

Analogové elektronické obvody

Hybridní studijní texty

Nesetrváčné obvody s operačními zesilovači

Autor textu:
prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc.

Leden 2015

Komplexní inovace studijních programů a zvyšování kvality výuky na FEKT VUT v Brně
OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0193



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Obsah

1	ÚVOD.....	3
2	ZAŘAZENÍ PŘEDMĚTU VE STUDIJNÍM PROGRAMU.....	3
2.1	ÚVOD DO PŘEDMĚTU	3
2.2	VSTUPNÍ TEST.....	5
3	POZVOLNÉ ROZCVIČOVÁNÍ.....	6
3.1	OPRAVDU UMÍME OHMŮV ZÁKON?	6
3.2	ČÍTACÍ ŠIPKY NAPĚTÍ A PROUDŮ	7
3.3	OPRAVDU VÍME, CO JE SÉRIOVÉ A CO PARALELNÍ ŘAZENÍ?	8
3.4	NAPĚTÍ JAKO ROZDÍL POTENCIÁLŮ	9
3.5	CO JE TO UZEL?	10
3.6	CO JSOU TO ZKRAT A ROZPOJENÍ?.....	12
3.7	CO JSOU TO „ZBYTEČNÉ“ SOUČÁSTKY?	12
4	ZPĚTNÁ VAZBA V NESETRVAČNÝCH SYSTÉMECH S OZ.....	16
4.1	PLATÍ ZÁKON AKCE A REAKCE V ELEKTRICKÝCH OBVODECH?	16
4.2	NAPĚTÍ JE PŘÍČINOU NEBO NÁSLEDKEM (ÚČINKEM) PROUDU?.....	17
4.3	ZDROJE, ZESILOVAČE A KAUZALITA	17
4.4	ŘETĚZENÍ PŘÍČIN A NÁSLEDKŮ	17
4.5	ZPĚTNÁ VAZBA (ZV) JE KDYŽ..	18
4.6	OPERAČNÍ ZESILOVAČ VE ZPĚTNOVAZEBNÍM ZAPOJENÍ.....	19
4.7	ZLATÁ PRAVIDLA OPERAČNÍHO ZESILOVAČE (“OPAMP GOLDEN RULES“).	23
4.8	KDYŽ ZPĚTNÁ VAZBA PŘESTANE FUNGOVAT, I KDYŽ JE ZAPOJENÍ V POŘÁDKU.....	23
4.9	OZ MIMO REŽIM ZÁPORNÉ ZPĚTNÉ VAZBY	24
4.10	JAK LZE PRAKTICKY ZJIŠŤOVAT TYP A VLASTNOSTI ZPĚTNÉ VAZBY V KONKRÉTNÍM OBVODU S OZ?.....	27
4.11	KVALITATIVNÍ ANALÝZA ZPĚTNÉ VAZBY	27
4.12	DVOUSTAVOVÉ ROZHODOVÁNÍ: JE ZPĚTNÁ VAZBA Kladná či záporná?	30
4.13	Vliv ZPĚTNÉ VAZBY NA IMPEDANČNÍ (ODPOROVÉ) ÚROVNĚ.....	33
5	ANALÝZA ODPOROVÝCH OBVODŮ S IDEÁLNÍMI OPERAČNÍMI ZESILOVAČI	37
5.1	CO BUDE ANALYZOVÁNO	37
5.2	„ZBYTEČNÉ“ SOUČÁSTKY V OKOLÍ IDEÁLNÍHO OPERAČNÍHO ZESILOVAČE.....	37
5.3	TŘI UNIVERZÁLNÍ KROKY HEURISTICKÉ ANALÝZY OBVODŮ S IOZ.....	41
5.4	ŘEŠENÍ OBVODŮ „JEDNÍM TAHEM“	42
5.5	ŘEŠENÍ OBVODŮ METODOU „JEDNOHO POKUSU A JEDNOHO OMYLU“	52
6	NEŘEŠENÉ PŘÍKLADY.....	59
7	VÝSLEDKY VSTUPNÍHO TESTU Z KAPITOLY 2.2	70
8	VÝSLEDKY NEŘEŠENÝCH PŘÍKLADŮ Z KAPITOLY 6	71
9	LITERATURA A DALŠÍ INFORMAČNÍ ZDROJE.....	74

1 Úvod

Skriptum „Analogové elektronické obvody – hybridní studijní texty“ je studijním textem stejnojmenného povinného předmětu studijního oboru „Mikroelektronika a technologie“ tříletého bakalářského studijního programu „Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika“. Volně navazuje na skripta „Analogové elektronické obvody – přednášky“, „Analogové elektronické obvody – počítačová cvičení“ a „Analogové elektronické obvody – laboratorní cvičení“.

2 Zařazení předmětu ve studijním programu

Předmět „Analogové elektronické obvody“ je vyučován v zimním semestru 2. ročníku v rozsahu 39 hodin přednášek a 39 hodin cvičení, čemuž odpovídá jeho ohodnocení sedmi kredity. Předmět je zakončen zápočtem a zkouškou.

Nejdůležitější předměty 1. ročníku, na které tento předmět obsahově navazuje, jsou „Elektrotechnika 1“, „Elektrotechnika 2“ a „Elektronické součástky“, z volitelných oborových předmětů pak „Mikroelektronické praktikum“. Z předchozího studia se předpokládá, že student je schopen rozlišit, zda daný elektrický obvod se bude chovat jako lineární či nelineární, setrvačný či nesetrvačný. Dále se předpokládá jeho schopnost aplikovat Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony, metodu superpozice, metodu vzájemného přepočtu napěťových a proudových zdrojů, metodu zjednodušování sérioparalelních odporových dvojpólů a ideálních zdrojů, jakož i schopnost aplikovat Théveninovu a Nortonovu větu. Dalším předpokladem je schopnost stejnosměrné analýzy obvodů obsahujících diody a tranzistory, pramenící z porozumění funkce diody a tranzistoru na obvodové úrovni (porozumění na fyzikální úrovni není v této fázi vyžadováno).

Pokud jde o navazování na předměty Matematika 1-2“, v předmětu „Analogové elektronické obvody“ je používán matematický aparát pro popis a analýzu lineárních a nelineárních elektrických obvodů. To představuje práci se soustavami lineárních a nelineárních algebraických rovnic při analýze odporových obvodů a práci s diferenciálními rovnicemi při řešení obvodů setrvačných. Lineární diferenciální rovnice budou formálně převáděny na algebraické prostřednictvím fázorového, resp. operátorového počtu. Nelineární rovnice budou řešeny numerickými iteračními metodami. O těchto metodách je třeba mít alespoň uživatelský přehled ve smyslu globálního porozumění mechanismů jejich fungování.

Protože tyto texty se zaměřují na obvody nesetrvačné, matematický aparát bude omezen na algebraické rovnice. Analýza obvodů je zde založena na postupech, které využívají matematických nástrojů v minimální míře. Pro analýzu zpětnovazebních systémů je často účelné vyjádření obvodových rovnic grafy signálových toků. Teorie grafů však bude využívána jen ve velmi jednoduché formě, a to používáním Masonova pravidla, zjednodušeného převážně pro systémy s jednou zpětnovazební smyčkou.

2.1 Úvod do předmětu

Tyto elektronické učební texty jsou primárně určeny pro studijní obor bakalářského studijního programu Mikroelektronika a technologie FEKT VUT v Brně. Tématicky pokrývají vybrané části z oblasti analogového zpracování signálů lineárními obvody, vyučované na elektrotechnických fakultách škol v ČR a SR. Texty tedy mohou být využity i studenty těchto škol.

Termín „Hybridní studijní texty“ vyjadřuje přesvědčení autora, že účinnou metodou výuky může být pečlivě vyvážená kombinace postupů, používaných jednak v klasických přednáškách, jednak v numerických cvičeních a dalších formách tzv. praktické výuky. Ambicí těchto skript je pomoci studentům porozumět teorii na základě pochopení podstaty dějů v obvodech skrze řešení konkrétních zapojení. Texty se podrobně věnují zpětnovazebním obvodům s operačními zesilovači a rezistory, a to zejména obvodům s jednoduchou smyčkou záporné zpětné vazby. Na toto učivo pak mohou navazovat další učební texty, věnované aplikacím operačních zesilovačů s kladnou zpětnou vazbou, obvodům setrvačným, a obvodům s tranzistory a dalšími nelineárními součástkami. Tento postup s sebou přináší některé didaktické výhody: Paradoxně jde o výklad od jednoduchého k složitějšímu navzdory tomu, že se začíná „komplexním blokem“ – operačním zesilovačem a končí se tranzistory, z nichž se operační zesilovač skládá. Jednodušší je do hloubky pochopit fungování nesetrvačného lineárního systému s jednou smyčkou záporné zpětné vazby než tranzistorového zesilovače, který funguje v linearizovaném „malosignálovém“ režimu díky dvěma různým typům zpětných vazeb (DC a AC). Proto výčet cílových znalostí a dovedností studenta, pracujícího s tímto studijním textem, je omezen na následující souhrn:

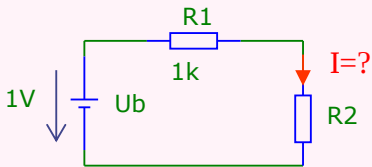
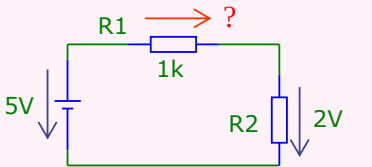
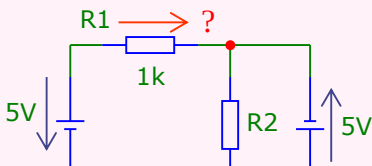
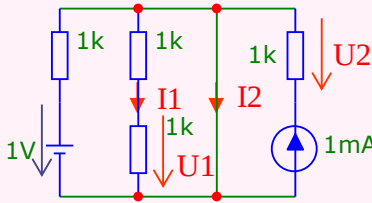
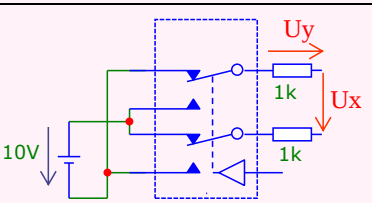
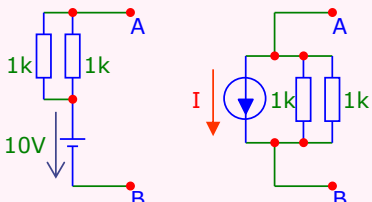
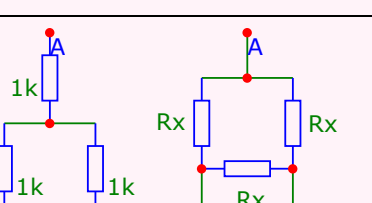
Student by měl být schopen rozpoznat typ zpětné vazby v konkrétním aplikačním obvodu. Pokud se bude jednat o zápornou zpětnou vazbu, měl by být schopen provést stejnosměrnou analýzu obvodu, tj. určení napětí a proudu každého z elektrických prvků, z nichž je obvod sestaven. Z výsledků analýzy by měl být schopen posoudit, zda jsou či nejsou narušeny výchozí předpoklady analýzy, tj. linearita a existence signálové zpětné vazby (což může být narušeno např. překročením saturačních úrovní operačního zesilovače). V případě narušení těchto podmínek by měl být schopen nalézt fyzikálně správné řešení.

Pro tu nejdůležitější schopnost, kterou by měl student získat za přispění tohoto učebního textu, však v Bloomově taxonomii není zavedeno příslušné činnostní sloveso: **rozumět** (nestačí jen **porozumět**, důraz je kladen na trvalost účinku) základním elektrickým obvodům s operačními zesilovači, aniž by se musel opírat o pomocné nástroje, tj. matematický aparát. Tomu nadřazeným cílem není zvládnutí onoho matematického aparátu, nýbrž získání něčeho, čemu se říká „elektrikářský cit“, umožňující na první pohled odhadnout, zda výsledek může či nemůže odpovídat realitě. Každý, kdo se odhodlá na tuto cestu vypravit, by si měl uvědomit, že analýza elektrického obvodu je v podstatě snadná úloha: Výsledek bývá, až na výjimky, jednoznačně zakódován v zadání. Cestu k řešení lze přirovnat k rozplétání detektivní zápletky: Ve výhodě je ten, kdo má schopnost hledání netradičních cest. Dovoleno je vše, avšak nevyplácí se prohršky proti logice. V našem případě nemůžeme sejít z cesty, budeme-li bezvýhradně respektovat trojí omezení: Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony, a specifická pravidla, kterými se řídí, v souladu s principy jejich fungování, aktivní elektronické prvky (zde operační zesilovače). S těmito „omezeními“ se samozřejmě musíme důvěrně obeznámit, nejlépe řešením celé řady vhodně volených příkladů. To, že nesejdeme z cesty, však ještě negarantuje, že dojdeme do cíle. Pro efektivní „rozplétání zápletky“ ve směru od zadání k řešení je proto vhodné využívat některé z osvědčených cest, které vyšlapali naši předchůdci a pro které bychom mohli (pro případ analogových nesetrvačných obvodů s operačními zesilovači) použít pracovní názvy „Blackův vztah“, „metoda potenciálů“, „zlaté pravidlo“, „řešení jedním tahem“, či „metoda jednoho pokusu a jednoho omylu“. Tento učební text není o ničem jiném než o putování od zadání Z k výsledku V bez používání složitých matematických výpočtů, s vědomím, že v žádném kroku nesmím porušit trojici „pravidel“, že volba cesty z bodu Z do bodu V je sice jen a jen na mně, ale že je rozumné, v závislosti na situaci, využívat některé praxí osvědčené postupy. Takovýto způsob analýzy obvodů může mít oproti mechanistickým výpočtům (například metodě uzlových napětí a dalším algoritmickým metodám), kromě toho, že bývá rychlejší, i další podstatnou výhodu: může nám napomoci v pochopení, jak obvod funguje.

2.2 Vstupní test

Průchod následujícím „autotestem“ vám ukáže, nakolik vaše současné znalosti odpovídají vstupním požadavkům k studiu tohoto učebního textu. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 7.

Vyznačte správnou odpověď (ke každé otázce existuje právě jedna):

č.	obvod	otázka	varianty odpovědi
1		Proud I je Napětí na R1 je orientováno Proud tekoucí baterií má směr	a) 1mA, b) -1mA, c) 0, d) nelze určit bez znalosti R2. a) →, b) ←, c) je 0, d) nelze určit. a) ↓, b) ↑, c) je nulový, d) nelze určit.
2		Napětí na R1 je Proud odebraný z baterie je Výkonová ztráta na R1 je Výkon dodávaný baterií je	a) 5V, b) 2V, c) 7V, d) 3V a) 2mA, b) 3mA, c) 4mA, d) 5mA a) 1mW, b) 9mW, c) 15mW, d) 1W. a) 1mW, b) 9mW, c) 15mW, d) 1W.
3		Napětí na R1 je Proud R2 teče Proud R2 je Proud pravou baterií teče Zvětšíme-li R2, pak proud R1	a) 0V, b) -5V, c) 5V, d) 10V, e) -10V. a) ↓, b) ↑ c) je 0, d) nelze určit. a) 5mA, b) 10mA, c) 0, d) nelze určit. a) ↓, b) ↑ c) je 0, d) nelze určit. a) klesne, b) vzroste, c) nezmění se, d) nelze určit.
4		Proud I1 je Proud I2 je Napětí U1 je Napětí U2 je	a) 0, b) 1mA, c) -1mA d) 2mA, e) -2mA. a) 0, b) 1mA, c) -1mA d) 2mA, e) -2mA. a) 0, b) 0.5V, c) -0.5V, d) 1V, e) -1V. a) 0, b) 0.5V, c) -0.5V, d) 1V, e) -1V.
5		Napětí Ux je Napětí Uy je Po přepnutí spínačů do druhé polohy bude napětí Ux	a) 0V, b) 5V, c) -5V, d) 10V, e) -10V. a) 0V, b) 5V, c) -5V, d) 10V, e) -10V. a) 0V, b) 5V, c) -5V, d) 10V, e) -10V.
6		Obvody jsou ekvivalentní vzhledem k svorkám A-B, když proud I je Vnitřní odpor levého obvodu na svorkách A-B je Propojíme-li svorky A-A a B-B ekvivalentních obvodů, těmito spoji poteče proud	a) 10mA, b) -10mA, c) 0, d) 20mA, e) -20mA. a) 0Ω, b) 500Ω, c) 1kΩ, d) 2kΩ. a) 10mA, b) -10mA, c) 0, d) 20mA, e) -20mA.
7		Obvody jsou ekvivalentní vzhledem k svorkám A-B-C, když Rx je Propojíme-li u obou ekvivalentních obvodů svorky A-A, B-B a C-C, pak mezi libovolnou dvojicí propojek naměříme odpor	a) 1kΩ, b) 3kΩ, c) 1/3kΩ, d) 1.5kΩ. a) 1kΩ, b) 3kΩ, c) 1/3kΩ, d) 1.5kΩ.

3 Pozvolné rozcvičování

Kdybych měl k dispozici hodinu na zvládnutí problému, na kterém by závisel můj život, strávil bych 40 minut jeho studiem, 15 minut jeho analýzou a 5 minut jeho řešením.

A. Einstein, volný překlad.

Cíle a obsah kapitoly:

Upozornění na zbytečné chyby začátečníka:

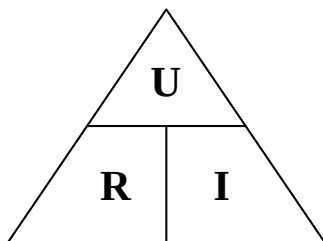
- Opravdu umíme Ohmův zákon = známe vzorec nebo jej umíme i správně použít?
- Čítací šipky napětí a proudů: dobrý pomocník, ale zlý pán.
- Opravdu víme, co je sériové a co paralelní řazení?

Popis užitečných praktik, jak z mála získat více, případně jak se pohnout z místa:

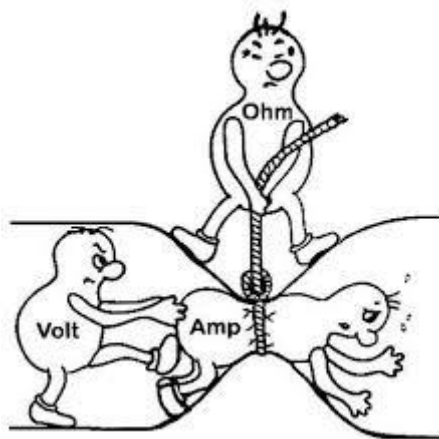
- Napětí jako rozdíl potenciálů: nikoliv nudná poučka, nýbrž spolehlivý pomocník v nesnázích.
- Co je to uzel aneb Kirchhoffovy zákony trochu jinak.
- Co jsou to zkrat a rozpojení? Mají něco společného se zdroji?
- Co jsou to „zbytečné“ součástky a jak je lze beztržně odstraňovat z obvodu?

3.1 Opravdu umíme Ohmův zákon? [1], [2], [3]

$$R = \frac{U}{I}$$

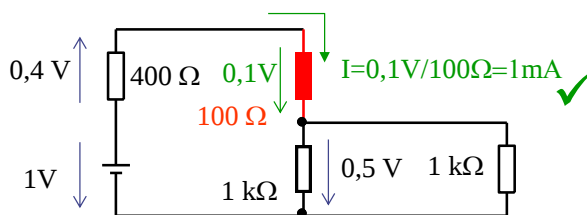
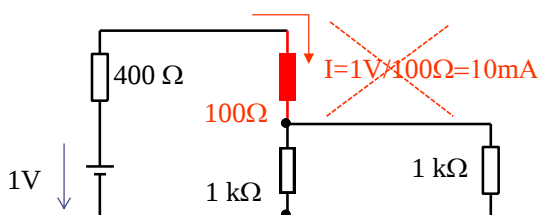


$$U = RI$$



$$I = \frac{U}{R}$$

<http://www.sengpielaudio.com/calculator-ohmslaw.htm>



Vzorec $I = U/R$ je správně, ale napětí i proud musí „patřit“ rezistoru, který je analyzován. Nelze si „vypůjčit“ napětí baterie (jen proto, že je zadáno), což je jiné napětí než na dotyčném rezistoru, a chtít pomocí něj určit proud rezistorem, který se nachází v jiné části obvodu.

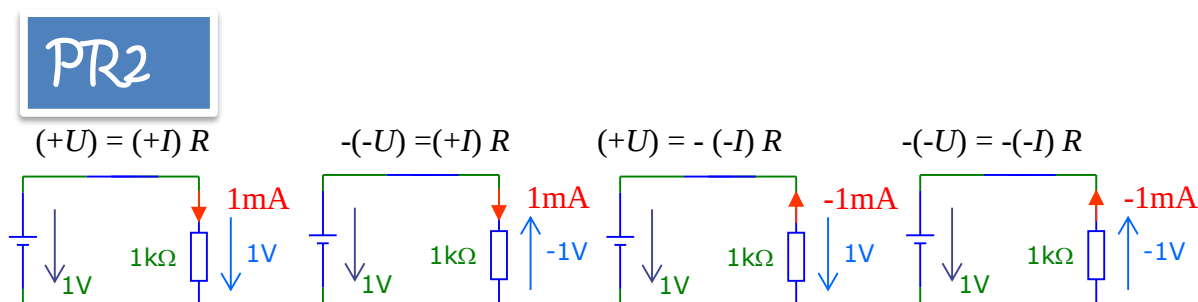
Tedy: všechny tři veličiny (U , I , R) ve vzorci Ohmova zákona musí patřit tomu samému objektu (konkrétnímu rezistoru). Pak ještě nesmíme udělat chybu v orientacích čítacích šipek napětí a proudu, resp. ve znaménkách.

3.2 Čítací šipky napětí a proudu

Napětí a proud na rezistoru o odporu $R > 0$ musí mít „stejná znaménka“: $(+U) = R (+I)$, $(-U) = R (-I)$.

Grafická interpretace: čítací šipky napětí a proudu téhož rezistoru musí mít souhlasnou orientaci.

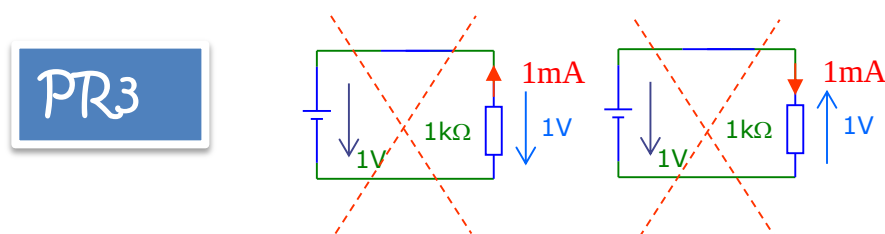
S tímto pravidlem však lze v mezích zákona „kouzlit“, použijeme-li jednoduchou „znaménkovou algebru“:



Orientaci čítací šipky můžeme změnit, ale současně musíme změnit i znaménko dané veličiny.

Toho využijeme, když na začátku řešení nemáme tušení, jakým směrem má být orientováno počítané napětí, případně proud. Zvolíme orientaci náhodně. Pokud se zmýlíme, poznáme to podle toho, že ve finále vyjde záporné číslo.

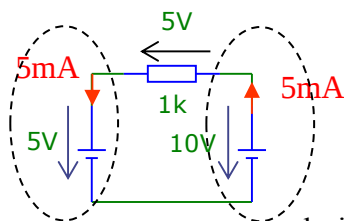
Jakékoliv porušování výše uvedených pravidel je trestné. Příklady nesprávných (a tudíž zakázaných) orientací čítacích šipek na spotřebiči (rezistoru):



Ohmův zákon $U = RI$ a jeho tři povolené „znaménkové mutace“ vyjadřují zákonitost, že **ze spotřebiče (rezistoru) se nikdy nemůže stát zdroj**: součin napětí a proudu, tedy spotřebovávaný výkon, musí být kladný (pokud by byl záporný, znamenalo by to, že výkon se generuje).

U zdroje platí opačná konvence, pokud je zatížen spotřebičem. Zdroj se však snadno může ocitnout v roli spotřebiče, pokud je „přetlačen silnějším zdrojem“:

PR4



spotřebičová orientace
baterie se chová pasivně,
jako spotřebič

zdrojová orientace
baterie se chová aktivně,
dobíjí druhou baterii

Ze zdroje se snadno může stát spotřebič (ale jen přičiněním dalších zdrojů).

Zkušený elektrikář se snaží odhadnout potenciální spád, resp. směr proudu součástkou a příslušným způsobem zvolí orientaci čítacích šipek počítaných veličin. I tak se občas zmýlí.

Pokud je navíc rozumný, nebude si zbytečně komplikovat život tím, že na rezistoru zvolí opačné orientace čítacích šipek napětí U a proudu $-I$, i když je to algebraicky správně. Pokud budeme chtít dostat zpět od kamaráda peníze, které jsme mu loni půjčili, asi jej neoslovíme větou „Ahoj, dlužím ti mínus pět set, tak jsem tady, abych Ti to vrátil“.

3.3 Opravdu víme, co je sériové a co paralelní řazení?

PR5

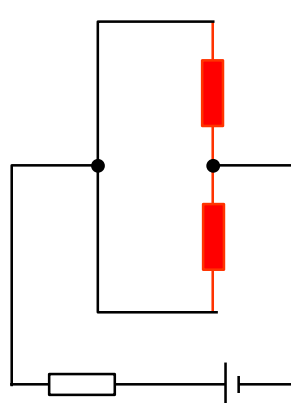
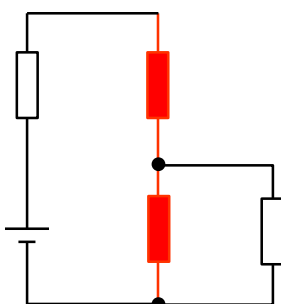
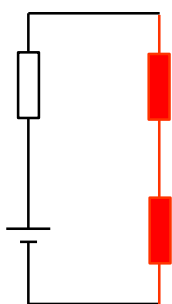
Jsou rezistory zapojeny do série nebo paralelně?

To zatím není jasné. Bude záviset na tom, kam vedou příslušné vodiče:

do série

ani tak, ani onak

paralelně



Dvojici prvků, které jsou zapojeny do série, musí téct stejný proud, ale:

Teče-li dvěma prvky stejný proud, ještě to neznamená, že prvky jsou v sérii.

Na dvojici prvků, které jsou zapojeny paralelně, je stejné napětí, ale:

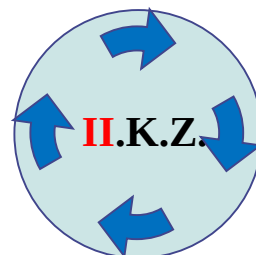
Je-li na dvou prvcích stejné napětí, ještě to neznamená, že prvky jsou zapojeny paralelně.

Je možné zapojit dva prvky do série tak, aby na nich bylo stejné napětí?

Je možné zapojit dva prvky paralelně tak, aby jimi tekla stejný proud?

3.4 Napětí jako rozdíl potenciálů

Druhý Kirchhoffův zákon (napětový) je v podstatě velmi jednoduchý, ale kupecké počty mohou někdy dělat problémy, zvláště když nesčítáme jen kladná čísla (třeba tržbu), ale kombinujeme čísla kladná i záporná (například sčítáme napětí v uzavřeném obvodu, která mohou mít různé orientace a tedy i znaménka).

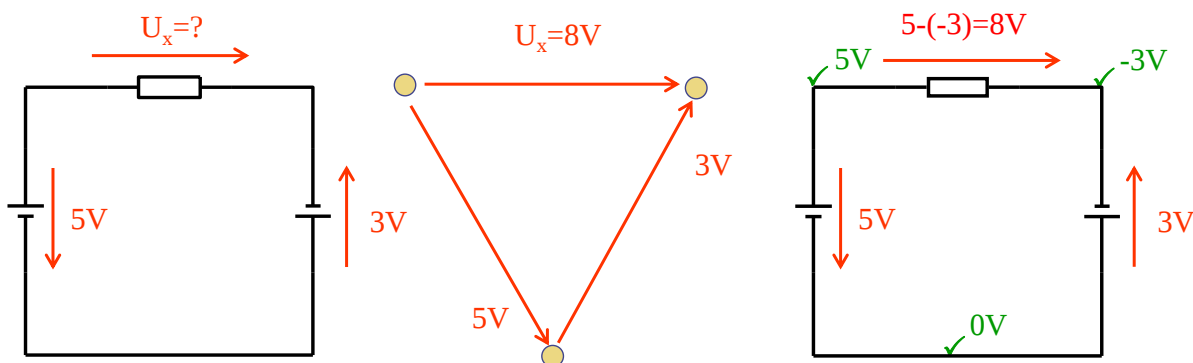


Praktik vidí na první pohled, že $U_x = 8 \text{ V}$.

Začátečník si může pomoci jednoduchým grafem (uprostřed). Pokud v něm uvidí grafické vyjádření rovnice $8 \text{ V} = 5 \text{ V} + 3 \text{ V}$, pak pochopil podstatu. Nevýhodou je zdržování při překreslování grafu ze schématu. Po získání praxe je možné představovat si graf přímo ve schématu.

Metoda potenciálů [4] je účinná, i když na první pohled primitivní. Pokud dodržíme jednoduchý postup, vždy nás bezpečně dovede k správnému výsledku (oceníme při rychlých výpočtech v obvodech s operačními zesilovači). Na spodním uzlu je zvolen referenční potenciál (libovolně, ale praktické je zvolit 0 V). Horní konec levé baterie má potenciál o 5 V vyšší, horní konec pravé baterie o 3 V nižší (napětí mezi 2 uzly se rovná rozdílů potenciálů obou uzlů). Pak U_x v orientaci zleva doprava je rozdíl potenciálů levého a pravého konce.

PR6



Ukázka postupu u mírně složitějšího obvodu z obrázku PR7:

Krok 1: Určení potenciálů.

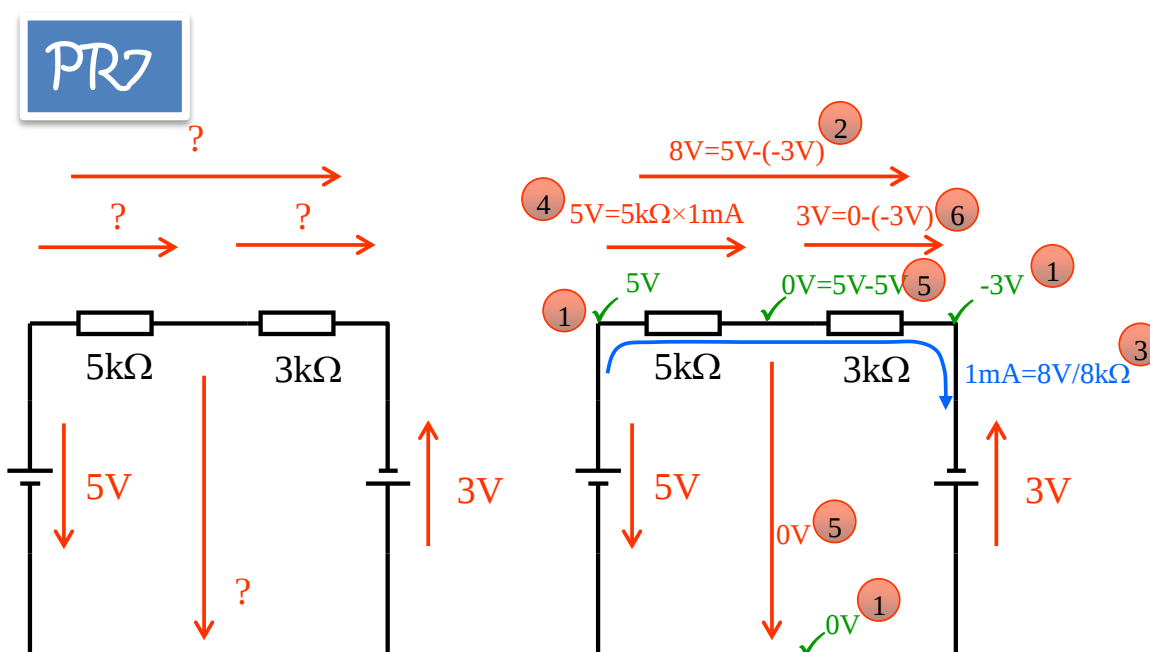
Krok 2: Určení napětí na dvojici rezistorů v sérii.

Krok 3: Výpočet proudu, který teče rezistory, z Ohmova zákona.

Krok 4: Určení úbytku napětí na levém rezistoru z Ohmova zákona.

Krok 5: Výpočet potenciálu „pravého konce“ levého rezistoru, což je současně další hledané napětí.

Krok 6: Určení napětí na druhém rezistoru, buď jako rozdíl potenciálů, nebo z Ohmova zákona.



Postřeh: Společný uzel obou rezistorů má nulový potenciál stejně jako referenční spodní uzel (zem). Tento uzel se tedy jeví napětově jako referenční uzel, ale není to referenční uzel. Jde o virtuální zem (virtuální nulu).

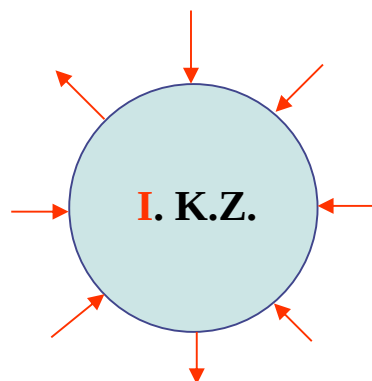
Změní se poměry v obvodu, když oba uzly se stejným potenciálem propojíme vodičem? V tomto případě ne. U operačního zesilovače si však toto nebudeme moci dovolit (virtuální zem operačního zesilovače nelze zkratovat se skutečnou zemí – proč? V čem je rozdíl? Není virtuální zem jako virtuální zem, viz příklady z kapitol 4, 5 a 6).

3.5 Co je to uzel?

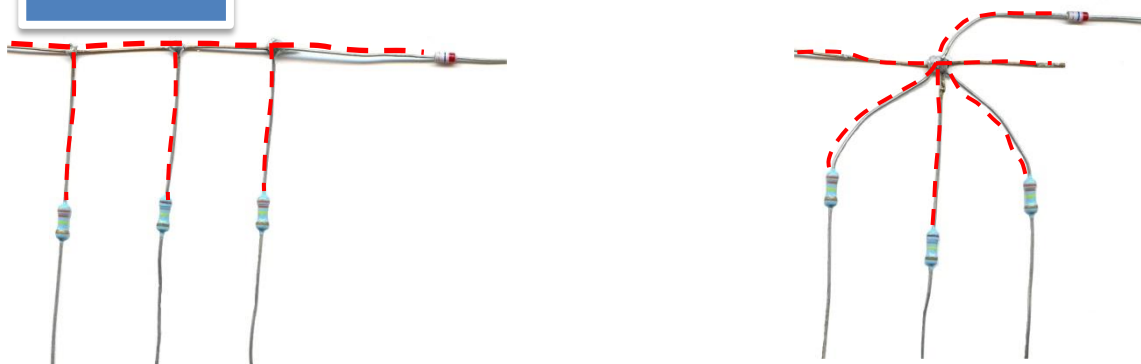
Uzel = abstraktní (modelové) označení pro „masu“ ideálních vodičů, které vodivě spojují elektrické součástky.

Fyzická realizace uzlu může být různá. Pokud jsou použity ideální vodiče (s nulovým odporem), pak elektrické vlastnosti těchto realizací jsou totožné.

Uzel je vše, kam bychom se mohli dostat, kdybychom kráčeli po ideálních vodičích. Ve všech těchto místech (červeně vyznačených na obr. PR8) je stejný elektrický potenciál.

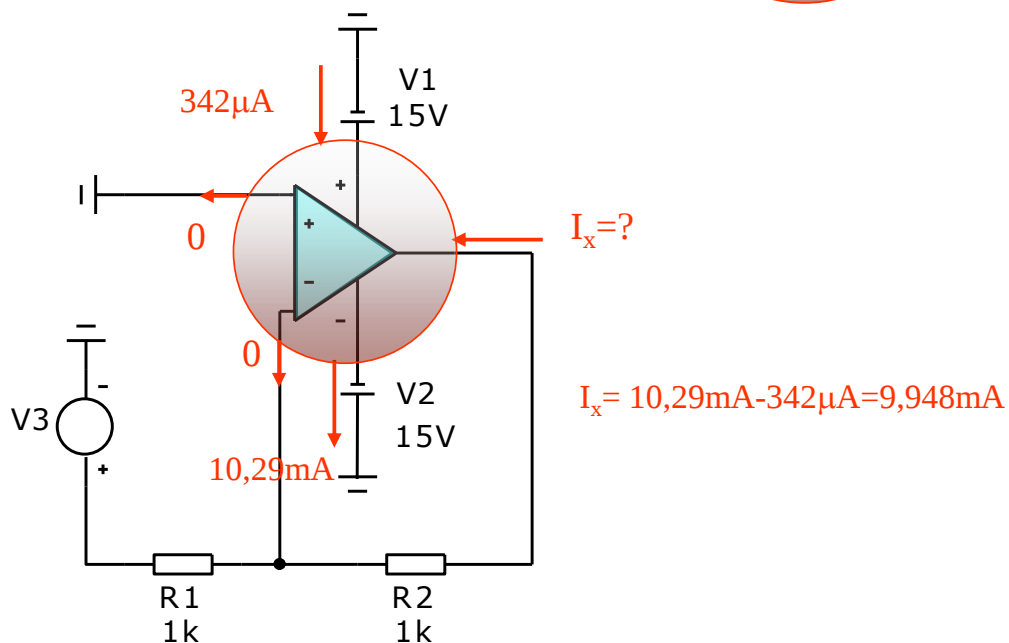
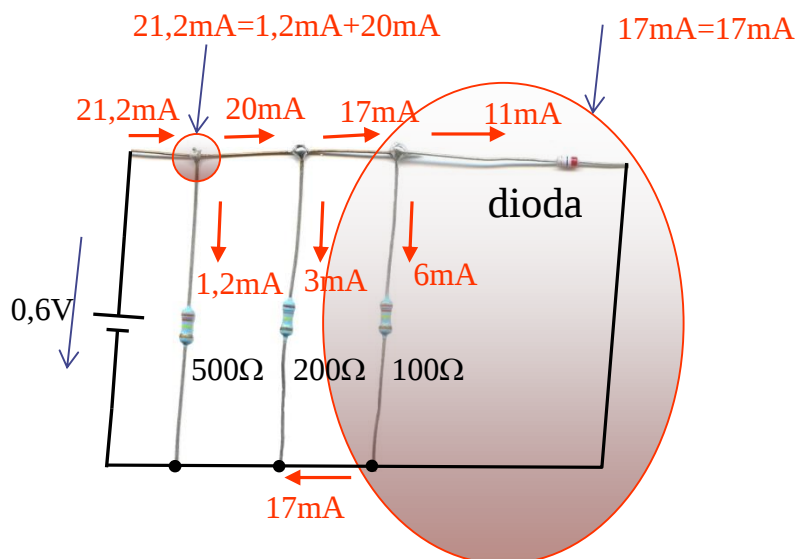


PR8 *)



První Kirchhoffův zákon (proudový) lze aplikovat na různé části uzlů nebo i na oblasti, které sdružují více uzlů:

PR9 *)



*) Obrázky jsou převzaty z [5].

