



MERAČ SATURÁCIE VÝKONOVÝCH CIEVOK

Úloha

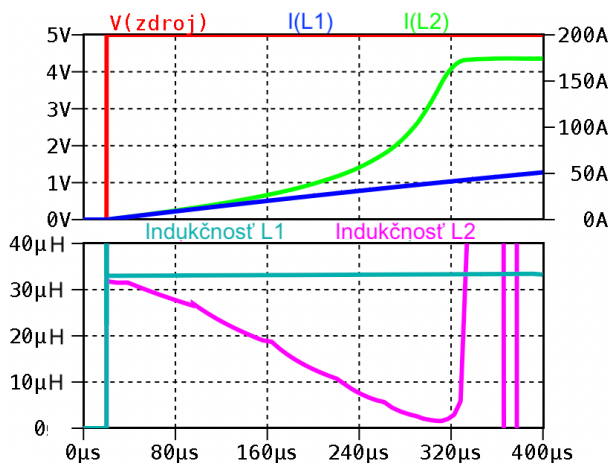
- 1) Podľa predloženej schémy zapojenia a zoznamu súčiastok navrhnete jednostranný plošný spoj.
- 2) Na centrálné úložisko nahrajte nasledovné súbory (linku pre Váš kraj nájdete na <https://cern.ch/zenit>, heslo dostanete od komisie):
 - a. Súbor s návrhom plošného spoja, z KiCad je to *.kicad_pcb. Súbor označte Vaším menom, alebo súťažným číslom
 - b. Vygenerovaný tlačový výstup (vo formáte PDF) strana plošných spojov s rozmiestnenými súčiastkami
- 3) Návrh preneste na dosku plošného spoja a plošný spoj vyrobte
- 4) Osadíte súčiastky a zapojenie oživte

Popis zapojenia

V praktickej časti ZENIT v elektronike budete stavať merač saturácie výkonových indukčností. Magnetické prvky (cievky, tlmivky, transformátory) sú základným stavebným blokom spínaných zdrojov, alebo výkonových filtrov. V týchto aplikáciách sa indukčnosti prevádzkujú s vysokým pracovným prúdom, ktorý vytvára vysoký magnetický tok v jadre a cievka často pracuje až na hranici saturácie kedy začne klesať hodnota jej indukčnosti a prudko narastajú magnetické straty. Preto je užitočné prakticky zmerať indukčnosť ako funkciu pracovného prúdu (saturačnú charakteristiku) pre konkrétne cievky, ktoré chceme použiť v obvode.

Z teórie vieme, že napätie na cievke je úmerné indukčnosti a rýchlosti zmeny prúdu cievkou, $u_L = L \Delta i_L / \Delta t$. Ak pripojíme ideálnu cievku na zdroj napätia, prúd bude narastať lineárne až kým nedosiahne hodnotu obmedzenú vnútorným odporom zdroja a odporom cievky (obr. 1, modrá krivka). Skutočná cievka s jadrom z magnetického materiálu sa bude správať inak. Na začiatku začne prúd narastať lineárne s časom, pri určitej hodnote prúdu začne jadro saturovať a indukčnosť klesať. Z dôvodu znižujúcej sa indukčnosti začne prúd stúpať čoraz rýchlejšie (exponenciálne) až kým nedosiahne maximálnu hodnotu definovanú odporom zdroja a cievky (obr. 1, zelená krivka). Okamžitú hodnotu indukčnosti je potom možné vypočítať zo vzťahu $L = u_L / (\Delta i_L / \Delta t)$, priebeh pre ideálnu cievku je na spodnom obrázku (tyrkysová krivka) a pre saturujúcu cievku (magentová krivka). Prístroj, ktorý idete stavať používa presne túto metódu na meranie indukčnosti ako funkcie pretekajúceho prúdu. Na osciloskop pripojíte napäťový a prúdový výstup obvodu. V najjednoduchšom prípade sledujete priebeh prúdu cievkou ako funkciu času a hľadáte kedy sa nárast zmení z lineárneho na exponenciálny. Číslicové osciloskopy ale umožňujú uložiť namerané priebehy, takže viete krivky spracovať na počítači, alebo moderné osciloskopy umožňujú dáta spracovať priamo na osciloskope (funkcia Math a pod.), čím získate priebehy ako na obr. 1.

