

V. KRUML - M. ŠTEFL

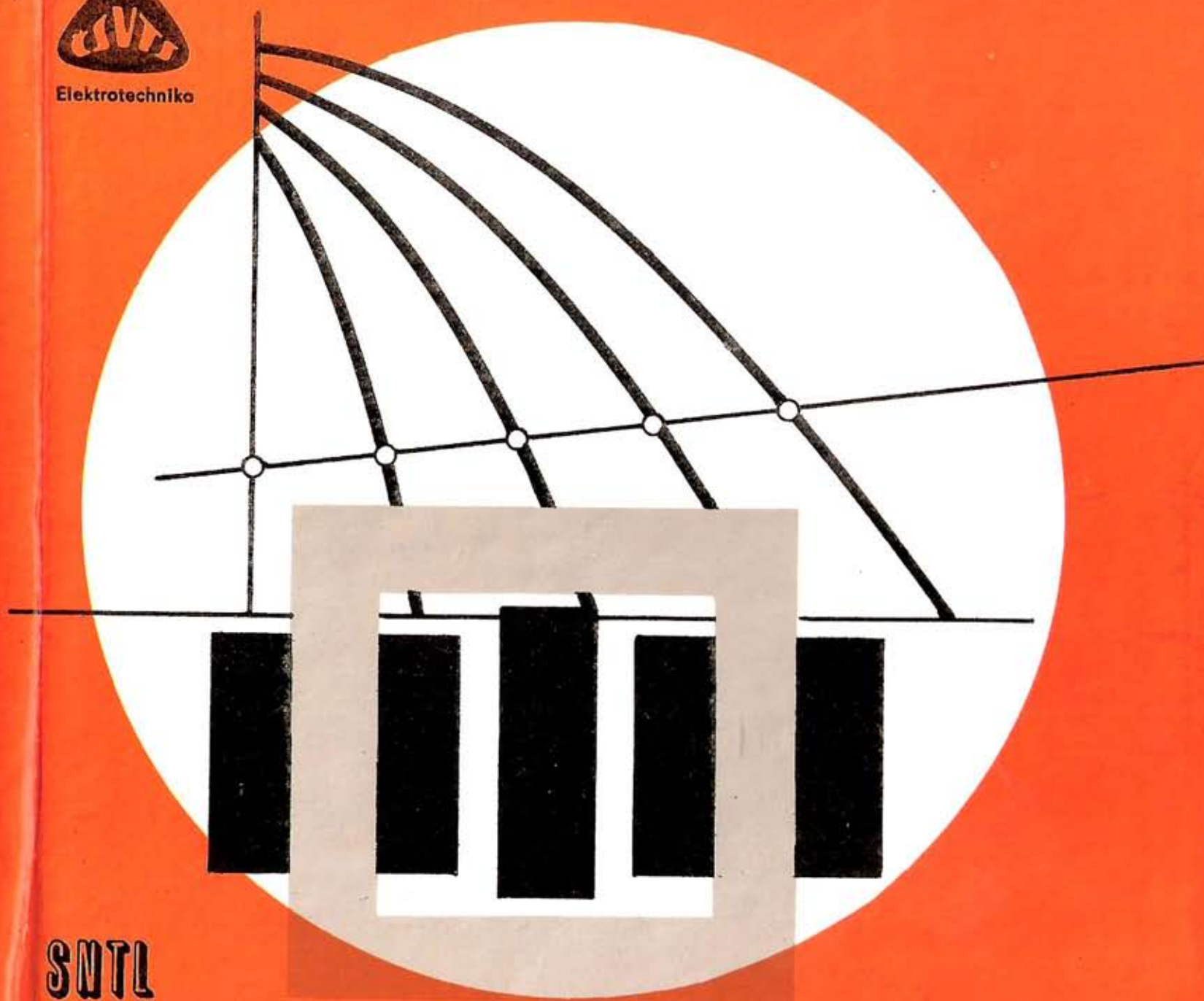


75

Transformátory pro obloukové svařování



Elektrotechnika



SNTL



75

VINCENC KRUML, MILAN ŠTEFL

**TRANSFORMÁTORY
PRO OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ**

SNTL

Ing. Vincenc Kruml, Ing. Milan Štefl

Transformátory pro obloukové svařování

Třetí, upravené vydání

PRAHA 1985

SNTL — NAKLADATELSTVÍ
TECHNICKÉ LITERATURY

V publikaci je nejdříve stručně vysvětlen význam obloukového svařování a základní pojmy z teorie svařovacího oblouku včetně otázek stability svařovacího oblouku a zdrojů proudu. Těžiště knihy leží v části, ve které jsou probrány všechny druhy ovládání výstupního proudu svařovacích transformátorů, způsoby výpočtu a příklady návrhu a konstrukce svařovacích transformátorů. Závěr knihy je věnován praktickým radám, bezpečnosti a ukázkám některých transformátorů starší a nové koncepce.

