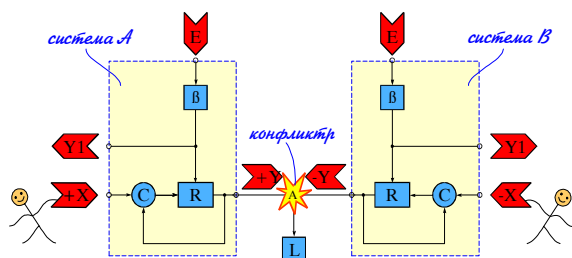
Нека сега да разширим тази идея като я пренесем в царството на схемите с операционни усилватели. Така например, нека се опитаме да реализираме транзисторната схема *обща база* чрез операционен усилвател.



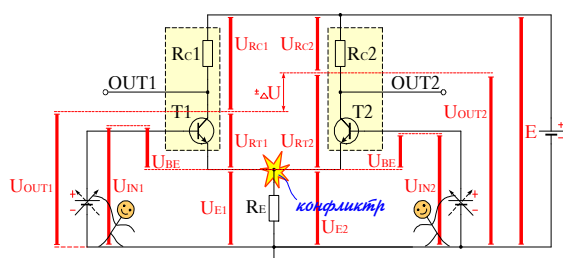
Така ще "изобретим" по един естравагантен начин (за кой ли път?) отново схемата на инвертиращия усилвател, сега представен като един "смутен" източник на напрежение.

Статия 11: ДРАМАТИЧЕН КОНФЛИКТ НА ПОТЕНЦИАЛИ!

Когато атакуваме един активен повторител в изхода ние сме принудени да търпим неговата реакция. Например, през "опорния" източник U_{REF} на схема "обща база" (статия 10) тече малкият базов ток на транзистора T , а през входния източник U_{IN} - целият изходен ток на емитерния повторител. Съвсем естествено се ражда идеята да облекчим "страданията" на източника U_{IN} като го буферираме с още един, идентичен на първия, активен повторител. Така получаваме сдвоена симетрична конструкция от две еднакви системи с отрицателна обратна връзка, изходите-повторители на които са свързани заедно към един общ товар L . В



конкретната реализация свързваме заедно емитерите на транзисторите T_1 и T_2 към общия резистор R_E .



Ако едната система поддържа постоянна изходната си величина Y , а другата се стреми да я промени, в общата точка възниква конфликт, който превръща системата-стабилизатор в усилвател. Така получаваме класическата *емитерно-свързана схема*, в която транзисторите се "борят" помежду си (единият - да запази напрежението върху емитерния резистор постоянно, а

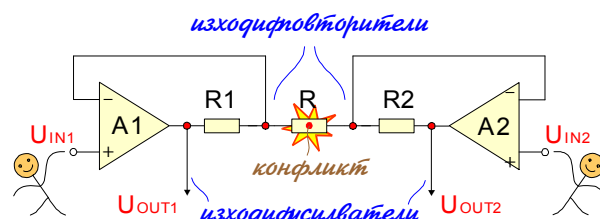
Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка

другият - да го промени). Напрежението върху резистора R_C на "смутената" система и неговото "допълнение" U_{OUT} отразяват степента на конфликта между двата емитерни повторителя и представляват изходен сигнал на схемата. Като използваме тази идея можем да построим и един *аналогов умножител с променлива стръмност*.

Когато заданията X на двете системи се изменят диференциално (едновременно и противоположно), конфликтът се задълбочава още повече - житейски примери за това са играта "теглена на въже", канадската борба и др. Конфликтът става драматичен, защото системите се стремят да поддържат изходните си величини Y_1 и Y_2 равни на входните X_1 и X_2 . Като реагират на взаимните смущения системите-повторители се превръщат в усилватели.

В конкретната схема, наричана в този случай *диференциален усилвател*, транзисторите действат с еднаква "сила" върху точката на конфликта (горната част на R_E), която остава с неизменен потенциал. Реакциите на двата емитерни повторителя - напреженията U_{OUT1} и U_{OUT2} , са симетрични и представляват изходни сигнали на схемата.