Obvod je napájaný zo zdroja napätia 12-15 V, maximálny odber prúdu 1 A. Potenciometrom RV1 sa nastavuje skúšobné napätie. Veľkosťou skúšobného napätia sa riadi ako rýchlo bude narastať prúd testovanou cievkou. Cez rezistor R5 sa pomaly nabije kondenzátorová banka C4-C5-C6. Meraná indukčnosť sa pripojí do svoriek



Obr. 1: Priebehy napätia a prúdu ideálnou a skutočnou cievkou (hore) a vypočítaná hodnota indukčnosti (dole)



J1. Zopnutím tranzistora Q2 sa meraná cievka pripojí ku zdroju napätia (C4-C5-C6) a začne prechodový dej. Kondenzátory aj MOSFET majú veľmi nízky vnútorný odpor, preto pri správnom návrhu plošného spoja dokážete dosiahnuť testovací prúd až 100 A čo je veľmi užitočné pre výkonové cievky a tlmivky.

Doba zopnutia sa riadi astabilným multivibrátorom okolo obvodu U1. Tento generuje obdĺžnikový priebeh s frekvenciou cca. 1 Hz a veľmi nízkou striedou, cca. 1:1000. V čase keď má na výstupe log. 0 je tranzistor Q2 vypnutý a nabíjajú sa kondenzátory. Po preklopení do log. 1 sa na niekoľko desiatok mikrosekúnd zopne tranzistor Q2 a prebehne meranie. Maximálny prúd meranou indukčnosťou sa riadi dobou trvania zopnutia Q2, ktorá sa ovláda potenciometrom RV2. Čím dlhšie je zopnutý Q2, tým dlhší je prechodový dej a

Prúd meranou indukčnosťou sa sníma na bočníku R7, hodnota je vybraná pre vysoké meracie prúdy (do 100 A). Po ukončení pulzu sa energia uložená v meranej cievke spotrebuje v komutačnej dióde D3.

Obvod vyznačený hrubou čiarou v schéme musí byť navrhnutý pre veľmi vysoký prúd (spomínaných 100 A), použite široké vodiče, alebo polygóny, súčiastky umiestnite fyzicky veľmi blízko vedľa seba, aby pretekajúci impulzný prúd videl čo najmenšiu slučku.

Na testovacie očka TP3 až TP7 pripojíte osciloskop. Vzhľadom na zapojenie bočníka voči bodu kam sa pripája zem osciloskopu je vhodné invertovať polaritu kanála, ktorý meria prúd. Osciloskop je možné spúšťať nábežnou hranou na výstupe TP6, alebo na základe merania prúdu. Zem osciloskopu je obvyčajne spojená s PE v zásuvke. Výstupná svorka „Osciloskop GND“ testera ale nemá rovnaký potenciál ako záporný pól vstupného napájacieho napätia, napájací zdroj by preto mal byť plávajúci voči PE.

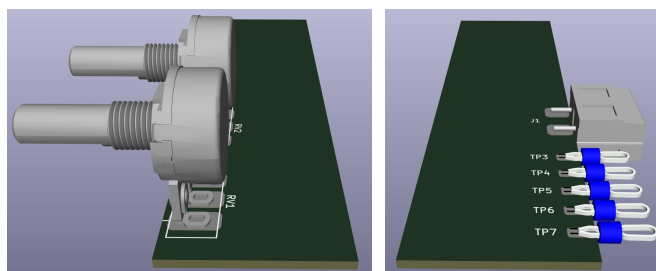
Zapojenie bolo navrhnuté pre testovanie cievok s indukčnosťou v ráde jednotiek až desiatok μH , s testovacím prúdom do 100 A. Merací rozsah sa dá veľmi jednoducho upraviť podľa potrieb používateľa. Vyššie hodnoty indukčnosti vyžadujú dlhší testovací impulz, nižšie hodnoty prúdu zvýšenie odporu meracieho bočníka, prípadne zníženie kapacity kondenzátorovej banky, nižšie hodnoty indukčnosti a vysoké prúdy zase zvýšenie kapacity banky. Keď rozumiete ako zapojenie funguje, nie je problém ho upraviť.