Knihy je určena technikům, konstruktérům, elektromontérům, údržbářům a širokému okruhu zájemců o konstrukci a návrh svařovacích transformátorů a jejich použití v praxi.

Lektor: Ing. Josef Pomikálek

Redakce elektrotechnické literatury

Hlavní redaktor Ing. Josef Říha

Odpovědný redaktor Ing. Rostislav Zeman

© Ing. Vincenc Kruml, Ing. Milan Štefl, 1985

Obsah

Předmluva	8
1. Úvod	9
1.1. Stručná historie obloukového svařování	9
1.2. Svařovací transformátory v ČSSR	10
1.3. Svařování střídavým proudem v zahraničí	11
1.4. Základní pojmy svařovací techniky	14
1.5. Porovnání různých druhů svářeček	19
1.6. Krátký přehled o stavu obloukového svařování střídavým proudem v ČSSR	19
2. Nástin fyzikální teorie svařovacího oblouku	32
2.1. Vznik elektrického oblouku	32
2.2. Fyzikální děje ve svařovacím oblouku	34
2.3. Statické charakteristiky svařovacího oblouku	37
2.4. Přenos kovu	38
2.5. Zvláštnosti oblouku napájeného střídavým proudem	42
2.6. Ruční elektrody, tavidlo a ochranné plyny z hlediska obloukového svařování střídavým proudem	45
3. Stabilita svařovacího oblouku a požadavky na zdroj střídavého proudu	48
3.1. Statická stabilita oblouku a požadavky na statické charakteristiky zdroje	48
3.2. Samoregulace obvodu „oblouk—zdroj“	51
3.3. Dynamické vlastnosti svářeček, zvláště svařovacích transformátorů	53
3.4. Opatření pro zlepšení stability střídavého svařovacího oblouku	57
3.5. Stručné základy automatické regulace svařovacího procesu	59
3.6. Dálková nastavování statických charakteristik svařovacích transformátorů	62
3.7. Samočinné odpínání napětí naprázdno	63
3.8. Účinnost a účinník svařovacího transformátoru	64
3.9. Kompenzace účiníku	65
3.10. Nerovnoměrné zatížení sítě	68
3.11. Vícemístné svařování	69
3.12. Vícefázové svařování	70
4. Principy ovládání svařovacích transformátorů	73
4.1. Transformátor s tlumivkou magneticky oddělenou od transformátoru	74
a) Tlumivka s přepínáním počtu závitů	74
b) Tlumivka se změnou velikosti vzduchové mezery	75
c) Transduktor	76
d) Úsporný transformátor—transduktor	81
4.2. Transformátor s tlumivkou magneticky spojenou s jádrem transformátoru	82
a) Přepínání počtu závitů tlumivky	84

	b) Změna velikosti vzduchové mezery tlumivky	85
4.3.	Rozptylové transformátory s přepínáním počtu závitů	86
4.4.	Transformátory s posuvnými cívkami	87
4.5.	Transformátory s magnetickým bočником	89
	a) Transformátory s pohyblivým bočником	90
	b) Transformátory se stejnosměrnou magnetizací magnetického boč- níku	90
4.6.	Transformátory s jinými způsoby ovládání rozptylu	92
4.7.	Transformátory s kombinací způsobů ovládání	93
4.8.	Transformátory s tyristorovou regulací svařovacího proudu	93
5.	Způsoby výpočtu svařovacích transformátorů	96
5.1.	Některé základní zákony magnetismu	97
	a) Magnetické účinky elektrického proudu	97
	b) Faradayův indukční zákon	100
	c) Vlastní a vzájemná indukčnost	101
	d) Feromagnetické obvody	105
5.2.	Princip transformátoru a základní rovnice pro výpočet	106
5.3.	Statické a dynamické charakteristiky transformátoru	112
	a) Statické charakteristiky transformátoru	113
	b) Dynamické charakteristiky transformátoru	116
	Zkrat z chodu naprázdno	117
	Zkrat ze zatížení odporem	119
	c) Připojení nezatíženého transformátoru na síť	119
5.4.	Proud transformátoru naprázdno	121
	a) Jalová složka proudu naprázdno	121
	b) Činná složka proudu naprázdno a ztráty v železe	122
5.5.	Ztráty a účinnost transformátoru	123
5.6.	Oteplení	126
5.7.	Volba průřezu jádra	128
5.8.	Výpočet rozptylových reaktancí	130
	a) Transformátor s válcovým souosým vinutím a s deskovým vinu- tím	136
	b) Transformátor se vstupním a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra	133
	c) Transformátor s pohyblivým magnetickým bočником	137
	d) Transformátor s posuvnými cívkami	140
	e) Příklady výpočtu rozptylových reaktancí	144
5.9.	Výpočet tlumivky	148
5.10.	Výpočet transformátoru se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočníku	152
5.11.	Připojení usměrňovače k transformátoru a výpočet vyhlazovací tlu- mivky	156
6.	Příklady návrhu svařovacích transformátorů	161
6.1.	Všeobecné údaje pro konstrukci	161
	a) Jádro transformátoru	162
	b) Vinutí a izolace	165
	c) Stahovací konstrukce a kryt	166
	d) Pomocné funkce	168
	e) Druh ochrany před nebezpečným dotykem	169
	f) Omezení rušení rozhlasového příjmu	169
6.2.	Příklad návrhu transformátoru se vstupním vinutím a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra	170

