



SEMESTRÁLNÍ PRÁCE Z PŘEDMĚTU
Modelování a počítačová simulace

NÁZEV PRÁCE: Zdroj proudu s vhodnou napěťovou referencí

semestr: LS 2024/2025
skupina: Út 18:00
vypracoval: Lukáš Lev, 256660
datum: 27. dubna 2025

Obsah

1	Zadání	3
2	Charakteristika klíčové součástky	4
3	Rozhraní modelu klíčové součástky	7
4	Simulované schéma s klíčovou součástkou	8
5	Provedené experimenty	9
5.1	Experiment 1a: Teplotní závislost	10
5.2	Experiment 1b: Maximální hodnota zátěže	13
5.3	Experiment 2: Šumová analýza	15
5.4	Experiment 3: Pulzní odezva	19
6	Závěr	22
7	Přílohy	24

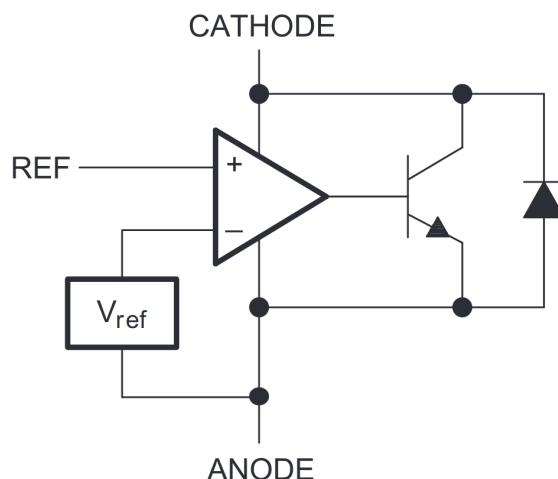
1 Zadání

1. Získejte z Internetu nebo jiným způsobem model vybrané vhodné klíčové součástky (Nap_reference) pro PSpice.
2. Získejte katalogový list (datasheet) k vybrané klíčové součástce.
3. S modelem klíčové součástky sestavte zdroj proudu (zvolte hodnotu I_{out} mezi 5 mA a 50 mA) podle doporučeného zapojení.
4. Experiment č. 1: Změřte teplotní koeficient proudu I_{out} při zátěži $100\ \Omega$ a $V_{cc} = 5\text{ V}$. Zjistěte závislost proudu I_{out} na velikosti zátěže. Ověřte výpočtem maximální hodnotu zátěže, kterou ještě může protékat nastavený konstantní proud.
5. Experiment č. 2: Analyzujte spektrální hustotu šumového výkonu a proudu zátěží v kmitočtovém pásmu 1 Hz až 150 kHz. Zjistěte efektivní hodnotu šumového proudu v tomto frekvenčním pásmu (a srovnajte ji s velikostí pracovního proudu I_{out}).
6. Experiment č. 3: Proveďte další experiment dle vlastního uvážení.

2 Charakteristika klíčové součástky

Klíčovou součástkou je TL431 vyráběna společností Texas Instruments. Vlastnosti této komponenty jsou popsány v technickém listu vydaném firmou Texas Instruments [1].

V kapitole „Detailed Description“ této dokumentace je uvedeno ekvivalentní schéma obvodu TL431 (viz obr. 2.1). Pokud uvažíme, že vnitřní napětová reference, označena jako V_{ref} , vytváří mezi svými výstupy přesný napětový rozdíl 2,5 V (typicky 2,495 V, viz tab. 2.1), pročež jsou pro hodnoty katodového napětí platí $V_{KA} \in (2; 5; 37)$ V.



Obrázek 2.1: Ekvivalentní schéma obvodu TL431[1]

Tabulka 2.1: Specifikace maximálních operačních parametrů TL431

		MIN	MAX	jednotka
V_{KA}	katodové napětí	2,5	37	V
I_{KA}	kontinuální katodový proud	-100	150	mA
$I_{I(ref)}$	proud referenčním uzlem	-0,05	10	mA
T_J	pracovní teplotní rozsah		150	°C
T_{stg}	teploty skladování	-65	150	°C

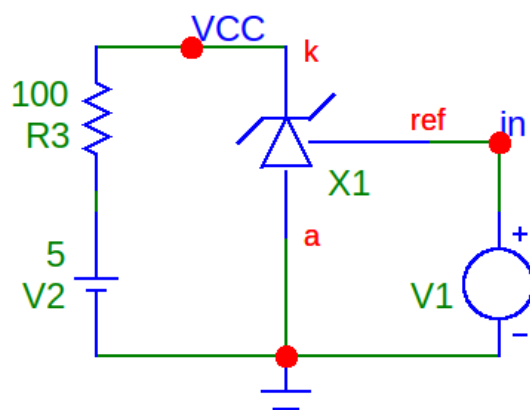
Pokud bude tedy na uzel REF přivedeno napětí větší než 2,5 V, pak se aktivuje operační zesilovač v roli komparátoru a „otevře“ bipolární tranzistor, s jehož bází je spojen. Tranzistor, jímž díky napětí na bázi teče proud mezi kolektorem a emitorem, reguluje napětí v katodovém uzlu na 2,5 V. V opačném případě je tranzistor uzavřen a k regulaci nedochází.

Je nutno poznamenat, že k regulačním procesům popsaným výše dochází pouze za předpokladu dostatečného katodového proudu, jehož minimální hodnota I_{min} je výrobcem stanovena jako 1 mA (viz tab. 2.2).

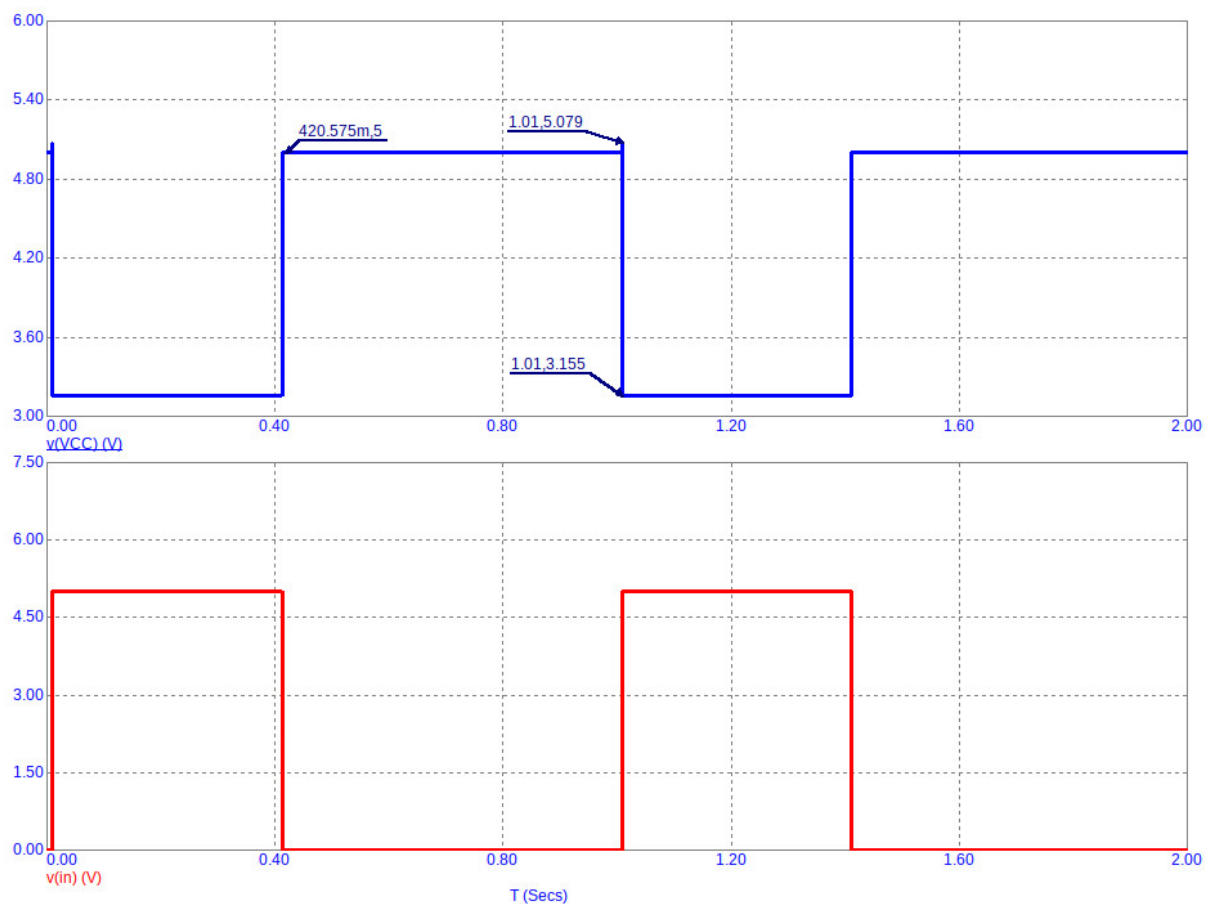
Takováto aplikace je popsána také v dokumentaci výrobce (viz kapitolu Comparator With Integrated Reference). Zároveň bylo toto zapojení ověřeno programem Micro Cap [2]. Simulované zapojení je na obr. 2.2 a výstup tranzientní analýzy v Micro-Cap je na obr. 2.3.