Návrh plošného spoja

Správny návrh plošného spoja je kritický pre elektrickú funkciu obvodu – pracujete s veľmi vysokým impulzným prúdom. Rozmiestnenie ovládacích prvkov a pripojovacích bodov je zase dôležité pre ergonómiu používateľa. Doporučené umiestnenie ovládacích prvkov aj konektorov je na niektorej hrane dosky, viď. obrázok 2. Môžete ich samozrejme umiestniť kam uznáte za vhodné a spôsobom aký uznáte za vhodný...

Návrh plošného spoja sa musí vojsť na jednostrannú dosku veľkosti maximálne 75 mm x 100 mm.

Plošný spoj navrhujte spojmi o minimálnej šírke 0,6 mm, podobná je aj minimálna šírka medzery. Pre veľmi krátke spoje je limit výrobitel'nosti fotocestou cca. 0,4 mm, užšie spoje nepoužívajte. Okrem časti s vysokým prúdom (hrubé vodiče v schéme), nepoužívajte polygóny. V prípade potreby použite drôtové prepajky.



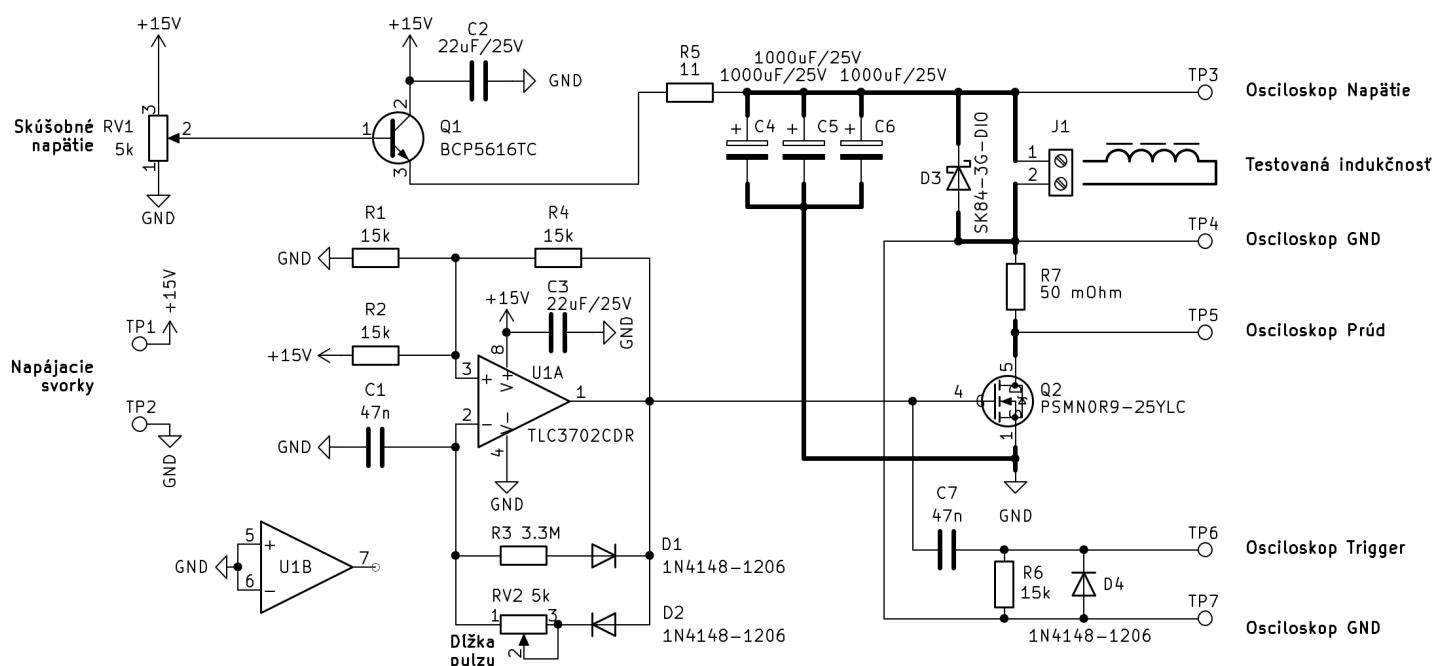
Obr. 2: Príklad umiestnenia ovládacích prvkov a konektorov na hranách dosky

Dosky sa nevrtajú, všetky súčiastky, prepajky, kondenzátory C4-C5-C6, potenciometre aj konektory sú osadené na vrchnej strane.