3.6 Co jsou to zkrat a rozpojení?

Zkrat = propojení dvou míst v obvodu ideálním vodičem, tj. rezistorem o odporu 0Ω .

Po zkratu vykazují obě místa stejný potenciál.

Rozpojení obvodu = propojení dvou míst v obvodu rezistorem o odporu $\infty \Omega$, resp. o vodivosti $0 S$, kterým za žádných okolností nemůže téci proud.

Jiný úhel pohledu:

Zkrat je možno realizovat ideálním zdrojem napětí $U = 0 V$.

Rozpojení je možno realizovat ideálním zdrojem proudu $I = 0 A$.

Toho využijeme při řešení obvodů metodou superpozice: účinky zdroje napětí vynulujeme jeho náhradou zkratem (pak je jistota, že na zkratu je nulové napětí), účinky zdroje proudu vynulujeme jeho náhradou rozpojením (pak je jistota, že rozpojeným obvodem nepoteče proud).

3.7 Co jsou to „zbytečné“ součástky?

Jednodušší obvody se obvykle analyzují snadněji než obvody komplikované. Pokud máme jistotu, že výsledek nebude záviset na určité součástce, pak ji s výhodou z obvodu odebereme. Takovou součástku nazvěme „zbytečnou“.

Tento postup se, k nelibosti některých studentů, většinou nedá opakovat až do totálního zániku analyzovaného obvodu, který by se pak prohlásil jako zbytečný.

Zde je důležité odlišovat mezi tím, zda lze danou součástku beztržně odstranit z modelu obvodu za účelem zjednodušení výpočtů, nebo zda ji lze odstranit i fyzicky z reálného obvodu, aniž by se narušila jeho funkce. Většinou platí jen první polovina výroku. Například když je vyvážen stejnosměrný Wheatstoneův můstek, neteče indikátorem vyvážení žádný proud a z hlediska výpočtů lze tuto součástku odstranit. Bylo by ale nerozumné indikátor odstraňovat fyzicky, protože bez něj by se dané zařízení nedalo používat. Jiné příklady praktických obvodů, například s operačními zesilovači, ukazují, že některé součástky, které z ideálního pohledu vypadají jako zbytečné (například rezistory připojované k vysokoimpedančním vstupům operačního zesilovače), mají svůj význam, který je skryt začátečníkovi (například slouží ke kompenzaci parazitních vlastností aktivních prvků – ke kompenzaci proudové nesymetrie apod.).

Při zjednodušování analyzovaných obvodů odstraňováním zbytečných součástek jsou důležité dvě věci: Jak bezpečně poznat zbytečnou součástku a jakým způsobem ji „odborně“ odebrat, aniž bychom narušili výsledek.

Příklady zbytečných součástek a způsoby jejich odebrání jsou uvedeny na obrázku PR10. Je třeba určit neznámé napětí U_x .

Obvod obsahuje 10 součástek, avšak pouze tři mají vliv na U_x (U_2 , I_2 a R_4).

Z příkladu je zřejmé, že potenciálními kandidáty na „zbytečné“ součástky jsou:

- „Osamocené“ zdroje napětí, tedy napájecí zdroje, které nic nenapájají (viz U_1).

Tyto zdroje bezpečně odstraníme vynulováním jejich napětí, tedy jejich náhradou zkraty. Je však možné je odstranit i prostým vyjmutím z obvodu, vyjde to nakonec nastejno.

- Zdroje proudu se zkratovanými vývody (viz I_1).

Takový zdroj předává veškerý svůj proud do zkratu a nikoliv do dalších částí obvodu. Bezpečně jej odstraníme vyjmutím z obvodu (vynulováním proudu), můžeme jej však nahradit i zkratem, vyjde to nastejno (dva zkraty paralelně).

- Rezistory paralelně se zdroji napětí (viz R_2 , R_3).

Připojením rezistoru o nenulovém odporu paralelně k ideálnímu zdroji napětí se toto napětí neovlivní. Na tomto napětí závisí hledané řešení. Rezistor ovlivní pouze proudový odběr ze zdroje, nic více. Odstraníme jej vyjmutím z obvodu (vynulováním odběrného proudu).

- Rezistory v sérii se zdroji proudu (viz R_5).

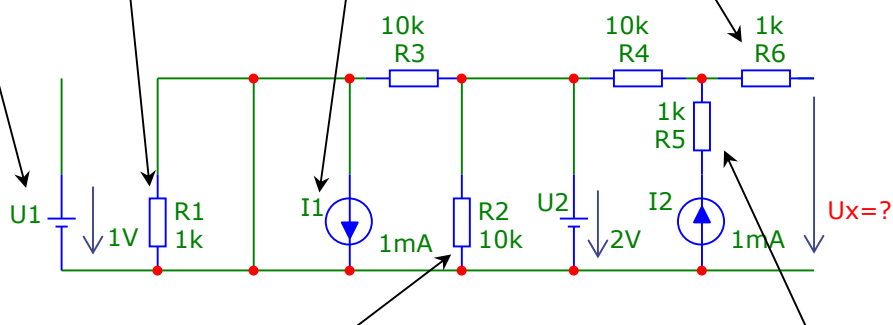


U_x nezávisí na U_1 , zdroj odstraníme vynulováním jeho napětí.

Zdroj proudu I_1 je zkratován, celý proud teče do zkratu a neprojeví se ve zbytku obvodu, odstraníme jej vyjmutím z obvodu.

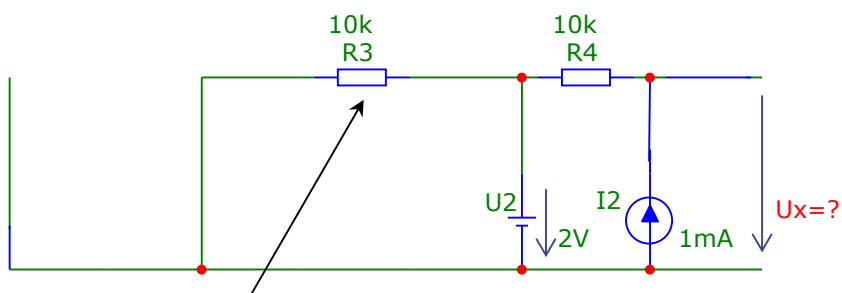
R_1 je zkratován, odstraníme jej vyjmutím z obvodu.

R_6 je napojen na zbytek obvodu jen jedním vývodem, neteče jím proud a úbytek napětí na něm je nulový, nahradíme jej tedy zkratem.



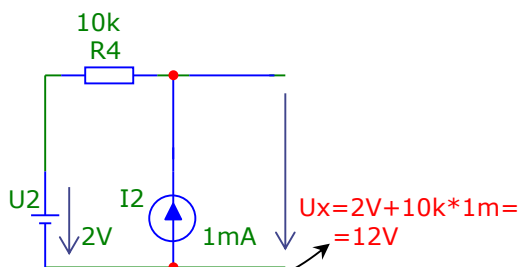
R_2 je paralelně k zdroji U_2 , má vliv na proudový odběr z U_2 , ale neovlivňuje U_x , odstraníme jej vyjmutím z obvodu.

R_5 je v sérii se zdrojem proudu I_2 , nemá vliv na proud, tekoucí do zbytku obvodu a tedy ani na U_x , nahradíme jej zkratem.



R_3 je paralelně k zdroji U_2 , odstraníme jej vyjmutím z obvodu stejně jako jsme vyjmuli R_2 .

Výsledek je získán metodou superpozice: při nepůsobení I_2 je na výstupu napětí zdroje U_2 , při nepůsobení U_2 je na výstupu úbytek napětí na R_4 .



Připojením rezistoru o konečném odporu do série s ideálním zdrojem proudu se proud zdroje neovlivní. Na tomto proudu závisí hledané řešení. Rezistor vyvolá pouze úbytek napětí, které ovlivní napětí na zdroji proudu, což ale není předmětem analýzy. Odstraníme jej náhradou zkratem (vynulováním úbytku napětí).

- Zkratované rezistory (viz R_1).

Výsledný odpor této dvojice je 0Ω (zkrat). Rezistor vyjme z obvodu. Stejně tak jej však můžeme nahradit zkratem (pak by byly dva zkraty paralelně).

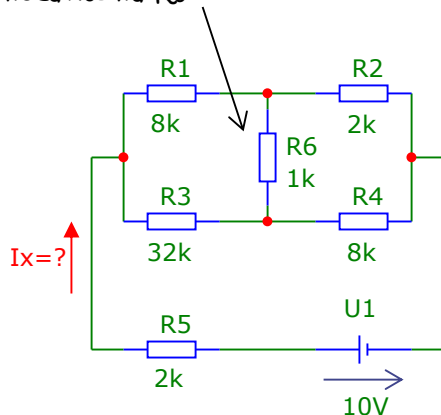
- Rezistory připojené jen jedním vývodem (viz R_6).

Jde vlastně o rezistor v sérii s „rozpojením“ (s nekonečným odporem). Výsledný odpor je nekonečný. Rezistor nahradíme zkratem. Stejně jej však můžeme nahradit rozpojením (rezistor vyjme z obvodu) a příslušný uzel (pro výpočet U_x na obrázku) posuneme „dovnitř obvodu“.

Wheatstoneův můstek na obrázku PR11 je vyvážený, proto pro výpočet proudu I_x je rezistor R_6 zbytečnou součástí. K zjednodušení obvodu lze použít kteréhokoliv z mezních stavů (náhrada R_6 rozpojením nebo zkratem).



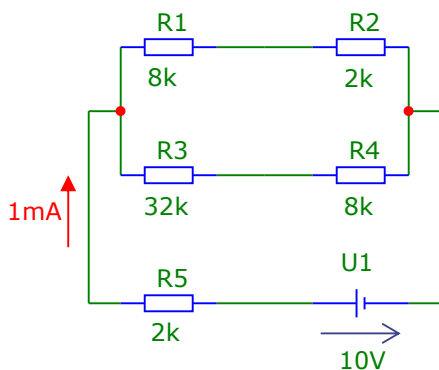
Můstek R_1, R_2, R_3, R_4 je vyvážený ($R_1R_4 = R_2R_3$). Proto napětí a proud na R_6 jsou nulové, a I_x nezávisí na R_6 .



$R_6 \rightarrow \infty$ (rozpojení):

$$(R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4) = 10\text{k}\Omega \parallel 40\text{k}\Omega = 8\text{k}\Omega$$

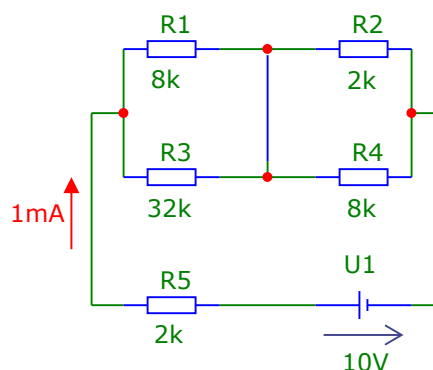
$$I_x = 10\text{V} / (8 + 2)\text{k}\Omega = 1\text{mA}$$



$R_6 = 0$ (zkrat):

$$R_1 \parallel R_3 + R_2 \parallel R_4 = 8\text{k}\Omega \parallel 32\text{k}\Omega + 2\text{k}\Omega \parallel 8\text{k}\Omega = 8\text{k}\Omega$$

$$I_x = 10\text{V} / (8 + 2)\text{k}\Omega = 1\text{mA}$$

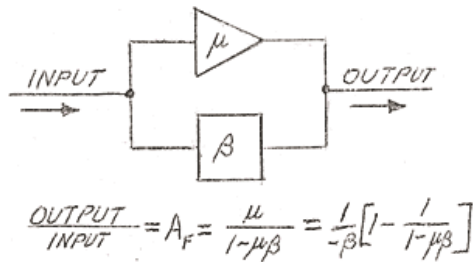


Z příkladu je zřejmé, že je-li na svorkách rezistoru udržováno vnějším obvodem, nezávisle na tomto rezistoru, nulové napětí, pak tento rezistor je zbytečnou součástí a lze s ním udělat cokoliv.

Se zvláštními případy zbytečných součástek, které jsou variací zde ukázaných případů, se seznámíme u obvodů, obsahujících operační zesilovače. Bude se jednat o obyčejné rezistory, které získají atributy zbytečných součástek v podmínkách speciální symbiózy s operačními zesilovači.

4 Zpětná vazba v nesetřvačných systémech s OZ

...použijeme-li zesilovač, jehož zisk je zvolen záměrně vyšší, než požadujeme (řekněme o 40 decibelů, tedy 10 tisíc namísto 100), a přivedeme-li pak výstup zpět na vstup tak, že přebytečný zisk opět potlačíme, pak dosáhneme významného zlepšení parametrů – stability zesílení a linearity.



H. S. Black, volný překlad z práce [6] Stabilized Feed-Back Amplifiers, *Electrical Engineering*, vol. 53, no. 1, Jan. 1934, pp. 114-120.

Cíle a obsah kapitoly:

- Mechanismy akce – reakce a příčina – účinek v elektrických systémech.
- Význam zdrojů a aktivních prvků (zesilovačů) v mechanismech akce a reakce a příčin a účinků.
- Zpětná vazba aneb když účinek se stává příčinou.
- Blackův vzorec pro systém s jednoduchou smyčkou zpětné vazby.
- Přenos smyčky a stupeň zpětné vazby. Praktický význam těchto čísel.
- Kdy je zpětná vazba kladná a kdy záporná, kdy funguje a kdy ne.
- Co získáme vysokým zesílením aktivního prvku ve smyčce zpětné vazby.
- Zesilovače s rozdílovými vstupy ve zpětných vazbách.
- Zobecnění Blackova vzorce pro případ složitějších zpětných vazeb.
- Kvalitativní analýza zpětné vazby.
- Nesená součástka neboli napěťový bootstrap.
- Jak lze rychle a spolehlivě určit typ zpětné vazby v konkrétním obvodu s operačním zesilovačem.

4.1 Platí zákon akce a reakce v elektrických obvodech?

Zákon akce a reakce (jak se do lesa volá, tak se z lesa ozývá) může být v elektrických systémech extrémně zdeformován působením aktivních prvků (tj. obvodů, využívajících zdrojů, např. zesilovačů), které jsou schopny zavádět do vztahů mezi součástkami v obvodu umělé vzorce chování (absolutní nuly, nekonečna a asymetrie: nulové odpory, nekonečné odpory, vedení signálů jen jedním směrem).

Reálný zdroj napětí připojíme k odporové zátěži (akce – zdroj se snaží vnutit své napětí zátěži).

Svorkové napětí zdroje poklesne a ze zdroje je odebírán proud, který je roven proudu zátěži (zpětná reakce na snahu o vnucení napětí).

Jsou dvě možnosti, jak „vynulovat reakci“:

- 1) Reálný zdroj napětí nahradíme ideálním zdrojem s nulovým vnitřním odporem. Pak k poklesu svorkového napětí nedojde. Nevyrusíme však reakci ve formě odběrného proudu.
- 2) Mezi zátěž a reálný zdroj vložíme člen, který svorkové napětí zdroje převede na identické napětí na zátěži (bude fungovat „jedním směrem“ – od zdroje do zátěže), a vstupní odpor členu bude nekonečný (ze zdroje nebude odebírán žádný proud).

Obě možnosti (ideální zdroj napětí i ideální zesilovač, zde se zesílením 1) lze snadno realizovat elektronicky s využitím aktivních polovodičových prvků a napájecích zdrojů.

Kombinací a zobecněním obou možností vznikne ideální zesilovač: má nekonečný vstupní odpor (aby neovlivňoval obvod, jehož signál má zpracovat) a nulový výstupní odpor (aby se na svých výstupních svorkách choval jako ideální zdroj). Takovýto prvek pak zdánlivě popírá zákon akce a reakce jak na svém vstupu, tak i na výstupu, a zavádí do obvodu absolutní asymetrii (signál vede jedním směrem, ze vstupu do výstupu). Bloky tohoto typu je pak možno používat jako komponenty blokově orientovaných schémat.

Unikátním extrémem je pak takový zesilovač, do jehož „absolutních“ parametrů přidáme nekonečné zesílení: vznikne ideální operační zesilovač [7]–[9], o kterém jsou tyto učební texty.

4.2 Napětí je příčinou nebo následkem (účinkem) proudu?

Otázka kauzality „co bylo dříve, zda slepice či vejce“ má v elektrotechnice různé podoby. Je napětí na rezistoru příčinou toho, že prvkem protéká proud, nebo je to naopak – proud, tekoucí rezistorem, na něm vytvoří úbytek napětí (t. j. důsledek protékajícího proudu)?

Ohmův zákon toto neřeší: Veličiny U a I zde vystupují na stejné úrovni a použije se buď vzorec $U = RI$ (když počítám neznámý důsledek – napětí ze známé příčiny-proudu) nebo $I = GU$ v opačném případě.

Přitom otázka, co je příčina a co důsledek, je zásadní – míří na podstatu fungování všeho kolem nás.

4.3 Zdroje, zesilovače a kauzalita

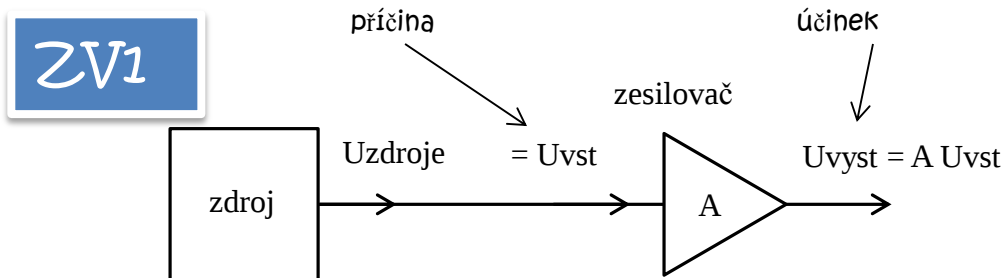
Tuto otázku může vyřešit přítomnost ideálního zdroje napětí, který vnutí své napětí paralelně připojenému rezistoru. Pak proud bude důsledkem tohoto napětí. Tady není prostor k pochybnostem. Pokud nebude baterie (zdroj napětí), pak nebude svítit žárovka (nepoteče proud).

Obdobně zdroj proudu, budící rezistor, bude příčinou a odpovídající reakcí – důsledkem bude napětí na rezistoru.

Zdroje tedy mohou zavádět asymetrie nutné k označení toho, „co bylo dříve“. Dalšími elektrickými prvky, zavádějícími řád do otázek příčin a účinků, jsou ideální zesilovače, které „vedou signál“ jedním směrem, od vstupu do výstupu. Ve skutečnosti ale nemohou takto pracovat bez vnějších napájecích zdrojů. Zdroje proto mohou buď přímo nebo skrytě vnucovat určité vzorce chování jiným prvkům v obvodu.

4.4 Řetězení příčin a následků

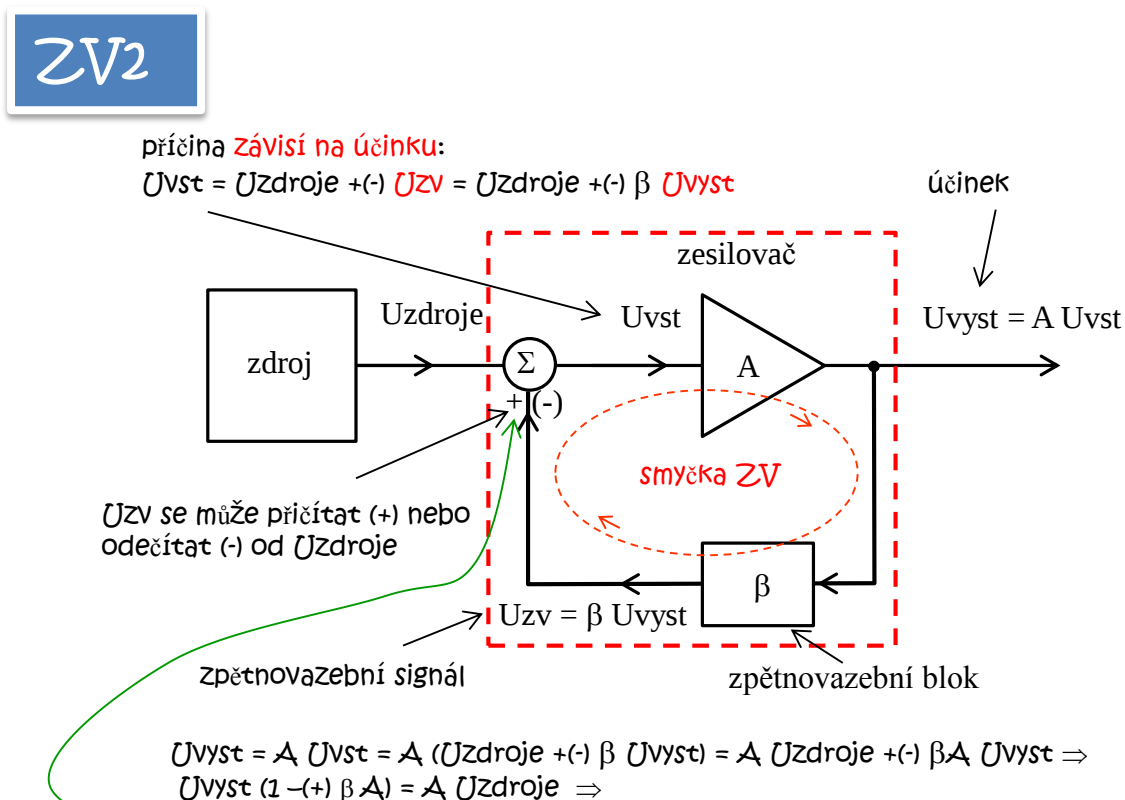
Spojením zdroje a zesilovače vznikne nejzákladnější zřetězení příčin a následků – zdroj generuje signál, který je „poslán dále“ ze vstupu na výstup asymetricky fungujícího zesilovače.



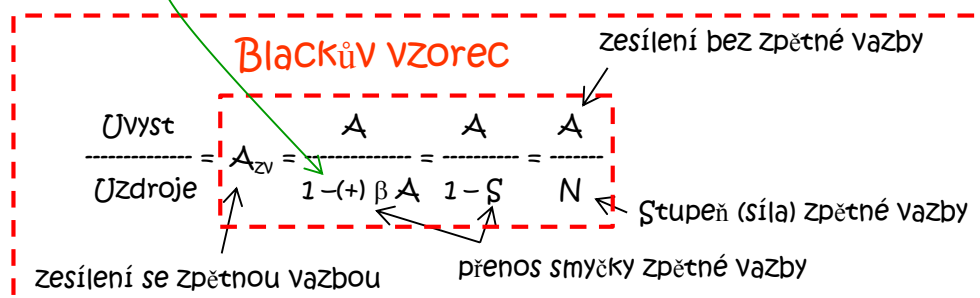
4.5 Zpětná vazba (ZV) je když..

.. účinek zpětně ovlivňuje příčinu, která jej vyvolává.

Modelem systému s jednou smyčkou zpětné vazby lze popsat chování celé řady obvodů s operačními zesilovači. V případě potřeby je možné použít složitějšího modelu.



ve vzorci musí být opačné znaménko než ve schématu



Stupeň (síla) zpětné vazby N závisí na zisku smyčky zpětné vazby $S = +(-)\beta A$:

(a)

Když $S = +(-)\beta A < 0$: $N > 1$, $A_{zv} < A$...záporná zpětná vazba, snižuje zesílení

(b)

Když $S = +(-)\beta A > 0$ ale $\beta A < 1$: $N < 1$ ale $N > 0$, $A_{zv} > A$...kladná zpětná vazba, zvyšuje zesílení

(c)

Když $S = +(-)\beta A = 1$: $N = 0$, $|A_{zv}| \rightarrow \infty$...kladná zpětná vazba, oscilační režim

(d)

Když $S = +(-)\beta A > 1$: $N < 0$, ...kladná zpětná vazba, nestabilní režim, **Blackův vzorec je nepoužitelný, vypočtená hodnota A_{zv} nemá smysl.**

Chceme-li, aby systém pracoval v lineárním režimu (zesilovač je typický příklad), pak:

Případ (a) je nejlepší volba (záporná zpětná vazba).

Případu (b) je vhodné se vyhnout (kladná zpětná vazba, i když pod kontrolou).

Případy (c) a (d) vylučují správnou funkci zesilovače v lineárním režimu.

Tento učební text je o případě (a), tedy o záporné zpětné vazbě. Pak stupeň zpětné vazby N je číslo, které říká, kolikrát se sníží zesílení vlivem ZV. Současně však říká, kolikrát se mohou „vylepšit“ další parametry zesilovače (vstupní a výstupní odpory, šířka pásma atd.) podle zásady „něco za něco“.

Proto je výhodné, když A je co největší: pro $A \rightarrow \infty$ bude $N \rightarrow \infty$ a $A_{zv} \rightarrow -(+)1/\beta$. Aby byla ZV záporná, pak musí být zisk smyčky ZV záporný. V tomto limitním (ideálním, hypotetickém) případě může dojít k „nekonečnému“ vylepšení parametrů zesilovače a zesílení vůbec nebude záviset na A : bude určováno jen přenosem zpětnovazebního členu β (který může být realizován například dvojicí rezistorů). Na scénu přichází operační zesilovač (OZ) s obrovským (ideálně nekonečným) zesílením, který dokáže účinně využívat blahodárných účinků záporné zpětné vazby (a dobré služby je schopen poskytovat i v dalších případech (b), (c), (d)). V zájmu zvýšení univerzality má OZ diferenční (+ -) vstup.

Vznikne-li potřeba řešit zesílení složitějšího zpětnovazebního systému, například s větším množstvím zpětnovazebních smyček, můžeme v řadě případů použít zjednodušený Masonův vzorec [10], [11], z něhož Blackův vzorec vyplývá:

Zjednodušený Masonův vzorec:

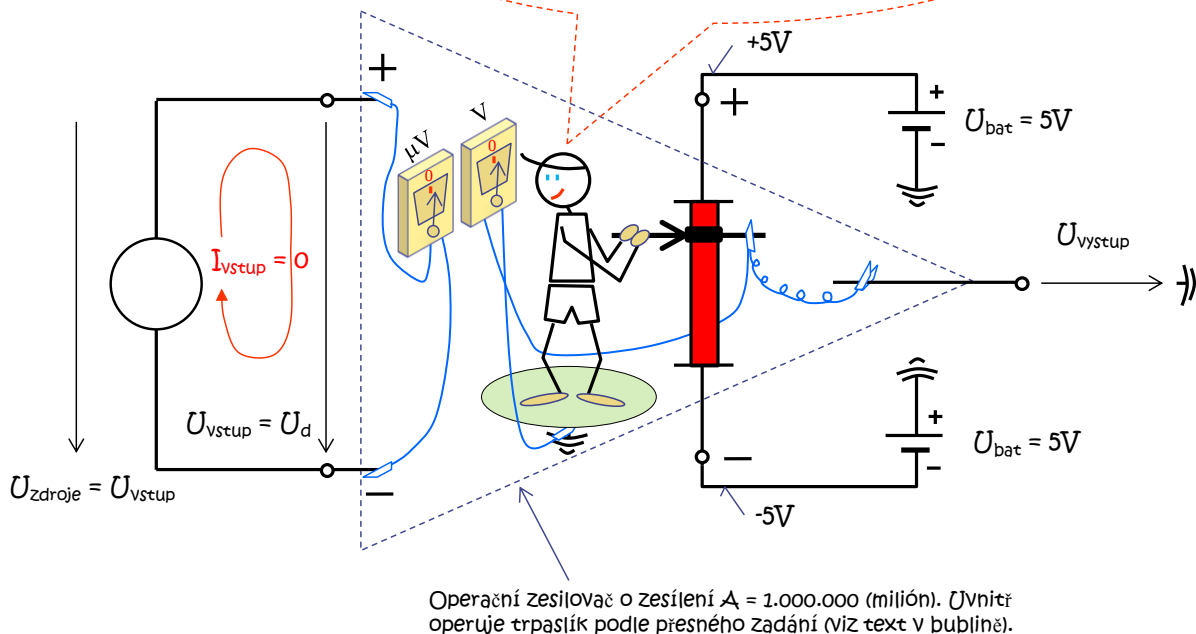
$$A_{zv} = \frac{\text{součet přenosů všech přímých cest ze vstupu do výstupu}}{1 - \text{součet přenosů všech zpětnovazebních smyček}}$$

V některých speciálních případech i tento vzorec selhává a musí být nahrazen úplným Masonovým vzorcem [11] (detaily viz přednášky).

4.6 Operační zesilovač ve zpětnovazebním zapojení

V režimu bez zpětné vazby služeb operačního zesilovače využíváme jen vzácně. Jeho funkci je možné znázornit podle „teorie trpaslíka“ [11] asi takto (obvod ZV3):

ZV3



Zesílení je neprakticky velké (v aplikacích většinou požadujeme jedničky až stovky), je vhodné jej N krát snížit zápornou zpětnou vazbou. Tím současně zabijeme další mouchy: skutečný OZ má neideální další parametry (viz přednášky), které po zavedení záporné zpětné vazby „automaticky“ N krát vylepšíme. Jinými slovy, čím více ustoupíme od požadavku na vysoké zesílení, tím více si polepšíme jinde. Ustupujeme snadno, pokud vysoké zesílení není naším konečným cílem. Pak je důležité, aby „zásoba zesílení“ byla co největší, tedy aby OZ měl „nepřirozeně“ vysoký zisk.

Zisk můžeme snížit pomocí odporového děliče R_1 , R_2 podle obrázku s obvodem ZV4. Porovnáním s blokovým schématem zpětnovazebního systému je možné identifikovat, že tento dělič je zpětnovazebním blokem „beta“ a že zpětnovazební napětí U_{zv} , tj. napětí na R_2 , je přiváděno na invertující vstup operačního zesilovače. Pro zadané číselné parametry vychází stupeň vazby $N = 10001 > 0$, zpětná vazba je tedy záporná a hodně „silná“, výsledné zesílení kleslo prakticky na stovku.

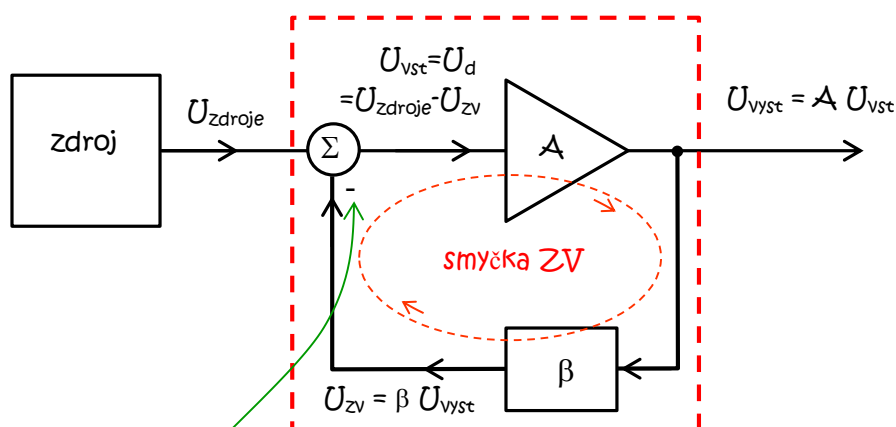
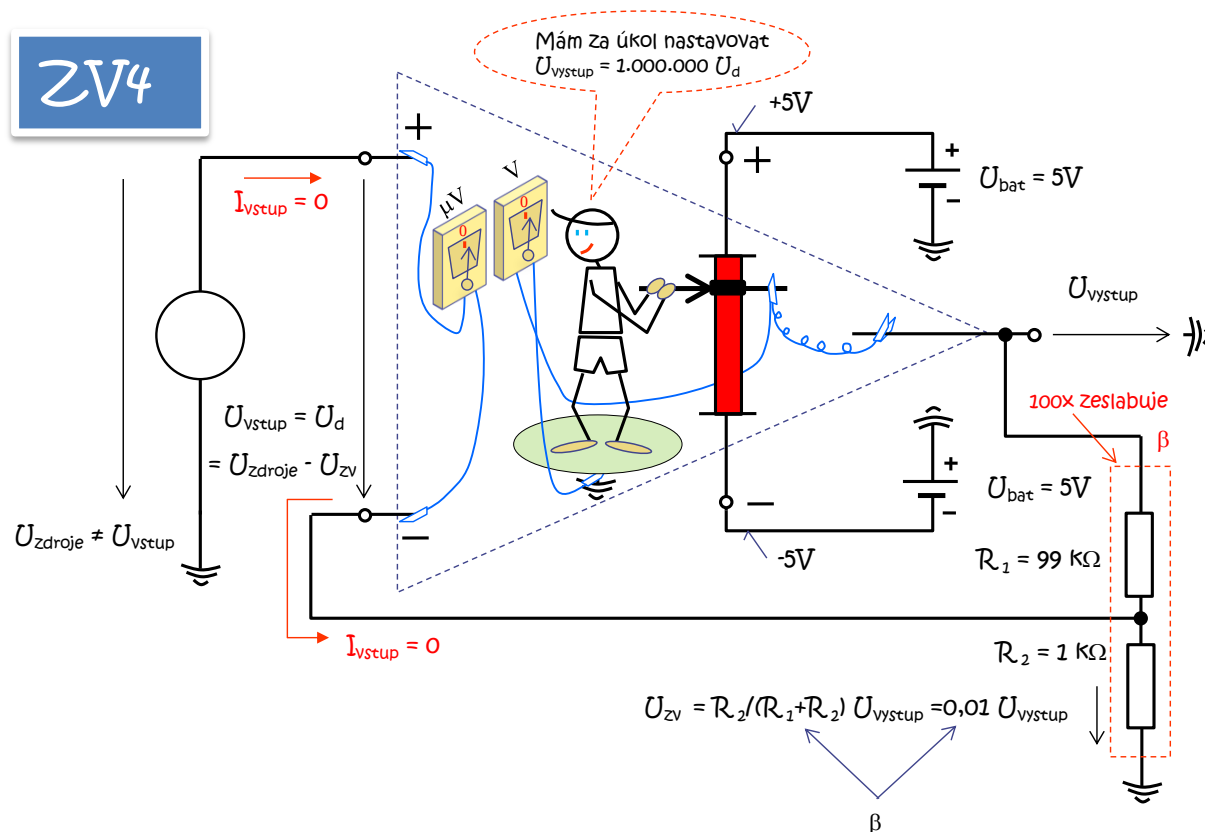
Dosadíme-li do Blackova vztahu symboly R_1 , R_2 a A namísto čísel, vyjde

$$A_{zv} = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{A}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}} \approx 99,99.$$

Vzhledem k číselným hodnotám je první člen ve jmenovateli o mnoho řádů menší než druhý člen. Proto

$$A_{zv} \approx \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 100,$$

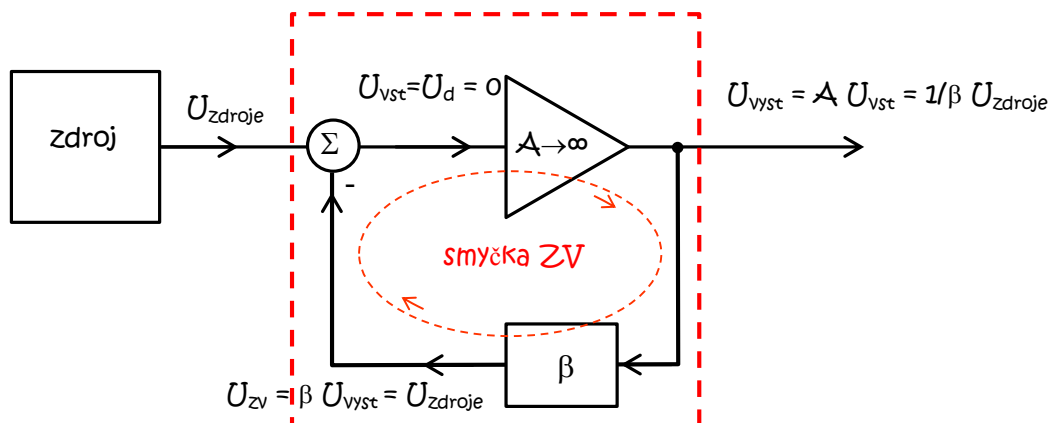
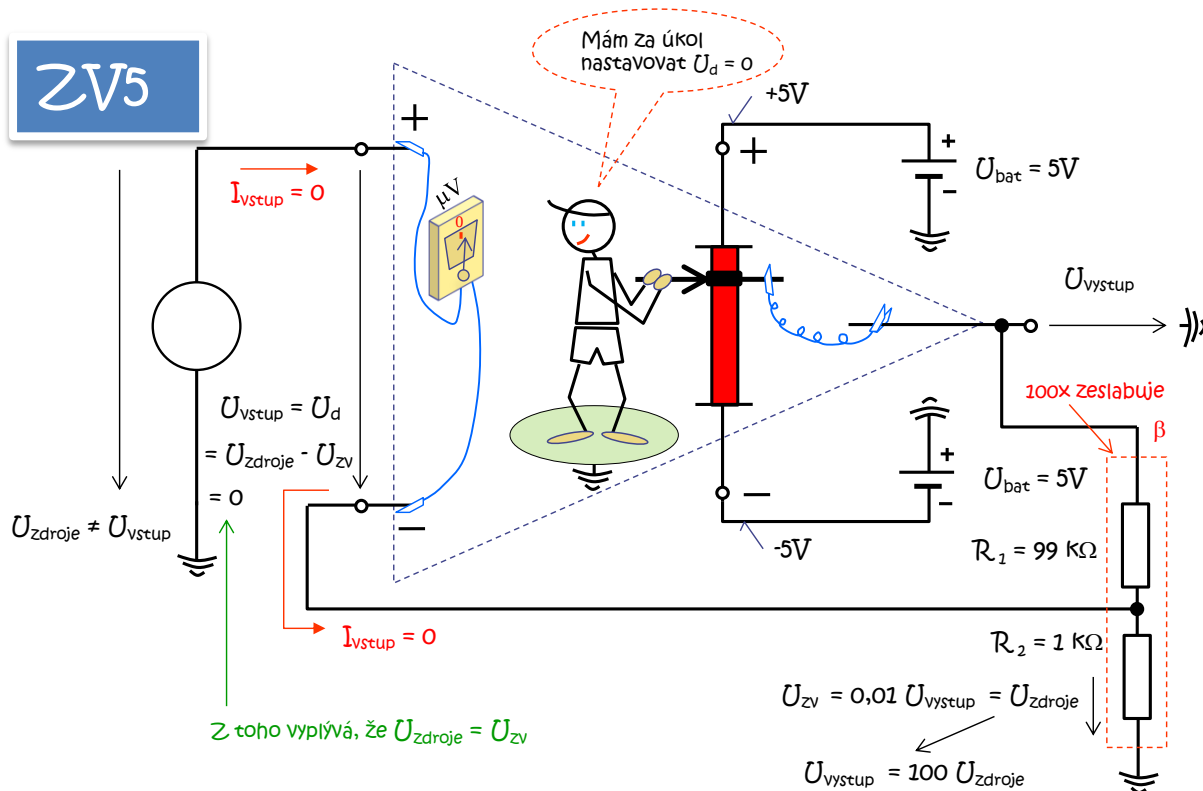
což je známý vzorec pro zesílení neinvertující varianty zesilovače s OZ při uvažování ideálního OZ s nekonečným zesílením. Předchozí vzorec je přesnější – uvažuje konečnou hodnotu zesílení OZ.



ve vzorci musí být opačné znaménko než ve schématu

$$\frac{U_{\text{vyst}}}{U_{\text{zdroje}}} = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{A}{N} = \frac{1.000.000}{1 + 0,01 \cdot 1.000.000} = \frac{1.000.000}{10001} \approx 99,99$$

Protože chyba mezi výsledky při uvažování OZ s konečným a nekonečným zesílením je nevýznamná (v tomto případě 0,01%), je možné pro praktické výpočty předpokládat nekonečné zesílení OZ, z čehož plyne nulové diferenční napětí. Pro trpaslíka uvnitř OZ to pak může znamenat podstatné zjednodušení zadání, co má dělat: stačí, když bude nastavovat vstupní diferenční napětí na nulu podle obrázku s obvodem ZV5. K tomu již nebude potřebovat sledovat výstupní napětí. Nastavené výstupní napětí pak bude přesně odpovídat případu, kdy OZ má nekonečné zesílení.



$$\frac{U_{vyst}}{U_{zdroje}} = A_{zv} = \frac{1}{\beta} = 100$$

Nepřehlédněme významný myšlenkový zlom při přechodu od úkolu „Mám nastavovat $U_{vyst} = 1.000.000 U_d$ “ k úkolu „Mám nastavovat $U_d = 0$ “. V druhém případě trpaslík nemá potřebu sledovat výstup, který nastavuje, nýbrž jen U_d . Postupuje přitom tak, že bedlivě sleduje sebemenší změnu U_d . Při náznaku, že by U_d mělo růst nad nulu, výstupní napětí zvýší, při poklesu U_d jej sníží. Smyčka záporné zpětné vazby pak ve spolupráci s trpaslíkem dokoná svoji základní regulační funkci: stabilizaci regulační odchylky na nulu.