Tabulka 2.2: Specifikace elektrických vlastností TL431 za teploty 25 °C

	parametr	MIM	TYP	MAX	jednotka
V_{ref}	referenční napětí	2440	2495	2550	mV
I_{ref}	vstupní proud reference		2	4	μA
I_{min}	minimální katodový proud pro regulaci		0,4	1	mA

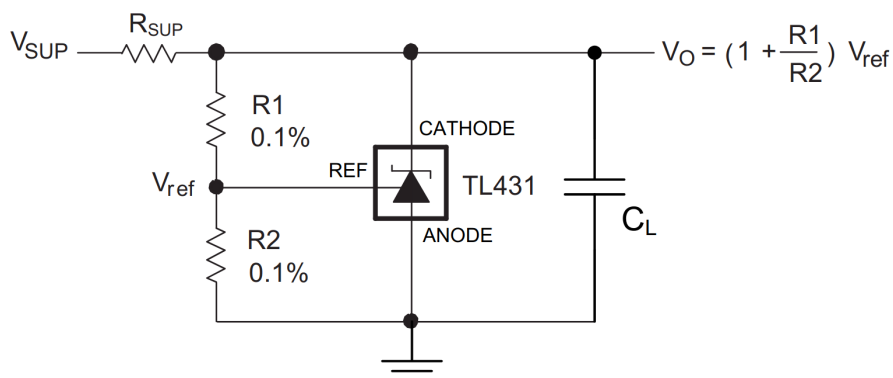


Obrázek 2.2: Zapojení TL431 jako komparátoru s integrovanou referencí pro simulaci v programu Micro-Cap [2]



Obrázek 2.3: Výstup tranzientní analýzy v programu Micro-Cap pro zapojení z obrázku 2.2 [2]

Pokud je ve zpětné vazbě z uzlu REF zapojen napěťový dělič (viz obr. 2.4), pak je možno hodnotami odporů $R1$ a $R2$ nastavit velikost výstupního, regulovaného, napětí V_O podle uvedeného vzorce: $V_O = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) V_{ref}$. [1]



Obrázek 2.4: Nastavitelný regulátor napětí s využitím TL431 [1]

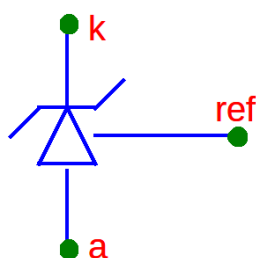
Dalšími možnými aplikacemi jsou napájecí zdroje, sledovače hladiny napětí, logika ochrany nabíjení a vybíjení pro akumulátory a další [1].

3 Rozhraní modelu klíčové součástky

Klíčovou součástkou je TL431 (viz kapitolu 2), jež je popsána ve SPICE modelu TL431.mod. Tento model byl poskytnut společností Texas Instruments, která jej uvádí na svých internetových stránkách. Podle hlavičky souboru lze stanovit datum vytvoření modelu na rok 1992 [3].

Rozhraní modelu sestává ze tří vývodů (viz obr. 3.1):

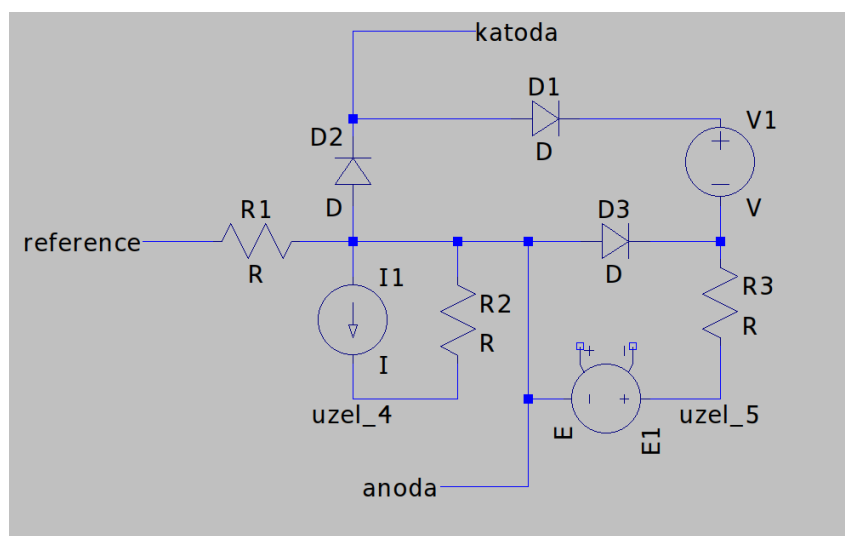
1. reference — napětí přivedeno na tento uzel je srovnáváno s vnitřní napětovou referencí TL431 o hodnotě 2,5 V,
2. anoda — zápornější elektroda (často spojena se zemí),
3. katoda — kladnější elektroda, jejím výstupem je stabilizované napětí.



Obrázek 3.1: Schematická značka modelu klíčové součástky TL431 s označenými vývody

Model je realizován za zjednodušení operačního zesilovače na závislý zdroj napětí řízený napětím, jež ovlivňuje velikost proudu tekoucí z uzlu katody do anody, a to pomocí polynomiální funkce $V(4, anod) \cdot 710 - V(ref, anod) \cdot 710 = V(5, anod)$ (viz obr. 3.2).

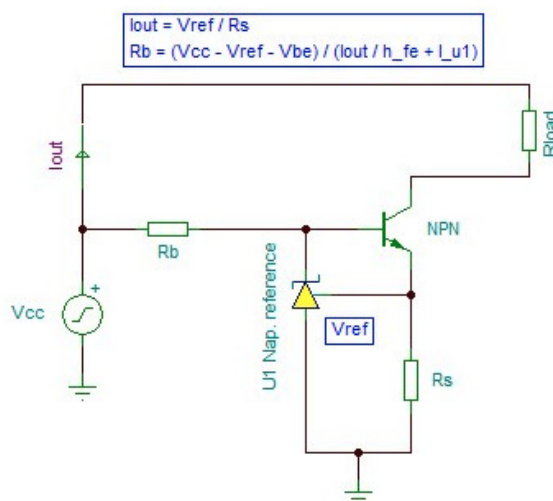
Model také zohledňuje teplotní vlivy na odpor $R2$ a sériové odpory diod. Lze ale předpokládat, že například při vysokofrekvenčních aplikacích bude vznikat chyba tohoto modelu v důsledku nedokonalého modelování vnitřních jevů operačního zesilovače.



Obrázek 3.2: Zjednodušený model TL431 ve „SPICE-like“ prostředí programu LTspice [4]

4 Simulované schéma s klíčovou součástí

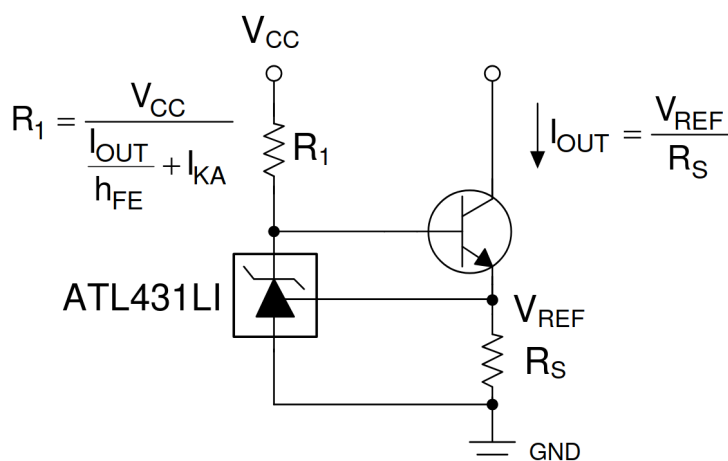
Schéma poskytnuté vyučujícím (obr. 4.1) odpovídá schématu, jež v kapitole System Examples uvádí výrobce TL431 pod názvem „Precision Constant-Current Sink“ [1, 5] (obr. 4.2).