Použitie Autoroutra nie je povolené!

Kompaktné návrhy, zohľadňujúce charakter prístroja a ergonómiu používania budú hodnotené vyšším počtom bodov ako rozmerné, rozťahané, neorganizované motívy.

Schéma zapojenia



Obr. 3: Schéma zapojenia merača volt-ampérových charakteristík

Zoznam súčiastok

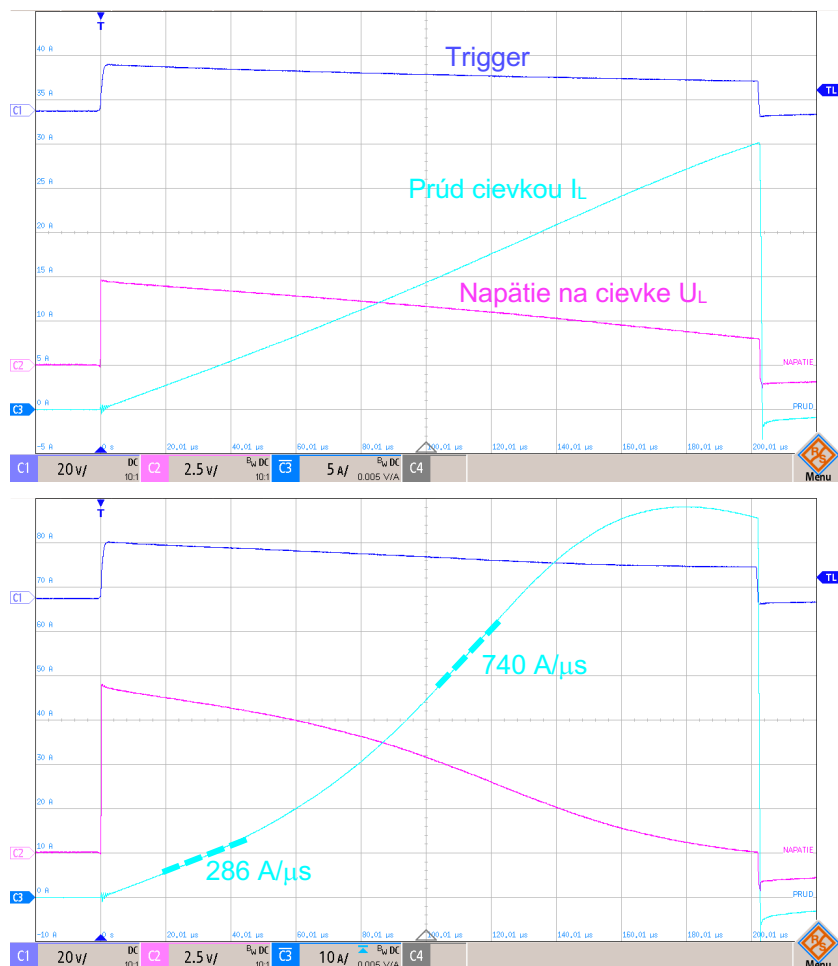
Počet	Súčiastka	Hodnota	Poznámka
2	C1,C7	47n	Keramický kondenzátor, veľkosť 1206 (menší)
2	C2,C3	22uF/25V	Keramický kondenzátor, veľkosť 1210 (väčší)
3	C4,C5,C6	1000uF/25V	Prispájkovať s čo najkratšími vývodmi na stranu súčiastok bez vŕtania
3	D1,D2,D4	1N4148-1206	Katóda označená prúžkom
1	D3	SK84-3G-DIO	Katóda označená prúžkom
1	J1	DG300-7.5-2P11	
1	Q1	BCP5616TC	
1	Q2	PSMN0R9-25YLC	Vysoký prúd, veľkú plochu riadne prispájkovať! Pozor na skrat veľkého padu pod púzdom!
4	R1,R2,R4,R6	15k	Rezistor 1206
1	R3	3.3M	Rezistor 1206
1	R5	11	Rezistor 1206
1	R7	50 mOhm	Bočník, veľkosť 2512
2	RV1,RV2	5k	Potenciometer
3	TP3,TP5,TP6,	Spájkovacia pružinka	biela
2	TP4, TP7	Spájkovacia pružinka	modrá
1	U1	TLC3702CDR	