4.7 Zlatá pravidla operačního zesilovače (“OpAmp Golden Rules“)

Při analýze ideálních operačních zesilovačů lze použít dvě zlatá pravidla [1]:

- 1) OZ se snaží v každém okamžiku regulovat diferenční napětí na nulu, $U_d = 0$ V.
- 2) Do vstupů OZ netečou proudy, $I_{vst} = 0$ A.

Pozor!!

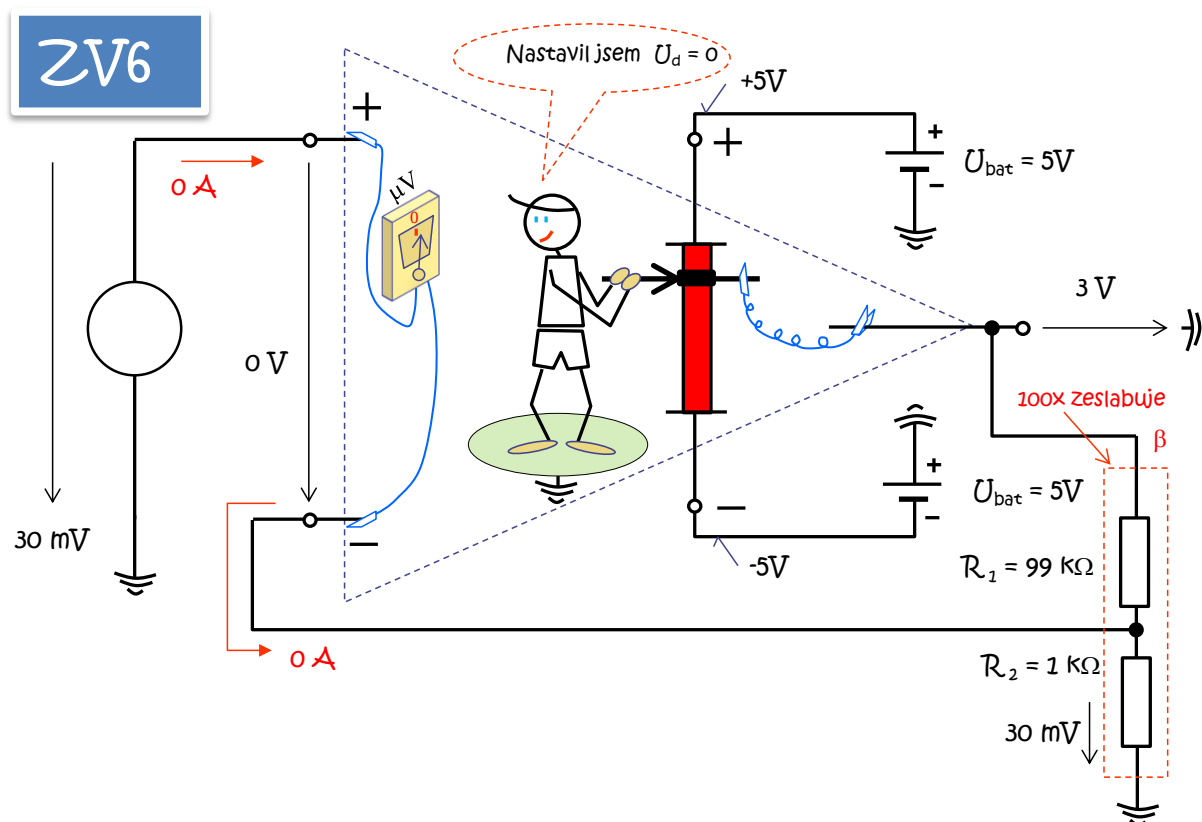
Pravidlo 1) platí jen tehdy, pracuje-li OZ v režimu FUNGUJÍCÍ ZÁPORNÉ ZPĚTNÉ VAZBY.

Pravidlo 2) platí vždy, protože je důsledkem nekonečného vstupního odporu OZ (někteří studenti dokáží zneplatnit i toto pravidlo zničením tranzistorů ve vstupním dílu OZ příliš velkým napětím).

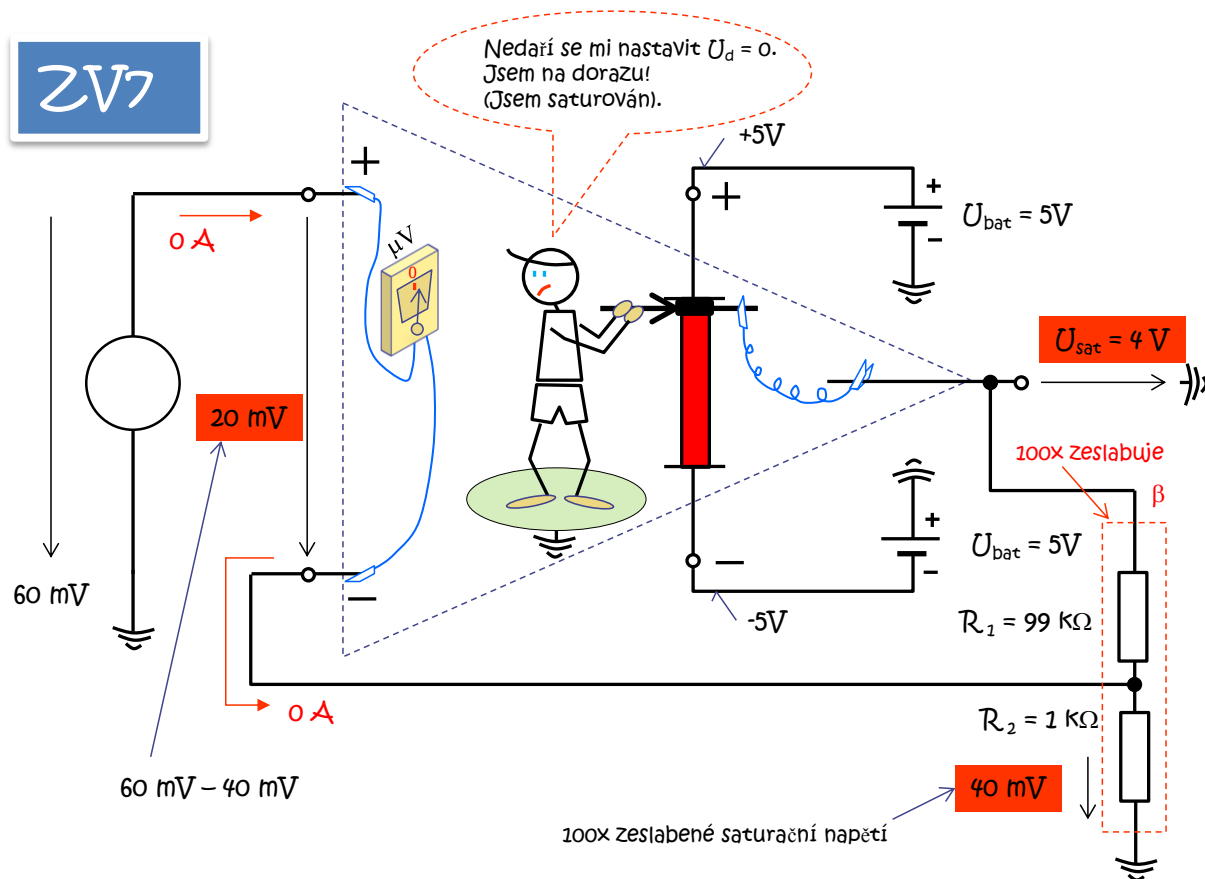
Pravidla se nazývají zlatá, protože když je operačnímu zesilovači dovoleno se jimi řídit, pak se z něho stává zařízení k nezaplacení.

4.8 Když zpětná vazba přestane fungovat, i když je zapojení v pořádku

Má-li obvod ZV6 o zesílení 100 zesílit napětí 30 mV, pak při použití pětivoltových napájecích zdrojů není problém – trpaslík snadno nastaví výstupní napětí na 3 V (je menší než 5 V).



Problém vznikne, má-li se na výstupu objevit větší napětí, než kolik baterie umožňují (viz ZV7).



Například vstupnímu napětí 60 mV by odpovídalo $100\times$ zesílené napětí na výstupu 6 V . Maximální napětí, které je schopen trpaslík nastavit, je však pouze kolem 4 V : všimněte si, že v důsledku nešikovné konstrukce zařízení pro nastavování napětí je maximální možné výstupní napětí (saturační napětí) asi 1 V pod napětím baterie. Tento konstrukční nedostatek je odstraněn u operačních zesilovačů rail-rail (podrobnosti viz přednášky). Trpaslík je zbaven možnosti doregulovat diferenční napětí na nulu. Může mlátit táhlem až na horní doraz, ale nic mu to nepomůže. Záporná zpětná vazba už nefunguje: změna vstupního napětí již není schopna vyvolat změnu na výstupu. Není-li změna na výstupu, nevrací se smyčkou zpět na vstup zpětnovazební signál. Teoretickým řešením, které ale nemusí být praktické, je zvýšení napětí baterií. Pak se ale daný problém pouze „posune“ a projeví se při vyšší úrovni signálu na vstupu.

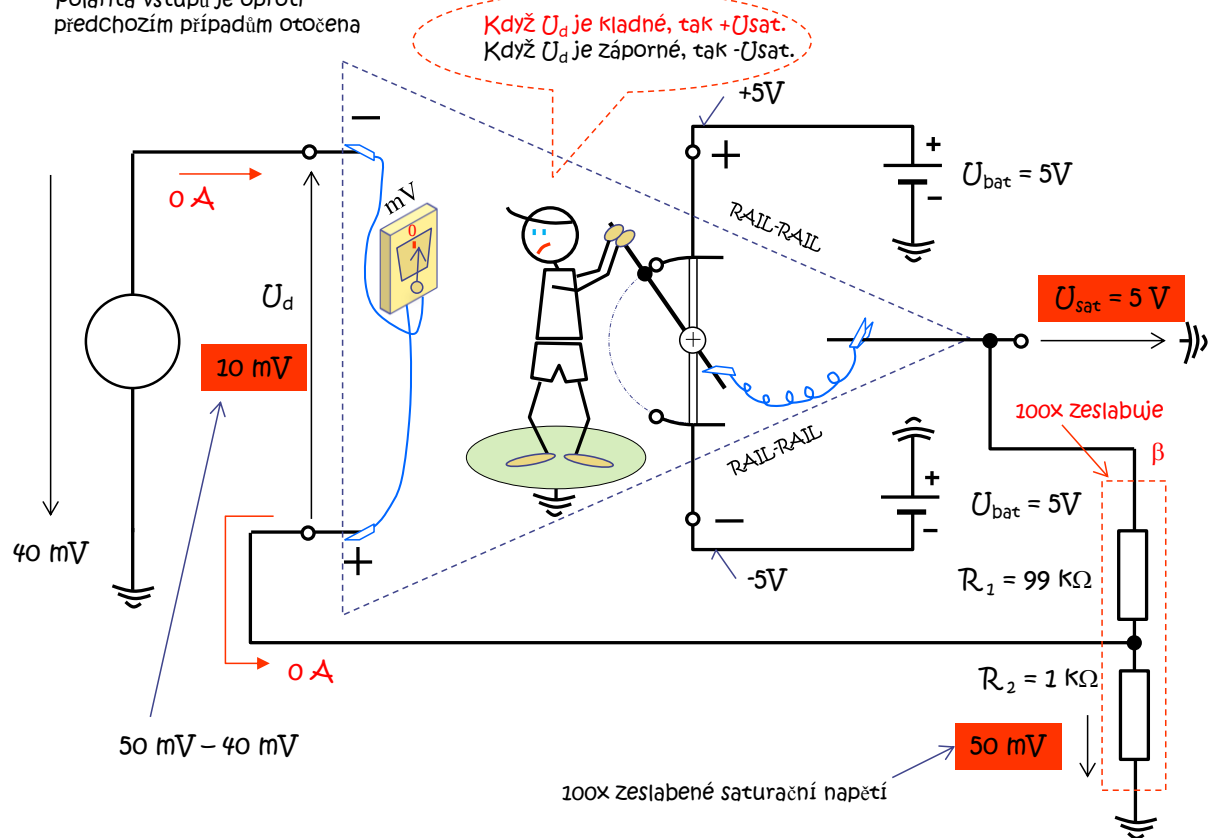
4.9 OZ mimo režim záporné zpětné vazby

Operační zesilovač má sám o sobě extrémně vysoké zesílení a trpí i různými neduhy, které jsou bez záporné zpětné vazby obtížně léčitelné. Proto i velmi slabá napětí, dokonce i všudypřítomný šum, mohou snadno uvádět OZ do saturace. V případě kladné zpětné vazby je saturace prakticky nevyhnutelná. Pak trpaslík ve skutečnosti řeší „dvoustavovou úlohu“: podle znaménka diferenčního napětí přepíná výstup do kladné či záporné saturace tak, aby kladnému diferenčnímu napětí odpovídalo kladné napětí na výstupu a opačně (protože $U_{\text{vyst}} = A U_d$, $A > 0$).

Obrázky s obvody ZV8 až ZV10 popisují tyto případy pro jednoduchost a větší názornost s rail-rail zesilovači, kdy U_{sat} je rovno napětí baterie. Vstupy OZ jsou oproti předchozím případům přehozeny, takže v obvodu je nyní zavedena kladná zpětná vazba.

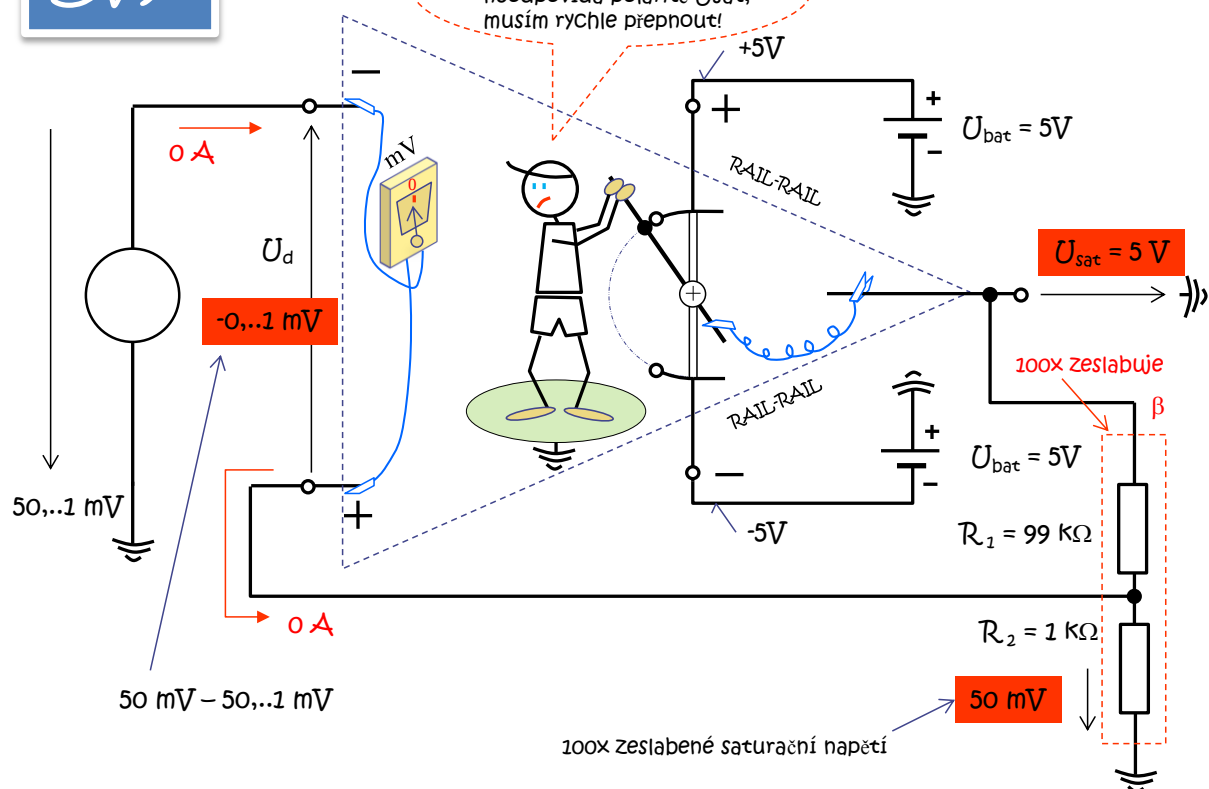
ZV8

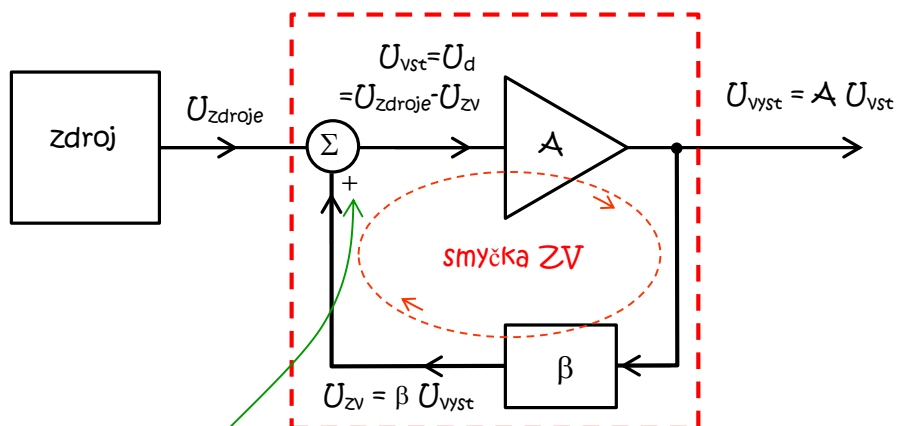
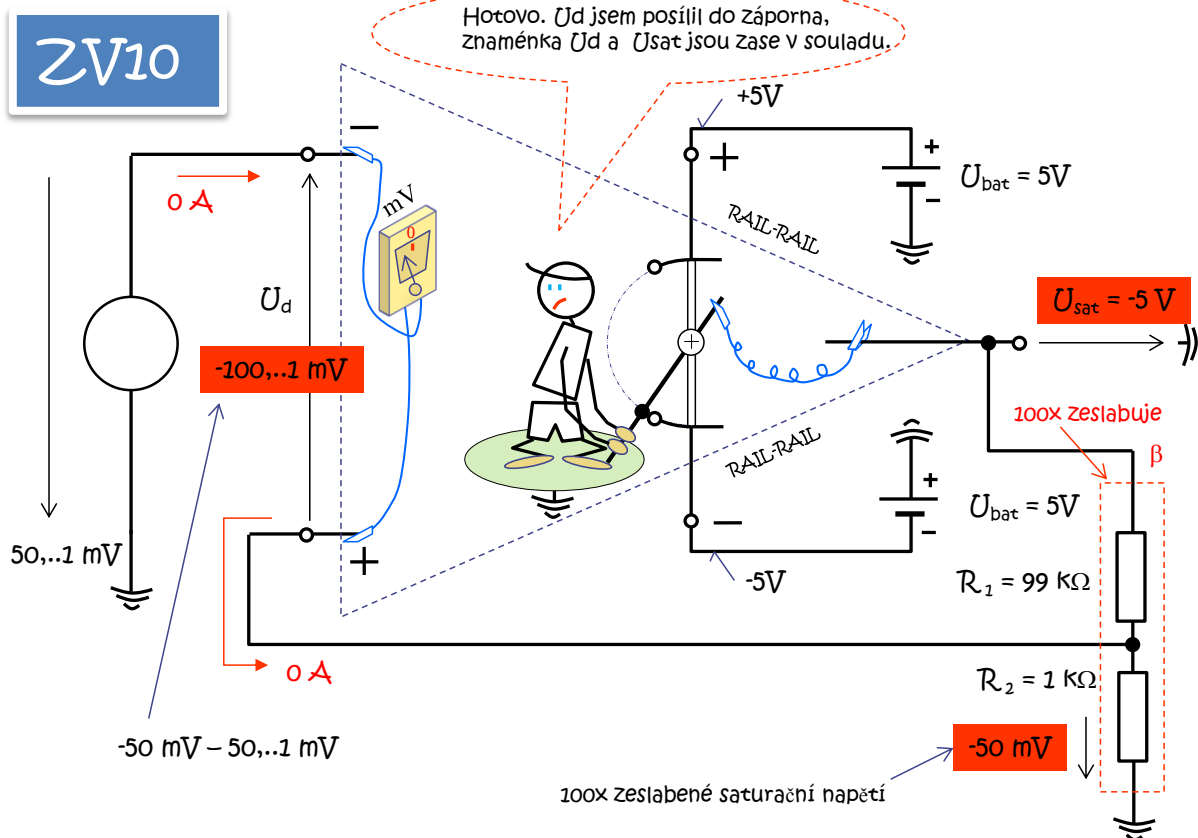
Polarita vstupů je oproti předchozím případům otočena



ZV9

Polarita U_d se změnila a už neodpovídá polaritě U_{sat} , musím rychle přepnout!





ve vzorci musí být opačné znaménko než ve schématu

$$\frac{U_{vyst}}{U_{zdroye}} = A_{zv} = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{A}{N} = \frac{A}{1 - 0,01 * A} \rightarrow -100 \text{ pro } A \rightarrow \infty$$

$\rightarrow -\infty < 0$

Výpočet podle Blackova vzorce nemá žádný význam, protože $N < 0$.
Kladná zpětná vazba je tak silná, že změnila charakter obvodu.
Už to není zesilovač, ale komparátor, výpočet zesílení A_{zv} je nesmyslný.

Na prvním obrázku s obvodem ZV8 je vstupní napětí 40 mV a diferenční napětí je kladné, a proto trpaslík má nastavené i výstupní napětí kladné. Tomu odpovídá zpětnovazební napětí 50 mV. Diferenční napětí je rozdílem mezi vstupním a zpětnovazebním napětím, tedy

kladných 10 mV, a vše je v pořádku. Pokud by vstupní napětí přesáhlo 50 mV, pak by to znamenalo změnu znaménka U_d a pokyn pro trpaslíka, aby přepnul do záporné saturace. Tento přechod a akci ukazují druhý a třetí obrázek (ZV9 a ZV10).

Důležité je příslušné blokové schéma zpětnovazebního uspořádání s vysvětlením, proč již Blackův vzorec v tomto případě nefunguje. Ve skutečnosti přestane být použitelný již pro zesílení operačního zesilovače větší než 100. Z obvodu se stává komparátor s hysterezí (podrobnosti viz přednášky).

Tyto texty se zabývají jen operačními zesilovači v lineárních nesetrvačných aplikacích (zesilovací technika), kdy stupeň řádně fungující zpětné vazby je kladný, zejména obvody se zápornou zpětnou vazbou. Při jejich řešení se pak můžeme opřít o obě zlatá pravidla.

4.10 Jak lze prakticky zjišťovat typ a vlastnosti zpětné vazby v konkrétním obvodu s OZ?

Informace, zda v konkrétním obvodu s OZ působí kladná či záporná zpětná vazba, je zásadní (přehozením vstupů OZ můžeme dostat obvod zcela jiného typu, například klopný obvod namísto zesilovače). Pokud je naším cílem analýza obvodu, pak toto rozhodování je možné chápat jako rozcestník do dvou zcela odlišných směrů, kterými se následná analýza musí ubírat (stručně řečeno: buď s nulovým napětím U_d a výstupem v lineárním režimu, nebo s nenulovým U_d a výstupem v saturaci).

Vyšším cílem pak bude, nad rámec dvoustavového rozhodnutí, zda jde o kladnou či zápornou zpětnou vazbu, získání kvalitativního popisu zpětné vazby (jak je silná, neboli vyjádření stupně ZV a dalších důležitých informací o systému z toho vyplývajících).

Kvalitativní analýza ZV se provede nejlépe odvozením blokové struktury obvodu a výpočtem A_{zv} buď Blackovým nebo Masonovým vzorcem.

Pokud nám jde pouze o dvoustavové rozhodnutí, lze použít daleko efektivnější postup.

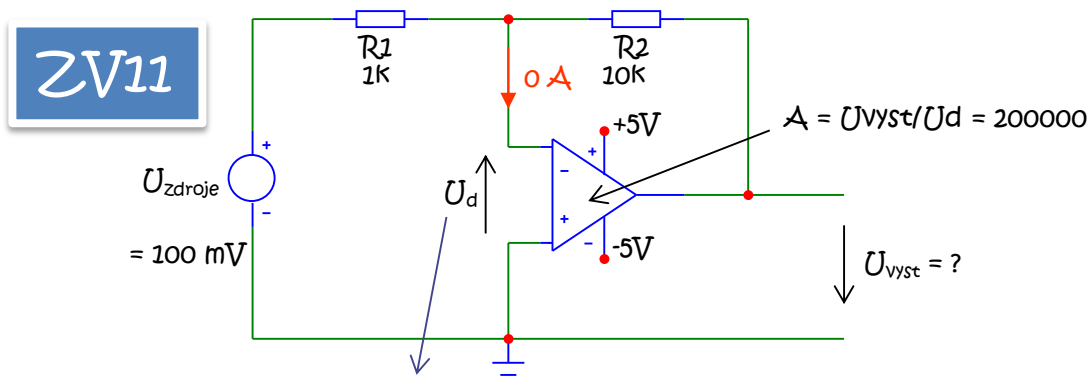
4.11 Kvalitativní analýza zpětné vazby

Příklad takové analýzy pro jednoduchý neinvertující zesilovač byl proveden v části 4.6 „Operační zesilovač ve zpětnovazebním zapojení“. Jednoduchost spočívala v tom, že blokové schéma zesilovače odpovídalo blokovému schématu zpětnovazebního systému pro odvození Blackova vzorce. Níže uvedeme dva příklady zapojení, jejichž bloková struktura je odlišná.

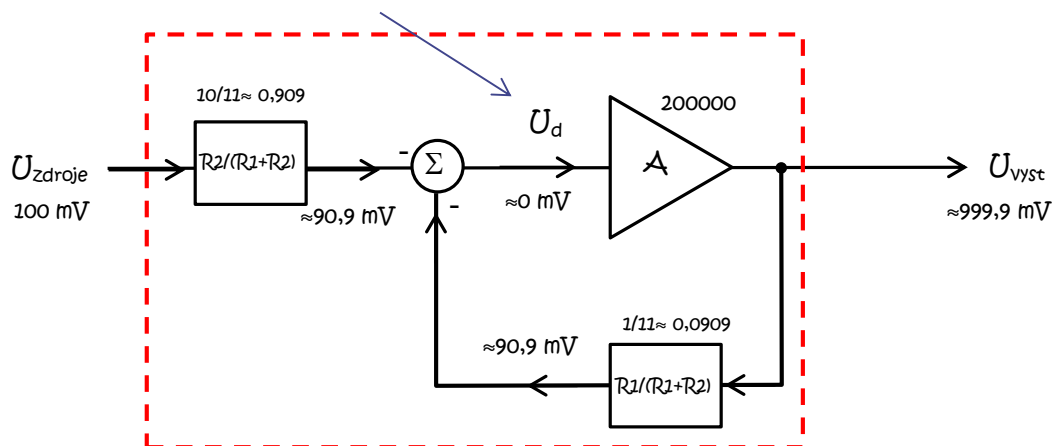
Schéma invertujícího zesilovače je výhodné zjednodušit na dva dílčí případy s využitím principu superpozice (viz obrázek s obvodem ZV11): Diferenční napětí U_d je vyvoláváno dvěma zdroji (příčinami), zdrojem signálu (přímé působení) a výstupem OZ (zpětnovazební působení). Přímé působení se děje přes nezatížený odporový dělič R_1 - R_2 (výstup OZ, který má vlastnosti ideálního zdroje napětí, vyřadíme), zpětnovazební působení se děje přes nezatížený dělič R_2 - R_1 (vyřadíme zdroj signálu). V blokovém schématu se (navíc oproti schématu klasickému) objevil blok mezi zdrojem signálu a sumačním blokem. Zesílení A_{zv} se vyřeší pomocí Masonova vzorce. Zesílení je prakticky -10. Pro $A \rightarrow \infty$ vzorec přechází ve známý vztah pro zesílení invertujícího zesilovače s ideálním OZ:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -10$$

Stupeň vazby je 18183, ale zpětnou vazbou se zesílení snížilo $200000/10 = 20000$ krát. Příčina rozdílu je zřejmá z blokového schématu: Vstupní napětí je nejprve zeslabeno děličem R_1 - R_2 a až poté vstupuje do zpětnovazební soustavy, která se postará o zesílení.



Princip superpozice: $U_d = -U_{zdroje} \frac{R_2}{(R_1+R_2)} - U_{vyst} \frac{R_1}{(R_1+R_2)}$



Masonův vzorec:

$$\frac{U_{vyst}}{U_{zdroje}} = A_{zv} = \frac{-A \frac{R_2}{(R_1+R_2)}}{1 - (A \frac{R_1}{(R_1+R_2)})} = \frac{A \frac{R_2}{(R_1+R_2)}}{(A+1) \frac{R_1}{(R_1+R_2)}} = \frac{200000 \times 10K}{200001 \times 1K + 10K} \approx -9,999$$

$$N = 1 + A \frac{R_1}{(R_1+R_2)} \approx 18183$$

Další schéma ZV12 ukazuje obvod s dvěma smyčkami zpětné vazby (tento obvod může být použit jako tzv. negativní impedanční konvertor, NIC; podrobnosti viz příklad AN19 v kapitole 5.5).

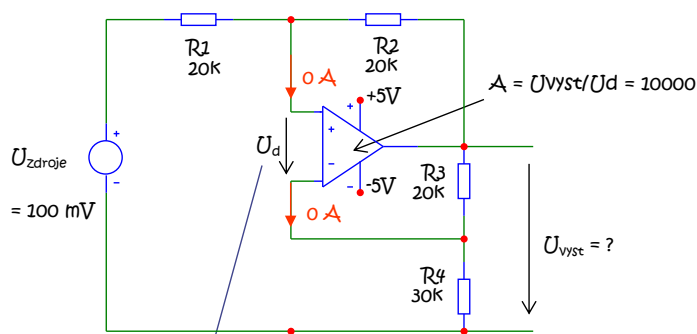
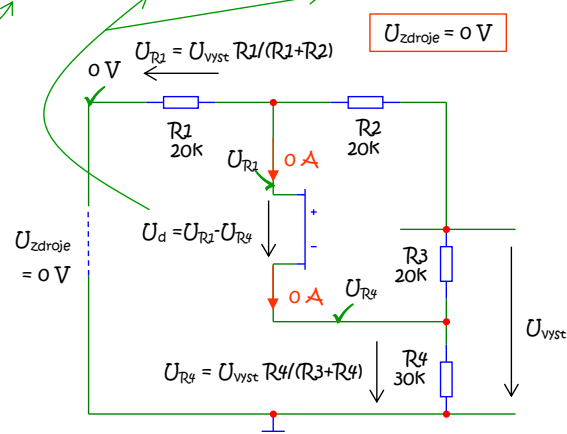
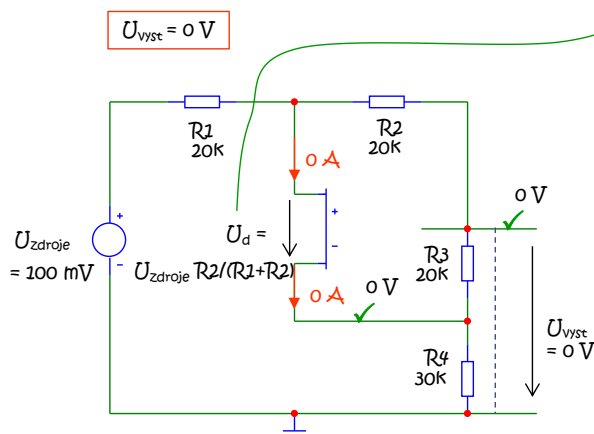
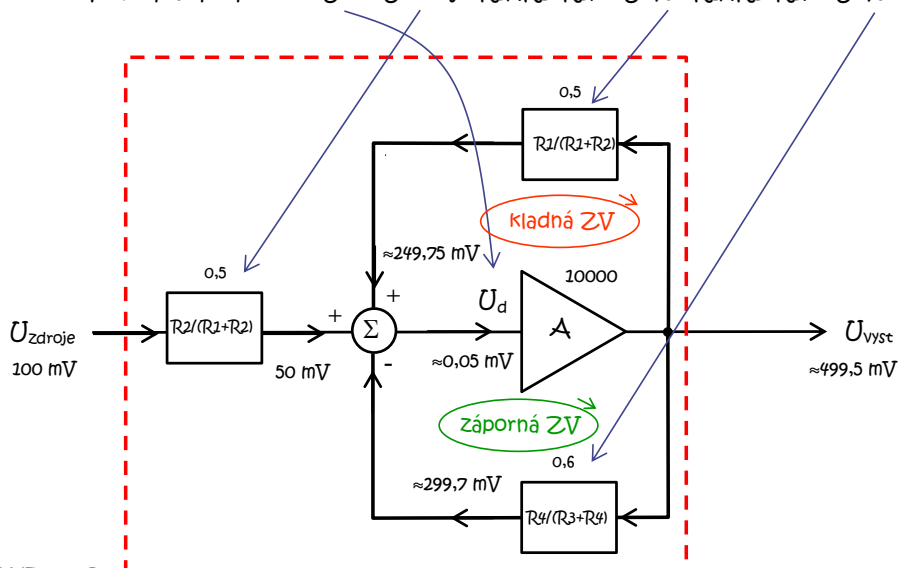
Podrobně si projděte způsob výpočtu diferenčního napětí s využitím principu superpozice. Proč si můžeme dovolit výpočet U_d při působení U_{zdroje} a nepůsobení U_{vyst} ? Není rozpor v tom, že počítáme nenulové U_d při nulovém U_{vyst} ? Proč je schématická značka OZ nakreslena neúplně?

V obvodu se objevily dvě zpětnovazební smyčky, takže je nutné použít Masonův vzorec. Z něho vyplývá, že stupeň ZV je kladný ($N = 1001$), takže záporná zpětná vazba „zvítězila“ nad kladnou a obvod se bude chovat jako stabilní zesilovač o zisku cca 5. Z blokového schématu vyplývá, že záporná ZV dodává do U_d zpětnovazební napětí cca 300 mV, zatímco kladná ZV pouze cca 250 mV. Stačilo by však docela málo a vše by bylo jinak: závisí na relacích mezi přenosy odporových děličů R_1 - R_2 a R_3 - R_4 . Podmínka

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} < \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ neboli } \frac{R_3}{R_4} > \frac{R_2}{R_1}$$

by znamenala záporný stupeň vazby a přechod do režimu „komparátor“. Pro velmi úzký rozsah odporů, kdy platí $0 < N < 1$, by obvod pracoval v lineárním zesilovacím režimu s kladnou ZV. Tento režim však zaniká pro $A \rightarrow \infty$.

ZV12

Princip superpozice: $U_d = U_{\text{zdroje}} R_2/(R_1+R_2) + U_{\text{vyst}} R_1/(R_1+R_2) - U_{\text{vyst}} R_4/(R_3+R_4)$ Princip superpozice: $U_d = U_{\text{zdroje}} R_2/(R_1+R_2) + U_{\text{vyst}} R_1/(R_1+R_2) - U_{\text{vyst}} R_4/(R_3+R_4)$ 

Masonův vzorec:

$$\frac{U_{\text{vyst}}}{U_{\text{zdroje}}} = A_{\text{zv}} = \frac{A R_2/(R_1+R_2)}{1 - A R_1/(R_1+R_2) + A R_4/(R_3+R_4)} = \frac{A R_2/(R_1+R_2)}{1 + A [R_4/(R_3+R_4) - R_1/(R_1+R_2)]} = \frac{10000 \times 0,5}{1 + 10000 \times (0,6 - 0,5)} \approx 4,995$$

$N = 1001$

4.12 Dvoustavové rozhodování: je zpětná vazba kladná či záporná?

Kvalitativní analýza zpětných vazeb dává odpověď na otázku, zda se jedná o ZV kladnou či zápornou. Nevýhodou může být to, že je nutno celý obvod komplexně vyšetřit, což hlavně u komplikovanějších zapojení může být obtížné. Pak bývá výhodnější nejprve zjistit typ ZV a v závislosti na tom obvod vyřešit jiným, efektivnějším postupem.