Obrázek 4.1: Schéma doporučeného zapojení poskytnutého vyučujícím

V tomto zapojení řídí TL431 bázi bipolárního tranzistoru, čímž kontroluje proud ním protékající. Regulace proudu se dosahuje sledováním a úpravou napětí na rezistoru R_s . Protože veškerý proud zátěže I_{OUT} protéká rezistorem R_s , udržování konstantního napětí na R_s zajišťuje konstantní proud zátěží [5].

Obvod obsahuje rezistor R_1 (resp. R_b), který slouží k nastavení klidového proudu obvodu reference. Hodnota proudu protékajícího zátěží I_{OUT} je určena vztahem $I_{OUT} = \frac{V_{REF}}{R_s} \cdot [5]$.



Obrázek 4.2: Schéma doporučeného zapojení poskytnutého výrobcem, kdy může být napěťová reference ATL431LI nahrazena TL431 [1, 5]

5 Provedené experimenty

Výsledky níže popsanych výpočetních experimentů, prováděných pro zapojení popsané v kapitole 4, dle zadání poskytnutého vyučujícím (viz kapitolu 1), jsou srovnávány s údaji poskytnutými výrobcem použité součástky TL431 (viz kapitoly 2 a 3).

Všechny simulace byly prováděny v programech „Spice-like“, tedy vycházejících ze standardu Spice [6]. Konkrétně byly použity programy LTspice a PSpice (bližší informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury) [4, 7, 8].

Tyto programy pro popis zapojení využívají kódové struktury, jež je nazývána netlist. Obecný netlist simulovaného zapojení je uveden v úryvku kódu 1. Tato základní struktura byla pro každý z experimentů modifikována (především byly nastaveny odpovídající hodnoty součástek).

```

1 *** NETLIST ***
2 Vcc      in    0          {valVcc}      ;napajeci zdroj
3 Rb       in    kat       {valRb}       ;odpor pri bazi
4 Rload    in    col       {valRload}    ;zatez
5 Rs       ref   0         {valRs}       ;odpor pro regulaci
6 Xref      ref   0      kat   TL431      ;napetova reference TL431
7 Q1       col   kat   ref   Q2N2222     ;bipolarni tranzistor pro regulaci
8
9 .LIB mps.lib      ;zdrojovy kod soucastky Q1
10 .LIB tl431.mod   ;zdrojovy kod soucastky Xref

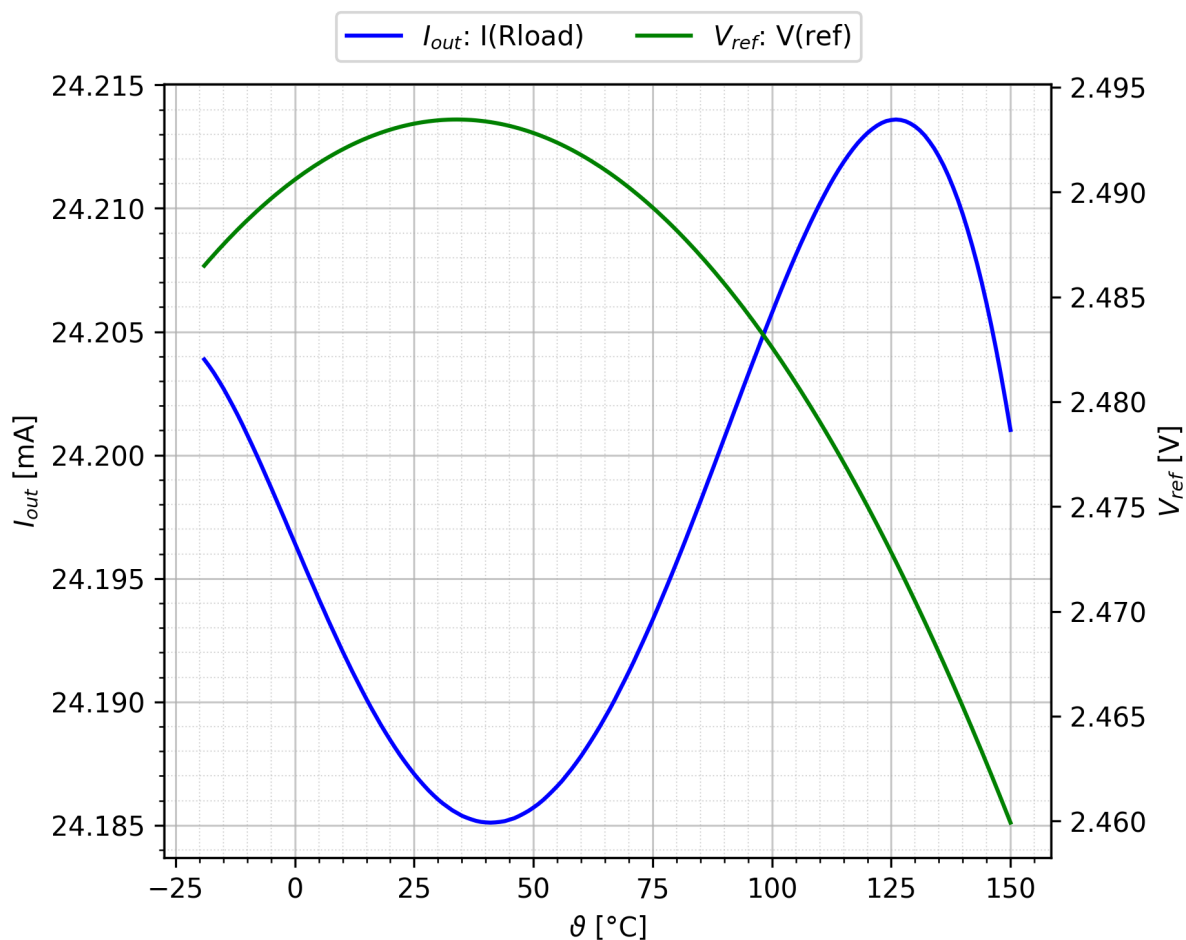
```