Autori:

Ing. Peter Adamec, Adam Lassak, Ing. Jaromír Sukuba, Ing. Juraj Tvarožek, doc. Ing. Daniel Valúch, PhD.
 Kontakt: daniel.valuch@cern.ch

Príloha: Interpretácia a spracovanie nameraných dát z osciloskopu

Z priebehov napätia na cievke a prúdu pretekajúceho cievkou vieme určiť parametre meranej cievky. Využijeme vzťah $u_L = L \Delta i_L / \Delta t$ a z neho odvodený $L = u_L / (\Delta i_L / \Delta t)$. Typický priebeh je zachytený na obrázku 3. Prúd cievkou z počiatku narastá lineárne s časom, cievka zatiaľ nesaturuje a jej indukčnosť je konštantná. Nad určitou hodnotou prúdu sa nárast zrýchľuje, indukčnosť cievky sa z dôvodu saturácie stále znižuje, až kým nedosiahneme maximum kedy prúd už ďalej nenarastá, lebo všetka energia uložená v kondenzátorovej banke bola vyčerpaná.



Obr. 3: Osciloskopom namerané priebehy. Hore cievka budená nižším prúdom, ktorý narastá lineárne a cievka nesaturuje. Dole budená vysokým prúdom, od cca. 30 A sa nárast zrýchľuje a cievka saturuje.

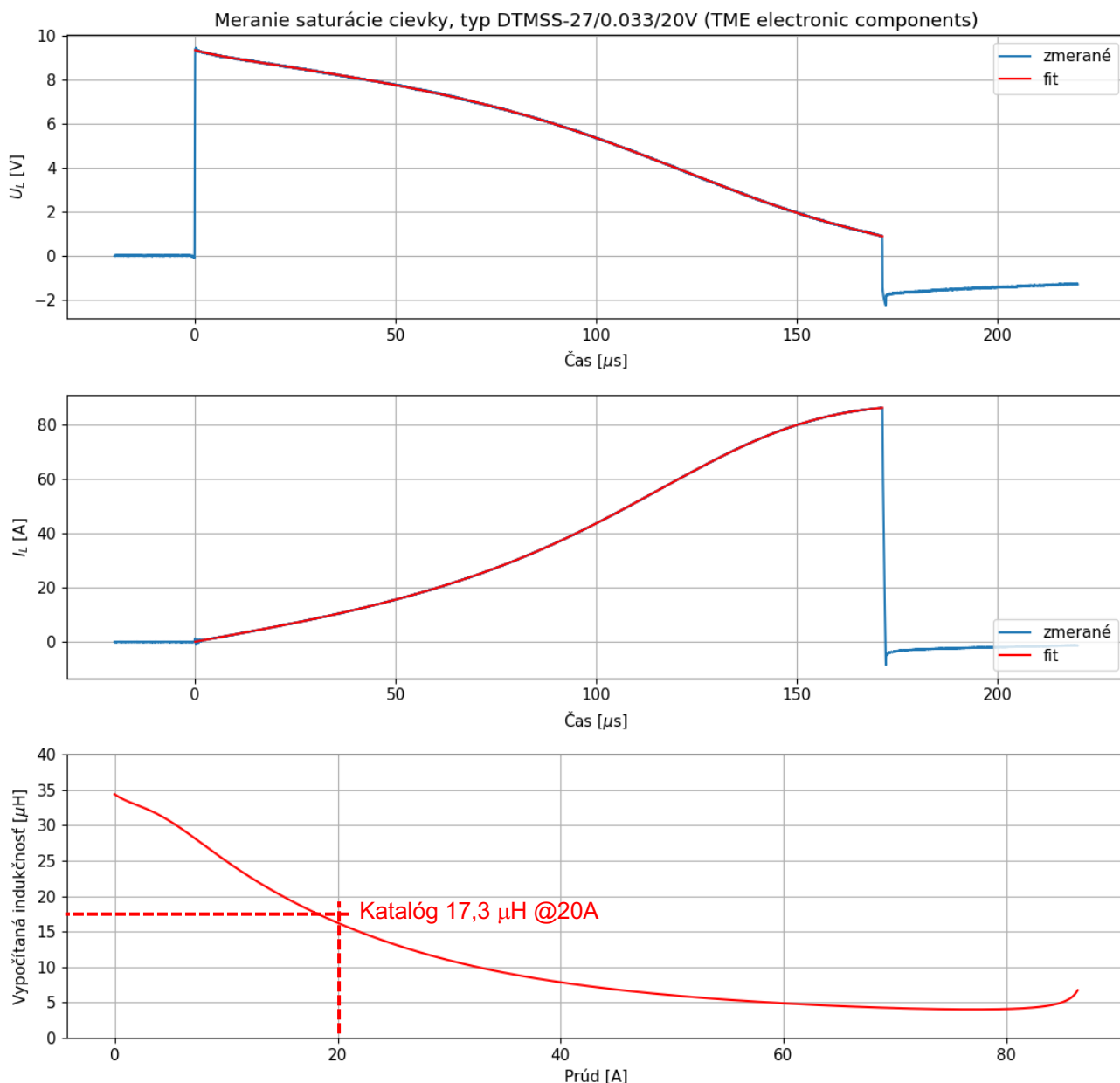
Ak chceme len veľmi rýchlo zmerať hodnotu prúdu, pri ktorom začne cievka saturovať, jednoducho nastavíme testovacie napätie (RV1) a dĺžku testovacieho pulzu (RV2) tak, aby bol nárast prúdu lineárny. Bod v ktorom sa rýchlosť nárastu prúdu začne zvyšovať je bod, kedy cievka začína saturovať.