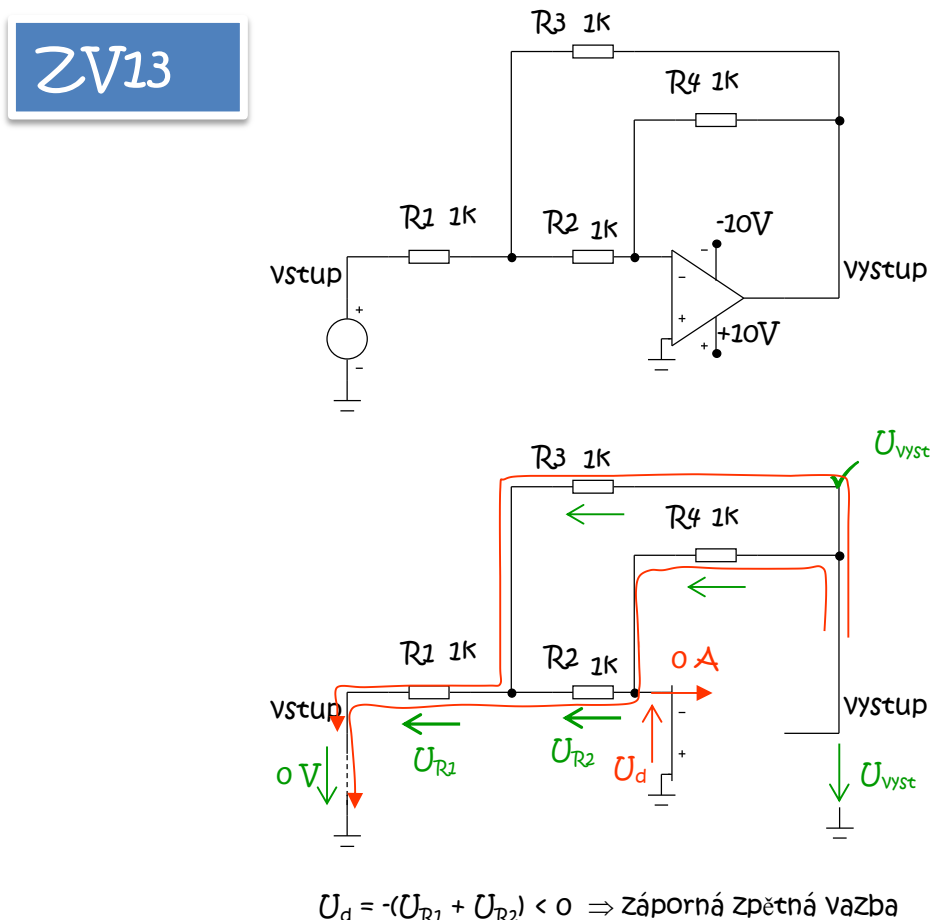
Typ celkové ZV je dán zisky zpětnovazebních smyček a nezávisí na ziscích přímých cest ze zdroje na výstup. Zdroj tedy můžeme vyřadit. Obsahuje-li obvod jeden operační zesilovač, pak charakter celkové ZV lze zjistit takto:

Zjistíme, jak by se změnilo U_d , kdyby se zvětšilo U_{vyst} . Pokud by U_d vzrostlo, ZV by byla kladná. Pokles U_d by znamenal zápornou ZV.

Pokud je obvod lineární, není třeba pracovat se změnami signálů, stačí uvažovat jejich znaménka. Z toho vyplývá praktický postup při dvoustavovém rozhodování o typu ZV:

1. Vyřadíme zdroj signálu (zdroj napětí nahradíme zkratem, zdroj proudu rozpojením).
2. Předpokládáme kladné výstupní napětí OZ. Na jeho velikosti nezáleží.
3. Odhadneme, zda se toto napětí přenese na U_d (mezi vstupy OZ) jako kladné nebo záporné. Podle toho rozhodneme o typu zpětné vazby (kladná nebo záporná).

Je zřejmé, že pokud by současně nečinilo velké potíže určit i velikost U_d pomocí U_{vyst} , šlo by takto přímo určit i stupeň zpětné vazby.

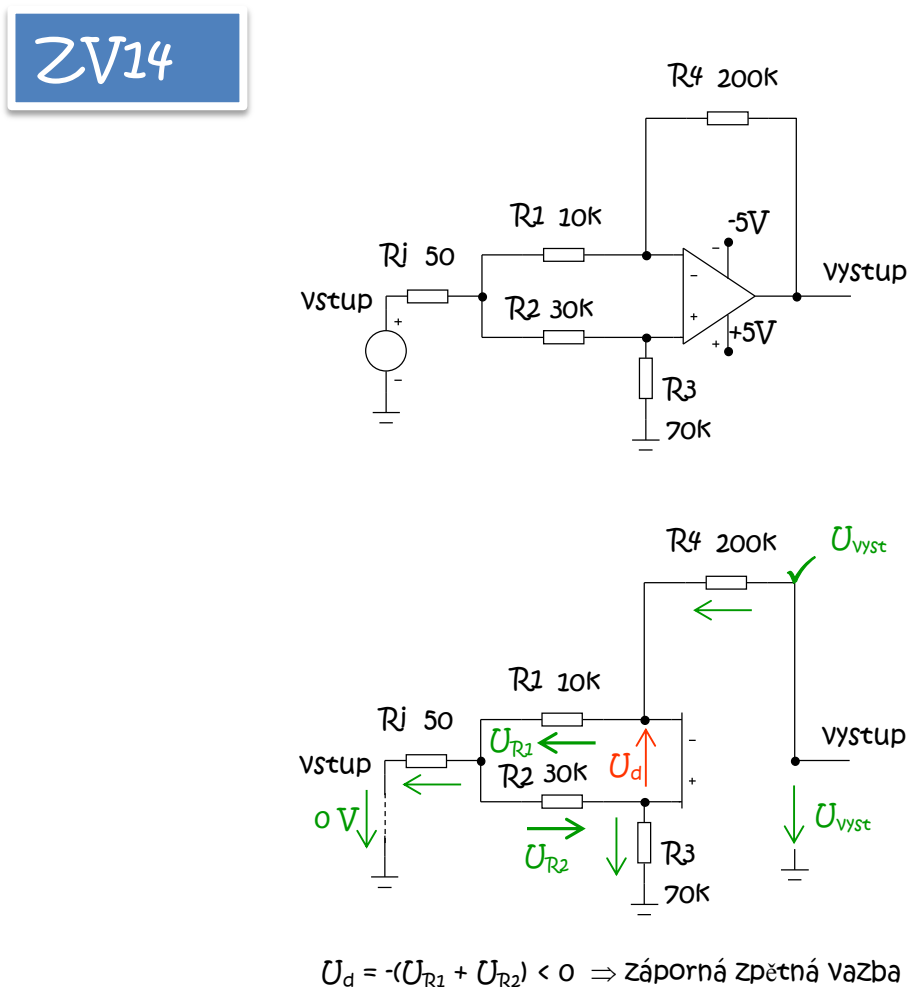


Sledujte, jak jsou kroky 1, 2 a 3 realizovány pro obvod ZV13. Je jasné, proč napětí na všech rezistorech, vyvolaných kladným napětím U_{vyst} , musí mít jednoznačně uvedenou orientaci (zkuste vysledovat jediný možný způsob větvení a toku proudů, vytékajících z výstupu OZ přes odporovou síť)? Diferenční napětí je určováno pouze napětími na R_1 a R_2 (je jejich záporně vzatým součtem). Proto U_d musí být záporné a jde o zápornou zpětnou vazbu.

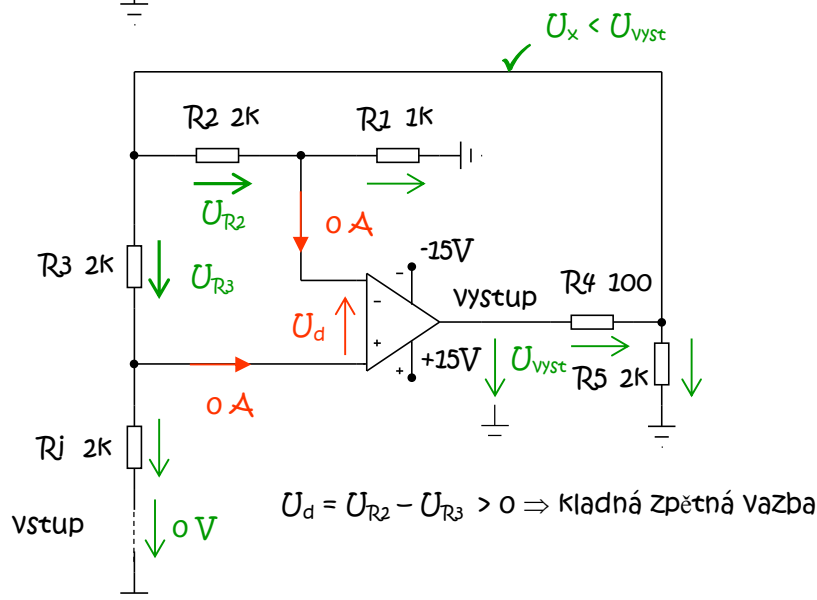
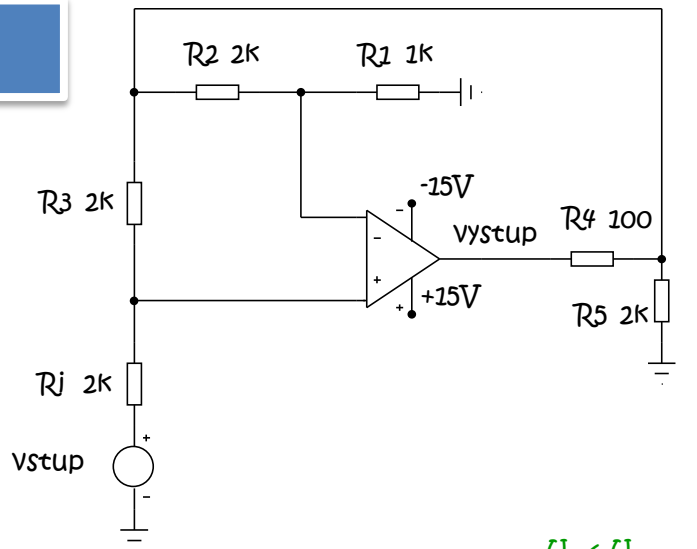
S trochou zkušenosti zjistíme na první pohled, že zpětná vazba je záporná, aniž by bylo nutné provádět uvedený rozbor: Neinvertující vstup OZ je uzemněn, takže zpětná vazba může být vedena z výstupu pouze na invertující vstup. Obvod je odporový, proto nemůže dojít k žádným fázovým posuvům, které by zápornou ZV „zvrátily“ na kladnou.

Dále si všimněme, že protože řešíme přenos signálu z výstupu OZ zpět na jeho vstup a nikoliv přenos z jeho vstupu na výstup, vlastní OZ k této operaci vlastně nepotřebujeme – výpočty nijak neovlivňuje. K jedinému ovlivňování odporového „zbytku“ obvodu by mohlo dojít přes vstupy OZ, ale tomu je zamezeno jeho nekonečným vstupním odporem (nulový odběrný proud). Tato skutečnost je (nepovinně) vyjádřena neúplnou schématickou značkou OZ.

Obvod ZV14 má stejně jako ZV13 zavedenou zápornou zpětnou vazbu, a to i přesto, že v zapojení jsou využívány oba vstupy OZ. Diferenční napětí má opačné znaménko než výstupní napětí nezávisle na odporech rezistorů v obvodu.



ZV15



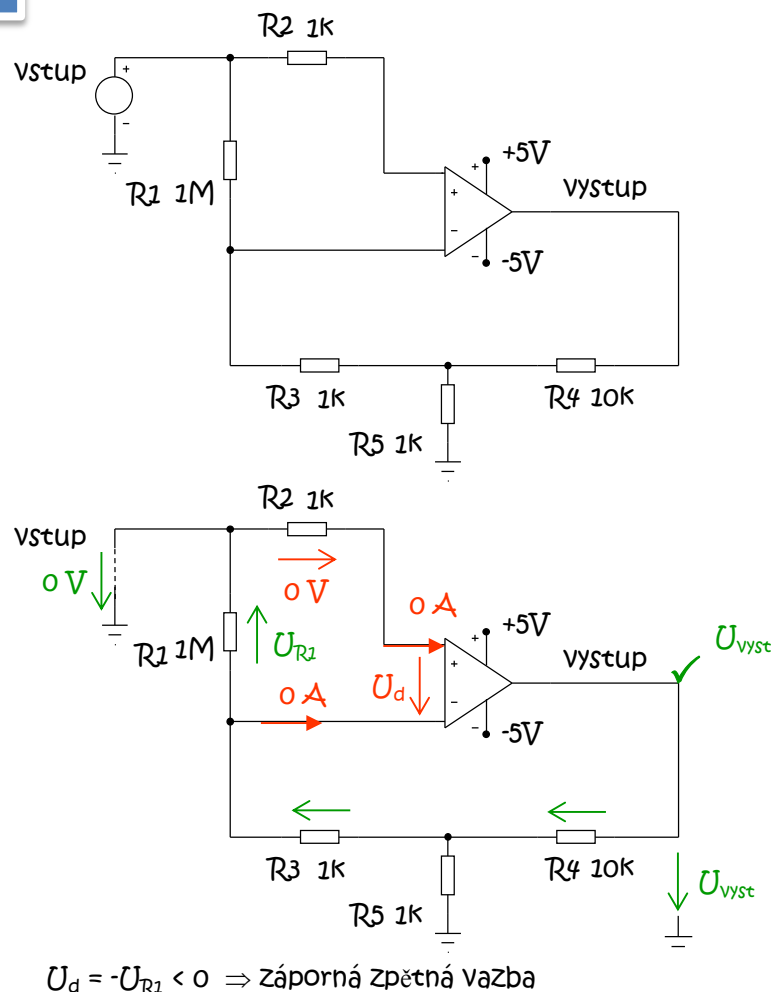
U obvodu ZV15 je výstupní napětí OZ zeslabeno na nižší napětí U_x v důsledku napěťového úbytku na R_4 . Napětí U_x napájí dva nezátížené děliče napětí R_3-R_i a R_2-R_1 . Záporná zpětná vazba je vedena přes dělič R_2-R_1 , kladná přes dělič R_3-R_i . Diferenční napětí U_d je rovno rozdílu napětí na R_2 a R_3 . V důsledku nesymetrie děličů je U_{R2} větší než U_{R3} a U_d je kladné, což znamená dominantní kladnou zpětnou vazbu. Operační zesilovač bude v saturaci (v kladné nebo záporné?).

Zápornou zpětnou vazbu můžeme nastavit například zmenšením odporu R_i pod $1\text{ k}\Omega$.

U obvodu ZV16 je zabezpečena záporná zpětná vazba. Na této skutečnosti nic nezmění ani libovolná hodnota vnitřního odporu zdroje signálu.

Na rezistoru R_2 není žádný úbytek napětí, protože jím neteče proud. Diferenční napětí OZ je tedy plně určováno úbytkem napětí na R_1 .

ZV16



4.13 Vliv zpětné vazby na impedanční (odporové) úrovně

Zpětná vazba ovlivňuje nejen zesílení, ale i další parametry aplikace, například její vstupní a výstupní odpor.

Obrázek ZV17 vysvětluje podstatu tzv. nesené součástky neboli napětového bootstrapu [12]. Je zřejmé, že řízený zdroj o napětí, které je přímo úměrné napětí U_{vstup} , lze realizovat zesilovačem (resp. zeslabovačem) o přenosu α . Nastavujeme-li α od 0 do 1, pak zdánlivý odpor, tak jak se jeví z pohledu zdroje U_{vstup} , lze měnit od 1 k Ω až směrem k nekonečnu. Platí totiž „alfa vzorec“

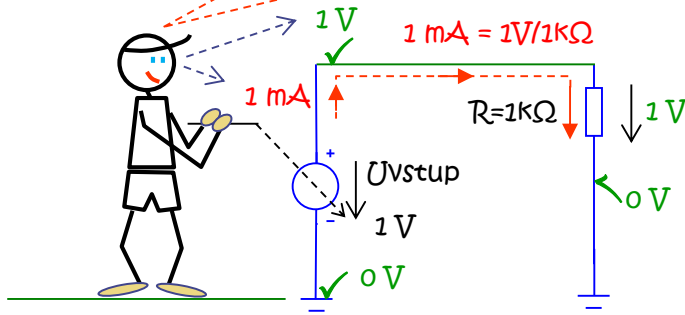
$$R_{zdánlivý} = \frac{U_{vstup}}{I} = \frac{U_{vstup}}{U_R / R} = R \frac{U_{vstup}}{U_R} = R \frac{U_{vstup}}{U_{vstup} - \alpha U_{vstup}} = \frac{R}{1 - \alpha}.$$

Výsledek připomíná Blackův vzorec, což není podobnost čistě náhodná.

Pokud bychom nastavili záporné α , pak bychom mohli regulovat odpor pod hodnotu R směrem k nule. Volba $\alpha > 1$ by ale vedla k zápornému odporu (napětí a proud by byly opačně orientovány), což je potenciálním zdrojem nestability.

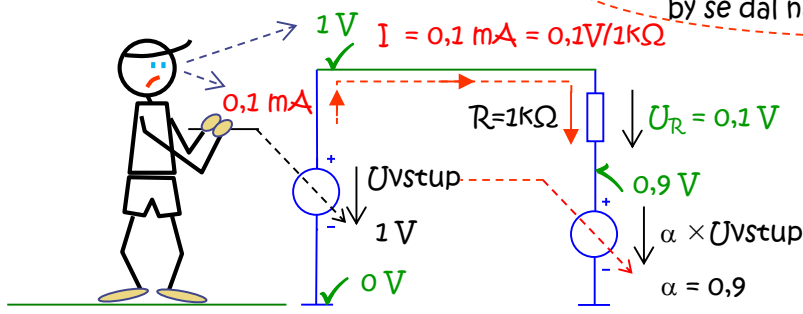
ZV17

Chci změřit velikost odporu. Na zdroji nastavím 1V a odečtu proud, odebíraný ze zdroje. Odpor vychází $1\text{V}/1\text{mA}=1\text{k}\Omega$. To souhlasí se štítkovou hodnotou na rezistoru..



Spodní vývod rezistoru jsem podložil dalším zdrojem, jehož napětí je automaticky regulováno na 90 % z napětí prvního zdroje. Ted' ale vidím, že první zdroj je jakoby zatěžován odporem $1\text{V}/0,1\text{mA} = 10\text{k}\Omega$!

Takto bych si vlastně mohl vyrobit elektronicky řízený rezistor. Jeho odpor by se dal nastavovat parametrem α .

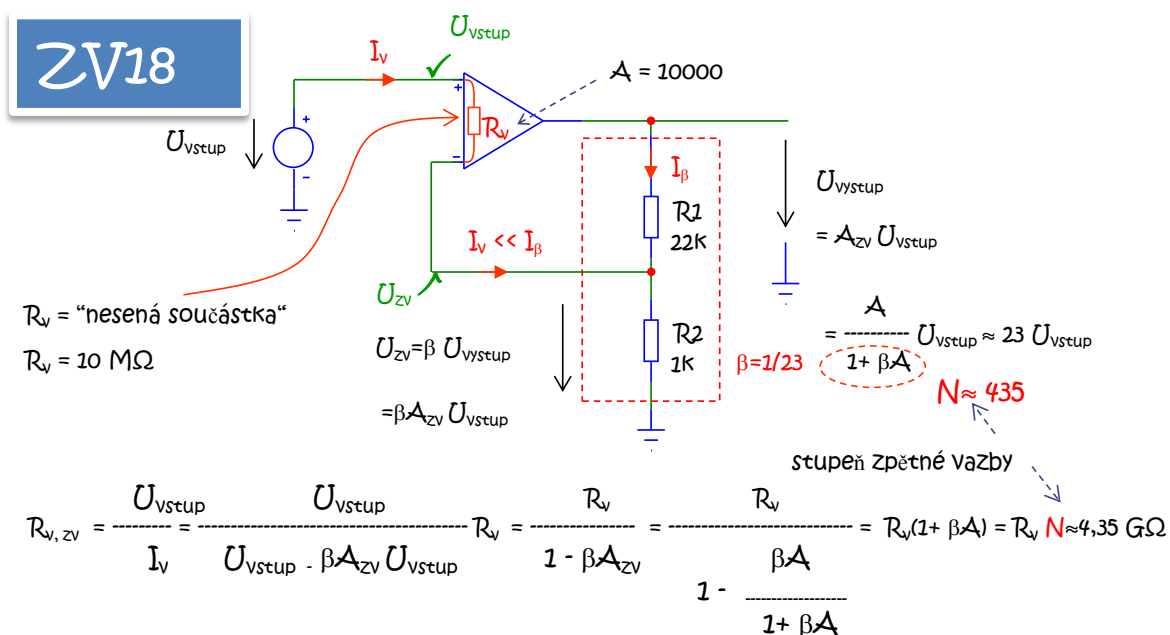


Alfa vzorec:

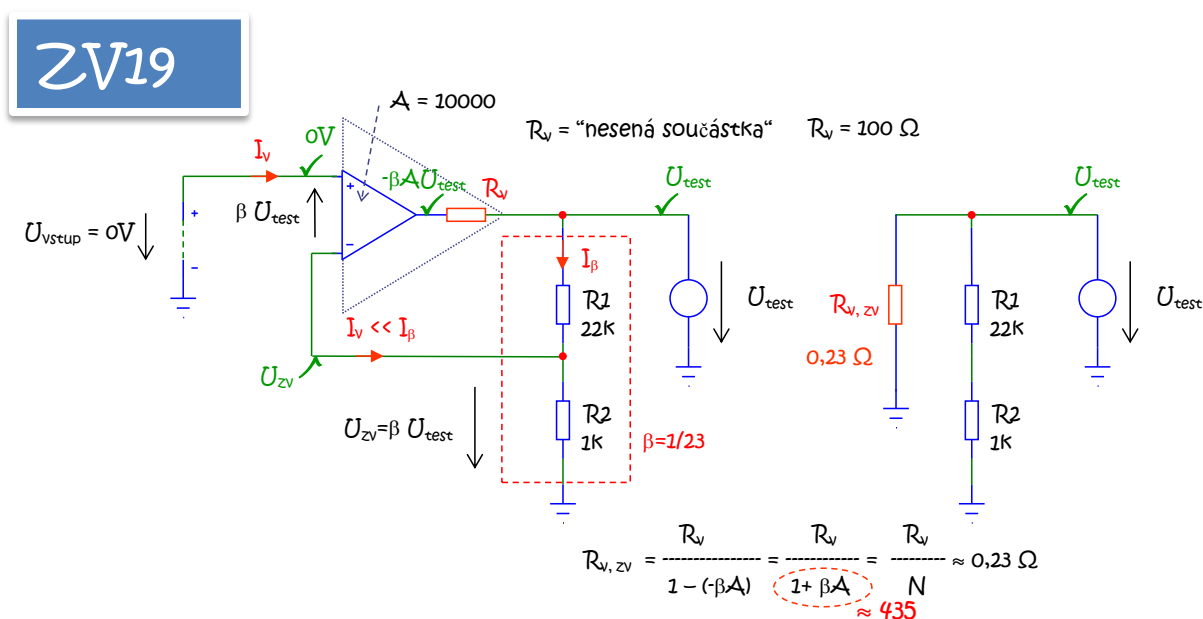
$$R_{\text{zdánlivý}} = \frac{R}{1 - \alpha}$$

Dvojpol, jehož jeden vývod je „podložen“ napětím, odvozeným od napětí jiného vývodu, se nazývá nesená součástka (bootstrap). Původ pojmu „bootstrap“ je velmi zajímavý [13]. Podle jednoho z mnoha výkladů je převzat z anglického boot-strap, tj. tkanička od bot. Při chůzi tkanička sleduje pohyb nohy, tak jako napětí zdroje αU_{vstup} , kterým je „podložen“ spodní konec nesené součástky na obr. ZV17, je ve vleku (kopíruje pohyb) napětí zdroje U_{vstup} . Při absolutní shodě, tj. pro $\alpha = 1$, by rezistorem netekl žádný proud a zdroj U_{vstup} by nebyl zatěžován. Toho lze využít k zvyšování vstupního odporu zesilovače, kdy vstupní odpor reálně existující součástky se projeví jako nekonečný odpor nesené součástky (v alfa vzorci se odpor dělí nulou) z pohledu zdroje signálu U_{vstup} .

Obrázek ZV18 ukazuje, jak se tento efekt uplatňuje v obvodech se zavedenou zpětnou vazbou. Neinvertující zesilovač je osazen operačním zesilovačem o zesílení 10000 a vstupním odporem 10 MΩ. Tento odpor je možno považovat za nesenou součástku, protože záporný vstup OZ je podložen zpětnovazebním napětím. Z výpočtu vyplývá, že vlivem ZV je vstupní odpor aplikace N krát větší než je vstupní odpor OZ, kde N je stupeň ZV. Protože vstupní odpor vychází několik gigaohmů, je tudíž o 6 řádů vyšší než odpory v děliči R_1 - R_2 (kiloohmy), což potvrzuje oprávněnost zanedbání proudu I_v oproti proudu děličem I_β .

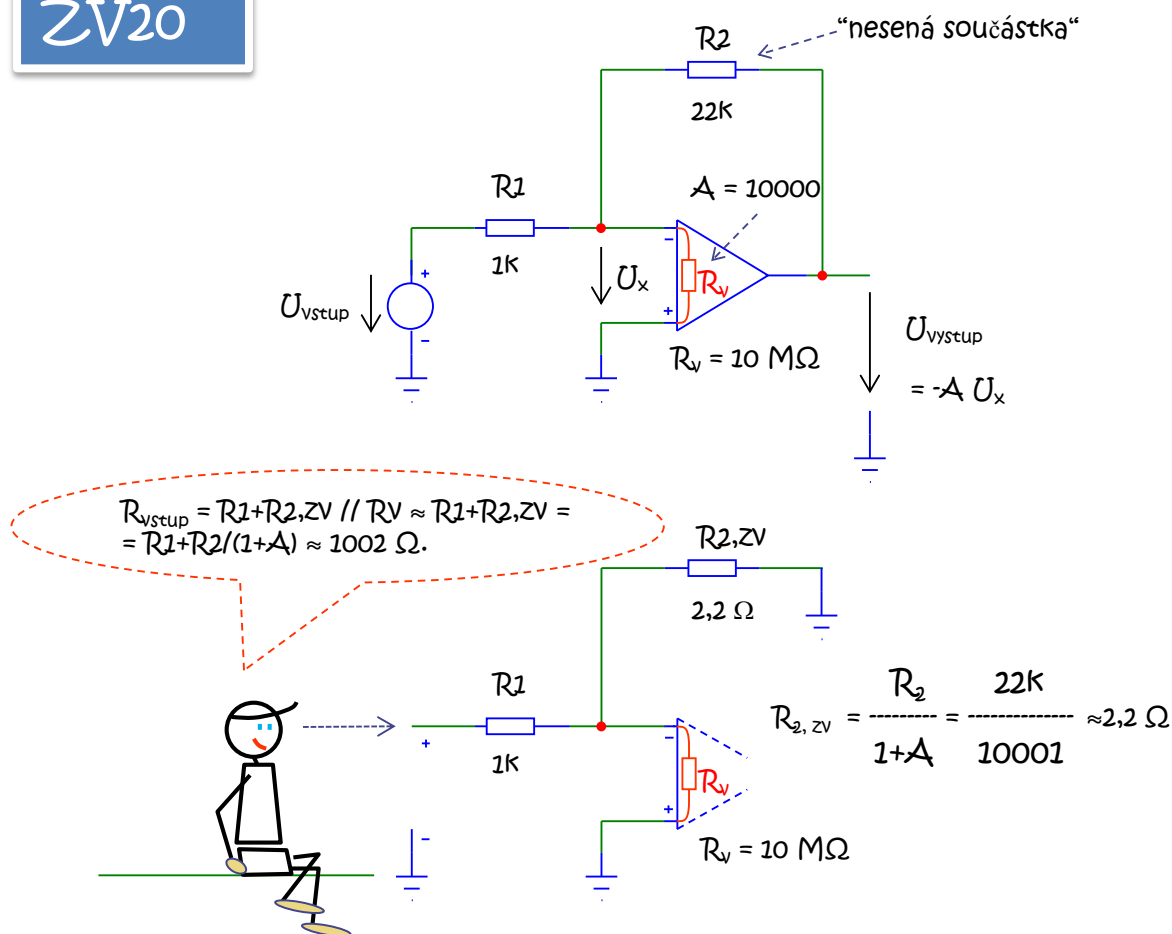


Potvrzuje se dříve uvedené tvrzení, že vedlejším (ale velmi příjemným) důsledkem poklesu zesílení ($N = 435$ krát) po zavedení záporné zpětné vazby je nárůst ($N = 435$ krát) vstupního odporu.



Na obrázku ZV19 pokračuje v tomto duchu analýza výstupního odporu téhož obvodu při uvažování nenulového výstupního odporu R_v operačního zesilovače. Výstupní odpor aplikace lze zjistit vynulováním vstupního napětí, přivedením testovacího napětí na výstup, odečtem odběrného proudu z testovacího zdroje, a vydělením napětí a proudu. Z obrázku vyplývá, že R_v je nesená součástka, protože zpětnovazební napětí U_{ZV} po zesílení operačním zesilovačem „podpírá levý konec“ R_v . Dochází tak ke klasickému napěťovému bootstrapu z obrázku ZV17, kde zdánlivý odpor je popsán alfa vzorcem pro $\alpha = -\beta A$. Operační zesilovač se pak chová jako velmi tvrdý zdroj napětí, protože zatěžuje testovací zdroj zdánlivým odporem N krát menším než je jeho skutečný výstupní odpor ($0,23 \Omega$ namísto 100Ω). Pro úplnost dodejme, že výstupní odpor zesilovače z obr. ZV19 je dán paralelní kombinací R_v/N a $(R_1 + R_2)$.

ZV20



Obrázek ZV20 ukazuje rychlý postup určování vstupního odporu invertujícího zesilovače s OZ, u něhož je uvažována konečná hodnota vstupního odporu $R_v = 10 M\Omega$ a zesílení $A = 10000$. Rezistor R_2 je nesená součástka, protože napětí na jeho „pravém konci“ je invertované a zesílené napětí z jeho „levého konce“. Odpor R_2 se transformuje mezi vstupy OZ jako $2,2 \Omega$ a působí paralelně k obrovskému vstupnímu odporu OZ. Výsledný vstupní odpor aplikace je pak prakticky roven odporu R_1 .

Následující kapitola je věnována obvodům s ideálními OZ, jejichž nulový výstupní a nekonečný vstupní odpor není třeba složitě řešit (bootstrapem nemohou být ovlivněny). Vysoké zesílení OZ ve zpětnovazební smyčce pak bývá garancí toho, že výsledky se nebudou příliš lišit od reality.

5 Analýza odporových obvodů s ideálními operačními zesilovači

Vše by mělo být vykonáváno tak jednoduše, jak je to jen možné, ale ne jednodušeji.

A. Einstein, volný překlad.

Cíle a obsah kapitoly:

- Ideální OZ = IOZ v roli nejjednoduššího možného modelu skutečné součástky.
- „Zbytečné“ součástky v okolí IOZ.
- Tři univerzální kroky heuristické analýzy obvodů s IOZ.
- Řešení obvodů s IOZ metodou jednoho tahu.
- Řešení obvodů s IOZ metodou jednoho pokusu a jednoho omylu.

5.1 Co bude analyzováno

Tato kapitola objasňuje postupy řešení obvodů, které obsahují ideální operační zesilovače, rezistory a zdroje signálů. Omezíme se na obvody, pracující v lineárním režimu (se zápornou zpětnou vazbou).

Ideální OZ = IOZ = operační zesilovač, jehož chování lze jednoznačně popsat trojicí extrémních parametrů: nekonečným zesílením U_{vyst}/U_d , nekonečným vstupním odporem a nulovým výstupním odporem. Tento nejjednodušší možný model OZ poskytuje vysokou shodu chování s reálně fungující součástkou v stejnosměrném a nízkofrekvenčním režimu (detaily viz přednášky). Nejjednodušší možný model otevírá dveře k nejjednodušším možným postupům řešení obvodů, které jsou s jeho pomocí modelovány.

Protože v modelu IOZ není zahrnuta limitace výstupního napětí saturačními úrovněmi, správně by se vývoody pro stejnosměrné napájení měly ošetřit zdroji o nekonečném napětí. Šlo by ale o typickou ukázkou, jak snaha o jednoduchost vede paradoxně ke komplikaci. Kompromisním řešením je neuvádět u napájecích pinů konkrétní napětí, nýbrž napájecí napětí označit symbolicky, např. $+U_N$, $-U_N$, a mlčky předpokládat, že toto napětí je natolik vysoké, že nepředstavuje překážku pro „volný pohyb“ výstupního napětí OZ. Pokud bychom napájecí piny zcela odstranili ze schématu, bylo by to na jednu stranu zjednodušení, ale na stranu druhou bychom tím vlastně ignorovali proudy, tekoucí mezi operačním zesilovačem a napájecími zdroji. Takovéto zjednodušení modelu, které porušuje první Kirchhoffův zákon (viz závěr kapitoly 3.5), by již bylo za hranou, o které se zmiňuje výše uvedený citát A. Einsteina.

5.2 „Zbytečné“ součástky v okolí ideálního operačního zesilovače

Svémi **extrémními** parametry a často za vydatné pomoci záporné zpětné vazby způsobuje ideální OZ to, že některé obvodové veličiny, které analyzujeme (například výstupní napětí), vůbec nezávisí na určitých součástkách v okolí operačního zesilovače. Tyto součástky, rozšiřující množinu „zbytečných součástek“ z kapitoly 3.7, je možné odstranit z obvodu za účelem dalšího zjednodušení jeho řešení.

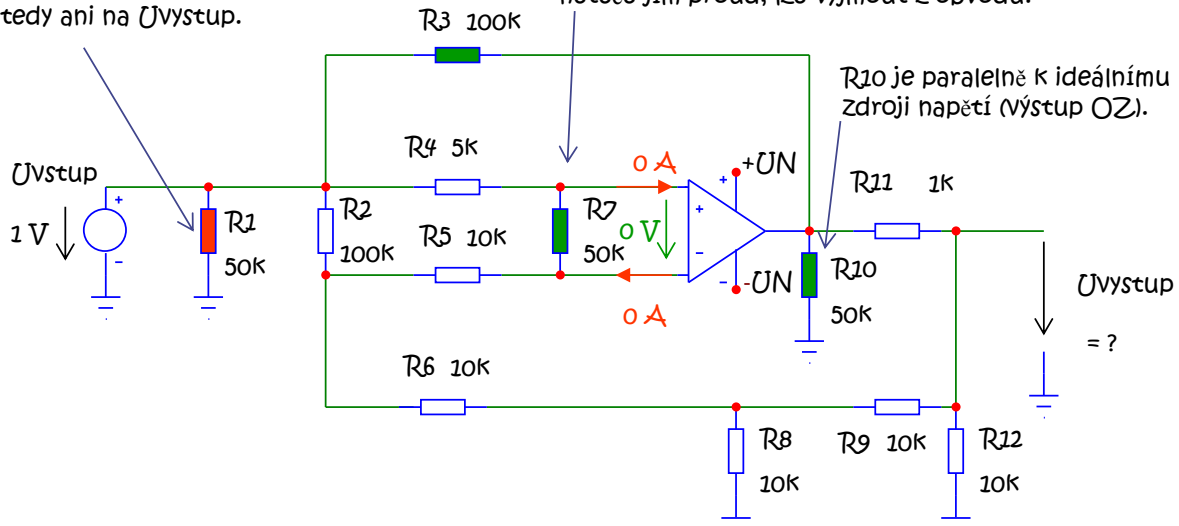
AN1

R_1 je paralelně k ideálnímu zdroji napětí, nemá vliv na U_{vstup} a tedy ani na U_{vystup} .

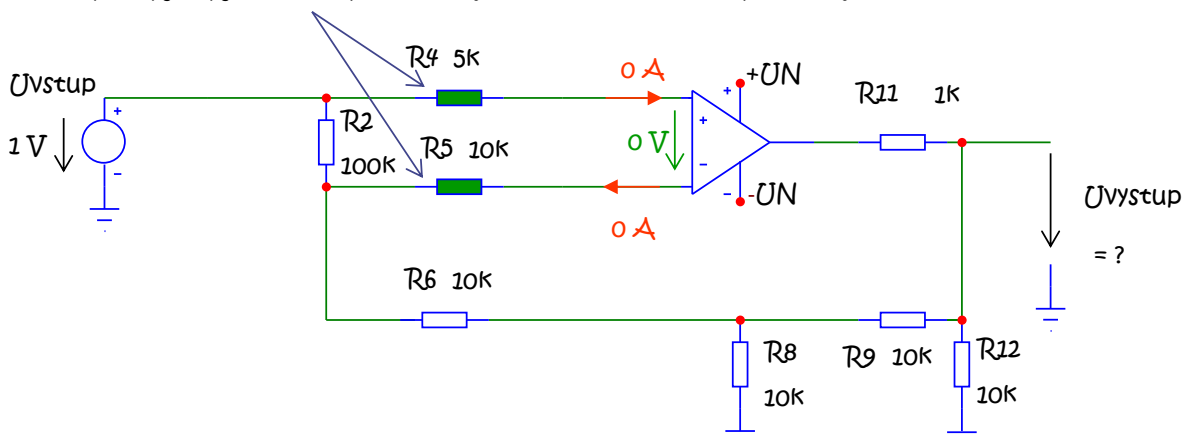
R_3 je zapojen mezi dva ideální zdroje napětí (výstup OZ se tak chová), nemá tedy vliv na U_{vystup} .

R_7 je paralelně k vstupům OZ, není na něm napětí, neteče jím proud, lze vyjmout z obvodu.