6.3.	Příklad návrhu transformátoru s posuvnými cívkami	177
6.4.	Transformátor plášťového typu s přepínáním počtu závitů	188
7.	Zkoušení svařovacích transformátorů a transformátorků	190
7.1.	Svařovací vlastnosti svařovacího transformátoru	191
7.2.	Kontroly, měření a zkoušky z hlediska bezpečnosti	200
8.	Pokyny pro použití	202
8.1.	Vybavení pracoviště	203
8.2.	Přídavné materiály pro obloukové svařování	203
8.3.	Zapalování a udržování stabilního oblouku	205
8.4.	Paralelní chod svařovacích transformátorů	207
8.5.	Bludné proudy	208
8.6.	Údržba a opravy svařovacích transformátorů	209
9.	Bezpečnost při svařování	211
10.	Starší a nové svařovací transformátorky a transformátory vyrobené v ČSSR	215
11.	Nové směry ve vývoji obloukových svařovacích transformátorů	233
	Literatura	236
	Rejstřík	242

Předmluva

Pro velký zájem o tuto publikaci a především proto, aby se dále rozšířilo používání obloukových svařovacích transformátorů, předkládáme čtenářům toto třetí, upravené vydání.

Vzhledem k jednoduchosti konstrukce uvedených transformátorů, k nízké pořizovací ceně a především k úspoře elektrické energie při jejich provozu se v závodech v ČSSR v širším měřítku zavádí svařování střídavým proudem, a to nejen automatické obloukové svařování, které má více než třicetiletou tradici, ale také svařování ručními elektrodami.

Předkládaná kniha v kapitolách 1 až 3 stručně pojednává o výhodách a nevýhodách různých druhů svářeček, o přenosu kovu v oblouku, o druzích ochrany svařovacího oblouku a o jejich vlivu na koncepci svařovacího transformátoru, dále o statických a dynamických charakteristikách a jejich způsobu nastavení, o účinnosti, účinníku a jeho kompenzaci a o možnosti zmenšit nerovnoměrnost zatížení sítě.

V kapitolách 4 až 6 jsou popsány všechny nejznámější principy ovládání svařovacích transformátorů, jejich výhody a nevýhody i z hlediska svařovacích vlastností, dále jsou uvedeny výpočty a příklady návrhu svařovacích transformátorů, transformátorků a tlumivek, jsou vysvětleny druhy ochrany před nebezpečným dotykem a jsou uvedena opatření pro zmenšení rádiového rušení.

V kapitolách 7 až 9 se popisují nezbytné zkoušky svařovacích transformátorů u výrobce, příprava nutná před uvedením transformátoru do chodu a dále údržba, opravy a požadavky na bezpečnost při vlastním svařování.

Kapitola 10 uvádí přehled některých dříve vyráběných a všech nyní v ČSSR vyráběných svařovacích transformátorů, z nichž nejnovější typy mají složitější konstrukci — používají totiž elektroniku.

Kapitola 11 pojednává o nových směrech ve vývoji obloukových svařovacích transformátorů s využitím silnoproudé i slaboproudé elektroniky.

V tomto vydání se používá nové normalizované názvosloví a přihlíží se i ke všem technickým změnám uvedeným v přepracovaných nebo nových čs. normách.

Je naší milou povinností poděkovat na tomto místě lektorovi Ing. J. Pomikálkovi, dále Ing. A. Svítlovi a J. Šafránkovi za cenné podněty k úpravě tohoto vydání. Současně patří dík vedoucím činitelům koncernových podniků MEZ Brumov a ZEZ Hořice, výrobnímu družstvu Elektrov Znojmo a také finské firmě Kemppi za poskytnutí podkladů a za svolení k uveřejnění údajů o jejich výrobcích.