Vďaka moderným číslicovým osciloskopom ale vieme z nameraného priebehu získať oveľa viac informácií. Ak si namerané krivky uložíme do textového súboru, alebo priamo prečítame z osciloskopu napr. cez ethernetové rozhranie, vieme ich podrobne analyzovať.

Pripravili sme pre Vás skript v jazyku Python, ktorý vypočíta a vykreslí hodnotu indukčnosti ako funkciu pretekajúceho prúdu. Vstupné dáta sú tri krivky z osciloskopu – čas, trigger, napätie U_L a prúd cievkou I_L . Náš osciloskop umožňuje priamo zadať citlivosť sondy vo voltoch na ampér, takže krivka je priamo v ampéroch. Ak to Váš osciloskop neumožňuje a čítate napätie, stačí ho podľa Ohmovho zákona predeliť hodnotou bočníka $R = 50 \text{ m}\Omega$.

Namerané priebehy z osciloskopu sú ako všetky reálne merania zaťažené šumom, preto sme pre ľahkú čitateľnosť do programu doplnili funkciu, ktorá cez namerané priebehy preloží polynóm 9. rádu, čím získame „bezšumové“ dáta. Až na ne potom aplikujeme vzťah $L = u_L / (\Delta i_L / \Delta t)$ a vykreslíme priebeh indukčnosti ako funkciu prúdu. Skript si stiahnete zo stránky odkiaľ si sťahujete zadania.

Výsledok merania a výpočtu je vynesý v grafoch na obr. 4. Porovnanie s dátovým listom na obr. 5.



Obr. 4: Spracovanie nameraných dát skriptom a výsledná indukčnosť ako funkcia prúdu cievkou

ELECTRICAL PROPERTIES:

Part number	L_{max} [μH]	I_{max} [A]	$L@I_{max}$ [μH]	RDC [Ω]	Δt [°C]
DTMSS-27/0,033/20	33	20,0	17,3	0,0072	38,8



DTMSS-27/0.033/20V

Tlmička: drôtový; THT; 33μH; 20A; 7,2mΩ

Označenie výrobcu: [DTMSS-27/0.033/20-V](#)

Výrobca: [FERDYSTER](#)

Množstvo
[ks]

Cena bez DPH
[EUR/ks]

1+	3.83
5+	3.37
25+	3.20
100+	2.99

[Zobraziť podrobnosti o cenách](#)

113 ks v sklade

[Skontrolovať dodanie](#)

Počet kusov
(Mnohonásobnosť: 1)

-

1

+

Obr. 5: Výňatok z katalógového listu meranej cievky