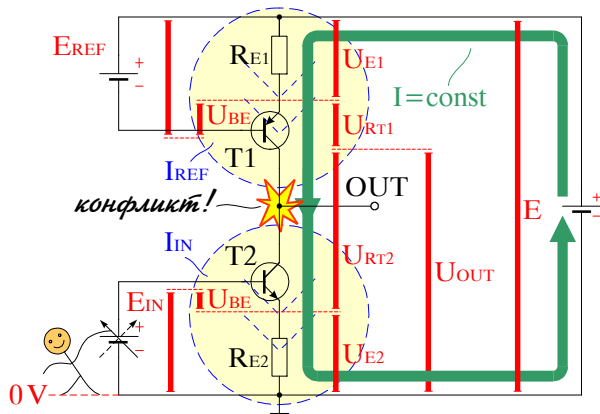
Ако реализираме тази идея чрез операционни усилватели, ще "изобретим" легендарния *измервателен усилвател* - стремейки се да променят потенциала в



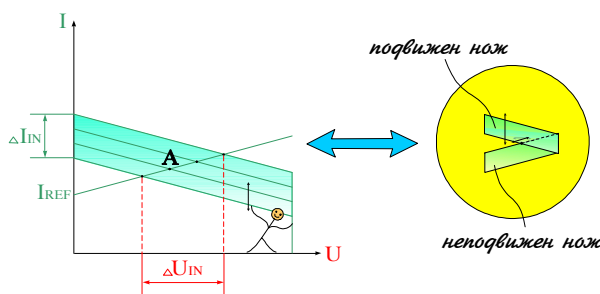
средата на резистора R повторителите се смущават взаимно и се превръщат в усилватели.

Статия 12: КОНФЛИКТИ МЕЖДУ ИЗТОЧНИЦИ НА ТОК

Освен конфликти между източници на напрежение в аналоговата схемотехника можем да предизвикаме и конфликти между източници на ток. Така "изобретяваме" още една легендарна аналогова схема - усилвателното стъпало с динамичен товар.



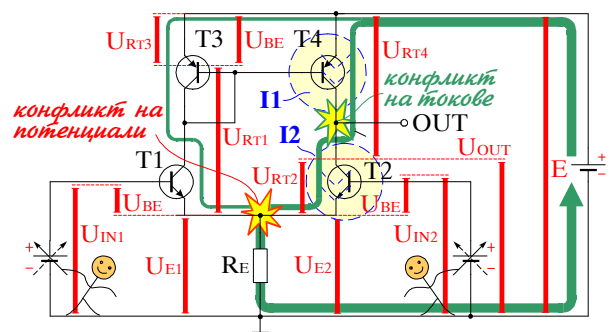
Транзисторите T_1 и T_2 "копират" задаващите напрежения U_{REF} и U_{IN} върху постоянните резистори R_{E1}, R_{E2} и така изпълняват функциите на източници на ток, които се "борят" помежду си. T_2 се стреми да установи входния ток I_{IN} във веригата като променя текущото си съпротивление R_{T2} в съответната посока. T_1 му се противопоставя като мени текущото си съпротивление R_{T1} в противоположната посока, с което се опитва да поддържа



старата стойност на тока I_{REF} . Този конфликт предизвиква рязка промяна на потенциала U_{OUT} в общата точка - изходната величина на схемата, което обуславя големия коефициент на усилване на схемата.

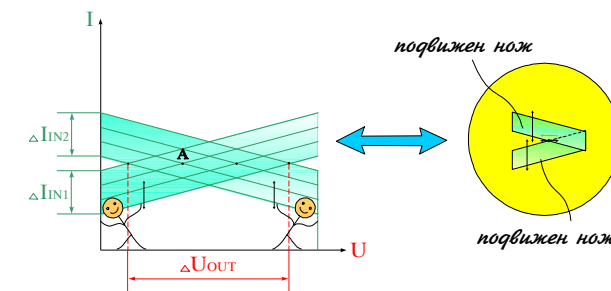
Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка

Конфликтът на токове става още по-драматичен, ако започнем да променяме едновременно и противоположно заданията на двата източника на ток. Така например можем да "изобретим" схемата на диференциалния усилвател с управляван динамичен товар, в която транзисторите T_2 и T_4 се борят "ожесточено" в стремежа си да



променят общия ток в десния клон. В резултат на това потенциалът на точка А се изменя драматично (т.е., схемата има много голям коефициент на усилване по напрежение).