Autoři

1. Úvod

Svařovací transformátory jako zdroje pro obloukové svařování (zvláště ručními elektrodami) byly a jsou dosud v průmyslových závodech v ČSSR neprávem opomíjeny. V zahraničí je tomu naopak, v některých zemích je dokonce v provozu 90 % svařovacích transformátorů a pouze 10 % svářeček na stejnosměrný proud.

Svařovací transformátor klasické konstrukce, který je ve světě nejvíce rozšířen, je jednoduchý, lehký a málo hlučný zdroj s velkou účinností při zatížení a s malou spotřebou elektrické energie při chodu naprázdno. Je provozně spolehlivý a levný. Jeho nevýhody lze většinou kompenzovat. V porovnání se stejnosměrným obloukem jsou poměry ve střídavém svařovacím oblouku poněkud odlišné, jsou složitější a to je nutné respektovat.

Předkládaná knížka má za úkol vysvětlit zvláštnosti střídavého svařovacího oblouku širšímu okruhu zájemců, seznámit je s výpočtem, návrhem a zkouškami svařovacích transformátorů a uvést směrnice pro výhodné a bezpečné použití zařízení na obloukové svařování střídavým proudem. To má přispět především ke zmenšení hlučnosti v pracovním prostředí, k úspoře elektrické energie a aktivního a konstrukčního materiálu na výrobu svářeček atd., to znamená má přispět k uplatnění racionalizace a ke zvýšení efektivity ve výrobě.

1.1. STRUČNÁ HISTORIE OBLOUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

Svařovací oblouk je elektrický oblouk vzniklý při výboji v plynu. Výboj v plynu popsal jako první Franklin, který jej v r. 1750 objevil v blesku. V r. 1803 uvedl ve své knize stať o elektrickém oblouku Petrov [1], [2]. Nezávisle na něm uveřejnil v r. 1808 popis elektrického oblouku Davy [3]. Tento oblouk s netavicí se uhlíkovou elektrodou poprvé použil ke svařování Benardos v Rusku v r. 1885. Tavicí se elektrodou začal v Rusku svařovat Slavjanov v r. 1892. Oba vynálezci patentovali nesčetná použití i v mnoha zemích západní Evropy. Tavné obloukové svařování se rozvinulo i v USA. Po první světové válce se rozšířilo do všech průmyslově vyspělých zemí, zvláště po zavedení obalených elektrod, které patentoval v r. 1908 Kjellberg.

Zpočátku se používaly stejnosměrné zdroje svařovacího proudu a baterie a dynamy s rezistory a později se přešlo k používání speciálních svařovacích dynam, vyráběných dodnes. V padesátých letech se místo

dynam pomalu začaly používat polovodičové usměrňovače, které jsou nyní osazovány již nejmodernějšími polovodičovými součástkami, integrovanými obvody, diodami a tyristory.

Střídavý proud byl znám už od třicátých let minulého století, ale první transformátor s uzavřeným magnetickým obvodem sestrojili až v roce 1894 Hopkinsové [4]. Po zvládnutí hospodárního přenosu elektrické energie střídavým proudem se uvažovalo o jeho použití pro tavné obloukové svařování.

Plné uplatnění našly svařovací transformátory asi v roce 1930, po zavedení jakostních elektrod s kyselým obalem (později s rutilovým obalem, nyní i s bazickým obalem, upraveným na střídavý proud). V posledních patnácti letech se používají při svařování vysokovýkonnými a gravitačními elektrodami.

Po roce 1930 [5] se začalo zavádět svařování v inertních ochranných plynech (nyní WIG — nebo TIG v USA; Wolfram Inert Gas, Tungsten Inert Gas), kdy se ke svařování hliníku, jeho slitin a jiných kovů používal pouze střídavý proud. Tento způsob se uplatňuje dosud.

V letech druhé světové války se v průmyslu zavedlo svařování pod tavidlem (v SSSR a USA), a to automatické a poloautomatické. Při něm se uplatnily svařovací transformátory vzhledem k některým ekonomickým výhodám a také proto, že odstranily foukání oblouku, které působí obtíže při stejnosměrném proudu nad 800 A a při velkých svařovacích rychlostech.

1.2. SVAŘOVACÍ TRANSFORMÁTORY V ČSSR

V Československu vyráběly obloukové svařovací transformátory některé závody již před druhou světovou válkou a asi do roku 1948. Tyto transformátory se používaly v malých dílnách a na podřadnější práce. Přídavným materiálem byly kyselé elektrody. V průmyslu se tyto transformátory příliš neuplatnily. Tam již převládal stejnosměrný svařovací proud z dynam svařovacích soustrojí. Poslední z nich byly Triodyn RK 320 a K 220 (od poloviny sedmdesátých let se vyrábějí pouze na export).