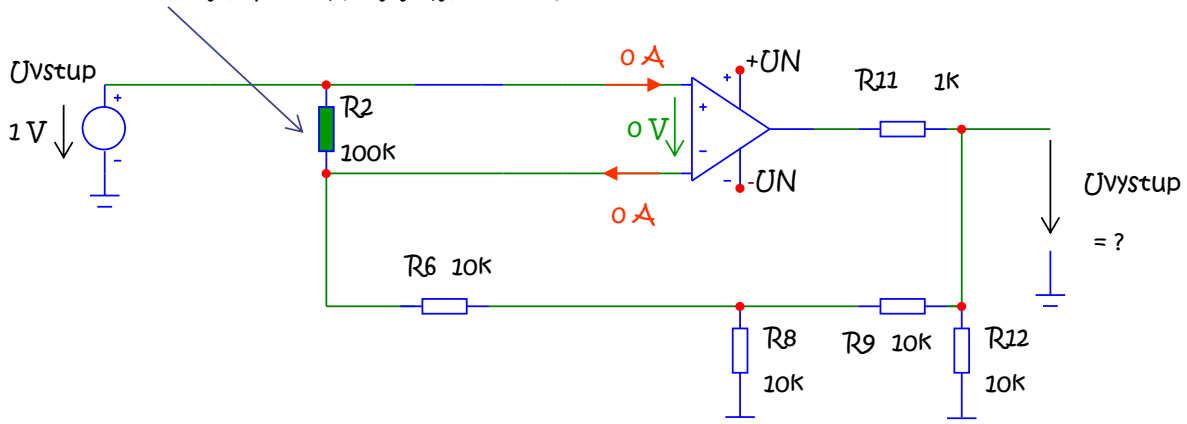
R_{10} je paralelně k ideálnímu zdroji napětí (výstup OZ).

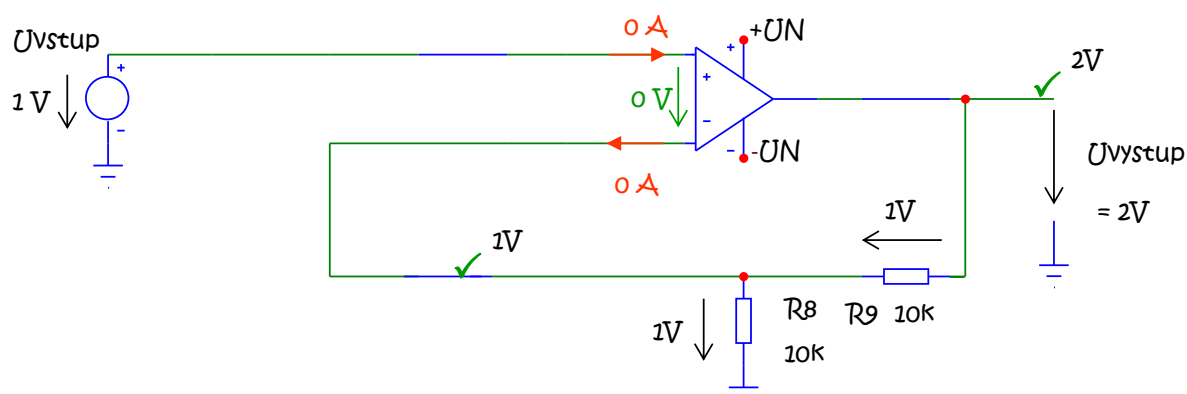
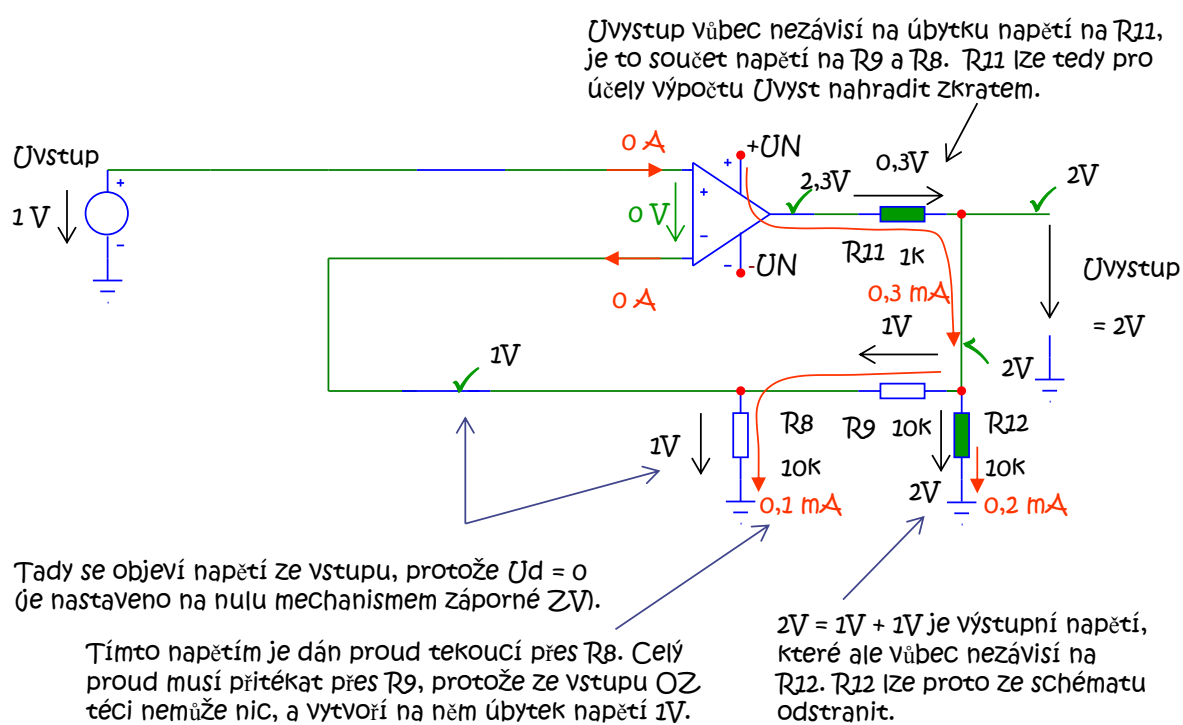
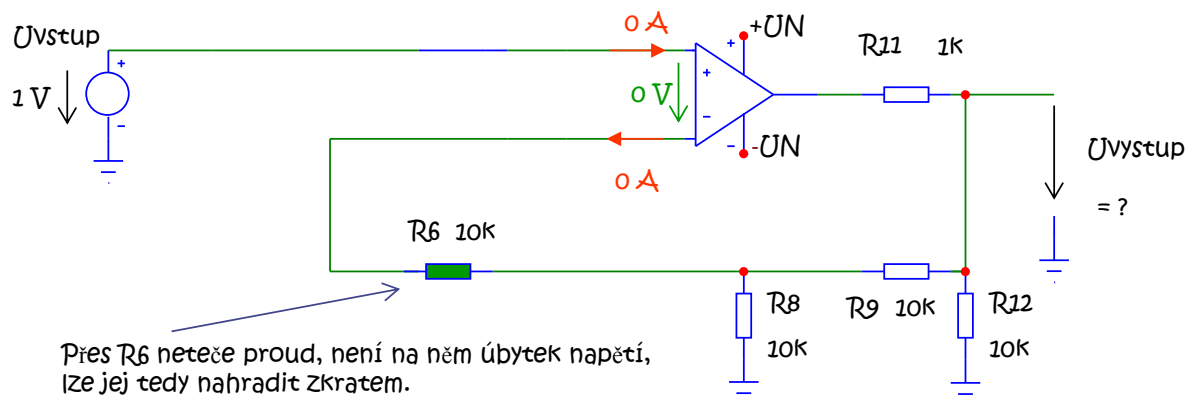


Přes R_4 a R_5 netečou proudy, nejsou na nich úbytky napětí, lze je tedy nahradit zkraty.



R_7 je paralelně k vstupům OZ, není na něm napětí, neteče jím proud, lze jej vyjmout z obvodu.

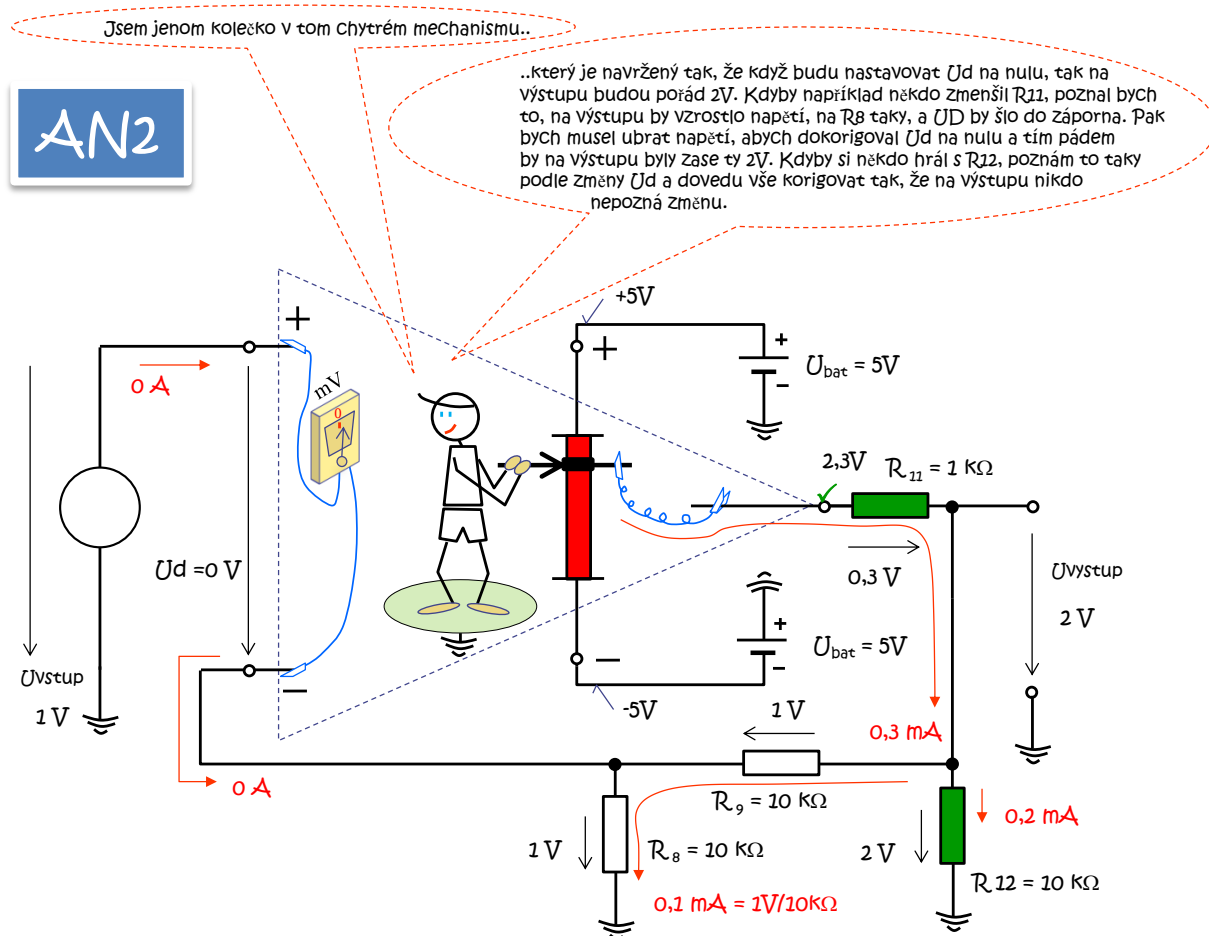




Obrázek AN1 názorně ukazuje účinnost těchto zjednodušovacích technik: ve výchozím obvodu, který obsahuje 12 rezistorů, jen dva z nich mají vliv na výstupní napětí, a to R_8 a R_9 . Porovnejte první a poslední variantu zapojení: úloha se dá řešit z paměti. Pokuste se na základě posledního obrázku zrekonstruovat napětí a proudy všech součástek ve výchozím obvodu.

Důležitý závěr vyplývá ze srovnání posledních dvou variant zapojení: R_{11} je možné chápat jako model výstupního odporu OZ. Je zřejmé, že výstupní napětí aplikace na něm nezávisí, i když je odpor značný. Je tomu tak proto, že $U_{\text{výstup}}$ závisí pouze na R_8 a R_9 , což je zase jediným důsledkem toho, že diferenční napětí je nula. Diferenční napětí je regulováno na nulu mechanismem záporné zpětné vazby. Trpaslík nastaví tak velké napětí na výstupu OZ, aby vynuloval U_d . V tomto případě je to 2,3 V. Pro případ $R_{11} = 0 \Omega$ by to byly 2 V. Ve skutečném obvodu, kde musíme počítat se saturačním napětím, by příliš velká hodnota R_{11} snižovala dynamiku výstupního napětí.

Stojí za to zapřemýšlet nad obrázkem AN2. Co trpaslík udělá, když náhle z obvodu odstraníme R_{12} ?

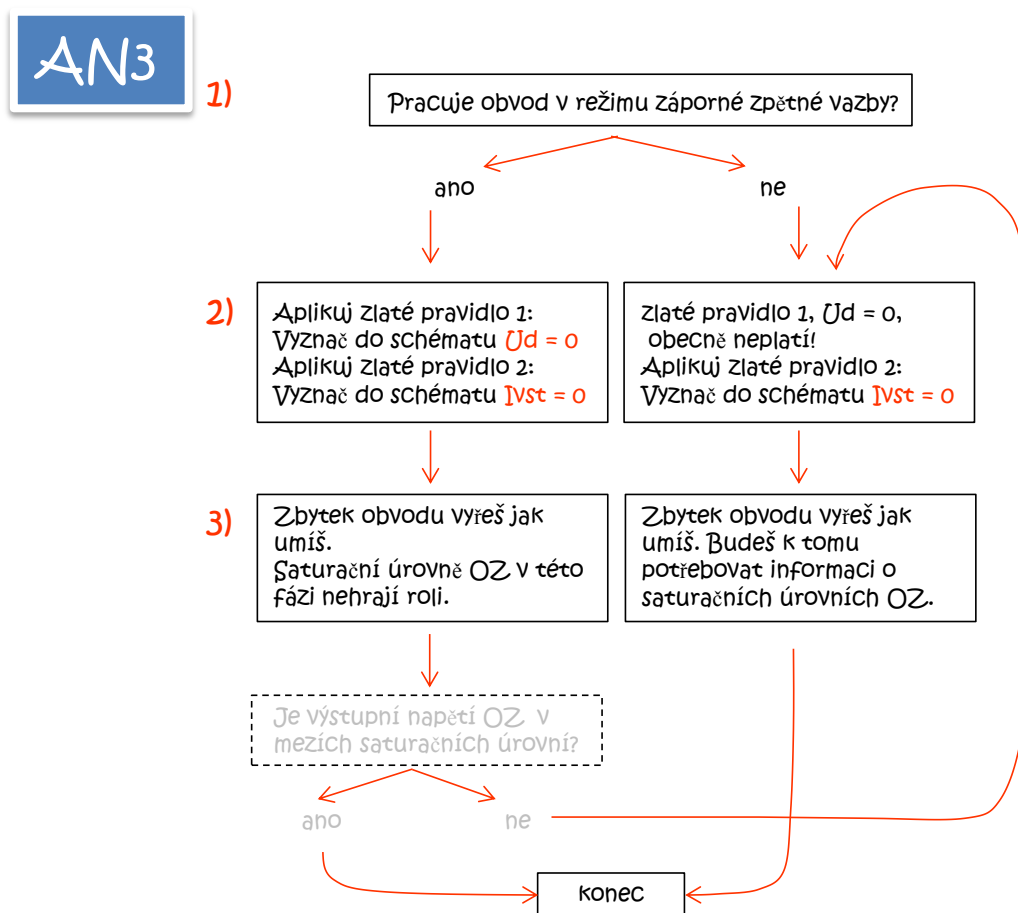


Z výše uvedeného vyplývá, že výstup aplikačního obvodu z obr. AN2, i když se přímo nejedná o výstup OZ, nýbrž o uzel, k němuž jsou připojeny 3 rezistory R_9 , R_{11} a R_{12} , má nulový vnitřní odpor a chová se tedy jako ideální zdroj napětí. Je tomu tak díky regulačním účinkům záporné zpětné vazby, v jejíž smyčce je OZ s nekonečným zesílením. Proto stupeň zpětné vazby N je nekonečný (nekonečně-krát se vylepší = sníží reálný výstupní odpor, který bychom naměřili před zavedením zpětné vazby). Samozřejmě že ve skutečnosti je zesílení OZ konečné a výstupní odpor pak nebude přesně nula.

Protože výstupní odpor aplikace je teoreticky nulový, nemá R_{12} vliv na výstupní napětí. Příslušnému rezistoru je tím vnucena role „zbytečné“ součástky. V praxi se samozřejmě jedná o zátěž, pro jejíž napájení je aplikace určena, a v této roli jde o součástku významnou, nikoliv zbytečnou.

5.3 Tři univerzální kroky heuristické analýzy obvodů s IOZ

Obvody s IOZ je často výhodné řešit ve třech krocích:



Heuristické metody řešení [11] (upřednostňované v tomto učebním textu) mají opačný charakter než metody algoritnické (třeba metoda uzlových napětí) [11]: Zatímco účelem algoritnické metody je mechanické sestavení soustavy rovnic obvodu (většinou v maticovém tvaru), a následně její numerické řešení (například pomocí determinantů), u heuristické metody si řešitel volí způsob analýzy podle svého uvážení. Algoritnická metoda je výborná pro počítač, který dokáže bravurně nalézt řešení soustavy stovek rovnic o stovkách neznámých, a dokonce pro něj není problém tyto rovnice i sestavit ze schématu obvodu, pokud mu je nakreslíme ve schématickém editoru příslušného programu. Heuristická metoda je zase výborná pro člověka, který chce rozumět, jak analyzovaný obvod vlastně funguje. Kromě toho se nezřídka stává, že řešení je tak primitivní, že se k němu dobereme dříve, než by trvalo zadání vstupních dat do počítače.

První krok v diagramu AN3 – rozhodnutí o typu zpětné vazby – provedeme nejlépe metodou dvoustavového rozhodování z kapitoly 4.12.

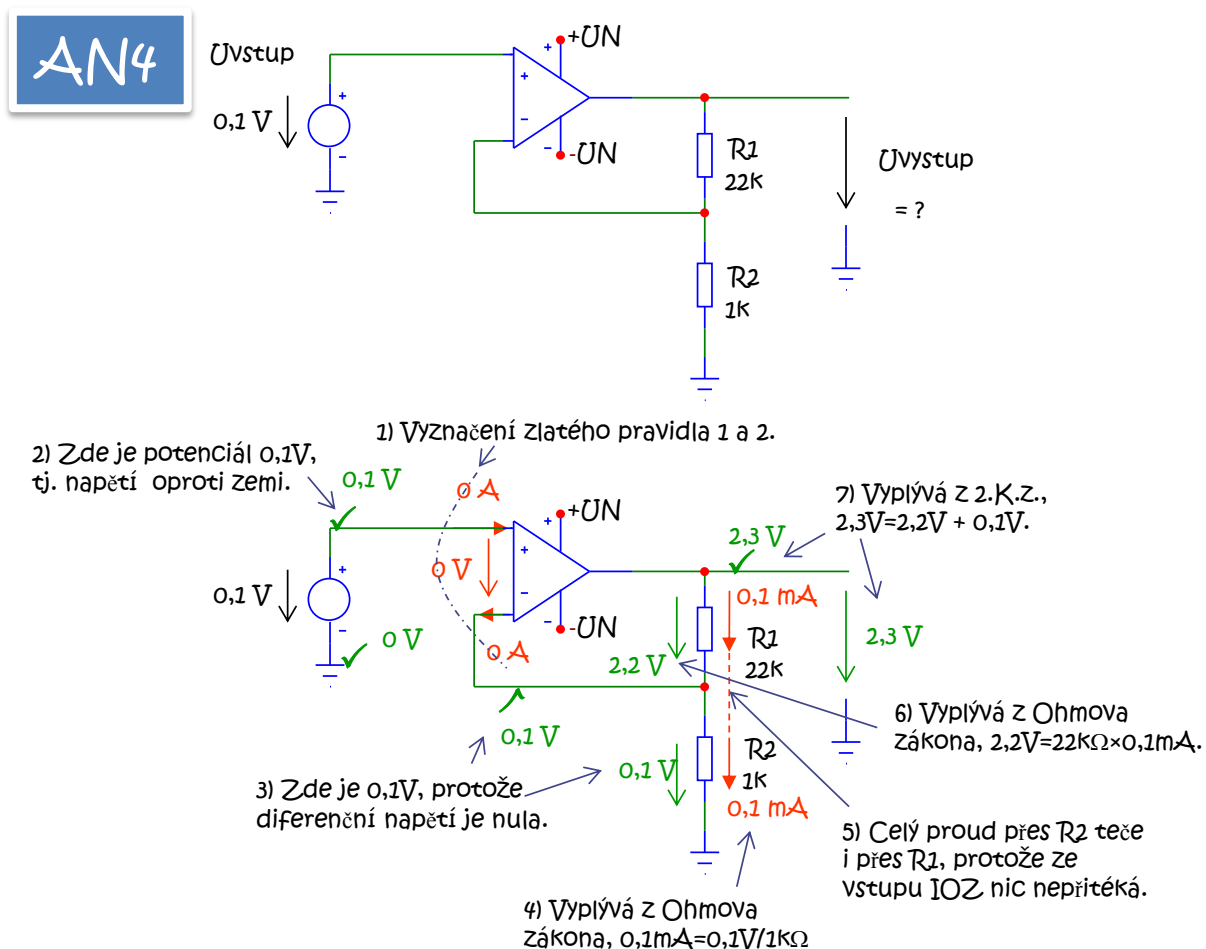
Tato kapitola je věnována analýze obvodů se zápornou zpětnou vazbou, pro něž je platná levá strana průchodu diagramem AN3. Nicméně je vhodné na konci výpočtu provést kontrolu, zda vypočtené napětí na výstupu OZ nepřesahuje saturační úrovně, které jsou zamýšleny v případné realizaci (neboli zda se operační zesilovač v daném zapojení skutečně chová jako IOZ). Pokud by docházelo k saturaci, znamenalo by to, že záporná zpětná vazba řádně nefunguje. Pak bychom použili cestu z pravé části diagramu AN3 pro nelineární režim.

Samozřejmě že klíčovým krokem v analýze je krok 3, v němž jde o postupné hledání rozložení napětí a proudů jednotlivých součástek v obvodu a kdy nám mohou pomoci omezení z bodu 2 (například tím, že nám pomohou v identifikaci „zbytečných“ součástek). Tyto součástky nemusíme ze schématu odstraňovat, ale pak je důležité, abychom důsledně u každé z nich vyznačili, proč jsou zbytečné (formou nulového napětí či proudu). Při analýze se rovněž můžeme opírat o přehlednou metodu potenciálů (viz kapitola 3.4).

Některé obvody s IOZ lze řešit prakticky zpaměti, tj. bez složitých mezivýpočtů či řešení soustav rovnic, postupnou analýzou napětí a proudů směrem ze zadaného vstupu k neznámému výstupu. Tento postup budeme nazývat „řešením jedním tahem“. Některé složitější obvody však takto řešit nelze. Pak je třeba do hry zapojit více tvořivosti a zkušenosti. Výbornou metodou v tomto případě může být postup, který nazvěme metodou „jednoho pokusu a jednoho omylu“.

5.4 Řešení obvodů „jedním tahem“

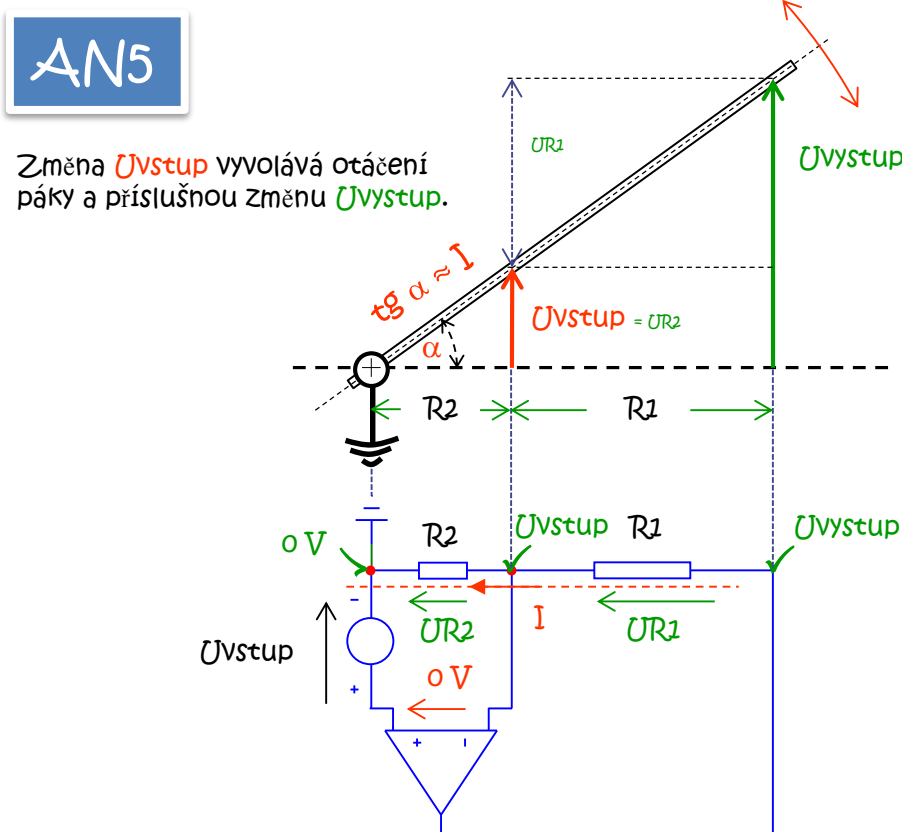
Neinvertující zesilovač na obrázku AN4 má zavedenu zápornou zpětnou vazbu (rozhodování dle bodu 1 z obr. AN3 je v tomto případě velmi jednoduché). Obrázek AN4 ukazuje výpočet výstupního napětí zesilovače „jedním tahem“ v sedmi po sobě následujících krocích.



Zesílení obvodu je $2,3 / 0,1 = 23$, což je i v souladu s vzorcem pro neinvertující zesilovač $1 + R_1 / R_2 = 1 + 22 / 1 = 23$.

Vstupní odpor aplikace je teoreticky nekonečný (do vstupu IOZ neteče proud).

Z analýzy vyplývá, že protože IOZ (respektive trpaslík uvnitř) udržuje diferenční napětí na nule, je vstupní napětí přesně kopírováno na R_2 . Nastavováním vhodné velikosti R_2 tak můžeme volit proud, který však beze zbytku protéká rezistorem R_1 . Tento proud ale na R_1 vůbec nezávisí. V našem případě je proud 0,1 mA postaven do cesty R_1 o relativně velkém odporu 22 k Ω (22 x větším než R_2). Na R_1 tak vznikne úbytek napětí 2,2 V (22 krát větší než je vstupní napětí). Výstupní napětí je ještě o něco větší (o napětí na R_2 , což je kopie vstupního napětí). Mechanismus zesilování tedy spočívá v tom, že IOZ se spolu s R_2 chová vůči R_1 jako zdroj proudu, důsledkem čehož může být velký úbytek na R_1 při velkém odporu R_1 . Zesílení tedy bude tím větší, čím bude větší poměr $R_1:R_2$. To je zřejmé i z elektro-mechanické analogie neinvertujícího zesilovače na obr. AN5.

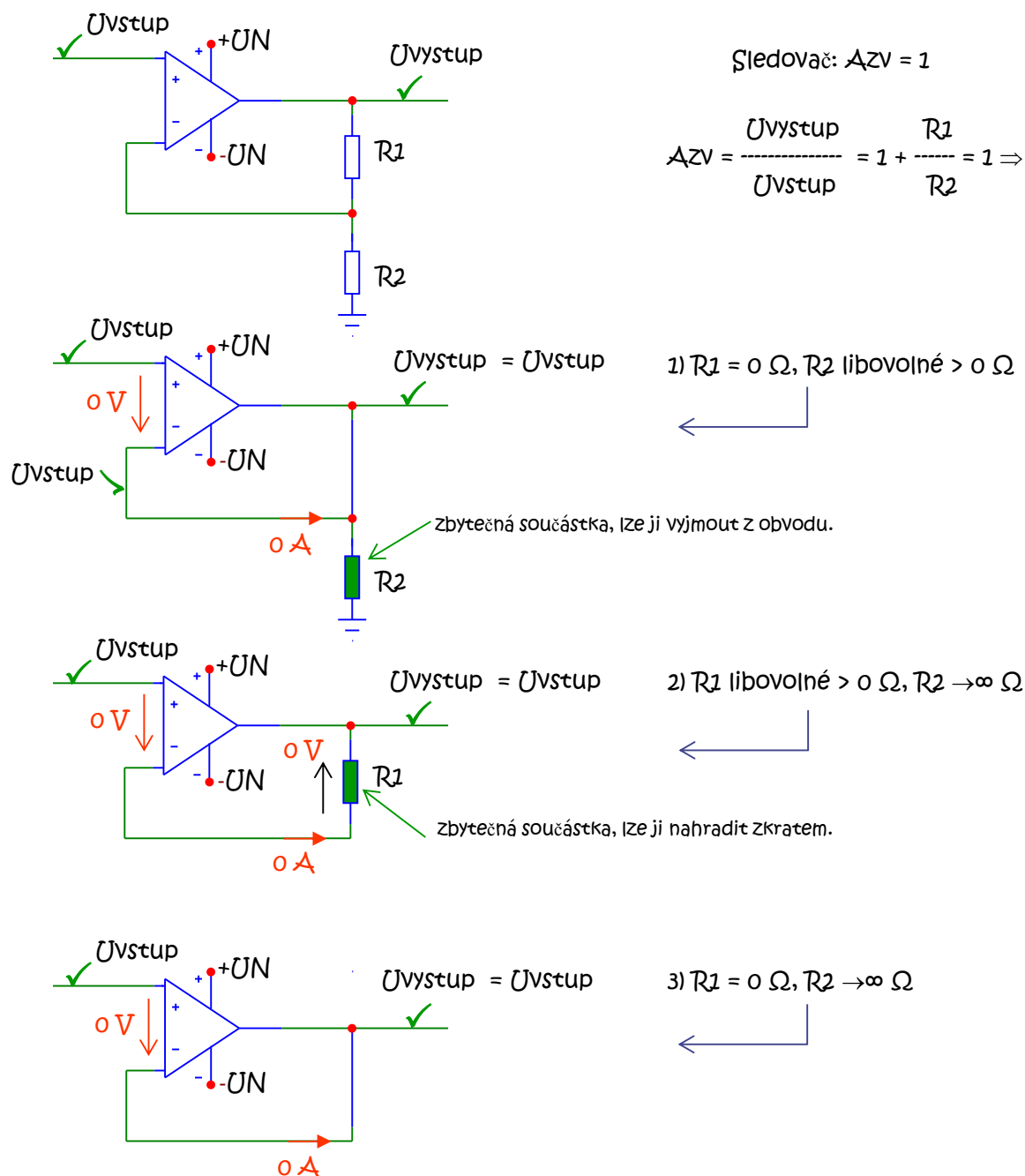


Změna U_{vstup} vyvolává otáčení páky a příslušnou změnu U_{vystup} .

Speciálním případem neinvertujícího zesilovače je blok s přenosem 1, nazývaný též napěťový sledovač, napěťový buffer, nebo jednotkový zesilovač. Používá se k impedančnímu oddělení spojovaných bloků: sledovač má velký vstupní odpor (nezatěžuje tedy odběrným proudem zdroj signálu, na který je napojen), a nulový výstupní odpor (bezproblémově napájí další blok, neboť se chová jako ideálně tvrdý zdroj napětí).

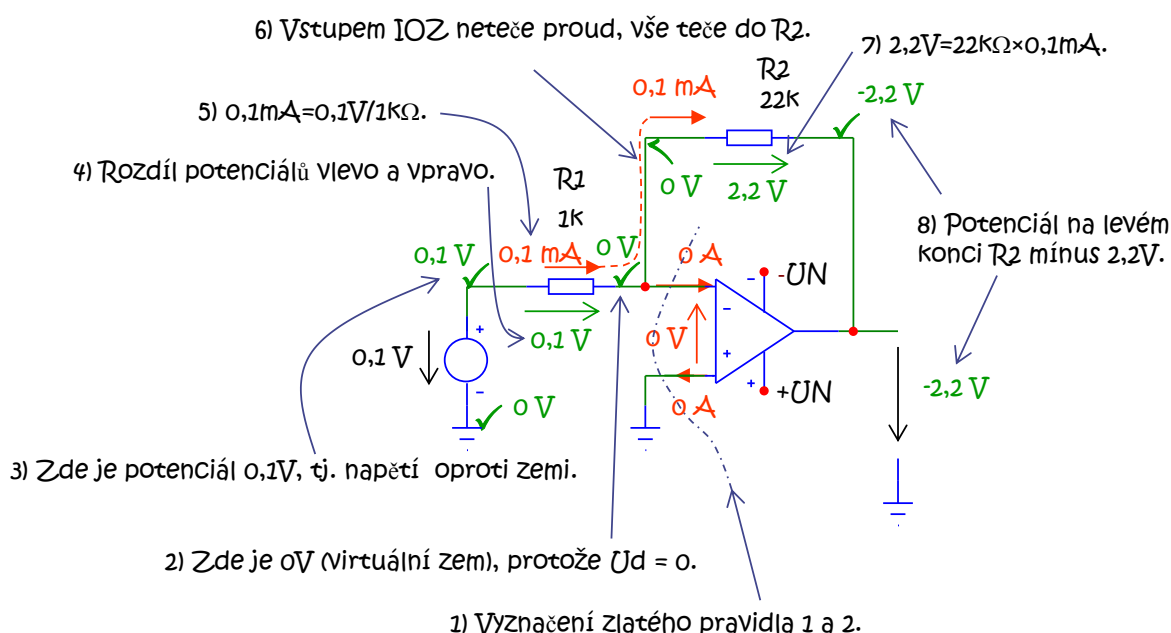
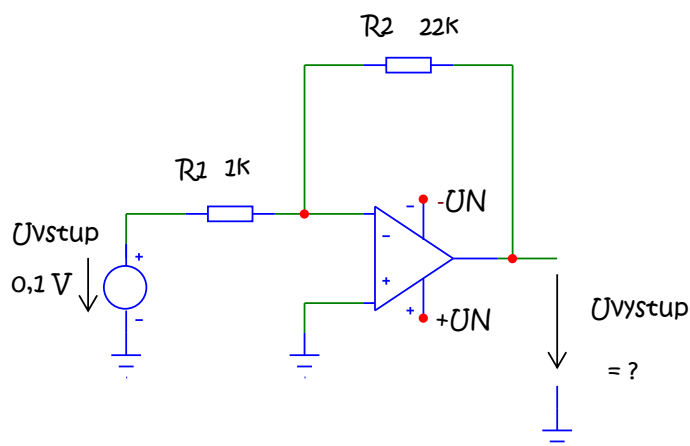
Obrázek AN6 ukazuje tři různé způsoby, jak dosáhnout jednotkového zesílení neinvertujícího zesilovače z obrázku AN4. V první variantě se v zapojení objevila „zbytečná“ součástka R_2 : je připojena paralelně k výstupu OZ, není tedy schopna ovlivnit výstupní napětí. Je možné ji vyjmout z obvodu bez narušení funkce. Ve skutečnosti R_2 může modelovat vstupní odpor navazujícího obvodu. Druhá varianta obsahuje „zbytečnou“ součástku R_2 : neteče jí proud, není na ní žádný úbytek napětí, chová se tedy jako zkrat. Ve skutečnosti lze R_2 použít ke kompenzaci nenulových klidových proudů OZ (podrobnosti viz přednášky). Poslední varianta je nejúspěšnější, protože vznikne z předchozích zapojení po vyloučení „zbytečných“ součástek.

AN6



Na obrázku AN7 je řešení invertujícího zesilovače, u něhož je test na přítomnost záporné zpětné vazby rovněž jednoduchý. Zesílení vyšlo $-2,2/0,1 = -22$, což odpovídá vzorci pro invertující variantu $-R_2/R_1 = -22k/1k = -22$.

V souvislosti s rezistorem R_2 je třeba uvážit, že protože je na něm úbytek napětí 2,2 V a protože potenciál jeho „levého konce“ je nula, bude potenciál jeho „pravého konce“ o 2,2 voltů menší (napětí je rozdíl potenciálů). Potenciál „pravého konce“ R_2 je současně potenciálem uzlu, k němuž je připojen výstup OZ, výstupní napětí je tedy záporné, -2,2 V.

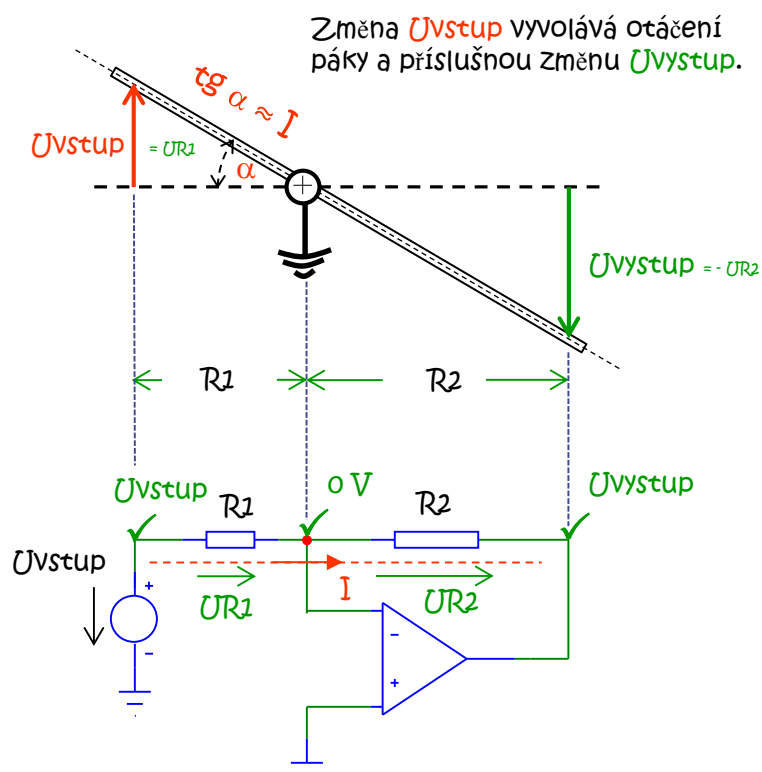


Z rozboru na obrázku AN7 je zřejmé, že napětí na R_1 je přesnou kopií vstupního napětí, a to díky tomu, že záporná zpětná vazba nastavuje diferenční napětí přesně na nulu. Proud rezistorem R_1 , který je roven poměru vstupního napětí a R_1 , tudíž vůbec nesouvisí s velikostí R_2 , ale celý teče právě přes rezistor R_2 . Působí tady proto podobný zesilovací mechanismus jako u neinvertujícího zesilovače: rezistor R_2 je buzen z „elektronického“ zdroje proudu. Zesílení bude tím větší, čím bude větší R_2 (pak bude na R_2 velký úbytek napětí) a čím menší bude R_1 (tím větší bude proud a tím pádem i napětí na R_2).