В графичното представяне и двете волт-амперни характеристики се

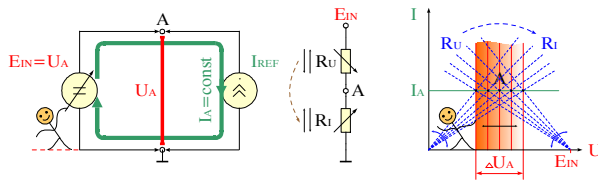


движат едновременно и противоположно, наподобявайки хоризонтална гилотина с два подвижни ножа. В резултат на това, "работният ход" на т. А се увеличава двукратно.

Този физически (механически или оптически) ефект е разгледан много добре от Перелман в знаменитата му книга "Занимателна физика".

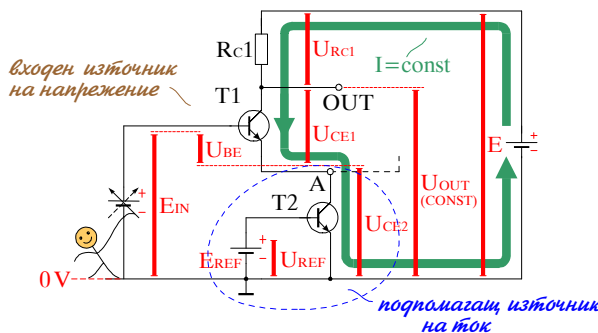
Статия 13: ВЗАИМОПОМОЩ МЕЖДУ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗТОЧНИЦИ

Интересни електронни устройства можем да изобретим, ако принудим два електрически източника да си "помагат". Например, нека "натоварим" един източник на напрежение с малко необичаен консуматор - източник на ток.



За да измени потенциала на общата тока А, източникът на входно напрежение започва да променя текущата стойност на вътрешното си съпротивление R_U в съответната посока. Източникът на ток реагира на това като променя вътрешното си съпротивление R_I в противоположна посока и така подпомага източника на напрежение.

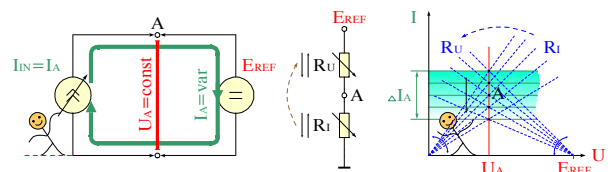
Този уникален феномен можем да наблюдаваме в лявата част на добре познатия ни диференциален усилвател при синфазни входни сигнали.



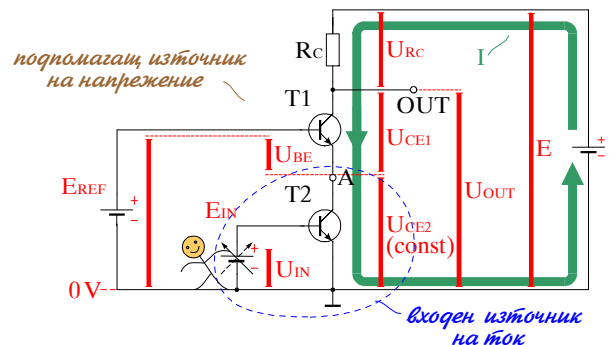
Източникът на напрежение (емитерният повторител, реализиран с транзистора T_1) се стреми да промени потенциала на т. А като мени текущото си съпротивление между колектора и

Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка

емитера. Източникът на ток (схема *общ емитер*, реализирана с транзистора T_2), му "помага" като променя текущото си съпротивление в обратната посока. В резултат на това токът, протичащ през резистора R_{C1} и изходното напрежение U_{OUT} не се изменят - основно свойство на диференциалния усилвател при синфазни входни сигнали.