Po znárodnění čs. průmyslu se začaly vyvíjet a vyrábět svařovací transformátory pro ruční a pak pro automatické obloukové svařování v k. p. MEZ Brumov a později v k. p. ZEZ Hořice. V současnosti se v ZEZ Hořice vyrábí pouze transformátor TSM 1000 pro svařování pod tavidlem a svařovací souprava MA 315 pro metodu WIG. K. p. MEZ Brumov dodává pro ruční svařování transformátor WT 315 střední velikosti a transformátorek RTB-3. Na výstavě Welding 82 předvedl k. p. BEZ Bratislava transformátor pro ruční svařování BEZKA 160, vybavený tyristory. Týž podnik zavedl do výroby transformátor pro automatické svařování ZZS 1250. Od poloviny šedesátých let dodává

výrobní družstvo Elektrokov Znojmo transformátorky řady JS-90 pro ruční svařování. Jsou to typy JS-90 Standard a JS-90 F Triumf a typ JS-90 FN Combi s vývodem pro nabíjení akumulátorových baterií na 6 V a 12 V.

Podrobnější údaje o některých čs. svařovacích transformátorech starší produkce a o všech nových svařovacích transformátorech, s uvedením jejich schémat, statických charakteristik a fotografií, podává kapitola 10.

1.3. SVAŘOVÁNÍ STŘÍDAVÝM PROUDEM V ZAHRANIČÍ

V evropských zemích se již několik desetiletí převážně používají svařovací transformátory např. v SSSR, Anglii, Francii, NSR, Belgii, Norsku, Švýcarsku, Španělsku, v jiných světadílech především v Japonsku. Je pozoruhodné, že ve Švédsku, v zemi s převážným používáním stejnosměrného proudu ke svařování, odkud byla do Československa v r. 1948 převzata výroba bazických elektrod na stejnosměrný proud [6], se v r. 1968 např. v loděnicích svařovalo téměř výhradně vysokovýkonnými elektrodami, které byly napájeny svařovacími transformátory do 600 A.

Porovnání výroby obloukových svařovacích transformátorů ve světě s ostatními druhy svářeček od r. 1958 je v tab. 1 [7]. Částečný přehled o výrobě stejnosměrných svářeček a svařovacích transformátorů v některých zemích a v ČSSR dává tab. 2 [8], [93], [104].

V minulých letech bylo v některých zemích vyrobeno značné množství svařovacích transformátorů, např. v Japonsku 152 000 kusů v roce 1970, v USA 269 600 kusů v roce 1973, v NSR 21 790 kusů s příkonem do 4 kV. A a 13 570 kusů s příkonem nad 4 kV. A v roce 1974.

V údajích ze SSSR byla uvedena procenta uplatnění jednotlivých druhů svářeček pouze pro ruční svařování. V r. 1966 tam bylo vyrobeno kolem 50 000 transformátorů typu TS 500 (v r. 1972 ve dvou

Tab. 1. Index světové výroby svářeček (rok 1958 je 100 %)

Rok	Stejnosemné točivé svářečky	Svařovací usměrňovače	Svařovací transformátory
1958	100	100	100
1960	117	200	140
1962	134	275	150
1964	154	275	187
1966	180	316	214

Tab. 2. Roční výroba svářeček

Druh svářeček	SSSR	USA	NSR	Japonsko	Francie	ČSSR
	r. 1968	1973	1976	1976	1969	1981
	%	%	mil. DM	ks	%	ks
Stejnosemné točivé	47	31	7,9	15 600	5	pro domácí trh 0
Usměrňovače	8	37	16,4	14 400	50	8 500
Transformá- tory	45	32	44,3	72 700	45	velké 120
						střední 810
						malé 14 100

Poznámka: V NSR bylo ke konci roku 1971 [34] v průmyslu 560 000 obloukových svářeček, z toho: točivých stejnosměrných 18,5 %, usměrňovačů 14,5 %, transformátorů 66,0 %, ostatních 1,0 %.

podnicích asi 60 000 týchž transformátorů s označením TD 500) s posuvnými cívkami, na proud 500 A při zatěžiteli 60 %, s rozsahem proudu 40 A až 800 A a 25 000 transformátorů typu STS 500 s magnetickým bočníkem. Pro vysokovýkonné elektrody měl tento transformátor napětí naprázdno 80 V. Transformátory byly tak levné a spolehlivé, že se nevyplácelo je opravovat. Byly bez ventilátoru a měly hliníkové vinutí s měděnými vývody spojovanými tlakovým svařováním zastudena [9].