Vstupní odpor obvodu je v případě nekonečného zesílení IOZ přesně R_1 : je to poměr vstupního napětí a proudu rezistorem R_1 . „Pravý konec“ R_1 na obr. AN7 je připojen k virtuální nule, takže tomu ani jinak být nemůže. Při uvažování konečného vstupního odporu OZ bude výpočet vstupního odporu celé aplikace poněkud komplikovanější. Pokusíte se o něj (s využitím techniky bootstrap)?

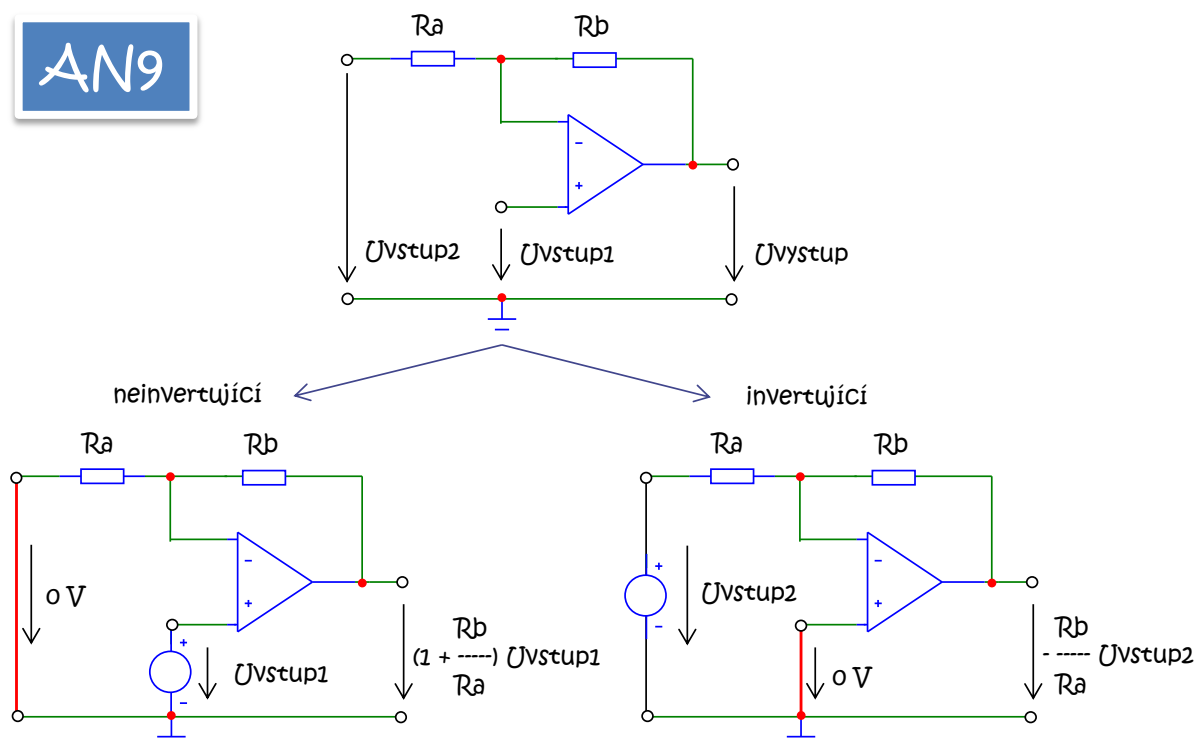
Elektromechanický model invertujícího zesilovače je na obrázku AN8. „Mechanická zem“ ve formě kloubu, kolem něhož se otáčí páka, nyní koresponduje s virtuální zemí, kterou vyvolává operační zesilovač na svém invertujícím vstupu. Je zde názorně ukázáno, kromě inverze signálu, že k zesilovacímu efektu dochází, pokud je „rameno R_2 “ delší než „rameno R_1 “.

AN8

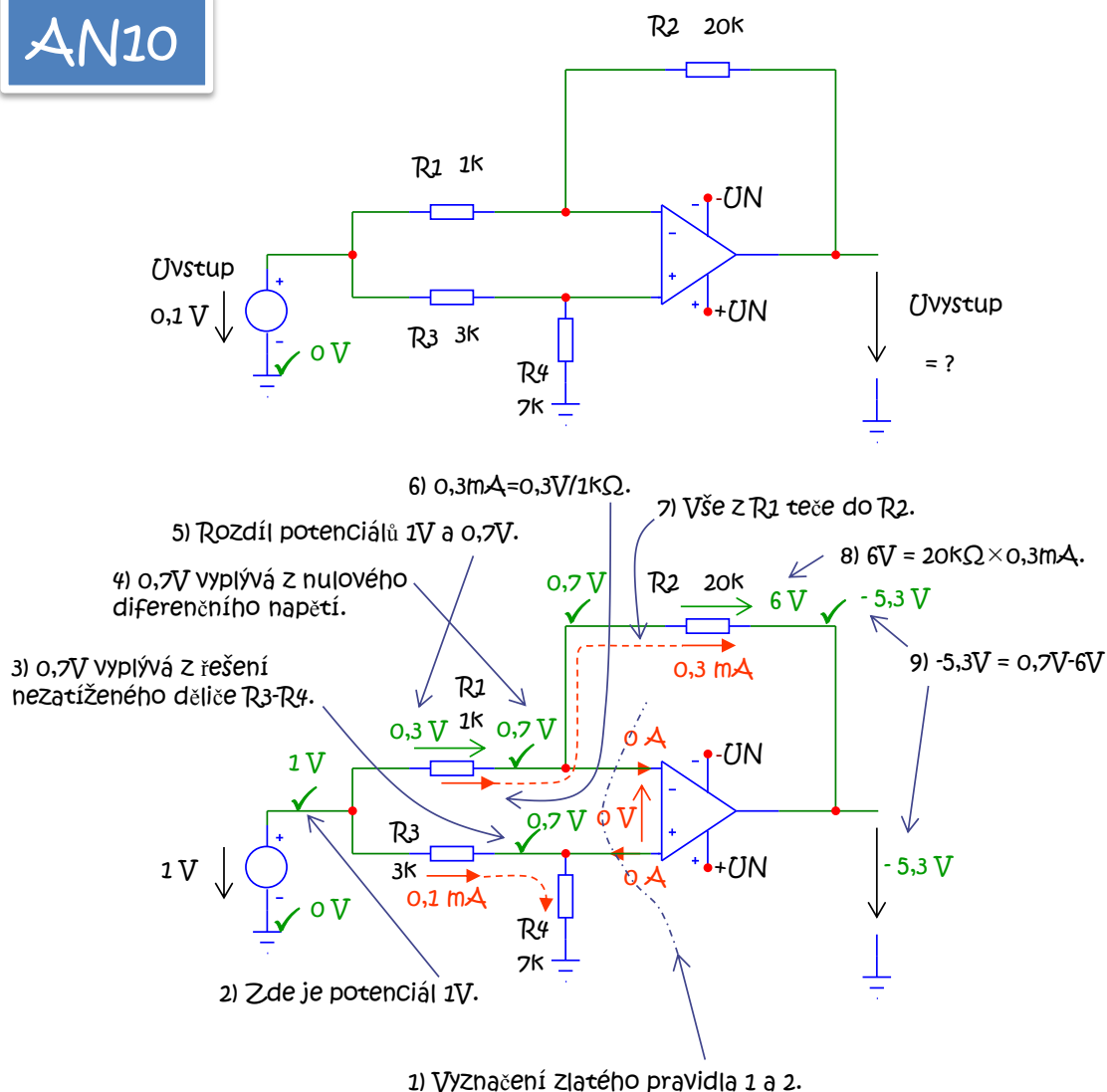


Je užitečné si uvědomit, že neinvertující a invertující zesilovače AN4 a AN7, z nichž vycházejí další užitečné obvody, jsou vlastně jedním a týmž obvodem se dvěma vstupy. Tento obvod pak bude fungovat jako neinvertující či invertující varianta podle toho, který ze vstupů použijeme (viz obrázek AN9).

AN9



AN10



Na obrázku AN10 je zesilovač, vzniklý kombinací neinvertující a invertující varianty, kdy vhodným návrhem rezistorů je možné dosáhnout jak kladného, tak i záporného zesílení. Oproti zapojení AN9 přibyl odporový dělič R_3 - R_4 , který zeslabuje vstupní napětí před jeho přivedením na neinvertující vstup OZ. Tímto způsobem je vytvořena možnost nezávislého nastavování zisků neinvertující a invertující verze zesilovačů, které jsou zkombinovány v tomto zapojení.

Test na typ ZV byl proveden v příkladu ZV14 (s jinými hodnotami součástek, ale bylo tam ukázáno, že výsledek testu – záporná zpětná vazba – na nich nezávisí). Výstupní napětí je na obrázku AN10 vypočteno v devíti jednoduchých krocích. Z výsledku je patrné, že větší zisk je nastaven u invertující varianty.

Pokuste se nalézt takovou podmínku pro odpory R_1 , R_2 , R_3 a R_4 ze zapojení AN10, aby výstupní napětí bylo nulové nezávisle na vstupním napětí.

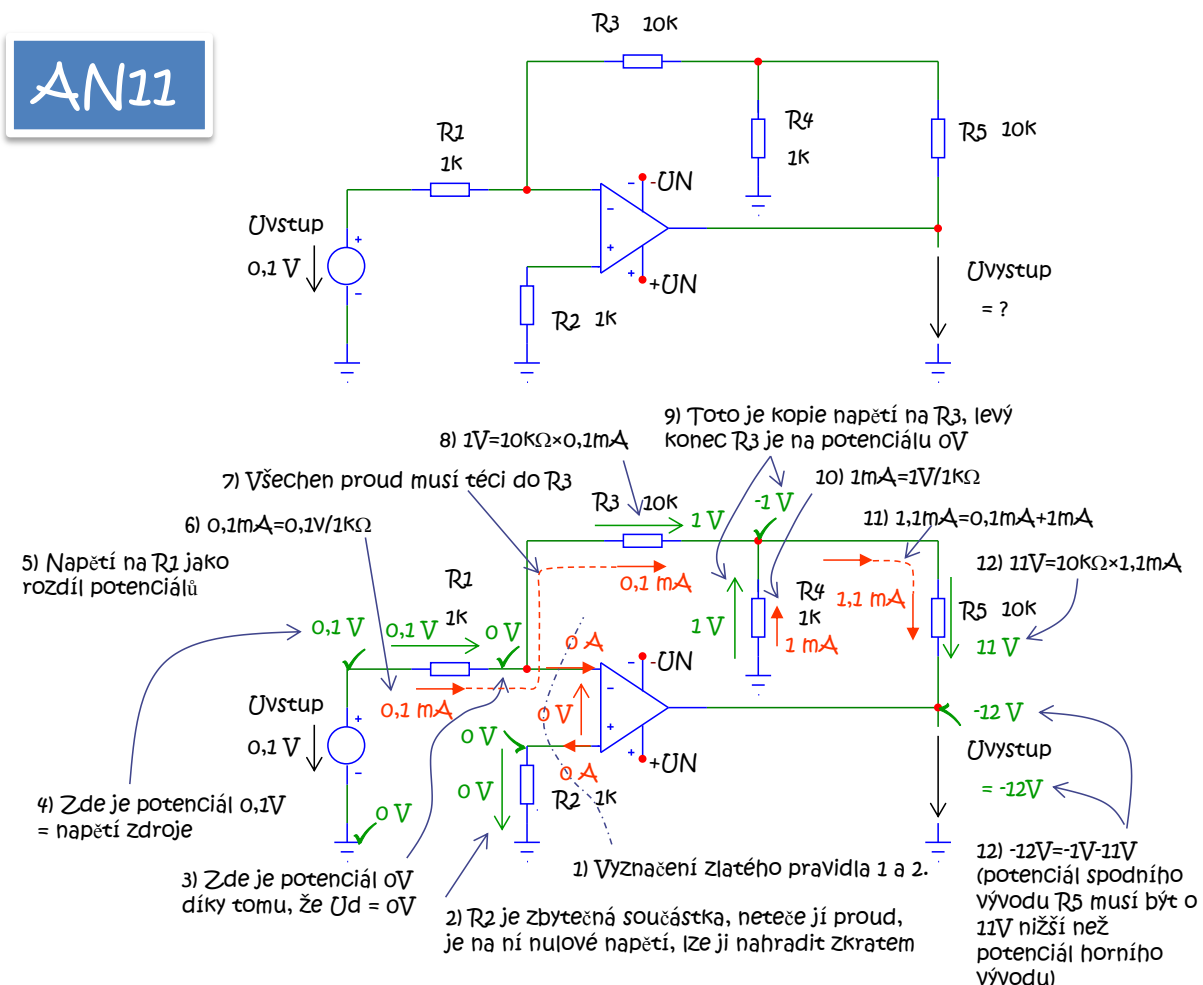
Vstupní odpor obvodu číselně vychází $1\text{V} / (0,1\text{mA} + 0,3\text{mA}) = 2,5\text{ k}\Omega$. Jak ale konkrétně závisí na odporech R_1 , R_2 , R_3 a R_4 ?

Kdybychom z obvodu vyňali rezistor R_1 , byl by vstupní odpor roven součtu $R_3 + R_4 = 10\text{ k}\Omega$ (což je vstupní odpor nezátíženého děliče R_3 - R_4). R_1 je nesená součástka, protože její „pravý konec“ je v důsledku nulového diferenčního napětí vlečen výstupním napětím děliče

R_3 - R_4 . Při uvažování R_1 tedy bude paralelně k R_3+R_4 působit, v souladu s alfa vzorcem a obrázkem ZV17, zdánlivý odpor $R_1/(1-\alpha)$, kde α je přenos děliče $R_4/(R_3+R_4) = 0,7$. Zdánlivý odpor pak bude $(10/3) \text{ k}\Omega$. Proto pro vstupní odpor obvodu z obrázku AN10 platí $10\text{k}/(10/3) = 3 \text{ k}\Omega$. Daný postup vede k vzorci $R_1(R_3+R_4)/(R_1+R_3)$, z něhož plyne, že vstupní odpor nezávisí na R_2 . R_2 tedy vystupuje ve vztahu k vstupnímu odporu jako zbytečná součástka. Ve skutečnosti by ale bez R_2 nefungovala záporná zpětná vazba a proto ani celý obvod. Vstupní odpor však bude $2,5 \text{ k}\Omega$ nezávisle na odporu R_2 .

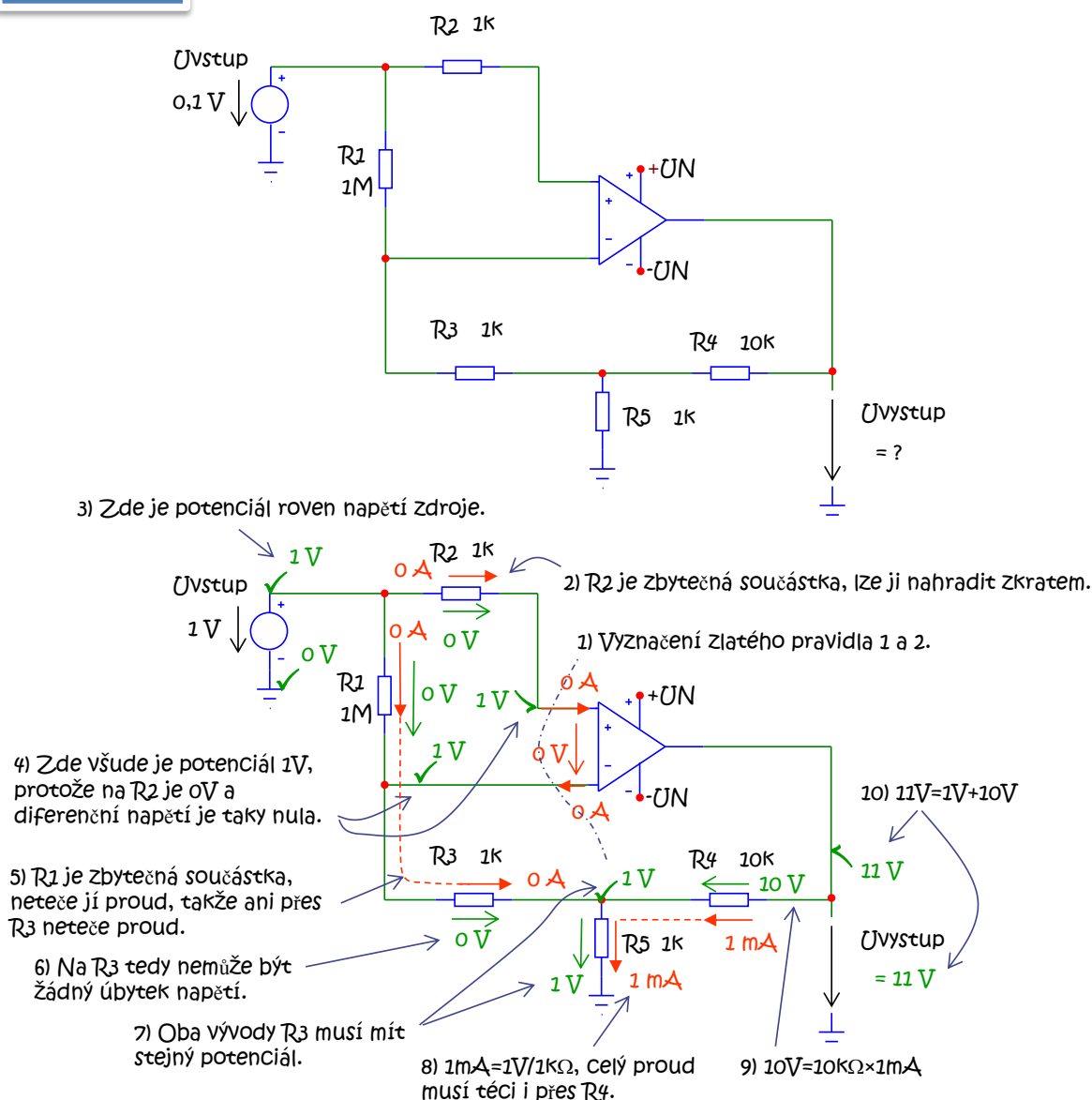
Na obrázku AN11 je „jedním tahem“ zjištěno výstupní napětí invertujícího zesilovače s T-článkem (rezistory R_3 , R_4 a R_5 si lze představit tak, že mohou připomínat písmeno T – stačí R_5 posunout blíže k R_4 a otočit do roviny R_3). Zesílení obvodu vychází $-12 \text{ V}/0,1 \text{ V} = -120$ a je dosaženo pomocí rezistorů s odpory $1 \text{ k}\Omega$ a $10 \text{ k}\Omega$ (jejich poměr je 1:10). Klasickým invertujícím zesilovačem s dvojicí rezistorů (viz obrázek AN7) by požadavek na zesílení 120 vedl na poměr odporů 1:120. Zesílení nezávisí na R_2 . R_1 funguje díky nulovému diferenčnímu napětí jako převodník vstupního napětí na proud, tekoucí do R_3 a přitom nezávislejší na R_3 . Napětí na R_3 bude tím větší, čím větší bude R_3 a čím větší bude proud, tedy čím menší bude R_1 . Toto napětí je ale současně napětím na R_4 . Proud tekoucí rezistorem R_4 se připojuje k proudu přes R_3 a teče dále do R_5 . Tento proud můžeme zvětšovat snižováním R_4 . Úbytek napětí na R_5 je přímo úměrný R_5 a podílí se na tvorbě výstupního napětí. Celkové zesílení lze tedy zvětšovat zvětšováním R_3 a R_5 a zmenšováním R_1 a R_4 . Pokuste se o odvození vzorce!

Pro ideální OZ je vstupní odpor aplikace roven R_1 a výstupní odpor je nulový.



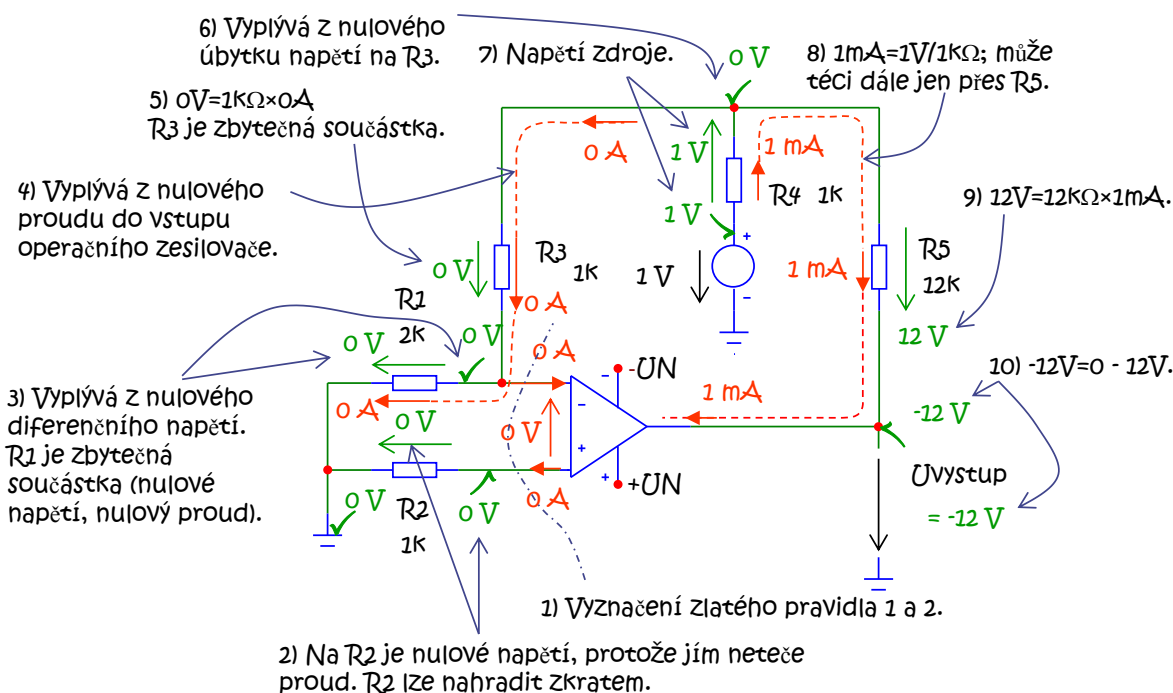
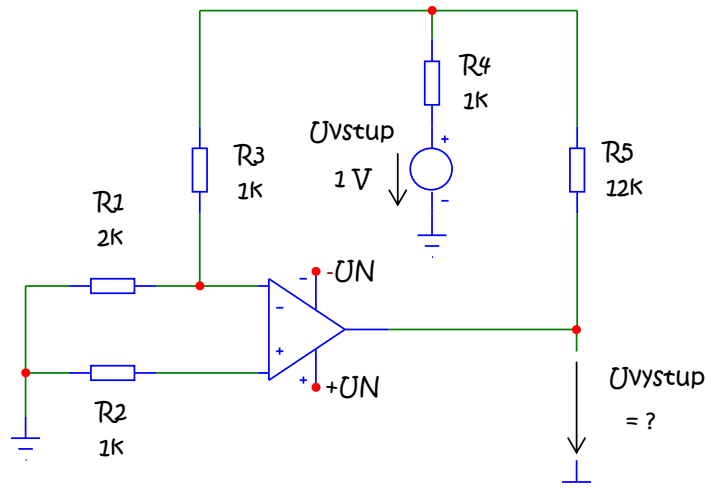
Ověřte, že obvod je možné současně využívat jako zesilovač o zisku $-R_3/R_1 = -10$, pokud bychom snímali výstupní napětí z uzlu, v němž se spojují rezistory R_3 , R_4 a R_5 , a že takovýto zesilovač by měl teoreticky nulový výstupní odpor – choval by se jako ideálně tvrdý zdroj napětí, i když napětí neodebíráme z výstupu OZ. Navíc by zesílení vůbec nezáviselo na R_4 a R_5 , vzhledem k tomuto výstupu by proto oba rezistory vystupovaly jako zbytečné součástky. Jak je to možné?

AN12



Na obrázku AN12 je obvod, který již byl uveden v příkladu ZV16, kde bylo zjištěno, že v obvodu působí záporná zpětná vazba nezávisle na navržených odporech rezistorů. Řešení nezávisí na třech součástkách: R_1 , R_2 a R_3 . Po jejich vyloučení z obvodu zjišťujeme, že obvod se chová jako klasický neinvertující zesilovač o zesílení $1 + R_4/R_5 = 11$. Vstupní odpor je nekonečný, výstupní odpor je nulový.

AN13

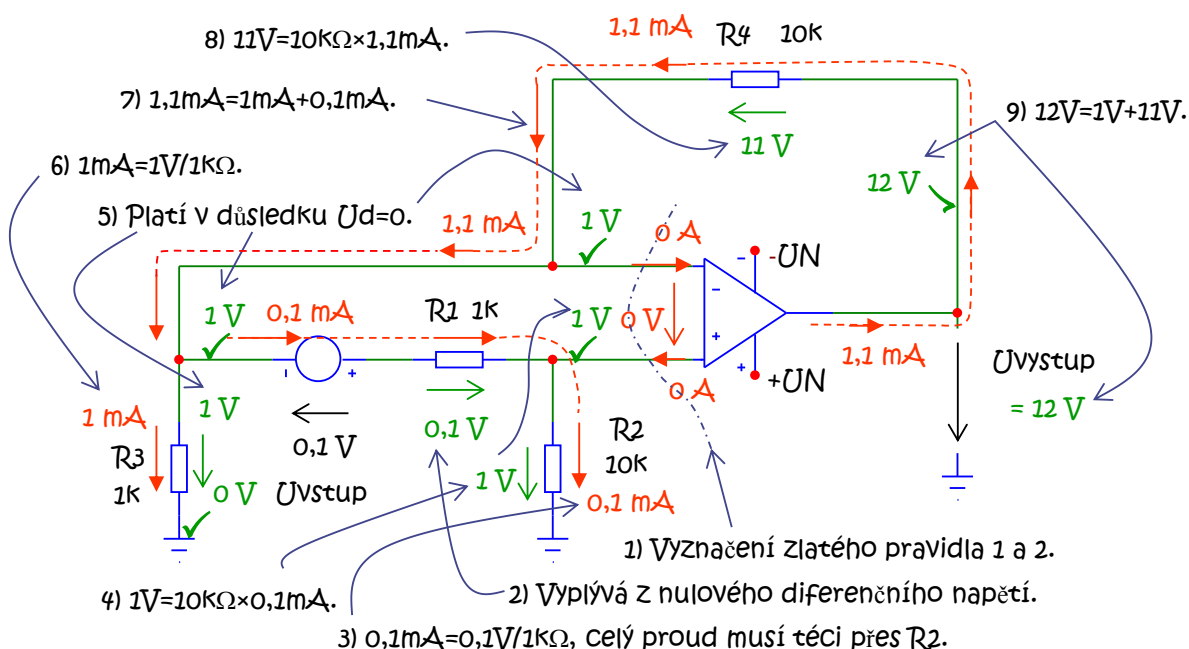
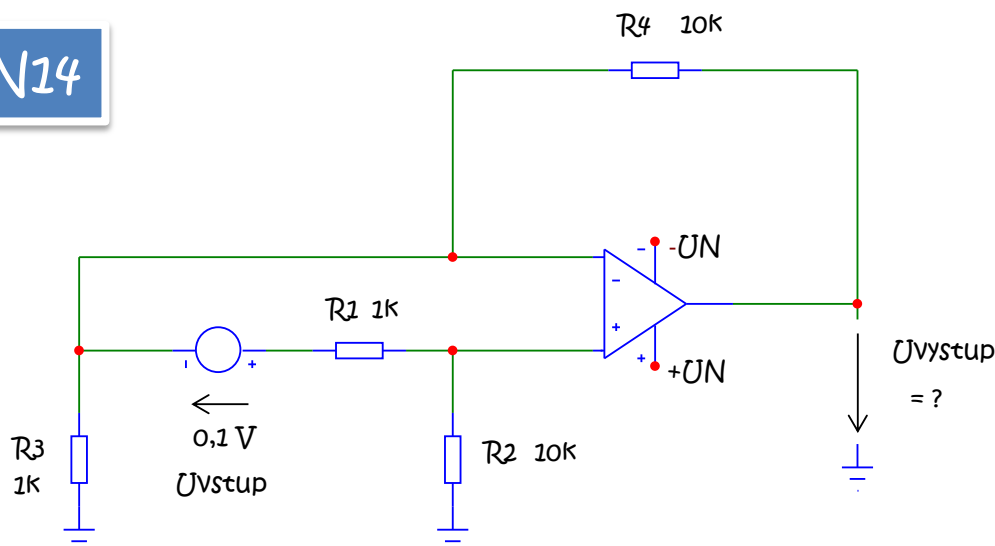


Obvod AN13 má tři zbytečné součástky: R_1 , R_2 a R_3 . Po jejich vyloučení z obvodu vznikne klasický invertující zesilovač o zesílení $-R_5/R_4 = -12$.

Zesilovač z obrázku AN14 zesiluje napětí plovoucího zdroje U_{vstup} . Ověření, že v obvodu působí záporná zpětná vazba, je snadné (s využitím postupu dvoustavového rozhodování z kapitoly 4.12). Zesílení je rovno $12\text{ V}/0,1\text{ V} = 120$. Je zajímavé, že k tak velkému zesílení je využíváno jen rezistorů s poměrem odporů 1:10. Jde o obdobnou výhodu jako u zesilovače AN11 s T-článkem. Z postupu řešení na obrázku AN14 vyplývá, že vysokého zesílení je dosahováno tímto mechanismem: Vstupní napětí je převedeno na proud rezistorem R_1 , a proud na úbytek napětí na R_2 . Na R_2 se tak objeví napětí, zesílené v poměru R_2/R_1 . Toto napětí se (v důsledku $U_d = 0\text{ V}$) objeví na invertujícím vstupu OZ jako první složka výstupního napětí. Současně však je k tomuto uzlu připojen rezistor R_3 , a jeho proud se připočítává k proudu zdroje a celý teče přes R_4 . Úbytek napětí na R_4 , což je druhá složka výstupního napětí, je tím větší, čím větší je R_4 a čím větší je proud, tedy čím menší je R_3 .

Pokuste se o nalezení vzorce pro zesílení a srovnajte jej se vzorcem pro obvod AN11.

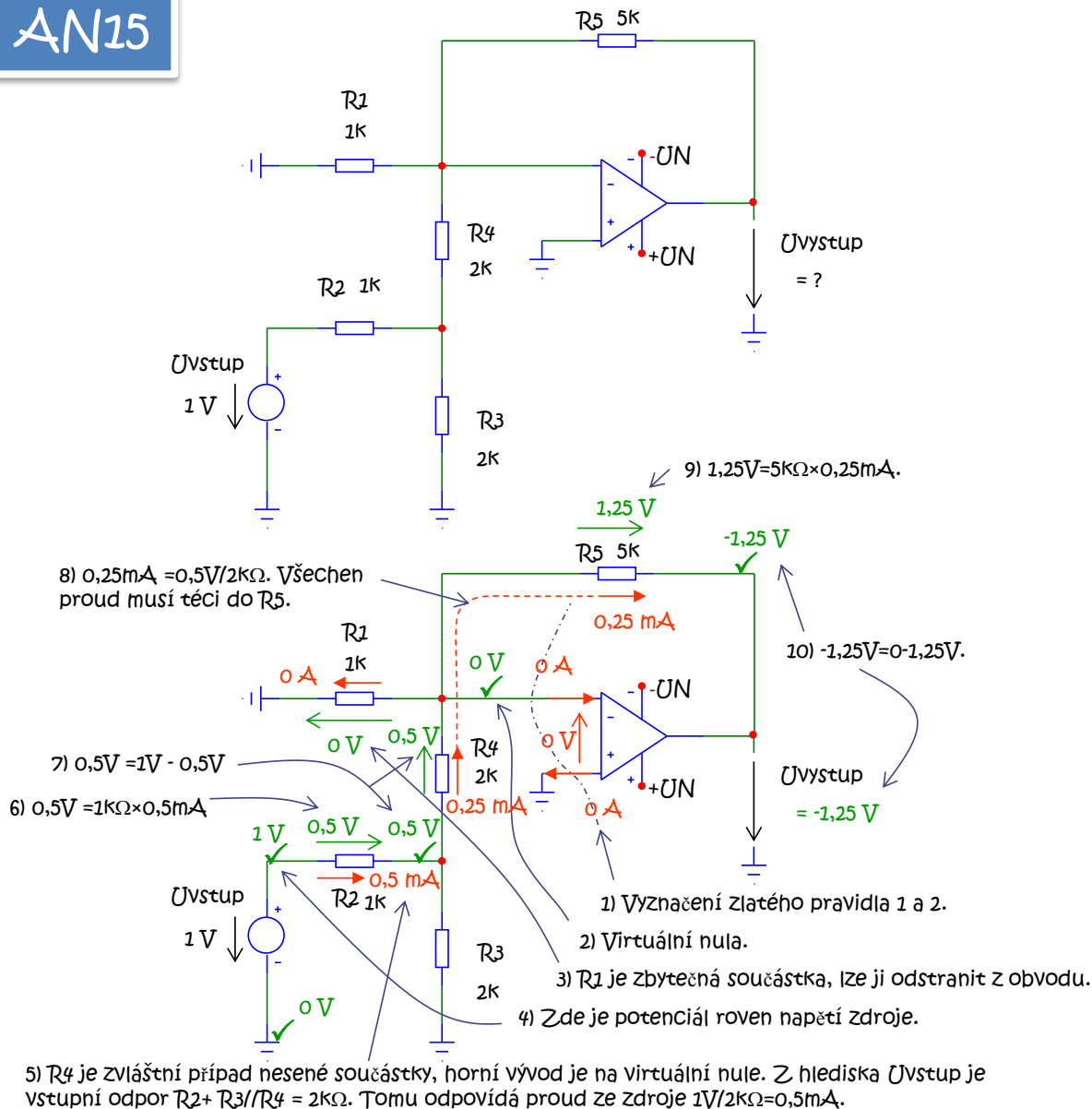
AN14



Jaký je vstupní odpor obvodu AN14? Z podílu napětí plovoucího zdroje a odběrného proudu vyplývá $0,1 \text{ V} / 0,1 \text{ mA} = 1 \text{ k}\Omega$. Jak ale výsledek závisí na rezistorech R_1 , R_2 , R_3 a R_4 ? Pokud je zdroj plovoucí, pak odpověď se obecně nemusí hledat snadno. V tomto konkrétním případě je však vstupní odpor roven přímo R_1 , protože napětí na R_1 je přesně rovno napětí zdroje a proud tekoucí rezistorem R_1 je přesně roven odběrnému proudu ze zdroje. Z hlediska výpočtu vstupního odporu jsou proto všechny ostatní rezistory zbytečnými součástkami.

Obvod na obrázku AN15 se dá sice řešit poměrně snadno, ale na rozdíl od předchozích zapojení již nelze hovořit o přímé metodě „jedním tahem“. Problematický moment je překonávání v kroku č. 5, kdy se na základě jakési úvahy počítá vstupní odpor a z něho úbytek napětí na R_2 , napětí na R_3 a další veličiny, potřebné pro další postup vpřed.

AN15



Některé obvody s operačními zesilovači nelze „jedním tahem“ řešit vůbec. Pak je třeba buď použít některou účinnou pomůcku, která nám pomůže dostat se přes překážku, například transfiguraci hvězda – trojúhelník [11], a pak pokračovat „jedním tahem“ až do cíle, nebo máme ještě jiné možnosti, zejména vyměnit metodu „jedním tahem“ za jinou, například za metodu jednoho pokusu a jednoho omylu.

5.5 Řešení obvodů metodou „jednoho pokusu a jednoho omylu“

Tato metoda chytře využívá toho, že zvětšíme-li x krát budící signál lineárního obvodu, zvětší se x -krát napětí a proudy na všech prvcích obvodu. To platí pro případ buzení obvodu z jediného zdroje (zde není řeč o napájecích zdrojích operačních zesilovačů, na nich výsledek analýzy nezávisí, saturace nepřipouštíme, omezujeme se na lineární režim).

Namísto toho, abychom vyšli při analýze ze známého napětí na vstupu, zvolíme si (vymyslíme) napětí nebo proud na vhodně zvolené součástce, a na tomto základě se následně pokusíme určit ostatní napětí a proudy v obvodu, mimo jiné i vstupní napětí. Potom však

pravděpodobně zjistíme, že původní vstupní napětí bylo jiné než to, které nám vyšlo: Zvolená veličina, kterou jsme začali analýzu, neměla správnou hodnotu – dopustili jsme se omylu (jeden pokus – jeden omyl). V druhé fázi svou chybu napravíme s využitím obyčejné trojčlenky: Všechna napětí a proudy, vypočtené v prvním kroku (včetně veličiny, kterou jsme si na úvod vymysleli), vynásobíme číslem

skutečná hodnota budící veličiny/vstupní veličina vypočtená v prvním kroku.

Na řešiteli je, aby zvolil dostatečně šikovně výchozí (tzv. klíčovou) veličinu, a to tak, aby se mohl úspěšně „nastartovat výpočet“, nejlépe metodou jednoho tahu od klíčové veličiny ke vstupu. Za vyloženou smůlu by bylo možno považovat to, kdybychom si za klíčovou veličinu vybrali napětí nebo proud zbytečné součástky, na které řešení z principu vůbec nezávisí. To bychom ale (snad) brzo odhalili. Extrémně nevhodným krokem by byla volba nenulového diferenčního napětí, případně volba vhodné klíčové veličiny, ale s hodnotou 0.

Pokud jde o velikost zvolené klíčové veličiny, pak v principu jakákoliv nenulová hodnota je dobrá. Pragmaticky bychom volbu měli přizpůsobit tomu, abychom si usnadnili numerické řešení. Například rozhodneme-li se pro volbu napětí na rezistoru o $R = 22 \text{ k}\Omega$ a vidíme, že další výpočty se budou odvíjet od proudu, je vhodné zvolit napětí například 2,2 V, aby proud vyšel „pěkně“, tj. 0,1 mA. Volbu 3,14159 V bychom asi neobhájili ani sami před sebou.

Z principu můžeme v prvním kroku pracovat i s hodnotami, které jsou nerealistické (například napětí, převyšující typické saturační úrovně operačních zesilovačů), protože pracujeme s lineárním modelem obvodu, který například nelze přebudit. Snažte se však této praxe vyvarovat. Klíčovou veličinu volte pragmaticky, ale s inženýrským citem.

Metoda jednoho pokusu a jednoho omylu je známa též pod názvy „Metoda úměrných veličin“ [14] nebo „Metoda klíčové veličiny“ [4].