Ако пък "натоварим" източник на ток с източник на напрежение, ще "изобретим" чудноватите *каскодни*



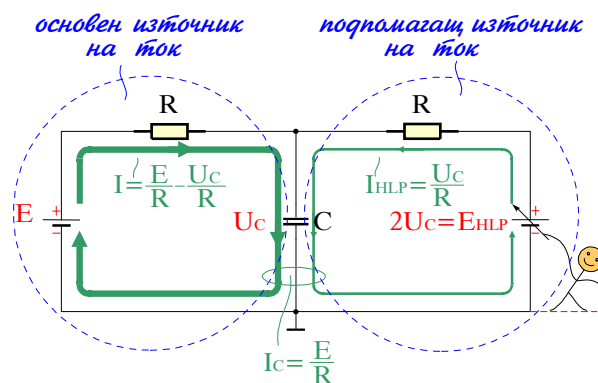
схеми.

За да промени тока I транзисторът T_2 започва да изменя текущото си съпротивление между колектора и емитера. Транзисторът T_1 обаче си е поставил задача да поддържа неизменен потенциала на емитера си и затова променя текущото си съпротивление в същата посока, с което "помага" на транзистора T_2 .

Статия 19: КОМПЕНСИРАМЕ ЧРЕЗ ИНЖЕКТИРАНЕ НА ТОК

Досега компенсирахме смущаващото влияние на товара върху действието на пасивните схеми като включвахме *последователно* на входния източник допълнителен, подпомагащ източник на напрежение. Сега ще се опитаме да постигнем същия резултат, но чрез *паралелно* инжектиране на ток през товара. Така например, можем да "изобретим" още един вариант на идеален интегратор.

Първо "сглобяваме" един пасивен интегратор на напрежение от източник на напрежение E , преобразувател *напрежение-ток* R и токов интегратор C (статия 17). Намалването на входния ток I с величината U_C/R компенсираме

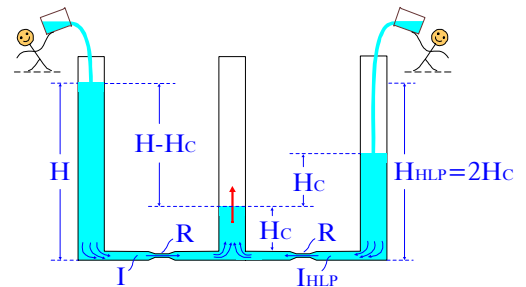


като "инжектираме" подпомагащ ток със същата стойност - $I_{HLP} = U_C/R$. За целта "сглобяваме" един "подпомагащ" източник на ток от източник на напрежение $E_{HLP} = 2U_C$ и преобразувател *напрежение-ток* R , и го включваме паралелно на кондензатора C .

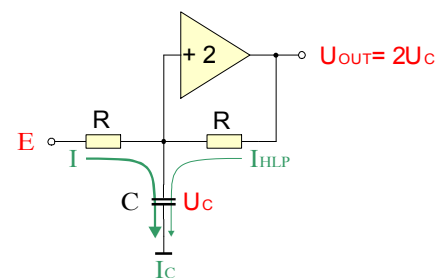
В хидравличната аналогия това означава да подадем от един помощен съд допълнителен воден поток към съда-кондензатор, с което компенсираме намалването на основния воден поток.

Конкретната реализация изисква просто да включим един усилвател с коефициент на усиление $K=2$ и да се

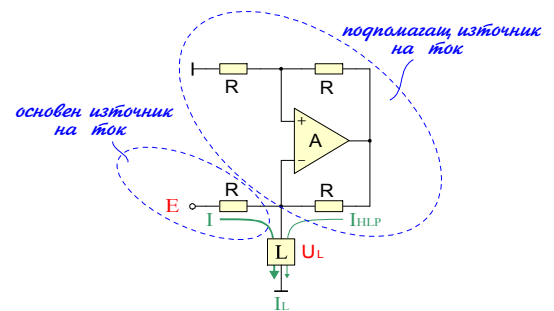
Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка



сетим да използваме напрежението $2U_C$ като изходно (познат "трик" от статия 18). За целта просто включваме един



неинвертиращ усилвател и в крайна сметка получаваме още една легендарна схема - източника на ток със заземен товар на Хауленд. Така можем



да достигнем и до идеята на отрицателното съпротивление, но за това по-късно.