Zemí, kde převládají obloukové svařovací transformátory, je dnes Japonsko. V r. 1969 prý vyráběla jediná firma Osaka Transformer Ltd. 5000 transformátorů měsíčně, což představovalo 35 % výroby v zemi [10]. Např. v moderní loděnici v Yokohamě u firmy Nippon Kokan K. K. [13] se v roce 1970 používalo

pro ruční svařování	1825 transformátorů 500 a 300 A
pro gravitační svařování	260 transformátorů 500 A
pro svařování pod tavidlem	
v tandemovaném uspořádání	
svařovacích hlav	64 transformátorů 1500 a 2000 A
pro svařování metodou WIG	1 transformátor 500 A
pro přivařování svorníků	2 transformátory 300 A
pro jeřábová svařovací	6 transformátorů 1500 A
zařízení	16 transformátorů 1000 A

V celé loděnici pracovalo pouze 14 svařovacích zařízení na stejnosměrný proud, z čehož 10 bylo elektrostruskových, s proudem 800 A.

Japonské transformátory pro ruční svařování mají magnetický bočník a dodávají se alternativně s dálkovým nastavováním proudu, se zařízením pro snížení napětí naprázdno do uzavřených prostor nebo s kompenzačními kondenzátory. Používají se v posledních několika letech nejen k napájení gravitačních elektrod, ale i k napájení svařovací trubičky podávané do místa svařování poloautomaticky bez ochranné atmosféry. Obě metody jsou zajímavé jednoduchostí a velkou efektivností.

Gravitační svařovací zařízení může mít hmotnost např. 6,6 kg až 7,5 kg. Skládá se ze šikmo opřené tyče, na níž volně klouže vodičko držáku obalené elektrody s délkou 700 mm až 900 mm. Měděný svařovací vodič k držáku má průřez 50 mm². Svářeč po vložení elektrody do držáku zapálí oblouk a elektroda samočinně uhořívá, až oblouk zhasne. Elektrody mají průměr 5 mm až 8 mm a jsou napájeny střídavým proudem z transformátorů do 500 A. Jeden méně zkušený svářeč může obsluhovat čtyři až šest zařízení. S výhodou lze tento způsob používat při koutovém svařování.

Poloautomatické svařování trubičkou plněnou tavidlem má rovněž své výhody [11], [12]. Dobu svařování lze zkrátit na 30 % doby ručního svařování. Spotřeba přídavného materiálu se zmenší až o 30 % v porovnání s ručním svařováním. Není nutná ochranná atmosféra (např. CO₂) a metodu lze bez obtíží použít na venkovních montážích, neboť svařovací proces není citlivý na účinky větru. Pro napájení se používají běžné svařovací transformátory do 600 A. Trubička má průměr 1,6 mm až 3,2 mm a je podávána ze svazků poloautomaty, jejichž podavače mají automatickou regulaci na konstantní napětí oblouku systémem Ward Leonard.

Vodorovně shora se např. svařuje trubičkou s průměrem 3,2 mm při proudech od 100 do 600 A, v polohách vodorovně na svislé stěně se používá proud 100 až 500 A, na svislé stěně vertikálně se svařuje při proudech od 100 do 200 A, nad hlavou při proudech od 100 do 300 A při svařovacích napětích od 24 do 30 V. Dosahuje se tedy velké operativnosti, velké elektrické účinnosti a dobrých technologických vlastností, např. rázové houževnatosti. Tyto vlastnosti lze různě upravovat složením tavidla; přenos kovu je bezzkratový, a tedy bez rozstříku, což je velká přednost tohoto procesu např. v porovnání se svařováním plným drátem v CO₂, kde je nutné pro napájení používat speciální stejnosměrnou svářečku s plochými statickými charakteristikami (s konstantním napětím).

V ostatních průmyslově vyspělých státech se pro napájení svařovací trubičky používají svařovací usměrňovače s plochými statickými charakteristikami jako pro klasické svařování v CO₂. Tato metoda se používá jak s ochrannou atmosférou, tak bez ní a v ČSSR se v posledních letech začíná také uplatňovat [94].

Další v cizině rozšířený způsob svařování, který používá obloukové svařovací transformátory, je svařování lehkých kovů a jejich slitin metodou WIG ([30], [31], [74], [92], [106] a dokumentační záznamy v [91]).

Strídavým proudem se tam svařují také tlusté plechy pod tavidlem do úzké spáry (viz kap. 11 a [107]).

1.4. ZÁKLADNÍ POJMY SVAŘOVACÍ TECHNIKY

Při návrhu, vývoji a zkoušení stroje se v ČSSR řídí výrobce československými státními normami (ČSN), které vydává Úřad pro normalizaci a měření (ÚNM) v Praze. Normy jsou většinou závazné. Pro konkrétní stroj vypracuje výrobce technické podmínky (TP) a návod k obsluze a údržbě, který je povinen dodat se strojem zákazníkovi. V této dokumentaci a v normách se používají pojmy a definice, jejichž význam musí zákazník — uživatel stroje znát, aby správně pochopil funkci a zvládl obsluhu při zachování bezpečnosti a aby se také mohl bránit nekvalitní dodávce od výrobce.