V kapitole 4.12 jsme zjišťovali, zda v obvodu ZV13 působí kladná či záporná zpětná vazba. Obvod vypadá jednoduše a rovněž dvoustavové rozhodování o typu zpětné vazby bylo snadné, zpětná vazba je záporná. Tento obvod však není možné řešit „jedním tahem“. Z obrázku AN16 je zřejmé, že pouhá aplikace zlatých pravidel 1 a 2 neumožňuje přímý výpočet ostatních obvodových veličin.

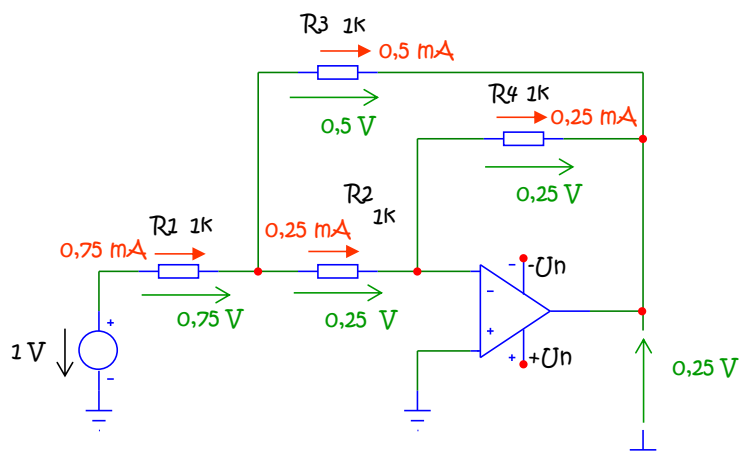
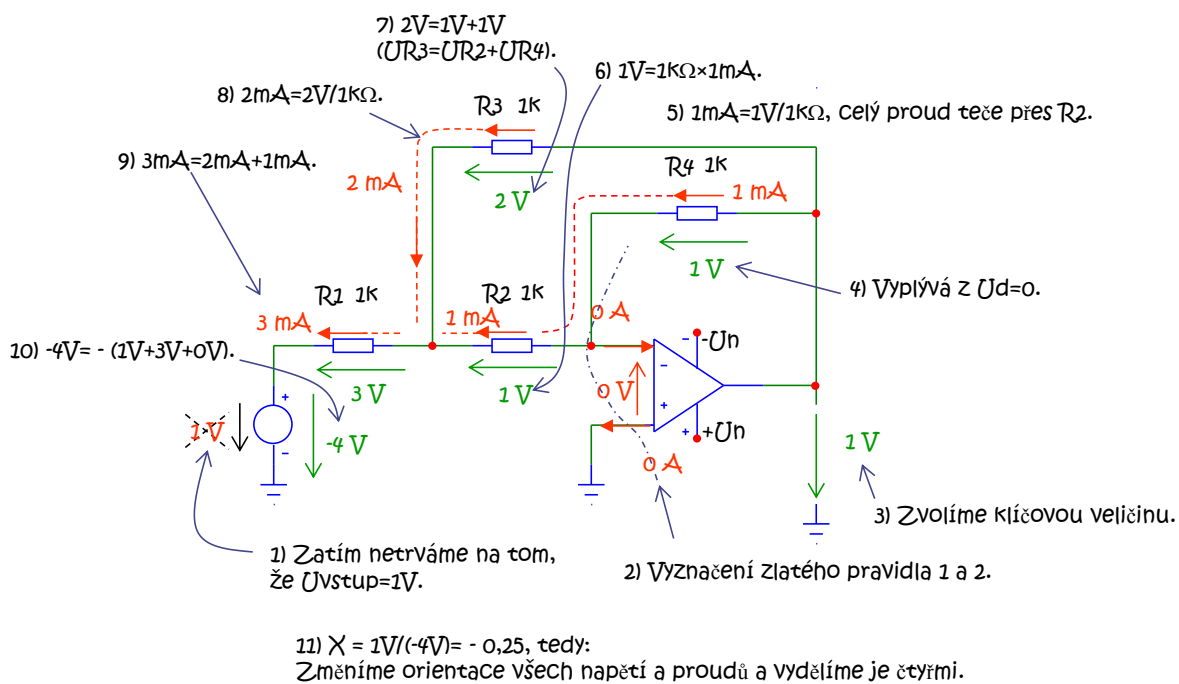
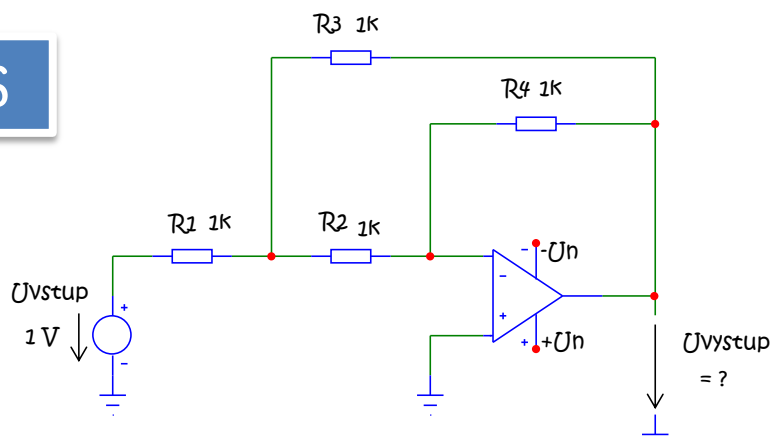
Zvolíme-li za klíčovou veličinu výstupní napětí, lze snadno „jedním tahem“ dospět k tomu odpovídajícímu vstupnímu napětí. Porovnáním se zadanou hodnotou 1 V vidíme rozdíl v hodnotě i znaménku. Jednoduchým přepočtem pak získáme správné rozložení napětí a proudů.

Zkušenější řešitel by byl schopen správně dopředu určit alespoň orientaci klíčové veličiny (výstupní napětí musí být záporné, protože operační zesilovač pracuje v invertujícím zapojení), z čehož by vyplynuly správné orientace ostatních napětí a proudů.

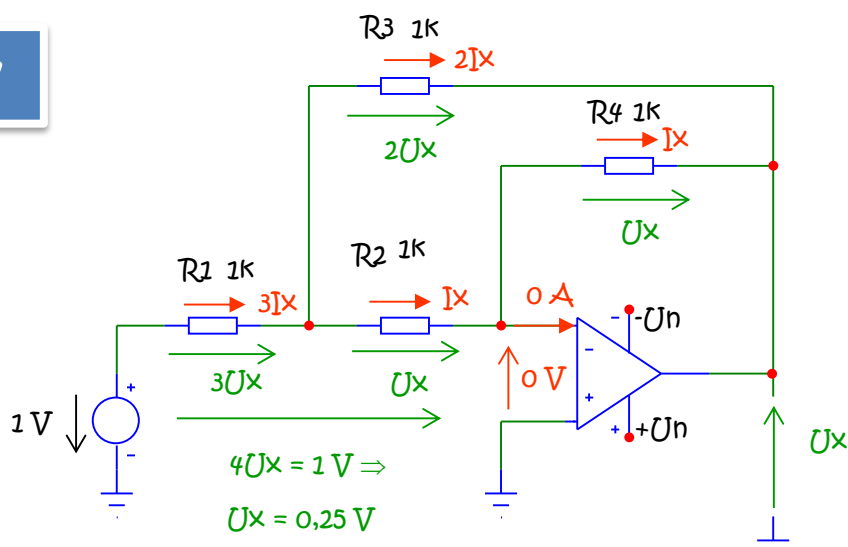
Z postupu vyplývá, že kdybychom vyšli z jiných napětí, konkrétně z napětí na R_2 nebo R_4 , k výsledku bychom dospěli stejně snadno. Příliš bychom si však nepomohli volbou napětí na R_1 nebo R_3 .

Úlohu je samozřejmě možné řešit i jinak. Obrázek AN17 popisuje jednu z možností. Protože rezistory R_2 a R_4 musí z principu téci stejný proud, který označíme I_x , a jejich odpory jsou stejné, pak musí být stejné i jejich napětí. Označme je například U_x . Pak napětí na R_3 musí být $2U_x$. Protože odpor R_3 je stejný jako R_2 a R_4 , proud rezistorem R_3 musí být $2I_x$, a součet proudů $I_x + 2I_x = 3I_x$ musí téct přes R_1 . Protože $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$, na R_1 je trojnásobné napětí $3U_x$. Součet napětí na R_1 a R_2 , tedy $4U_x$, musí být napětí zdroje 1 V, a proto $U_x = 0,25 \text{ V}$. Z toho se pak již snadno dopočítají napětí a proudy na všech rezistorech.

AN16



AN17



Vstupní odpor zesilovače lze rychle vyřešit technikou bootstrapu. Odpovídá sériové kombinaci R_1 a odporu R_2 , který je paralelně k zdánlivému odporu nesené součástky R_3 , který se určí z alfa vzorce: $R_3/(1-\alpha)$. Přenos α je zde představován přenosem z „levého konce“ R_3 na jeho „pravý konec“, což je zesílení invertujícího zesilovače, tvořeného operačním zesilovačem a rezistory R_2 a R_4 , neboli $\alpha = -R_4/R_2 = -1$. Pak zdánlivý odpor nesené součástky R_3 bude $R_3/2 = 500\ \Omega$ a vstupní odpor zesilovače je

$$R_1 + (R_2 \parallel \frac{R_3}{1 + R_4 / R_2}) = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{4}{3}\text{ k}\Omega \approx 1,333\text{ k}\Omega.$$

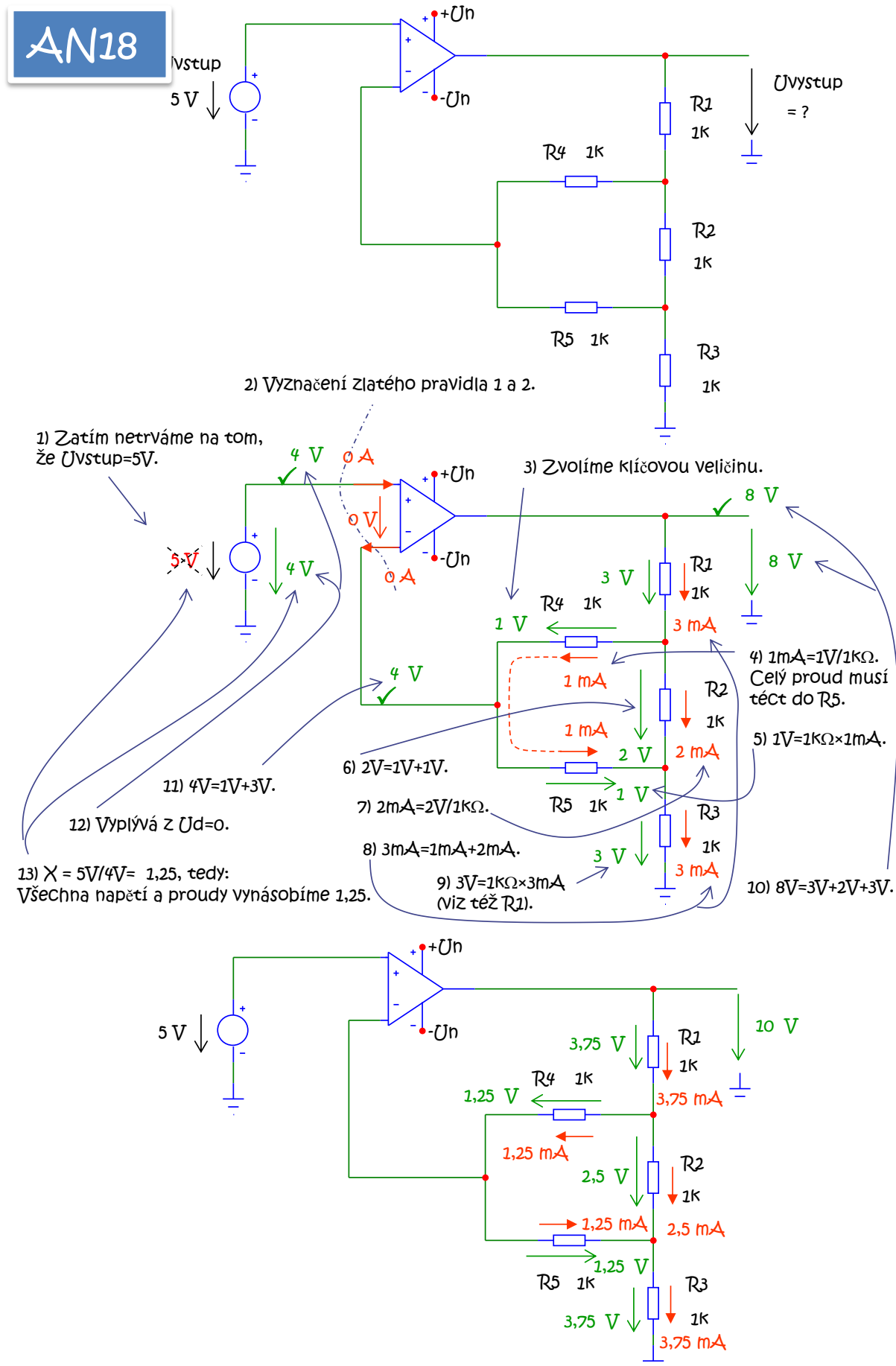
To je v souladu s číselným výsledkem na obrázku AN16: $1\text{ V}/0,75\text{ mA} = 4/3\text{ k}\Omega$.

Vstupní odpor závisí na odporech všech rezistorů v obvodu.

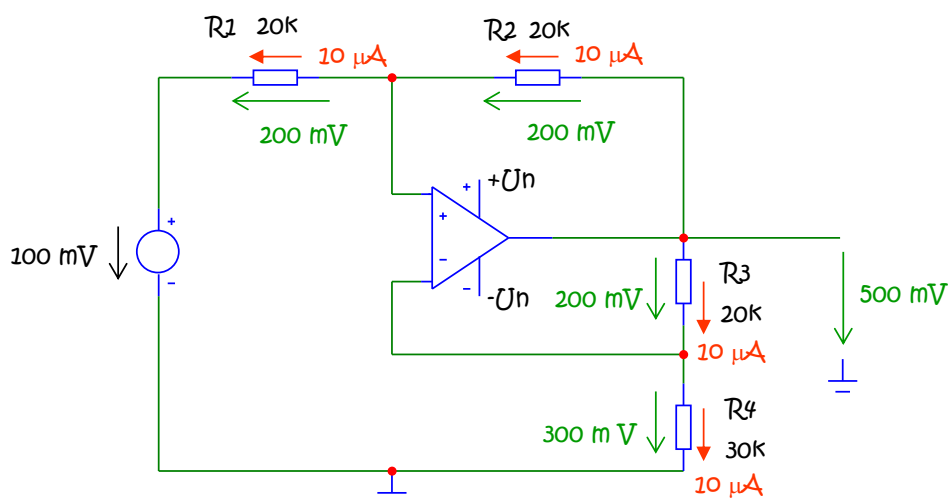
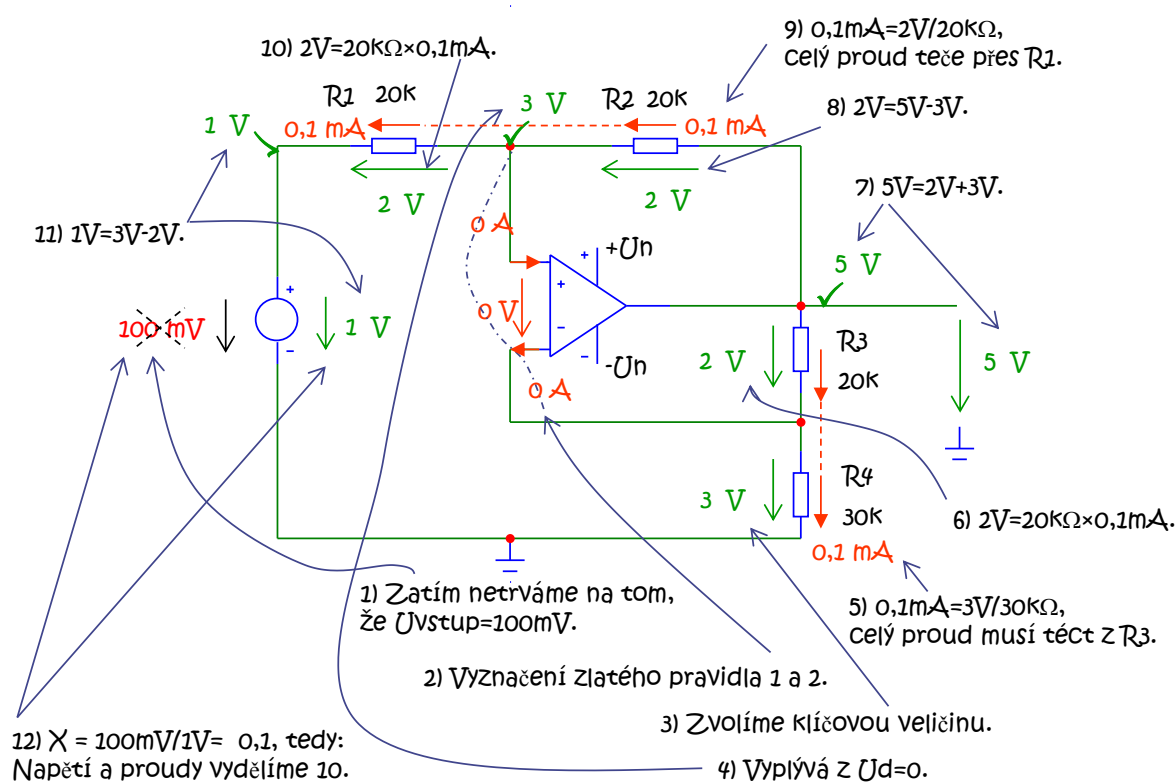
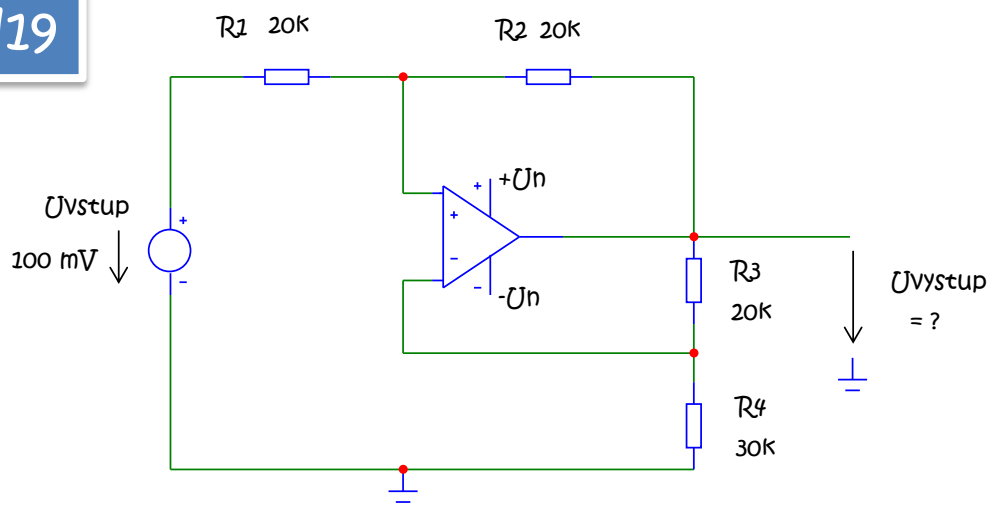
Výpočet vstupního odporu může být prvním krokem alternativní metody komplexního řešení obvodu AN16: z jeho znalosti vyjdeme v druhém kroku, kdy určíme proud odebíraný ze vstupního zdroje, a z proudu zjistíme úbytek napětí na R_1 . Zbytek pak již snadno dopočítáme.

Na obrázku AN18 je neinvertující zesilovač, v jehož zpětnovazebním obvodu je umístěna trojice rezistorů R_2 , R_4 a R_5 zapojených do trojúhelníka. Je zřejmé, že v obvodu je zavedena záporná zpětná vazba z výstupu do invertujícího vstupu operačního zesilovače. Je tedy možno aplikovat obě zlatá pravidla. Potenciál 5 V se objeví na uzlu, kde se spojují rezistory R_4 a R_5 . Obvod však nelze řešit jedním tahem bez pomocných operací. Nabízí se transfigurace trojúhelník-hvězda nebo použití metody jednoho pokusu a jednoho omylu, která je ilustrována na obrázku AN18. Za klíčovou veličinu je zvoleno napětí na R_4 , protože z něj se určí proud R_4 , který se musí přesně rovnat proudu rezistorem R_5 (je tomu tak proto, že do uzlu, v němž se spojují R_4 a R_5 , je připojen pouze vysokoimpedanční vstup IOZ, kterým neteče proud). Tak je možno nastartovat proces řešení všech ostatních napětí a proudů „jedním tahem“. Z konečného výsledku vyplývá, že zesílení obvodu je 2. Stejně zesílení by měl tento obvod, kdybychom z něj vyňali rezistory R_2 , R_4 a R_5 a všechny 3 vývody tohoto trojpólu bychom zkratovali: vznikl by klasický neinvertující zesilovač o zesílení $1 + R_1/R_3 = 2$.

Pokuste se obvod vyřešit transfigurací trojúhelníka R_2 , R_4 a R_5 na hvězdu. Obtížnějším úkolem pak bude analýza, jak závisí zesílení na jednotlivých odporech, konkrétně: Co se stane se zesílením (vzroste nebo poklesne), když odpor R_i ($i = 1$ až 5) zvětším?



AN19



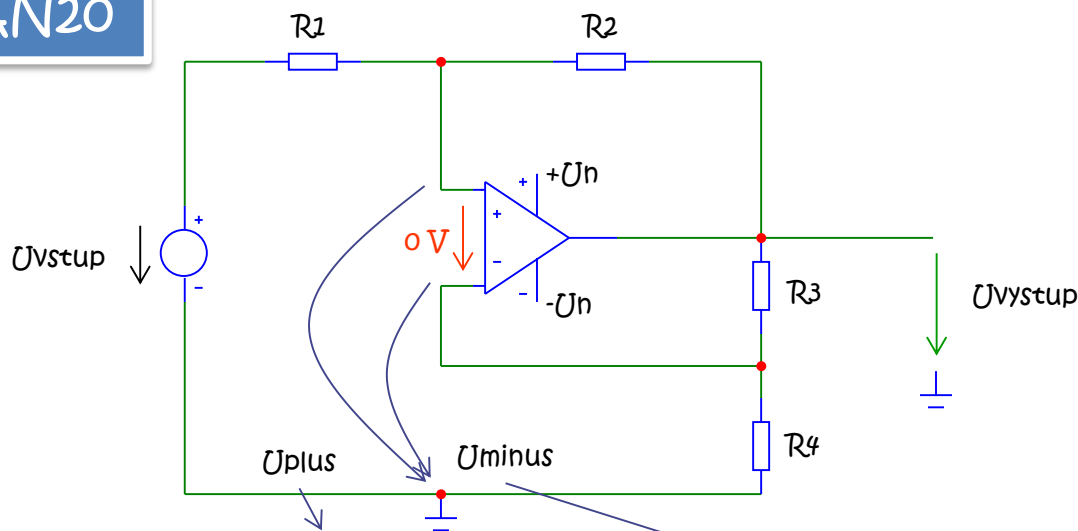
Na obrázku AN19 je překreslené schéma tzv. negativního impedančního konvertoru (NIC) [1], [15], který byl analyzován v kapitole 4.11 z hlediska typu zpětné vazby v příkladu ZV12. Tam bylo zjištěno, že pro dané odpory R_1 , R_2 , R_3 a R_4 „zvítězí“ záporná zpětná vazba nad kladnou a obvod tudíž pracuje v lineárním režimu ($U_d = 0$ V).

Pokusy o analýzu obvodu jedním tahem vedou k nezdaru. Na obrázku AN19 je ukázka řešení metodou jednoho pokusu a jednoho omylu. Za klíčovou veličinu je vybráno napětí na R_4 , což je současně napětí v uzlu, k němuž je připojen neinvertující vstup operačního zesilovače. Z finálního rozložení napětí a proudů vyplývá, že zesílení je 5. To je stejný výsledek, k němuž jsme dospěli v příkladu ZV12.

Jak závisí zesílení na odporech R_1 , R_2 , R_3 a R_4 ? Odpověď lze získat z výsledků analýzy z příkladu ZV12, která byla provedena pro obecné zesílení A operačního zesilovače, limitním přechodem $A \rightarrow \infty$. Jiný postup je ukázán na obrázku AN20. Napětí U_{plus} na neinvertujícím vstupu OZ je vypočteno pomocí principu superpozice jako součet příspěvků zdroje U_{vstup} (přes přenos děliče R_1 - R_2) a výstupního napětí U_{vystup} (přes přenos děliče R_2 - R_1). Napětí U_{minus} na invertujícím vstupu OZ je dáno výstupním napětím U_{vystup} , zeslabeném děličem R_3 - R_4 . V lineárním režimu, kdy záporná zpětná vazba „vítězí“ nad kladnou, se obě napětí musejí rovnat. Z výsledného vzorce pro zesílení A_{zv} vyplývá cenný závěr: zesílení je vždy větší než 1 pro lineární režim (čitatel je větší než jmenovatel). Pak ale přes rezistory R_1 , R_2 poteče proud směrem od většího U_{vystup} k menšímu U_{vstup} a vstupní odpor bude záporný. Od schopnosti imitovat záporný odpor je odvozen název obvodu.

Z obrázku AN19 vychází vstupní odpor $100 \text{ mV}/(-10 \text{ }\mu\text{A}) = -10 \text{ k}\Omega$. Pokuste se odvodit vzorec, jak vstupní odpor závisí na součástkách. Můžete využít například toho, že $R_1 + R_2$ je nesená součástka. K tomu budete potřebovat již odvozený vzorec pro zesílení.

AN20



$$U_{vstup} \times R_2 / (R_1 + R_2) + U_{vystup} \times R_1 / (R_1 + R_2) = U_{vystup} \times R_3 / (R_3 + R_4) \Rightarrow$$

$$A_{zv} = \frac{U_{vystup}}{U_{vstup}} = \frac{1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{\frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}} > 1$$

musí být větší než nula kvůli stabilitě
(viz příklad ZV12)

6 Neřešené příklady

Co slyším, to zapomenu. Co vidím, si pamatuji. Co si vyzkouším, tomu rozumím.

Konfucius

Cíle a obsah kapitoly:

Samostatným řešením příkladů, hledáním postupů a přemýšlením nad získanými výsledky do hloubky porozumět:

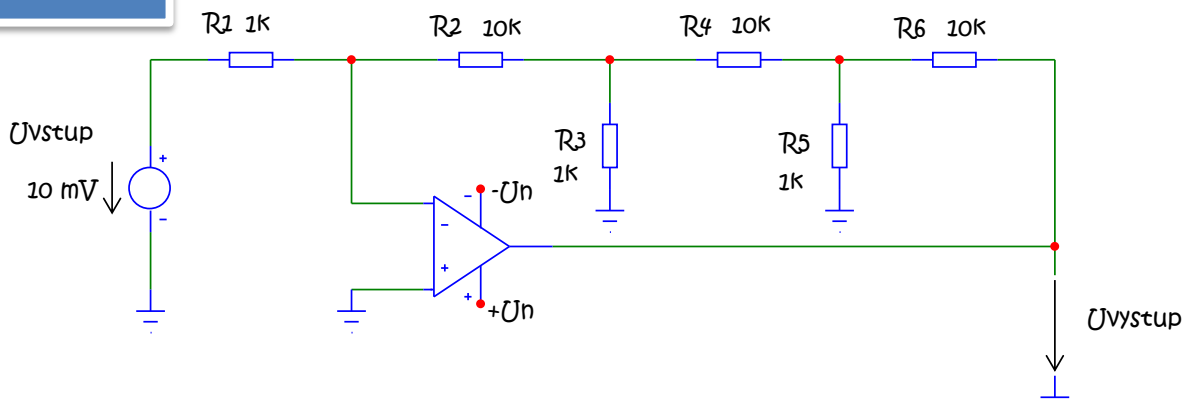
- Trojici základních zákonů (Ohmův, napěťový Kirchhoffův, proudový Kirchhoffův) jakožto spolehlivého vodítka k vyřešení libovolně složitého obvodu.
- Principu zpětné vazby, zejména záporné, a jejich „léčivým“ účinkům (proč to tak funguje).
- Rozdílnosti v mechanismech kladné a záporné zpětné vazby, které jsou zřejmé z metody „dvoustavového“ zjišťování typu zpětné vazby.
- Logice Blackova vzorce, Masonova vzorce a alfa-vzorce a jejich užitečnosti.
- Zlatým pravidlům ideálního operačního zesilovače, kdy fungují, kdy ne, a proč.
- Podstatě tzv. zbytečných součástek a zjednodušujícím postupům z toho plynoucím.
- Logice metody řešení jedním tahem (včetně rozpoznání, zda je reálné s její pomocí dospět rychle do cíle).
- Logice metody jednoho pokusu a jednoho omylu (včetně rozpoznání, kdy je rozumné ji upřednostnit před řešením jedním tahem).
- Jak a proč fungují obvody, které analyzujeme, za jakých podmínek (ne)budou takto fungovat.

U všech příkladů je třeba nalézt napětí a proudy pro všechny rezistory plus proud odebíraný ze vstupu plus proud tekoucí z výstupu ideálního operačního zesilovače. Kromě toho je třeba vyřešit úkoly, taxativně vymezené u každého obvodu.

Je žádoucí získané výsledky ověřit jednoduchým testem, například zda získané rozložení napětí a proudů není v rozporu s trojicí základních zákonů elektrotechniky. Užitečné může být i ověření výsledků počítačovou simulací za pomoci některého ze standardních programů pro numerickou analýzu elektrických obvodů, například Micro-Capu [16], MultiSimu [17], PSpice [18], LTSpice [19] apod. Nadto je možné doporučit program SNAP [20], který kromě numerických výsledků poskytne i vzorce pro zesílení, vstupní a výstupní odpor. To může být velmi užitečné pro každého, koho zajímá, které součástky v obvodu mají vliv na danou charakteristiku obvodu a jaký.

Výsledky řešení jsou ve stručné formě k dispozici v kapitole 8.

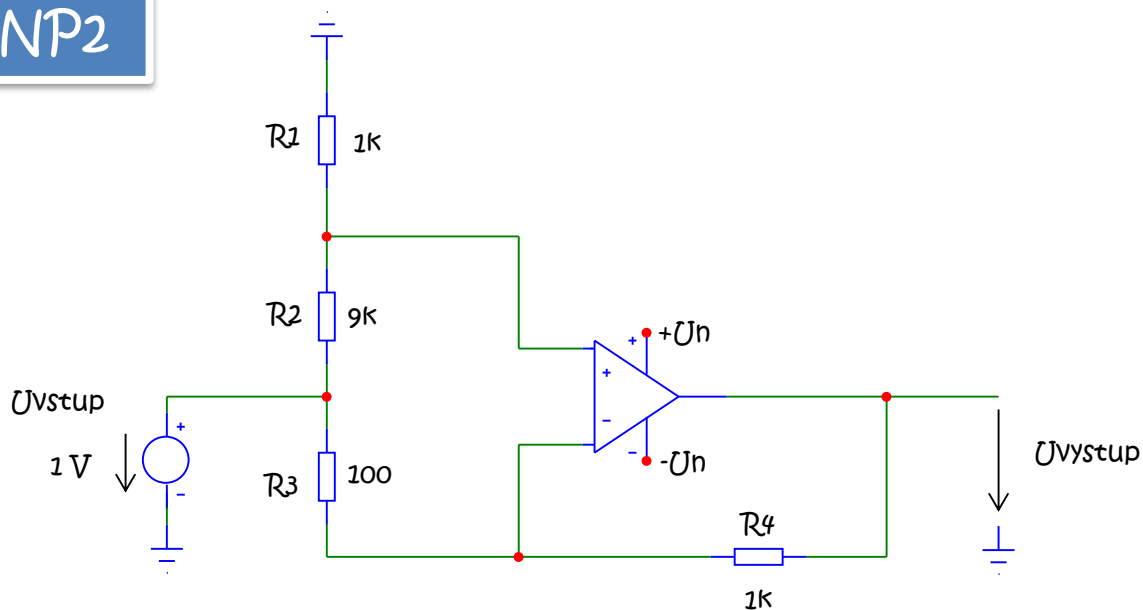
NP1



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_4 - R_5 - R_6 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 - R_4 .

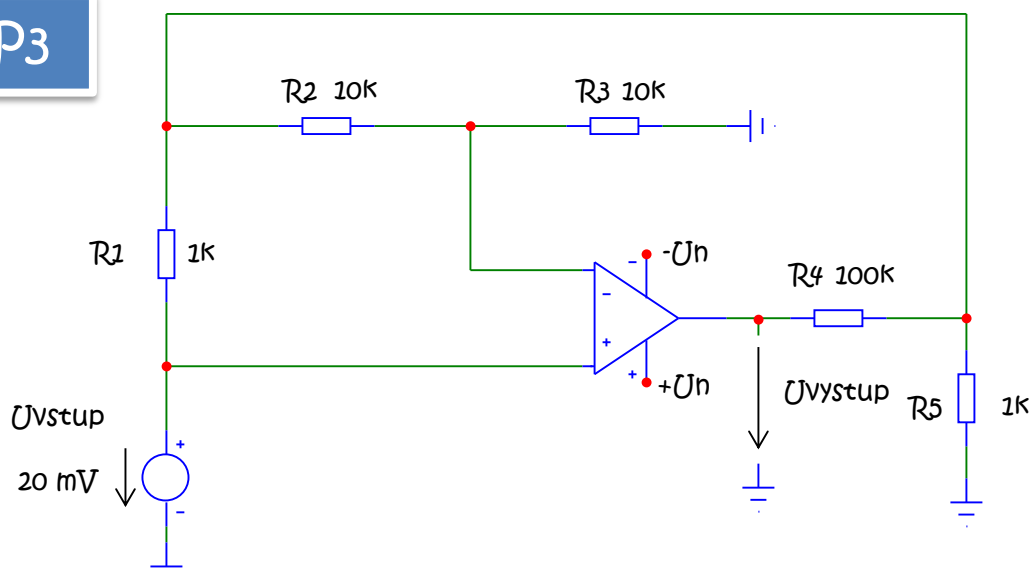
NP2



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 .

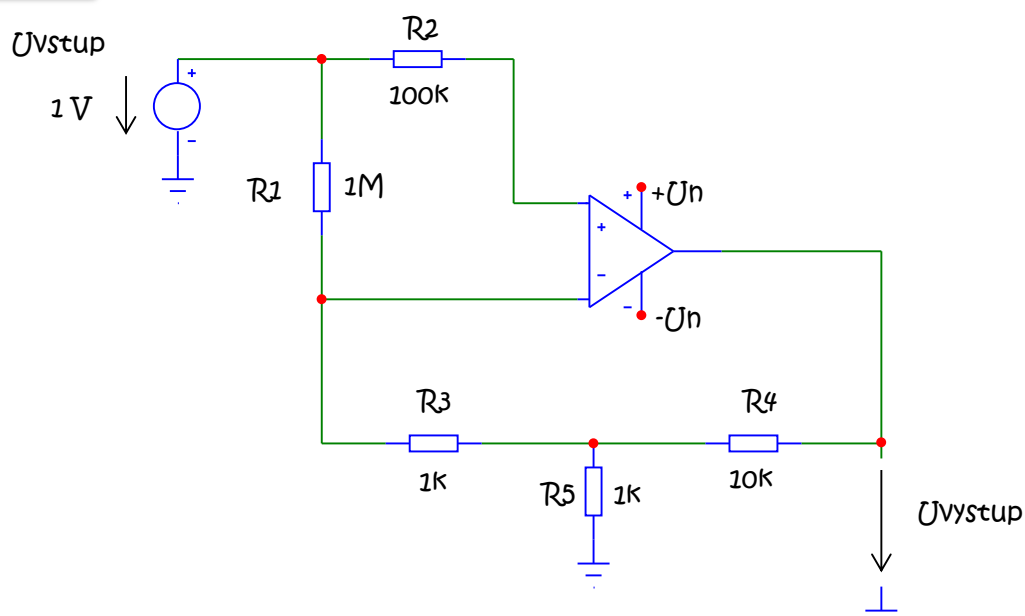
NP3



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_4 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 .

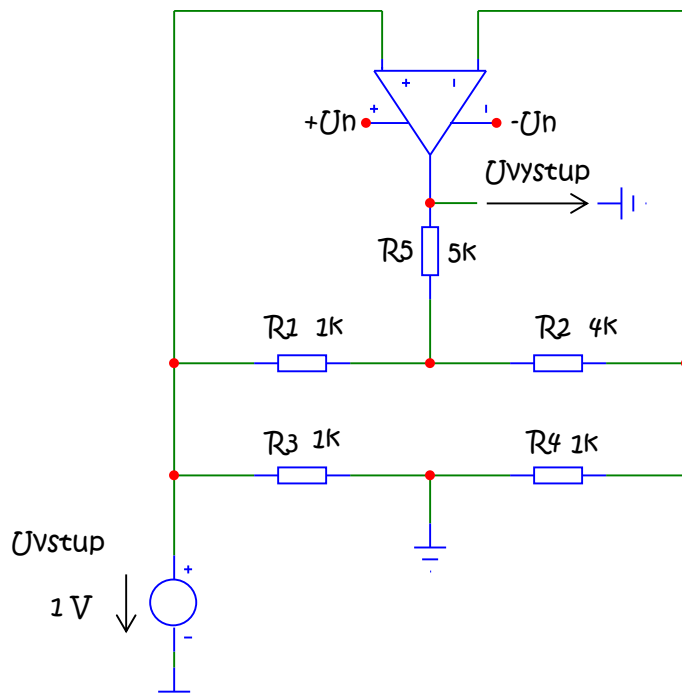
NP4



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_3 .