Úryvek kódu 1: Netlist pro zapojení popsané v kapitole 4

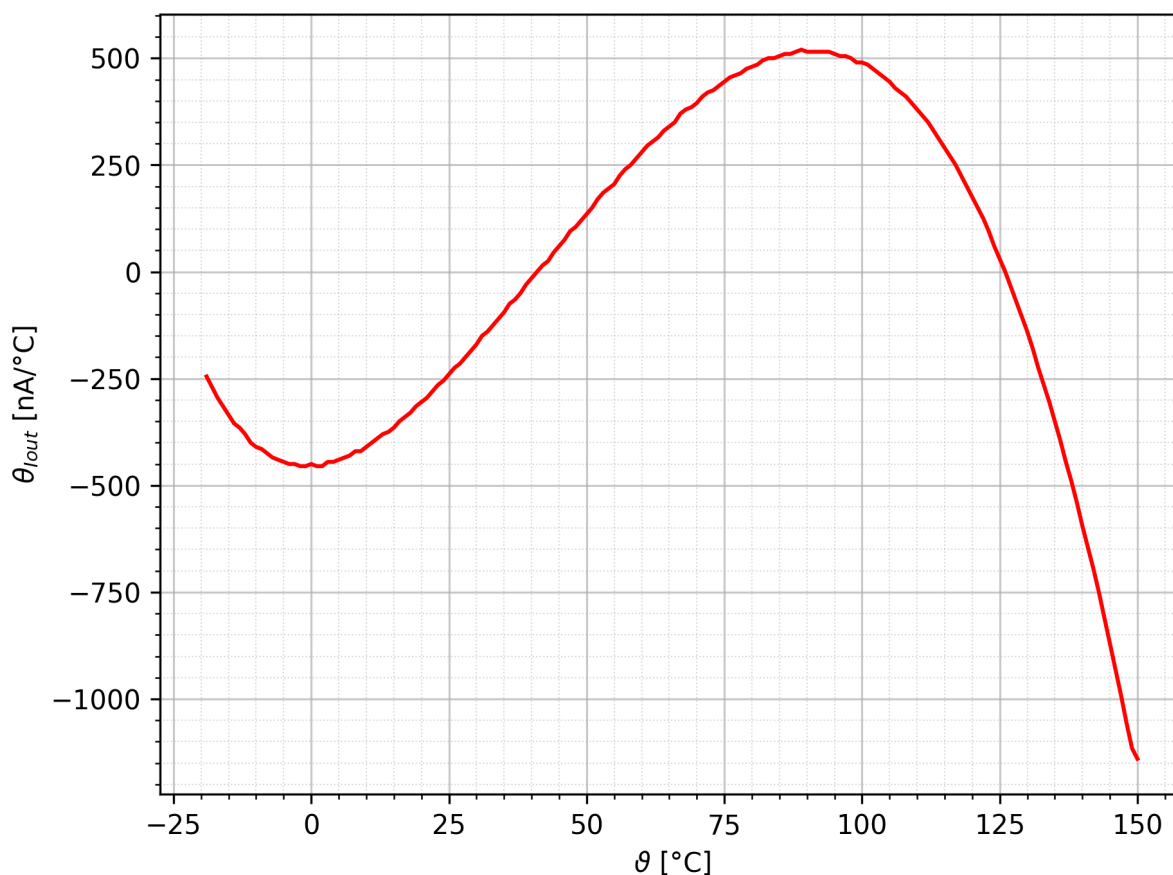
5.1 Experiment 1a: Teplotní závislost

Aby byl spočten teplotní koeficient $\theta_{I_{out}}$ byla nastavena hodnota odporu zátěže na $100\ \Omega$ a napájecí napětí bylo nastaveno na $5\ \text{V}$. Tím bylo zaručeno katodové napětí (v uzlu kat) větší než $2,5\ \text{V}$, což je podmínka pro regulaci.

Pomocí příkazu `.step temp`, tedy „kroky teploty“ byl pro jednotlivé výpočty pracovního bodu měněn parametr teploty, za níž byly parametry simulovány. Z každého z dílčích pracovních bodů byla vynesena hodnota proudu součástkou `Rload` do závislosti na obrázku 5.1. Simulace byla provedena v intervalu stanoveném výrobcem jako pracovní teplotní rozsah (viz tab. 2.1).



Obrázek 5.1: Teplotní závislost výstupního proudu při zátěži $100\ \Omega$, při napájení $5\ \text{V}$ a teplotní závislost napěťové reference LT431 simulována v programu LTspice [4]



Obrázek 5.2: Derivace závislosti 5.1 popisující teplotní závislost teplotního koeficientu θ_{Iout}

Kód, pomocí kterého byla tato simulace provedena, je shrnut v úryvku 2. Pro tuto simulaci byl použit program LTspice [4].

```

1 *** PRIKAZY ***
2 .step temp -20 150 1 ;krokovani parametru globalni teploty
3 .op                  ;vypocet pracovniho bodu (I(Rload))

```

Úryvek kódu 2: Příkazy využity v experimentu 1a

Pro stanovení koeficientu θ_{Iout} byla provedena numerická derivace knihovnou Numpy pro jazyk Python [9, 10, 11]. Jednoduchý program, který byl pro tyto účely použit je obsahem úryvku 6.

Z obrázku je patrné, že nejvyšší hodnoty dosahuje θ_{Iout} kolem 90 °C (přibližně 500 nA/°C). Odtud je možno pro odpovídající hodnotu proudu spočíst poměrný teplotní koeficient:

$$\frac{500 \cdot 10^{-9}}{24,2 \cdot 10^{-3}} \approx 20,661 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C} \quad (5.1)$$

Výrobce přitom uvádí vztah 5.2 pro teplotní koeficient napětové reference, který je přímo úměrný výše vyjádřenému koeficientu $\theta_{I_{out}}$ [1]. V tomto vztahu odpovídá veličině ΔT_A teplotní rozsah aplikace a $V_{I(dev)}$ rozdíl mezi maximální a minimální úrovní napětí na rozsahu teplot ΔT_A .

$$\alpha_{V_{ref}} = \frac{\frac{V_{I(dev)}}{V_{ref} \text{ při } 25^\circ\text{C}} \cdot 10^6}{\Delta T_A} \text{ [ppm/}^\circ\text{C]} \quad (5.2)$$

Po dosazení získáváme hodnotu:

$$\alpha_{V_{ref}} = \frac{\frac{2,4934589 - 2,4599218}{2,495} \cdot 10^6}{170} = 79,069 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

Výsledek simulace ($\approx 20,5 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$) je tedy v toleranci stanovené výrobcem [1].

5.2 Experiment 1b: Maximální hodnota zátěže

Předmětem této části experimentu bylo vyjádřit závislost výstupního proudu na velikosti zátěže a zároveň zjistit vztah pro maximální hodnotu této zátěže, při níž bude ještě probíhat regulace.

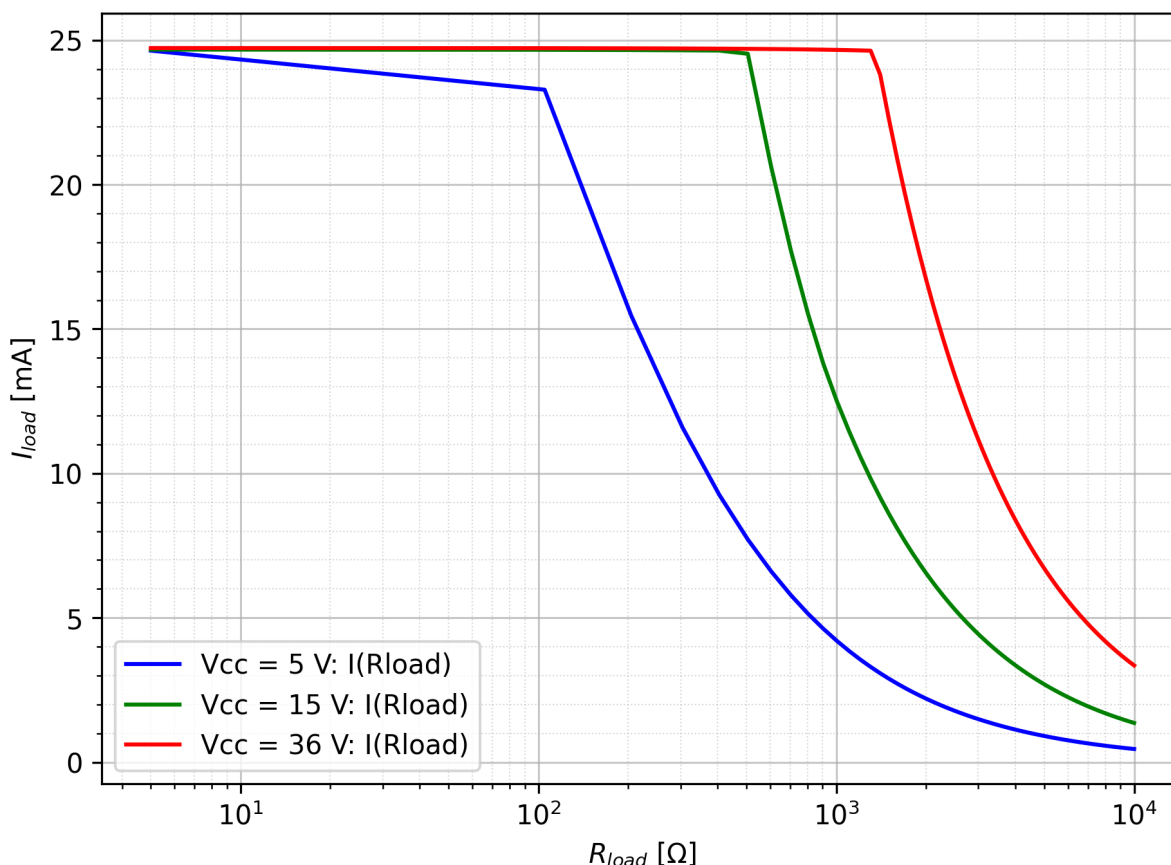
Nastavením simulačního programu LTspice byla stanovena velikost odporu R_S na $100\ \Omega$ (pro nastavení výstupního proudu na hodnotu $25\ \text{mA}$) a napětí napájecího zdroje na hodnoty $5\ \text{V}$, $15\ \text{V}$ a $36\ \text{V}$ (viz tab. 2.1), nakonec byla měněna velikost odporu R_{load} , a to mezi hodnotami $5\ \Omega$ až $10\ \text{k}\Omega$ (viz úryvek 3) [4]. Výsledek této simulace je obsahem obrázku 5.3

```

1 *** PŘÍKAZY ***
2 .op ;vypocet pracovniho bodu
3 .step param valrload 5 10k 100 ;krokovani velikosti zateze
4 .step param vccval list 5 15 36 ;krokovani hodnoty napajeni