Obloukových svařovacích transformátorů se týkají tyto normy:

- | | |
|-------------|---|
| ČSN 05 2205 | Obloukové svářečky (kmenová norma), 1977. |
| ČSN 05 2210 | Obloukové svařovací transformátory, 1978 a 1981. |
| ČSN 05 2211 | Zváracie transformátorčeky na oblúkové zváranie, 1976. |
| ČSN 05 0630 | Bezpečnostní ustanovení pro svařování elektrickým obloukem, 1979. |
| ČSN 05 0002 | Zváranie a naváranie elektrickým oblúkom a elektrotroskove. Základné pojmy, 1973. |

Základní pojmy

(Další důležité pojmy najde čtenář v uvedených normách a ve svářečských a elektrotechnických příručkách.)

Obloukový svařovací transformátor — transformátor tvořící s ovládacími, regulačními a signalizačními prvky napájecí jednotku vhodnou pro obloukové svařování střídavým proudem.

Obloukový svařovací transformátorek — malý jednofázový transformátor s nejvyšším zdánlivým příkonem 6,3 kV . A při jmenovitém vstupním napětí 1×380 V, 50 Hz nebo s nejvyšším zdánlivým příkonem do 4,2 kV . A při 1×220 V, 50 Hz, upravený pro napájení svařovacího oblouku. Zpravidla se vyrábí jako přenosný. S kompenzačním kondenzátorem může být navržen na větší svařovací proud než bez kompenzace.

Statická charakteristika — závislost výstupního napětí U_2 svářečky (měřeného na výstupních svorkách) na svařovacím (výstupním) proudu I_2 v ustáleném stavu při určitém nastavení ovládače. Vyjadřuje se graficky.

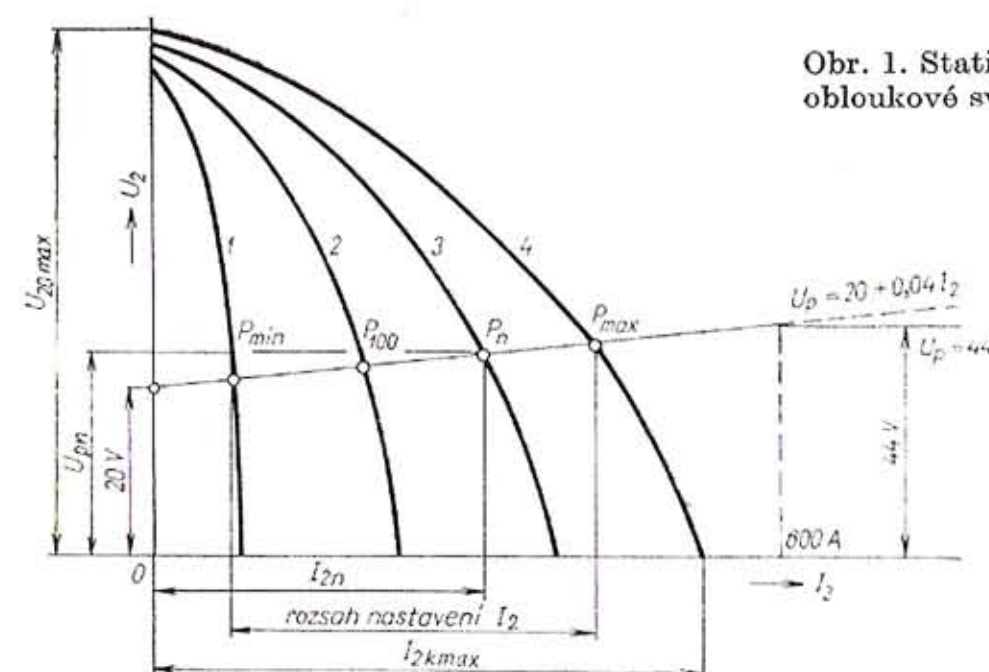
Čtyři typické statické charakteristiky jsou na obr. 1. Číslo znamená nastavení ovládače:

- 1 — na nejmenší svařovací proud; pracovní bod P_{\min} ;
- 2 — na trvalý svařovací proud při zatěžovateli $DZ_t = 100\%$;
pracovní bod P_{100} ;
- 3 — na jmenovitý svařovací proud I_{2n} při jmenovitém pracovním
napětí U_{pn} ; pracovní bod P_n , $DZ_r = 60\%$;
- 4 — na největší svařovací proud; pracovní bod P_{\max} .