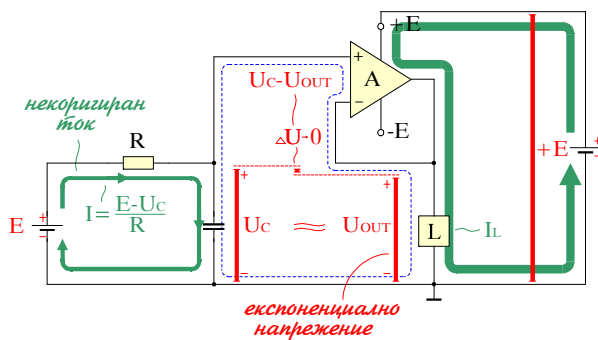
Все пак, кой от двата начина за компенсирание на смущения е по-добър? Очевидно - последователният. При паралелното компенсирание поддържа неинвертиращ усилвател и в крайна сметка получаваме още една легендарна схема - източника на ток със заземен товар на Хауленд. Така можем да достигнем и до идеята на отрицателното съпротивление, но за това по-късно.

Активни аналогови схеми с отрицателна обратна връзка

Статия 20: КОПИРАМЕ БЕЗ ДА УНИЩОЖАВАМЕ ОРИГИНАЛА

В някои житейски ситуации извършваме "активно копиране", но без да унищожаваме изходната величина (смушението, "оригинала"). Например, стремим се да постигнем това, което друг е постигнал, но без да го ощетяваме - просто го наблюдаваме, без да му въздействаме.

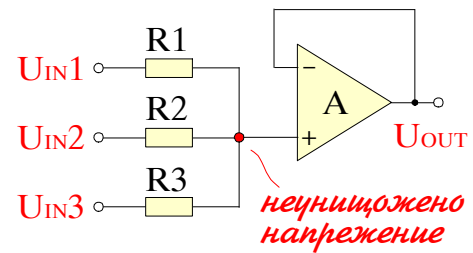
В аналоговата схемотехника също не винаги е необходимо или дори не е желателно да се компенсират загубите в пасивната верига. Така например, ако се нуждаем от експоненциално, а не от линейно изменящо се напрежение във времето, пасивният интегратор на напрежение (статия 17) си върши добре работата. В 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 помощта на система с последователна отрицателна обратна



връзка (активен повторител на напрежение).

Ако мерим силата на тока във верига, захранвана от източник на ток, също не е необходимо да "унищожаваме" вредното напрежение върху преобразувателя *ток-напрежение*, защото за това се грижи самият източник. В един неинвертиращ суматор също не "унищожаваме" напрежението в общата сумираща точка, а

режението в общата сумираща точка, а



само го "копираме" върху товара и т.н. Тези примери можем да обобщим в следните два извода:

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.

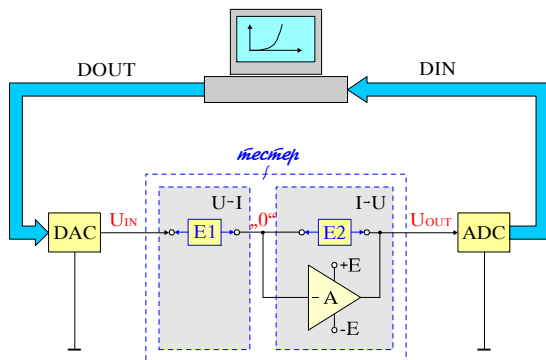
При последователния начин на сравняване не се изразходва енергия в състояние на равновесие, а само в преходния режим. Обратно, паралелният начин на сравняване е свързан с постоянно изразходване на енергия.

Тези заключения ни позволяват да дадем отговорим и на въпроса "Какъв тип обратна връзка - последователна или паралелна, трябва да използваме във всеки един конкретен случай от практиката?":

Ако напрежението върху допълнително включения в пасивната верига елемент е вредно за нас, ние го "унищожаваме" чрез система с паралелна отрицателна обратна връзка (DELETE и MOVE), а когато е полезно - просто го буферираме чрез система с последователна отрицателна обратна връзка (COPY).