```

Úryvek kódu 3: Příkazy využity v experimentu 1b



Obrázek 5.3: Závislost proudu zátěží na velikosti zátěže a napájecím napětí simulována v prostředí LTspice [4]

U výrazných poklesů na obrázku je patrný lineární trend hodnoty R_{load} , při níž tento zlom nastává, v závislosti na napětí V_{cc} . Z analýzy simulovaného obvodu vyplývá vztah:

$$V_{ka} = V_{CC} - R_{load}I_{out}, \quad (5.4)$$

Tabulka 5.1: Maximální hodnoty zátěže pro vybrané napájecí napětí při regulaci I_{out} na 25 mA

V _{cc} [V]	R _{load} ^{max} [Ω]
5	100,2
15	500,2
36	1340,2

kde V_{ka} je katodové napětí [12]. Po dosazení získáváme pro napájecí napětí 5 V a katodové napětí 2,495 V hodnotu R_{load}^{max} :

$$R_{load}^{max} = \frac{15 - 2,495}{25 \cdot 10^{-3}} = 500,2 \, \Omega. \quad (5.5)$$

Po dosazení pro napájecí napětí, jež byla použita při krokování v simulaci, získáváme hodnoty R_{load}^{max} odpovídající těm z grafické závislosti (tab. 5.1). Jelikož jsou tyto hodnoty charakteristické pro simulované zapojení, nelze je srovnávat s technickým listem.

5.3 Experiment 2: Šumová analýza

Pro provedení šumové analýzy byl obvod popsán v programu PSpice, jelikož oproti LTspice disponuje lepšími nástroji pro tuto analýzu [8]. Pracovní bod byl nastaven tak, aby při linearizaci obvodu v rámci AC analýzy, potřebné pro šumovou, byl tento proces proveden v oblasti regulace. Hodnota R_S byla zvolena jako 250 Ω pro výstupní proud 10 mA a napájecí napětí bylo nastaveno na 19,1 V. Celý soubor popisující obvod je shrnut v kódu 4.

```

1 * uzel 'in' byl prejmenovan na '3' z duvodu chyby .noise
2
3 *** NETLIST ***
4 Vcc      3      {VCC}      AC {VCC}
5 Rb       3      kat        1k
6 Rload    aux3   col        100
7 Rs       ref    0          250
8 Xref     ref    0      kat  TL431
9 Q1       col    kat    ref  Q2N2222
10
11 Vload 3 aux3 0
12
13 *** PRIKAZY ***
14 .lib tl431.mod
15 .lib MPS.lib
16 .param VCC = 19.1
17 .op
18 .ac dec 1000 1 150k ;ac analyza pro tisic bodu
19 .noise V(3,col) Vin
20 .probe
21 .end

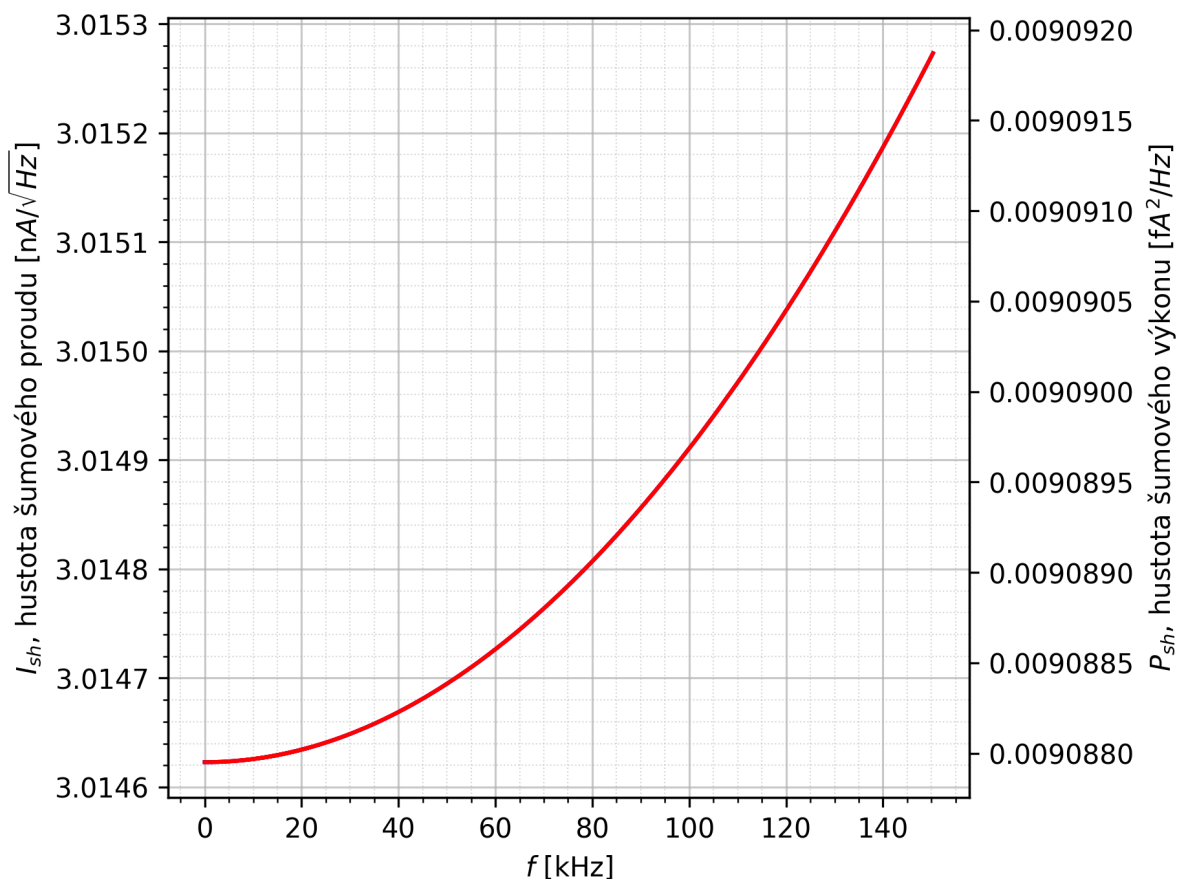
```

Úryvek kódu 4: Obsah souboru .cir pro experiment 2

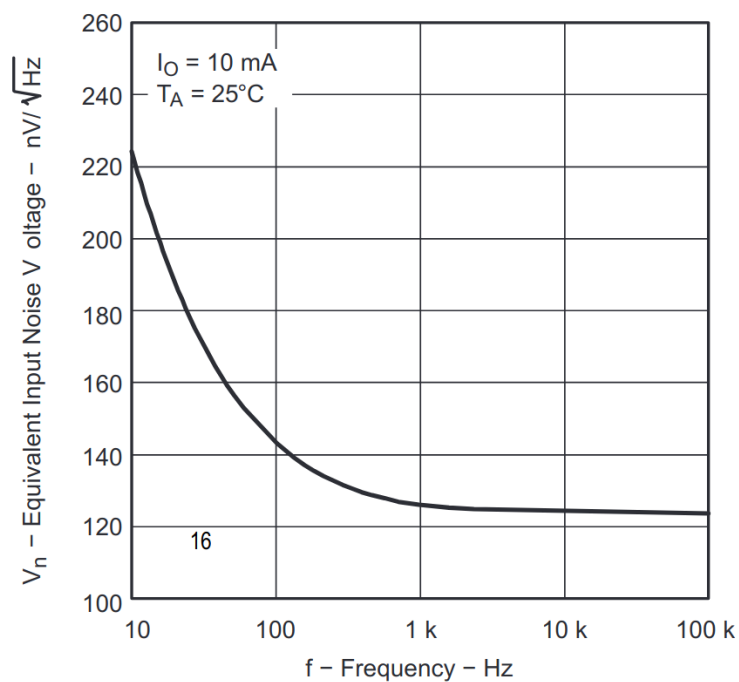
Pomocí postprocesoru .probe byly vykresleny frekvenční závislosti hustoty šumového výkonu a napětí (obr. 5.4) a také efektivní hodnota šumového proudu (obr. 5.6).