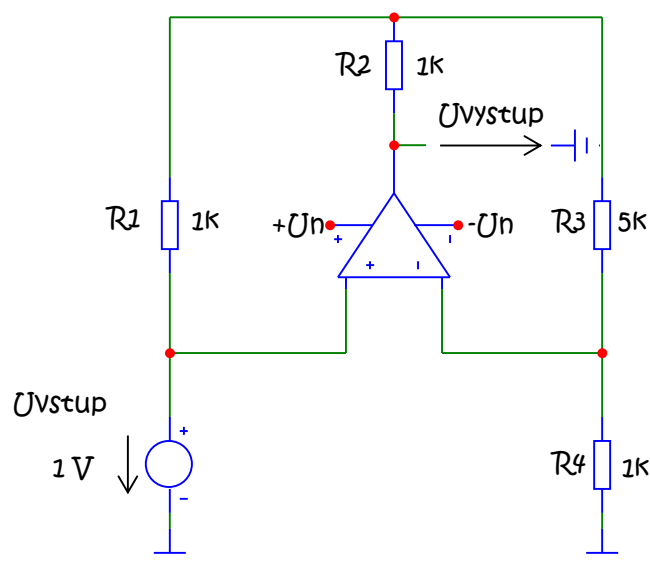
NP5



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

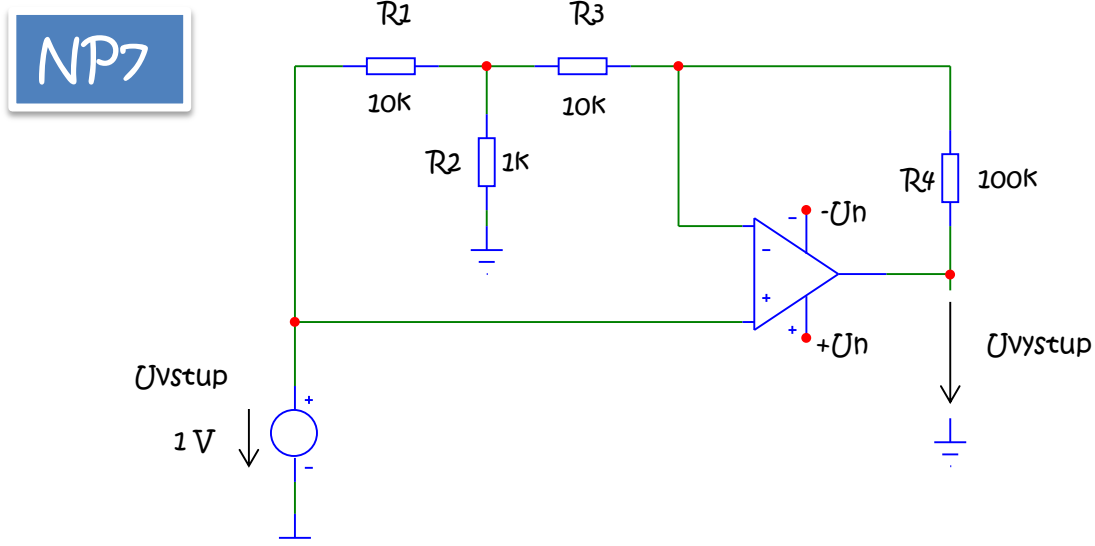
- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_4 .

NP6



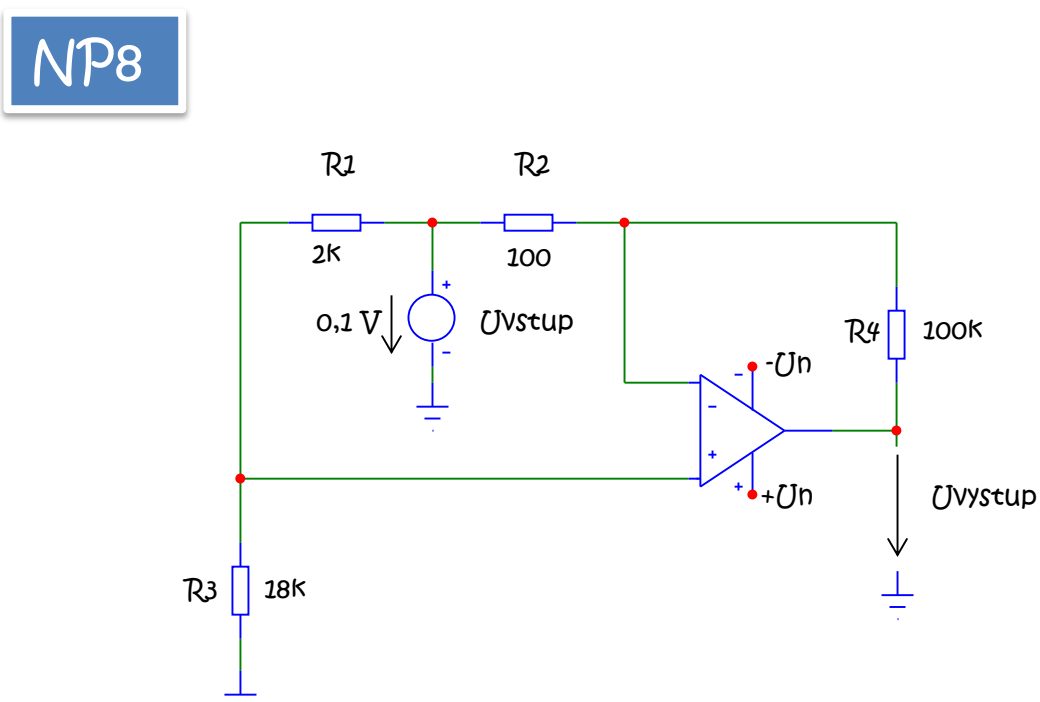
Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_3 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 .



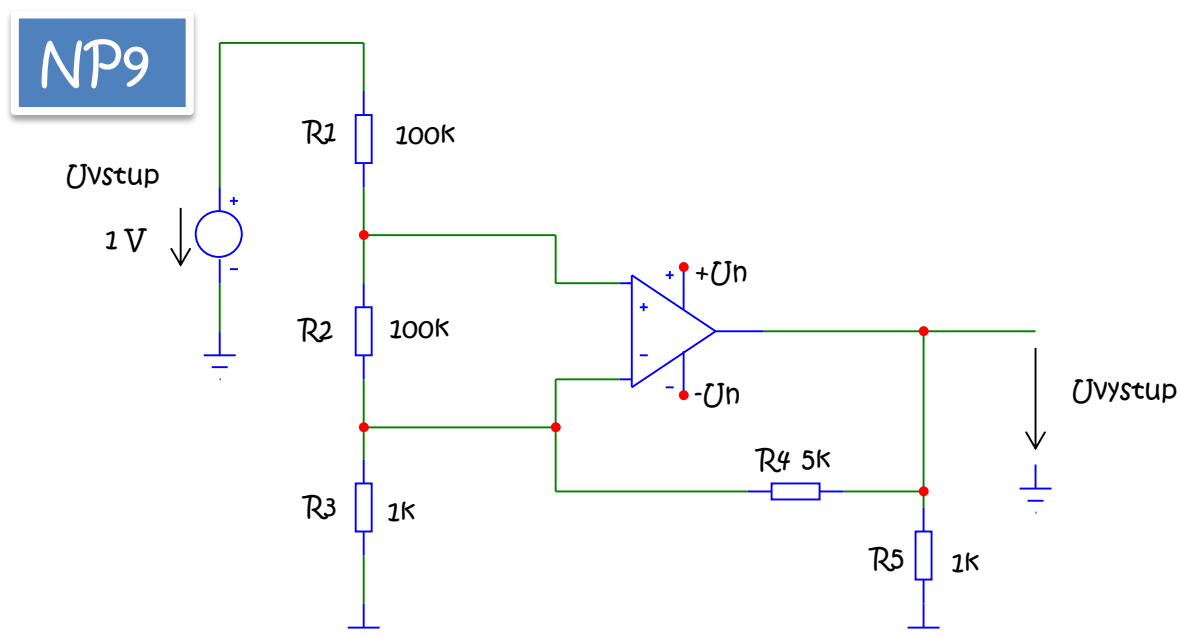
Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_3 .



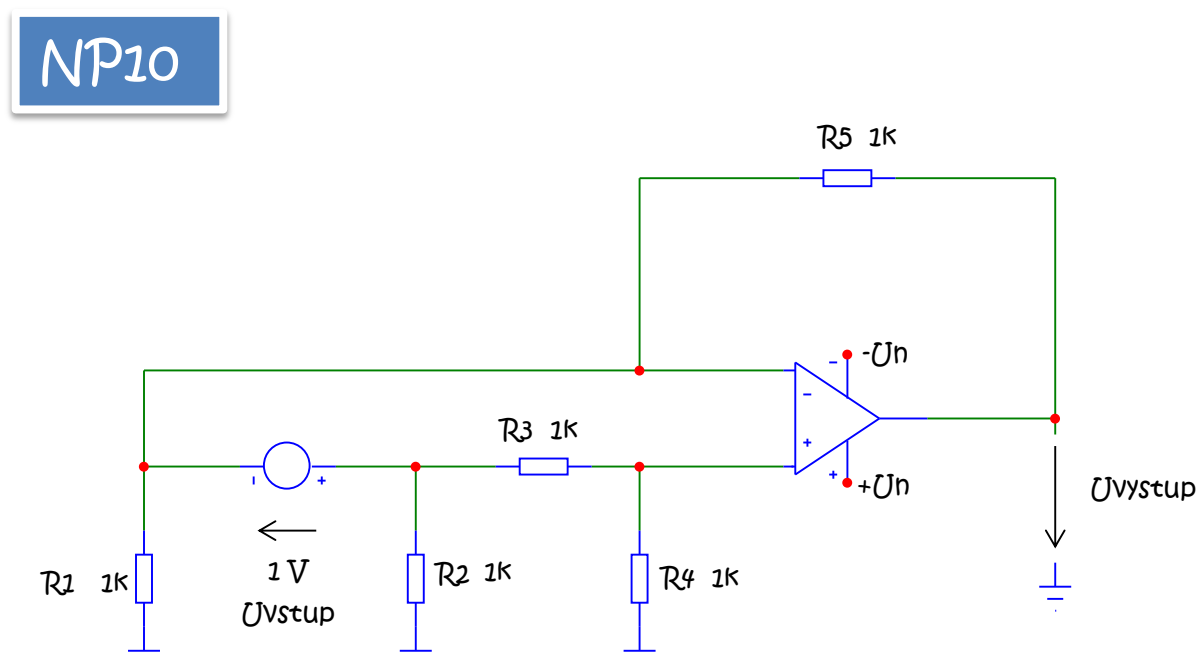
Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_3 .



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

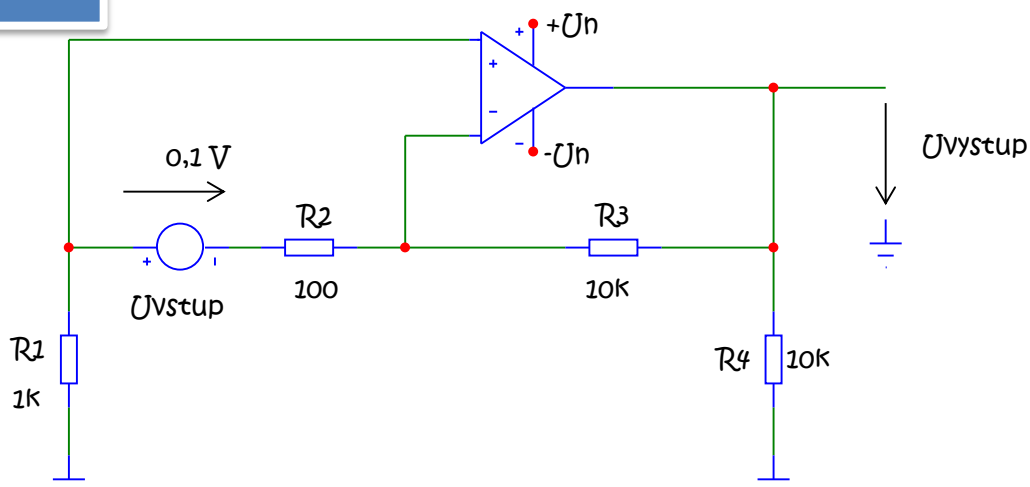
- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 .



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 - U_{vstup} .

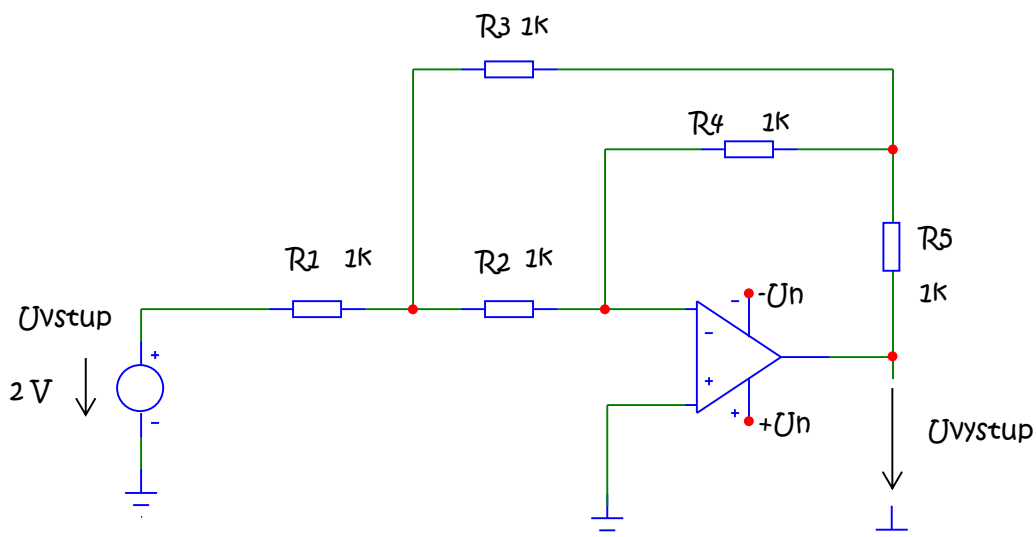
NP11



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu U_{vstup} - R_2 .

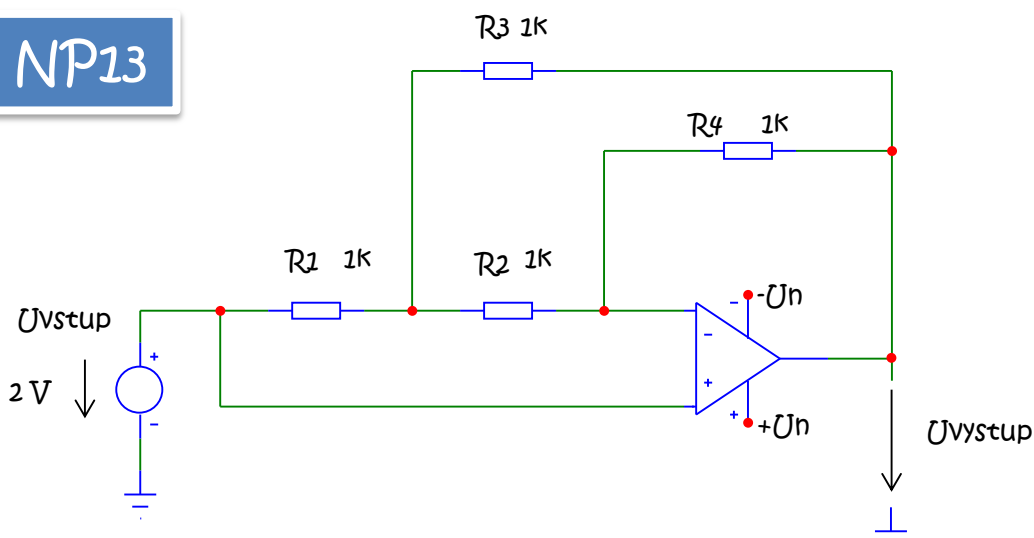
NP12



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_3 .

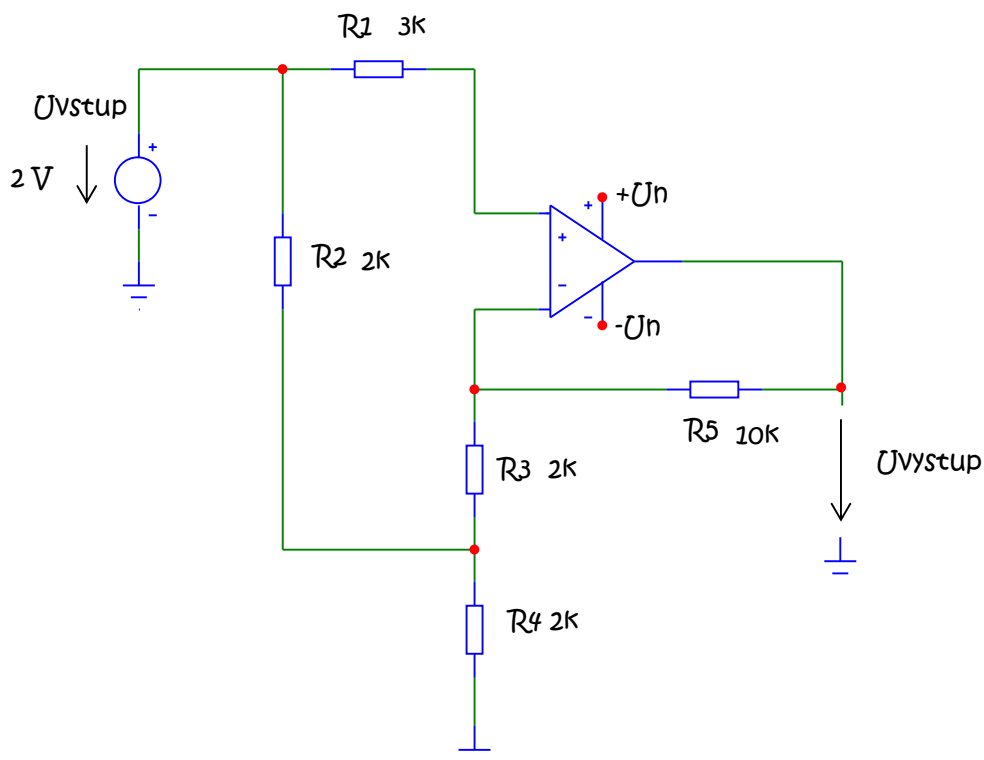
NP13



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_3 .

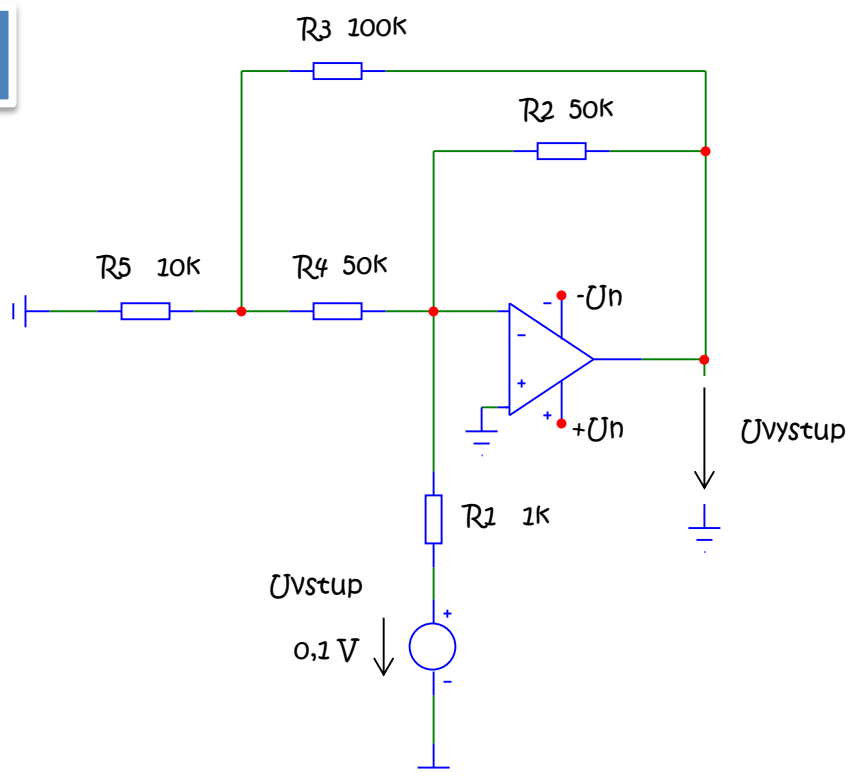
NP14



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 - R_4 .

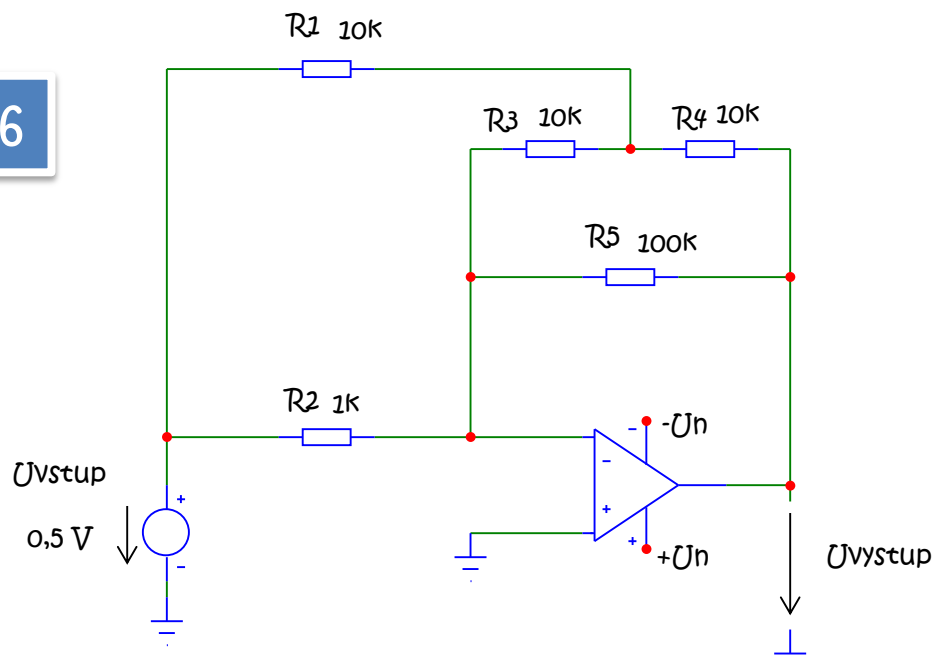
NP15



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 - R_5 .

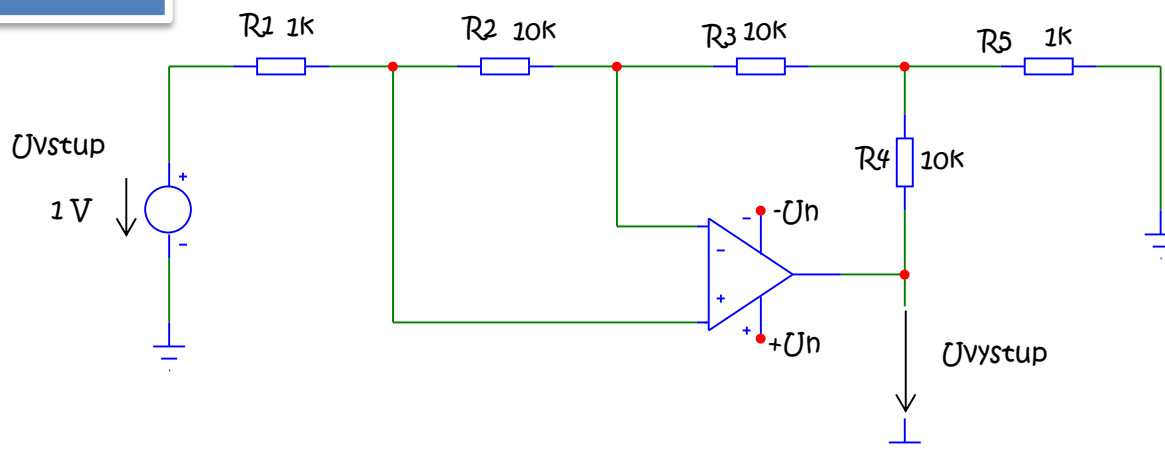
NP16



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtěte:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_3 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 - R_5 .

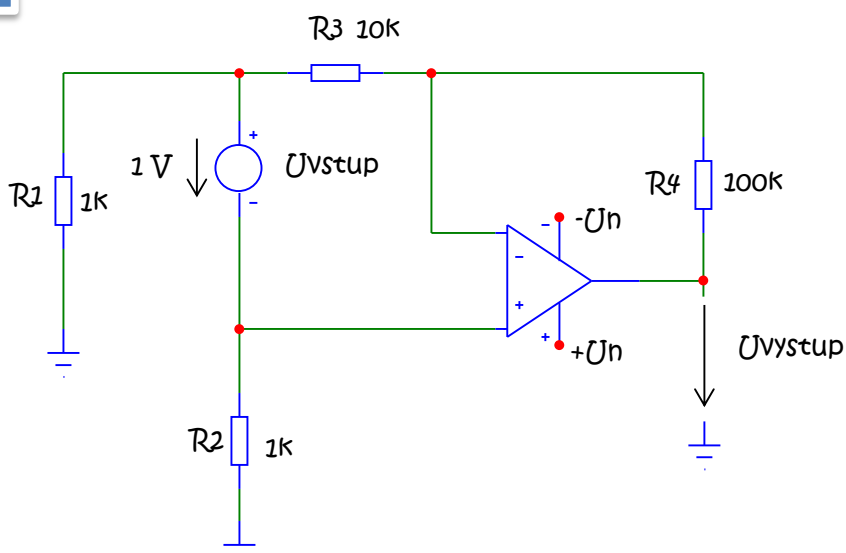
NP17



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 .

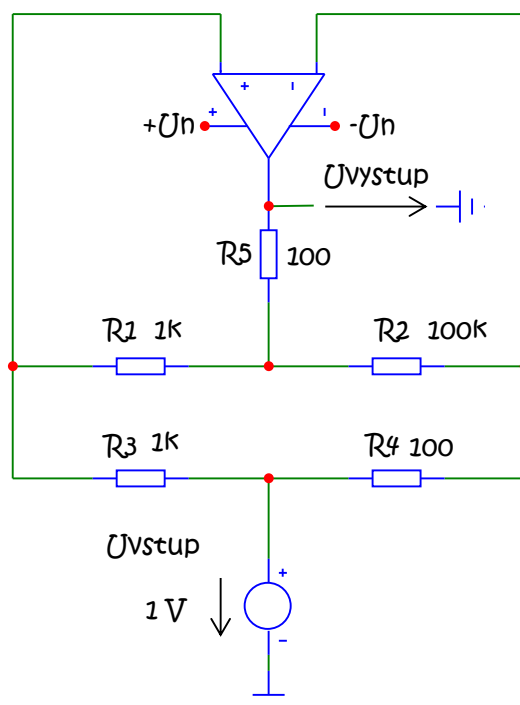
NP18



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_3 - R_4 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_3 - U_{vstup} .

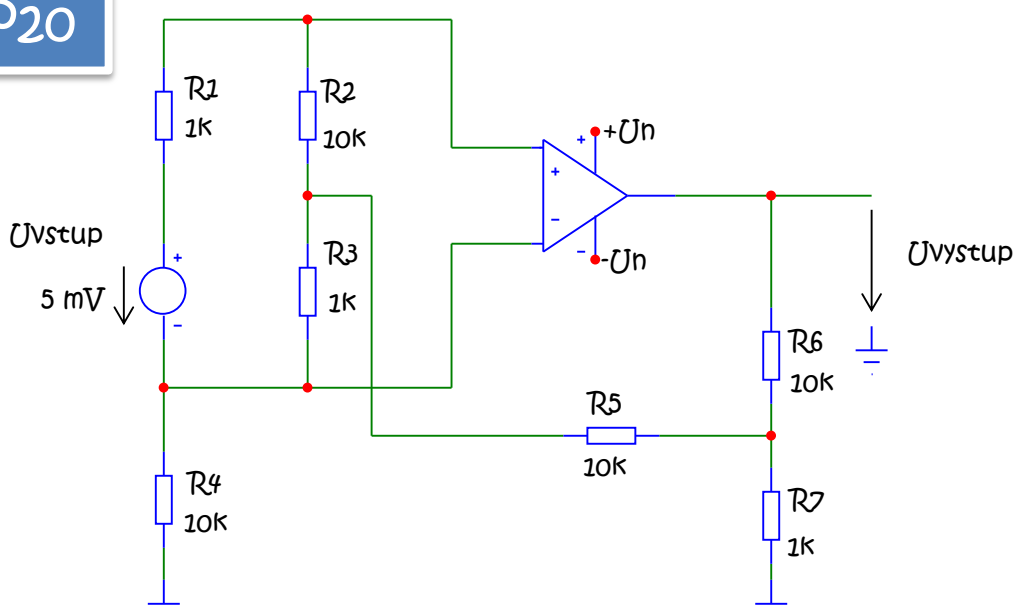
NP19



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_1 - R_2 - R_5 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_4 .

NP20



Určete, zda v obvodu působí záporná zpětná vazba. Pokud ano, pak vypočtete:

- U_{vystup} , zesílení, vstupní a výstupní odpor obvodu.
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_5 - R_6 - R_7 .
- Zesílení a výstupní odpor, je-li výstup odebírán z uzlu R_2 - R_3 - R_5 .

7 Výsledky vstupního testu z kapitoly 2.2

č.	obvod	otázka	varianty odpovědí
1		Proud I je Napětí na R1 je orientováno Proud tekoucí baterií má směr	a) 1mA, b) -1mA, c) 0, d) nelze určit bez znalosti R2. a) → , b) ←, c) je 0, d) nelze určit. a) ↓, b) ↑ , c) je nulový, d) nelze určit.
2		Napětí na R1 je Proud odebíraný z baterie je Výkonová ztráta na R1 je Výkon dodávaný baterií je	a) 5V, b) 2V, c) 7V, d) 3V a) 2mA, b) 3mA , c) 4mA, d) 5mA a) 1mW, b) 9mW , c) 15mW, d) 1W. a) 1mW, b) 9mW, c) 15mW , d) 1W.
3		Napětí na R1 je Proud R2 teče Proud R2 je Proud pravou baterií teče Zvětšíme-li R2, pak proud R1	a) 0V, b) -5V, c) 5V, d) 10V , e) -10V. a) ↓, b) ↑ c) je 0, d) nelze určit. a) 5mA, b) 10mA, c) 0, d) nelze určit. a) ↓, b) ↑ c) je 0, d) nelze určit. a) klesne, b) vzroste, c) nezmění se , d) nelze určit.
4		Proud I1 je Proud I2 je Napětí U1 je Napětí U2 je	a) 0 , b) 1mA, c) -1mA d) 2mA, e) -2mA. a) 0, b) 1mA , c) -1mA d) 2mA, e) -2mA. a) 0 , b) 0.5V, c) -0.5V, d) 1V, e) -1V. a) 0, b) 0.5V, c) -0.5V, d) 1V, e) -1V .
5		Napětí Ux je Napětí Uy je Po přepnutí spínačů do druhé polohy bude napětí Ux	a) 0V, b) 5V, c) -5V, d) 10V, e) -10V . a) 0V , b) 5V, c) -5V, d) 10V, e) -10V. a) 0V, b) 5V, c) -5V, d) 10V , e) -10V.
6		Obvody jsou ekvivalentní vzhledem k svorkám A-B, když proud I je Vnitřní odpor levého obvodu na svorkách A-B je Propojíme-li svorky A-A a B-B ekvivalentních obvodů, těmito spoji poteče proud	a) 10mA, b) -10mA, c) 0, d) 20mA, e) -20mA . a) 0Ω, b) 500Ω , c) 1kΩ, d) 2kΩ. a) 10mA, b) -10mA, c) 0 , d) 20mA, e) -20mA.
7		Obvody jsou ekvivalentní vzhledem k svorkám A-B-C, když Rx je Propojíme-li u obou ekvivalentních obvodů svorky A-A, B-B a C-C, pak mezi libovolnou dvojicí propojek naměříme odpor	a) 1kΩ, b) 3kΩ , c) 1/3kΩ, d) 1.5kΩ. a) 1kΩ , b) 3kΩ, c) 1/3kΩ, d) 1.5kΩ.

8 Výsledky neřešených příkladů z kapitoly 6

Všechny obvody NP1 až NP20 pracují v režimu záporné zpětné vazby.

NP1:

- a) $U_{\text{vystup}} = -14,3 \text{ V}$, zesílení = -1430, vstupní odpor = $1 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R4-R5-R6; zesílení = -120, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3-R4; zesílení = -10, výstupní odpor = 0Ω .

NP2:

- a) $U_{\text{vystup}} = 8,9 \text{ V}$, zesílení = 8,9, vstupní odpor = $109,89 \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4; zesílení = 0,1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2; zesílení = 0,1, výstupní odpor = 900Ω .

NP3:

- a) $U_{\text{vystup}} = 6,24 \text{ V}$, zesílení = 312, vstupní odpor = $-1 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R4-R5; zesílení = -2, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .

NP4:

- a) $U_{\text{vystup}} = 11 \text{ V}$, zesílení = 11, vstupní odpor = $\infty \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4-R5; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R3; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .

NP5:

- a) $U_{\text{vystup}} = 10 \text{ V}$, zesílení = 10, vstupní odpor = $-333,3 \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R5; zesílení = 5, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .

NP6:

- a) $U_{\text{vystup}} = 12 \text{ V}$, zesílení = 12, vstupní odpor = -200Ω , výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R3; zesílení = -6, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .

NP7:

- a) $U_{\text{vystup}} = 9,333 \text{ V}$, zesílení = 9,333, vstupní odpor = $12 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R3; zesílení = 0,1667, výstupní odpor = $833,3 \Omega$.

NP8:

- a) $U_{\text{vystup}} = -9,91 \text{ V}$, zesílení = -99,1, vstupní odpor = $952,4 \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R2-R4; zesílení = 0,9, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R3; zesílení = 0,9, výstupní odpor = $1,8 \text{ k}\Omega$.

NP9:

- a) $U_{\text{vystup}} = 6 \text{ V}$, zesílení = 6, vstupní odpor = $\infty \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2; zesílení = 1, výstupní odpor = $100 \text{ k}\Omega$.

NP10:

- a) $U_{\text{vystup}} = 5 \text{ V}$, zesílení = 5, vstupní odpor = $333,3 \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = $1 \text{ k}\Omega$.
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3- U_{vstup} ; zesílení = 2, výstupní odpor = 0Ω .

NP11:

- a) $U_{\text{vystup}} = 11 \text{ V}$, zesílení = 110, vstupní odpor = 100Ω , výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3; zesílení = 10, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu U_{vstup} -R2; zesílení = 9, výstupní odpor = $1 \text{ k}\Omega$.

NP12:

- a) $U_{\text{vystup}} = -2 \text{ V}$, zesílení = -1, vstupní odpor = $1,333 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4-R5; zesílení = -0,25, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R3; zesílení = 0,25, výstupní odpor = 250Ω .

NP13:

- a) $U_{\text{vystup}} = 2 \text{ V}$, zesílení = 2, vstupní odpor = $\infty \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R2-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R3; zesílení = 1, výstupní odpor = 250Ω .

NP14:

- a) $U_{\text{vystup}} = 5,333 \text{ V}$, zesílení = 2,667, vstupní odpor = $6 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R5; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3-R4; zesílení = 0,667, výstupní odpor = $666,7 \Omega$.

NP15:

- a) $U_{\text{vystup}} = -4,64 \text{ V}$, zesílení = -46,4, vstupní odpor = $1 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R4; zesílení = 0, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4-R5; zesílení = -3,571, výstupní odpor = $7,143 \text{ k}\Omega$.

NP16:

- a) $U_{\text{vystup}} = -11,9 \text{ V}$, zesílení = -23,8, vstupní odpor = $537,2 \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R1-R3-R4; zesílení = -7,615, výstupní odpor = $769,2 \Omega$.
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3-R5; zesílení = 0, výstupní odpor = 0Ω .

NP17:

- a) $U_{\text{vystup}} = 2 \text{ V}$, zesílení = 2, vstupní odpor = $\infty \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4-R5; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2; zesílení = 1, výstupní odpor = $1 \text{ k}\Omega$.

NP18:

- a) $U_{\text{vystup}} = -10,55 \text{ V}$, zesílení = -10,55, vstupní odpor = $1,818 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R3-R4; zesílení = -0,55, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R1-R3- U_{vystup} ; zesílení = 0,45, výstupní odpor = 500Ω .

NP19:

- a) $U_{\text{vystup}} = 1 \text{ V}$, zesílení = 1, vstupní odpor = $\infty \Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R1-R2-R5; zesílení = 1, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R4; zesílení = 1, výstupní odpor = $100,1 \Omega$.

NP20:

- a) $U_{\text{vystup}} = -13,2 \text{ V}$, zesílení = -2640, vstupní odpor = $1 \text{ k}\Omega$, výstupní odpor = 0Ω .
- b) Výstup je odebírán z uzlu R5-R6-R7; zesílení = -230, výstupní odpor = 0Ω .
- c) Výstup je odebírán z uzlu R2-R3-R5; zesílení = -120, výstupní odpor = 0Ω .

9 Literatura a další informační zdroje

- [1] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. Cambridge University Press, 2nd Edition, 2001; http://en.wikipedia.org/wiki/The_Art_of_Electronics
- [2] DORF, R.C., SVOBODA, J.A. Introduction to Electric Circuits. John Wiley&Sons, inc. 9th Edition, 2014.
- [3] DESOER, C., KUH, E.S. Basic Circuit Theory. McGraw-Hill Book Company, 2009. <http://manualmaster.net/files/b/basic-circuit-theory-desoer-kuh-solution-manual.pdf>
- [4] BIOLEK, D. How to Teach the Analysis of Electrical Circuits at Technical Universities. Plenary Lecture, 11th CCCC Conference. Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, July 23-28, 2007; http://user.unob.cz/biolek/veda/lectures/Crete07_plenary.ppt
- [5] BIOLEK, Z. Úvod do SPICE pomocí programu MICRO-CAP. SŠIEŘ Rožnov p.R., 2009; <http://www.roznovskastredni.cz/biolek/dwnl/skriptaSPICE.pdf>
- [6] BLACK, H. S. Stabilized Feed-Back Amplifiers. Electrical Engineering, vol. 53, no. 1, Jan. 1934, pp. 114-120.
- [7] DOSTÁL, J. Operační zesilovače. BEN – technická literatura, 2005.
- [8] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. BEN - technická literatura, 2002.
- [9] MANCINI, R. Op Amps For Everyone. Advanced Analog Products, August 2002. http://www.electronics-diy.com/pdf/Op_Amps_for_everyone.pdf
- [10] MASON, S. J. Feedback Theory - Further Properties of Signal Flow Graphs. Proceedings of the IRE, No. 7, 1956, pp. 920–926.
- [11] BIOLEK, D. Řešíme elektronické obvody. BEN, 2004.
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_(electronics))
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping>
- [14] ČAJKA, J., KVASIL, J. Teorie lineárních obvodů. TKI, SNTL/ALFA 1979.
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Negative_impedance_converter
- [16] Micro-Cap: <http://www.spectrum-soft.com>
- [17] MultiSim: <http://www.ni.com/multisim/>
- [18] PSpice: <http://www.electronics-lab.com/downloads/schematic/013/>
- [19] LTspice: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>
- [20] SNAP: http://user.unob.cz/biolek/download/Old_Snap_NewEditor.zip