Статия 21: ПРИНЦИПИТЕ В ДЕЙСТВИЕ - "СТРОИМ" ТЕСТЕР

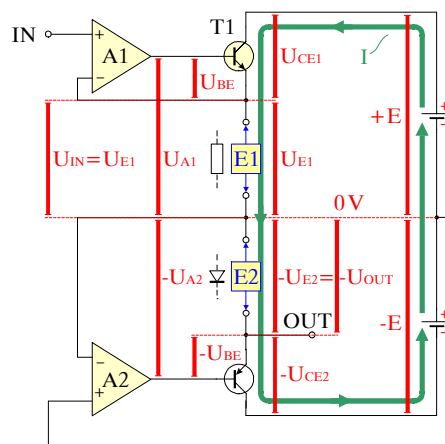
Вече имаме добра колекция от "инструменти" за синтезиране на аналогови електронни устройства. Тогава нека ги приложим в решаването на един интересен проект - тестер за изследване на електронни елементи.



Разполагаме със стандартна измервателна система (персонален компютър, аналогово-цифрова периферия и подходящ софтуер), с помощта на която можем да подаваме и възприемаме напрежения към/от изследвания обект. Задачата ни е да разширим възможностите на системата така, че тя да работи и с токове - това ще ни позволи да снемем волт-амперни характеристики на всевъзможни елементи (диоди, резистори, лампички и т.н.). Нека например да изследваме диод.

Първо, буферираме входа на тестера с мощен повторител на напрежение A1, T1 (COPU - статия 1, 20). Затваряме обратната връзка след смущението U_{BE} - операционният усилвател го компенсира като повдига изходното си напрежение U_{A1} (статия 8). Преобразуваме напрежението U_{E1} в ток чрез елемента E1 - резистора R (статия 1). Пропускаме тока през изследвания елемент E2 - диода D, който го преобразува в напрежение U_{E2} .

Унищожаваме го с "антинапрежение" - U_{E2} , изработвано от операционния усилвател A2, буфериран с емитерен повторител - транзистора T2 (COPU - статия 1, 20). Смущението U_{BE} не пречи, защото операционният усилвател A2 го е компенсирал с излишък в изходното си напрежение - U_{A2} (статия 8). Накрая, използваме "антинапрежението" $-U_{E2}$ като изходно



напрежение $-U_{OUT}$ (MOVE - статия 18).

В тази схема преобразувателите *напрежение-ток* и *ток-напрежение*, разделени от виртуалната "маса", си осигуряват взаимно идеални условия на работа. Съпротивлението на резистора R определя коефициента на преобразуване K на входния преобразувател *напрежение-ток* (например, при $R=100\ \Omega$, $K=10\text{mA/V}$).

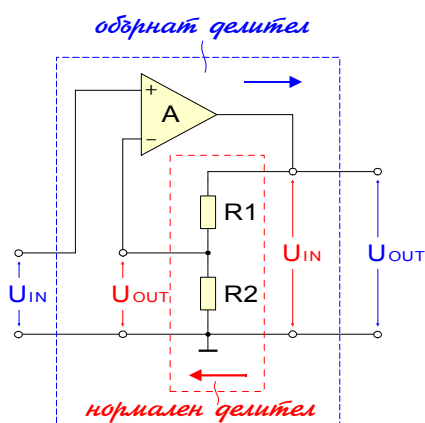
Ако разменим местата на диода и резистора, можем да изследваме диода чрез подаване на напрежение и измерване на тока. Всъщност, този начин е по-подходящ за изследване на транзистори (?), когато трябва да включим и допълнителен преобразувател *напрежение-ток* за генериране на базовия ток (подходяща е схемата на Хауленд - статия 19).

Статия 22: ДА ОБЪРНЕМ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕНИТЕ ВРЪЗКИ!

Нормално е входната величина на едно електронно устройство да обуславя изходната му величина - т.е., причинно-следствената връзка е в посока от входа към изхода. В действието на системите с отрицателна обратна връзка обаче, можем да наблюдаваме един уникален феномен - **способността им да обръщат причинно-следствените връзки.**

Например, редно е шефът да нарежда, а подчиненият му служител да изпълнява (причинно-следствената връзка е *шеф>подчинен*). Да предположим обаче, че по някаква причина (малодушие, слабост към другия пол и т.н.) шефът започне да се съобразява с подчинения си. Това може да доведе до абсурдната ситуация служителят да командва шефа си - причинно-следствената връзка се е реверсирала и добила вида *подчинен>шеф!*

Ако приложим тази плодотворна идея в аналоговата схемотехника, можем например, да обърнем един най-



обикновен делител на напрежение.

Продължава...