Ačkoliv je vztah mezi spektrální hustotou šumového výkonu a proudu charakterizován mocninou dvěma [13], není patrná jakákoliv transformace průběhů závislostí z obrázku 5.4. Je to z důvodu, že hodnoty obou výstupních parametrů jsou na kmitočtu v simulované oblasti téměř nezávislé, a tak se odmocnění téměř neprojeví na průběhu.

Takto konstantní průběh je překvapivý, a to především ve srovnání s průběhem, jenž popisuje výrobce (obr. 5.5). Ačkoliv se jedná o spektrální hustoty šumového napětí, měl by být průběh vycházející ze simulace totožný (je totiž normalizován na odpor 1 Ω) — přitom byly parametry pro toto měření nastaveny shodně s těmi, jež poskytl výrobce [1].

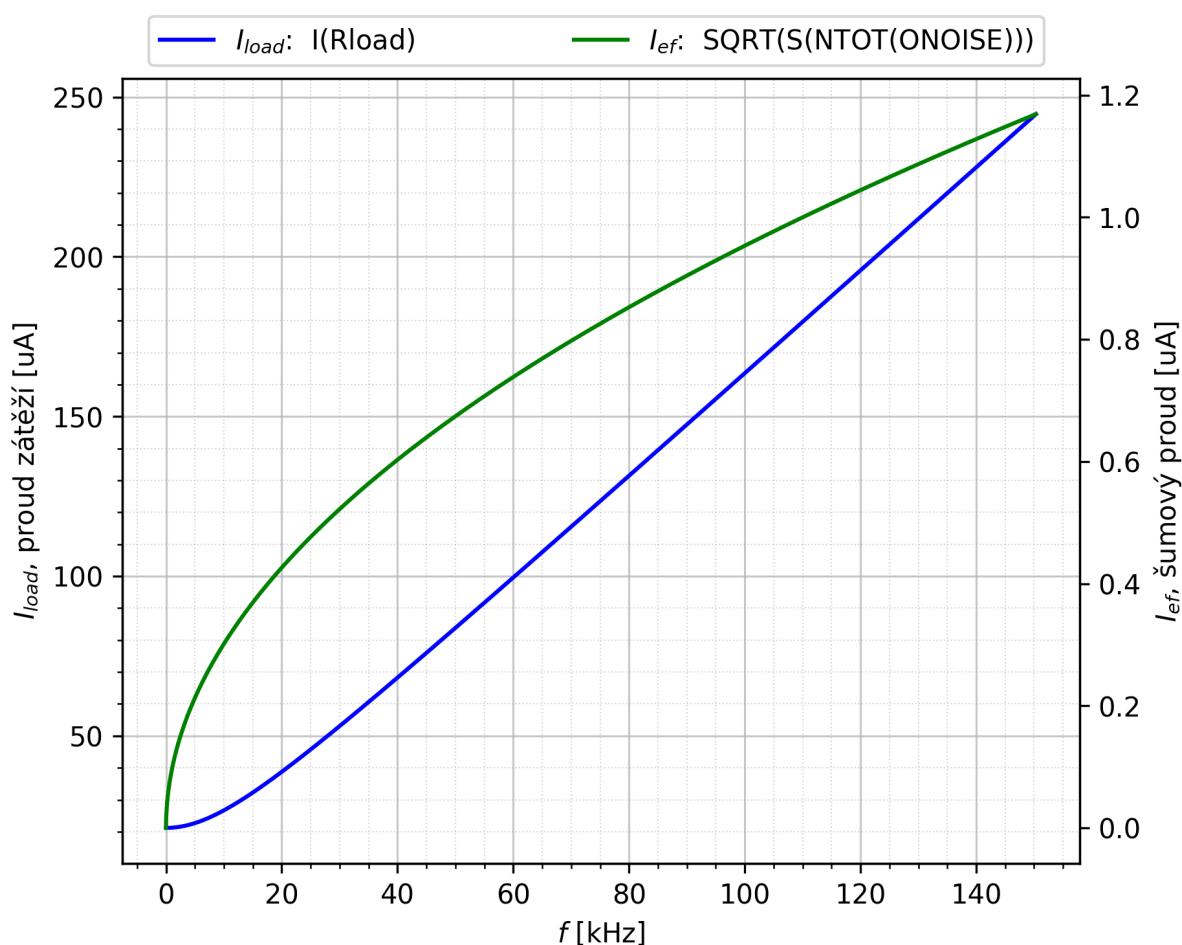


Obrázek 5.4: Kmitočtová charakteristika spektrální hustoty šumového výkonu a proudu [8]



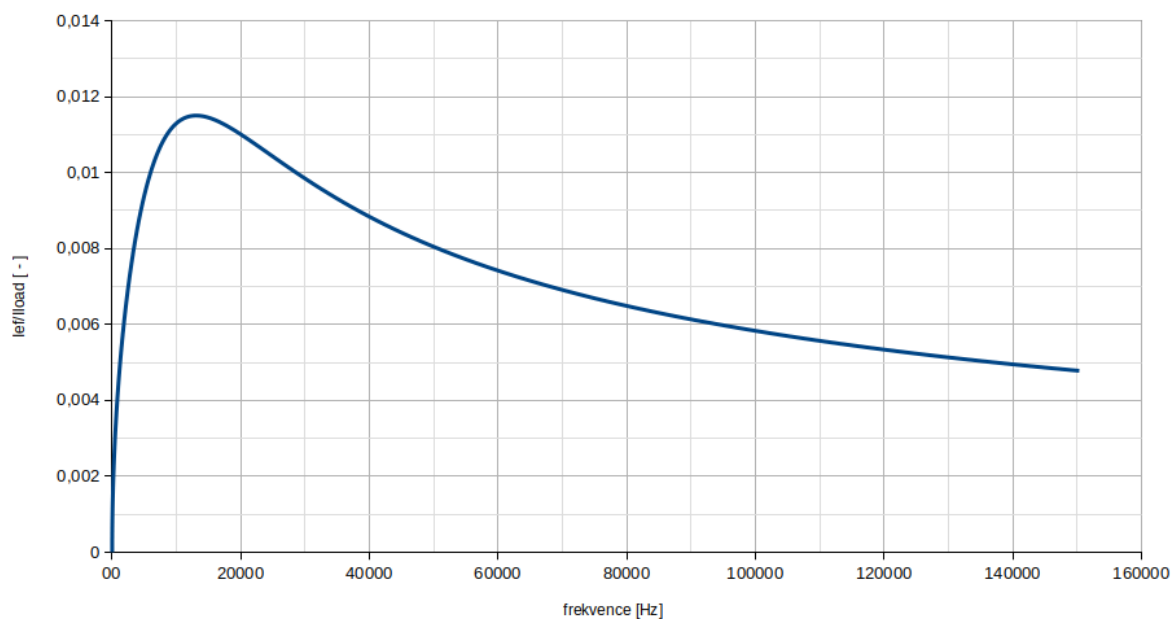
Obrázek 5.5: Kmitočtová charakteristika spektrální hustoty šumového napětí TL431 poskytnuta výrobcem [1]

Hodnota proudu zátěží se na nízkých kmitočtech blíží hodnotě $20\ \mu\text{A}$, ale již při $90\ \text{kHz}$ překračuje hranici $1\ \%$ výstupního proudu ($100\ \mu\text{A}$) a při kmitočtu $150\ \text{kHz}$ dosahuje téměř $250\ \mu\text{A}$ (tedy $2,5\ \%$). Kolem $1\ \text{kHz}$ je poměr šumového proudu ku proudu zátěží (resp. jeho citlivosti na malý signál) nejhorší (viz obr. 5.7). Přesto však dosahuje pouze $1,2\ \%$. Srovnání absolutních hodnot efektivního šumového proudu s proudem v pracovním bodě je tudíž bezpředmětné.



Obrázek 5.6: Kmitočtová charakteristika efektivní hodnoty šumového proudu ve srovnání s proudem zátěží [8]

Charakteristika spektrální hustoty šumového napětí, resp. proudu, poskytnuta výrobcem, jeví charakteristický průběh pro polovodičové součástky v důsledku přítomnosti tzv. $1/F$, neboli blikavého, šumu [13]. Protože je tato vlastnost u simulovaného průběhu nepřítomna, lze se domnívat, že se jedná o nepřesnost modelu, jež je podle rozboru kapitoly 3 sestavena za pomoci řízeného zdroje napětí, a tak mohou být některé polovodičové vlastnosti této součástky zanedbány.



Obrázek 5.7: Poměr efektivní hodnoty šumového napětí a proudu zátěží v závislosti na kmitočtu [8]

5.4 Experiment 3: Pulzní odezva

V rámci zkoumání pulzní odezvy obvodu (resp. součástky TL431, která je pro tuto funkci klíčová) byla využita transientní (neboli časová) analýza [14]. Obsah souboru .cir, jež byl pro simulaci použit je předmětem úryvku kódu 5 (napsán pro simulační prostředí PSpice [8]).

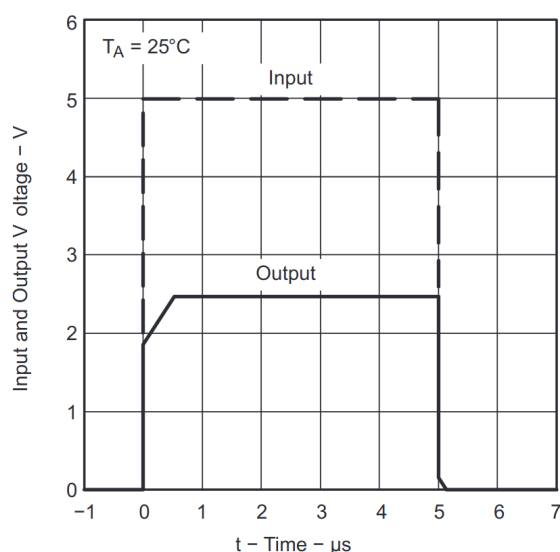
```

1 *** NETLIST ***
2 Vin      3      0      5      PULSE 0 5 1u 1f 1f 5u 10u
3 Rb       3      kat    1k
4 Rload    3      col    100
5 Rs       ref    0      100 ; Iout = Vref / Rs -> Rs = 2.5/25m
6 Xref     ref    0      kat TL431
7 Q1       col    kat    ref Q2N2222
8
9 *** PRIKAZY ***
10 .tran 8n 8u 0 10u SKIPBP
11 .lib tl431.mod
12 .lib MPS.lib
13 .probe
14 .op
15 .end

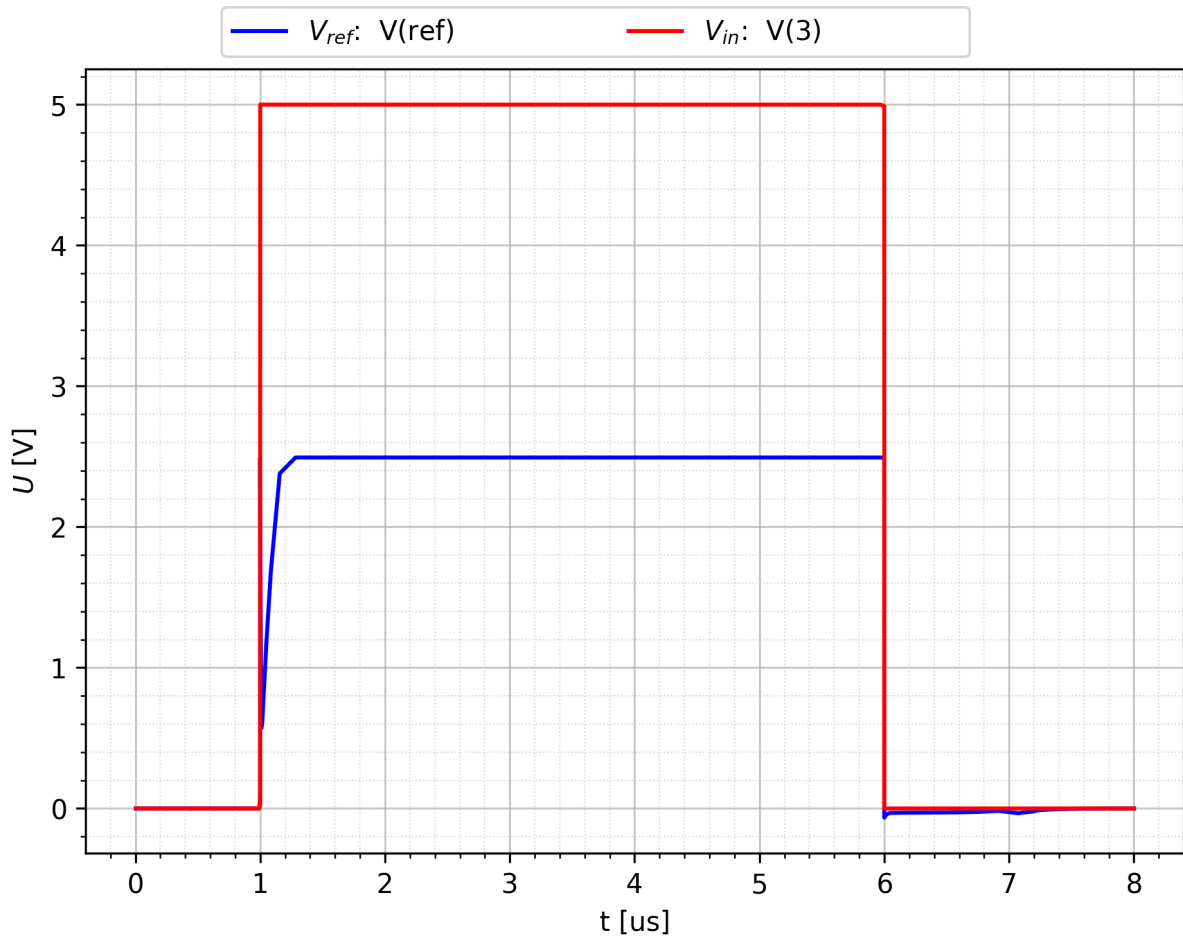
```

Úryvek kódu 5: Obsah souboru .cir pro experiment 3

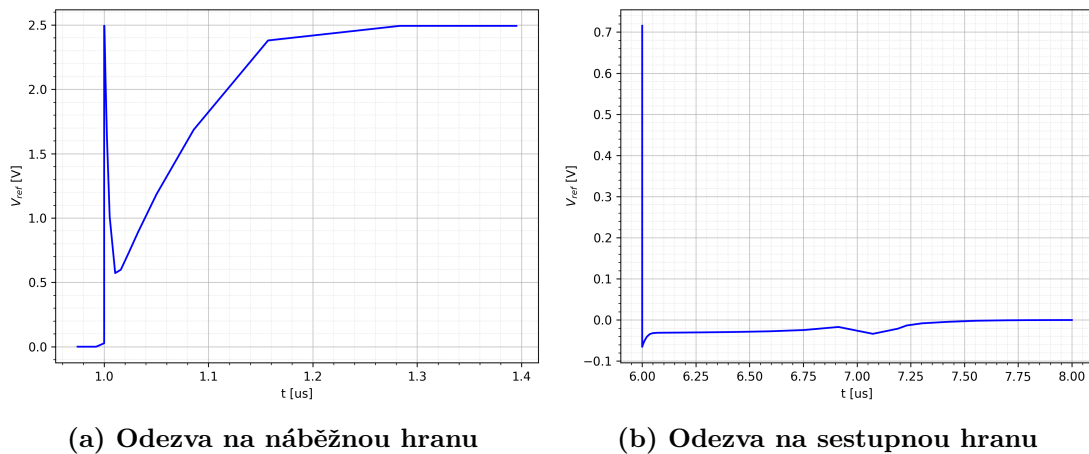
Výrobce napěťové reference sám poskytuje charakteristiku pulzní odezvy, kdy je vstupním signálem obdélníkový impuls 5 V o šířce 5 μs (viz obr. 5.8). Simulace byla těmto podmínkám nastavena co nejlépe. Jejím výstupem je potom průběh na obr. 5.9, jehož detail je na obr. 5.10.



Obrázek 5.8: Pulzní odezva součástky (referenčního napětí) TL431 poskytnuta výrobcem [1]



Obrázek 5.9: Pulzní odezva součástky (referenčního napětí) TL431 v simulovaném obvodu [8]



(a) Odezva na náběžnou hranu

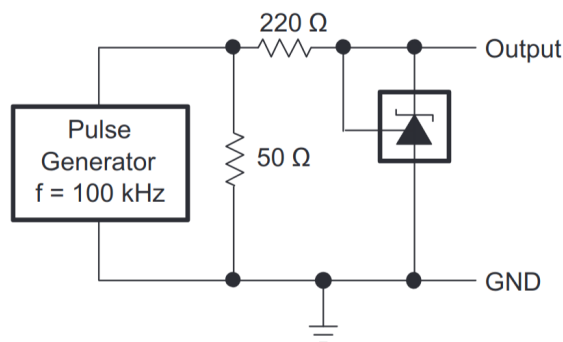
(b) Odezva na sestupnou hranu

Obrázek 5.10: Detail průběhu pulzní odezvy součástky (referenčního napětí) TL431 v simulovaném obvodu [8]

Z tohoto detailu je patrné, že se výstupní signál v reakci na náběžnou hranu ustálí již v čase ~ 350 ns, přičemž výrobce tuto hodnotu stanovuje na ~ 500 ns. Iniciální vrchol průběhu V_{ref} však výrobce neuvádí. Stejně tak není v technickém listu znázorněna ustalovací doba v reakci na sestupnou hranu, zatímco z výstupu simulace jsou patrné fluktuace ve výstupním napětí ještě celou μs po pádu vstupní sestupné hrany [1].

Důvodem těchto jevů může být zapojení, v němž byla součástka TL431 simulována, jelikož se liší od zapojení, jež pro tento experiment uvedl výrobce (obr. 5.11). Možnou příčinou prvotního vrcholu může být příliš rychlé „otevření“ tranzistoru Q1 (v technickém listu je jeho časová prodleva uvedena v řádu desítek ns, což by tomuto vrcholu odpovídalo). Dlouhá doba ustalování po sestupné hraně pak může být zapříčiněna parazitními jevy ve Spice modelu, jež charakteristika poskytnuta výrobcem nemusí uvažovat.

Důvodem, proč je v tomto experimentu analyzováno napětí V_{ref} namísto výstupního proudu je, že je výstupní proud sledované veličině přímo úměrný a navíc nám sledování V_{ref} umožňuje snazší srovnání s technickým listem.



Obrázek 5.11: Zapojení s TL431 uvedené výrobcem pro testování pulzní odezvy [1]

6 Závěr

V rámci této práce byly provedeny experimenty na zapojení programovatelného proudového zdroje s referenčním napětím. Základní funkcionalita zapojení spočívala v generování stabilního proudu řízeného vnějším napětím. Hlavním cílem experimentů bylo ověřit funkčnost zapojení, analyzovat jeho vlastnosti a zhodnotit jeho chování za různých podmínek.

Toto zapojení bylo poskytnuto vyučujícím (kapitola 1) a jako klíčová součástka byla zvolena bočníková napěťová reference LT431 od výrobce Texas Instruments [1] s odpovídajícím modelem v jazyce Spice [3]. Podrobnější rozbor součástky, jejího modelu i zadaného zapojení je obsahem kapitol 2, 3 a 4.

Samotným experimentům se pak věnuje kapitola 5, jež je rozdělena do následujících podkapitol:

1. Experiment 1a (podkapitola 5.1): simulace teplotní závislosti výstupního proudu a srovnání s údaji uvedenými výrobcem,
2. Experiment 1b (podkapitola 5.2): analýza maximální hodnoty zátěže v závislosti na parametrech zapojení (především napájecímu napětí), vyjádření analytického vztahu pro tuto závislost,
3. Experiment 2 (podkapitola 5.3): šumová analýza výstupního proudu a výkonu, srovnání s šumovými charakteristikami poskytnutými výrobcem,
4. Experiment 3 (podkapitola 5.4): srovnání simulované pulzní odezvy součástky TL431 s tou poskytnutou výrobcem.

Podrobné závěry jednotlivých experimentů jsou obsahem vlastních podkapitol.

Obecně lze ale říci, že teplotní závislost simulovaného modelu je v předpokládaných mezích. Maximální hodnota zatěžovacího odporu se chová podle vztahu 5.4, což bylo experimentálně ověřeno. Šumová charakteristika zapojení není v souladu s popisem, jež uvádí výrobce — pravděpodobně v důsledku nedokonalostí Spice modelu součástky. Srovnání pulzní odezvy obvodu vykazuje některé nesrovnalosti, které však mohou být přisouzeny vlastnostem zadaného zapojení.

Seznam použité literatury

- [1] Texas Instruments. *TL431 – Adjustable Precision Zener Shunt Regulator*. Ver. Rev. may 2024. [cit. 2025-04-24]. 2014. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>.
- [2] Spectrum Software. *Micro-Cap*. Ver. 12.2.0.5 (64 bit). [přístup 2025-04-24]. 2020.
- [3] Texas Instruments. *SPICE Model of TL431*. [cit. 2025-04-24]. 1992. URL: <https://www.ti.com/lit/zip/sloj174>.
- [4] Inc. Analog Devices. *LTspice*. Ver. 24.1.5 (x64). [přístup 2025-04-24]. 2024.
- [5] Texas Instruments. *Precision Current Sources and Sinks Using Voltage References*. Ver. Rev. june 2020. [cit. 2025-04-24]. 2014. URL: https://www.ti.com/lit/an/snoaa46/snoaa46.pdf?ts=1745477969963&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsite%252Fsearch%252Fen-us%252Fdocs%252Funiversalsearch.tsp%253FlangPref%253Den-US%2526nr%253D71586%2526searchTerm%253Dcurrent+source+high+power.
- [6] University of California. *Spice*. [cit. 2025-04-26]. URL: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/embedded/pubs/downloads/spice/>.
- [7] Inc. OrCAD. *OrCAD PSpice*. Ver. Demo Version 9.1. [přístup 2025-04-26]. 1999.
- [8] Inc. OrCAD. *PSpice AD*. Ver. OrCAD X 24.1. [přístup 2025-04-26]. 2024.
- [9] Python Software Foundation. *Python 3.12.3 Documentation*. Version 3.12.3. 2024. URL: <https://docs.python.org/3.12/>.
- [10] Charles R. Harris, K. Jarrod Millman, Stéfan J. van der Walt et al. *NumPy: Array programming for scientific computing*. Version 2.2.4. 2024. URL: <https://numpy.org/>.
- [11] The pandas development team. *pandas: Powerful Python data analysis toolkit*. Version 2.2.3. 2024. URL: <https://pandas.pydata.org/>.
- [12] Emanuel Svoboda. *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014. ISBN: 978-80-7196-438-4. URL: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:b14bcd0-1662-11e6-853f-005056827e52>.
- [13] Dalibor Biolk. *Modelování a počítačová simulace, v 2.1*. 2020.
- [14] Alexandr Krejčířík a Zdeněk Burian. *Simuluj! simulace vlastností analogových elektronických obvodů s diskrétními součástkami*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN: 80-7300-005-9.

7 Přílohy

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3
4 data = pd.read_csv('temp/1a_experiment.csv')
5
6 dx = np.gradient(data['temperature'])
7 dy = np.gradient(data['I(Rload)'])
8 derivative = dy / dx
9
10 # pridani derivace
11 data['dI_dT'] = derivative
12
13 # smazani sloupce
14 data = data.drop(columns=['I(Rload)'])
15
16 data.to_csv('temp/output.csv', index=False)

```

Úryvek kódu 6: Jednoduchý program pro numerickou derivaci dat z experimentu 5.1

```

1 *                REFERENCE
2 *                |  ANODE
3 *                |  |  CATHODE
4 *                |  |  |
5 .SUBCKT  TL431 1  2  3
6 V1  6  7  DC  1.4V
7 I1  2  4  1E-3
8 R1  1  2  1.2E6
9 R2  4  2  RMOD 2.495E3
10 R3  5  7  .2
11 D1  3  6  DMOD1
12 D2  2  3  DMOD1
13 D3  2  7  DMOD2
14 E1  5  2  POLY(2)  (4,2)  (1,2)  0  710  -710
15 .MODEL RMOD RES  (TC1=1.4E-5 TC2=-1E-6)
16 .MODEL DMOD1 D  (RS=.3)
17 .MODEL DMOD2 D  (RS=1E-6)
18 .ENDS

```

Úryvek kódu 7: Popis modelu klíčové součástky TL431 [3]


```
1 .model Q2N2222 NPN(Is=14.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=74.03 Bf=100 Ne=1.307  
2 +   Ise=14.34f Ikf=.2847 Xtb=1.5 Br=6.092 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=1  
3 +   Cjc=38p Mjc=.3416 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=126p Mje=.377 Vje=.75  
4 +   Tr=200n Tf=12n Itf=.6 Vtf=1.7 Xtf=3 Rb=10)
```

Úryvek kódu 8: Popis modelu bipolárního tranzistoru Q2N2222 poskytnutého vyučujícím