Matematicky se statické charakteristiky vyjadřují vztahem

$$U_2 = f(I_2)_{R \rightarrow} \quad (1)$$

kde symbol R_{\rightarrow} znamená nastavitelnost ovládače. Statických charakteristik je celý svazek podle principu ovládacího zařízení (na obr. 1 od čáry



Obr. 1. Statické charakteristiky obloukové svářečky

1 do 4); u svařovacích transformátorů mohou být v pracovním bodě polostrmé (jako na obr. 1), až strmé. Měří se při jmenovitém vstupním napětí a jmenovitém kmitočtu (např. při $U_{in} = 380 \text{ V}$, $f_{in} = 50 \text{ Hz}$). Zátěží výstupní strany je nastavitelný rezistor, nejlépe s malou teplotní závislostí odporu.

Ovládací zařízení je zařízení včetně ovládače, sloužící k nastavování svařovacího proudu nebo napětí oblouku (tj. svařovací veličiny podle metody svařování, viz čl. 3.5) v rozsahu daném konstrukcí obloukové svářečky (např. u svařovacího transformátoru magnetický bočník nebo tlumivka apod.). Dříve se používal nevhodný název regulační zařízení (ČSN 01 0170).

Ovládač je prvek ovládacího zařízení nebo automatického regulátoru, kterým se nastavuje ručně buď svařovací proud, nebo napětí

oblouku (např. u magnetického bočníku mechanismus s klikou nebo kolečkem, tlačítko pro servomotor k nastavování vzduchové mezery tlumivky, potenciometr automatického regulátoru apod.).

Dříve se používal nevhodný název regulátor (v ČSN 01 0170).

Napětí naprázdno U_{20} je ustálené výstupní napětí v nezatíženém stavu, tj. při neuzavřeném svařovacím obvodu. Na obr. 1 je vyznačeno $U_{20\max}$ — největší napětí naprázdno. Jeho efektivní hodnota je pro obloukové svařovací transformátory a transformátorky uvedena v ČSN 05 2210 a ČSN 05 2211, např. pro ruční svařování může být nejvíce 80 V.

V ČSN 05 2210 jsou pro obloukové svařovací transformátory a jiné metody svařování povoleny výjimky.

Pro mechanizované svařování může podle této normy mít svařovací transformátor na jmenovitý svařovací proud $I_{2n} = 1000$ A napětí naprázdno $U_{20} = 100$ V, na jmenovitý svařovací proud $I_{2n} = 1600$ A napětí naprázdno $U_{20} = 120$ V a na jmenovitý svařovací proud $I_{2n} = 2000$ A napětí naprázdno $U_{20} = 140$ V.

Tyto transformátory, pokud mají napětí naprázdno vyšší než 80 V, nesmějí mít zařízení, které by umožnilo existenci napětí naprázdno po skončení úkonu nutného k zapnutí napětí (nesmějí mít tedy ve vstupním obvodu např. spínač, stykač s přídržným kontaktem apod.). Tato ustanovení byla převzata z doporučení RVHP RS 4746-74.

Normalizované pracovní napětí U_{pn} je pracovní (výstupní) napětí, stanovené pro různé technologie podle zkušeností. Pro ruční svařování do proudu $I_2 = 600$ A je dáno přímkou

$$U_p = 20 + 0,04I_2 \quad (V; A) \quad (2)$$

Pro proud 600 A a větší je

$$U_p = 44 \text{ V} \quad (3)$$

Rozsah nastavení je určen dvojicemi hodnot svařovacího proudu a příslušného normalizovaného pracovního napětí při nejnižším a nejvyšším nastavení ovládače (obr. 1). V celém rozsahu nastavení musí svařovací transformátor spolehlivě zapalovat a svařovací proces, pro který je určen, musí být stabilní. Dříve se používal nevhodný název regulační rozsah.

Ke jmenovitým svařovacím proudům I_{2n} , jejichž velikosti jsou v řadách doporučeny ČSN 05 2205, se stanoví příslušné hodnoty jmenovitých pracovních napětí U_{pn} . Pro I_{2n} a U_{pn} je svařovací transformátor výrobcem navržen a při nich oteplení žádné jeho části nepřesáhne dovolené hodnoty.

Napětí na oblouku U_o je napětí na hořícím oblouku, měřené mezi napájecím bodem na elektrodě a základním materiálem, nebo mezi napájecími body na dvou elektrodách. Je přímo úměrné délce oblouku a vzhledem k výstupnímu napětí U_2 je nižší o úbytek napětí,

které je dáno činným odporem R_c svařovacího obvodu (tj. úbytek napětí na svařovacích vodičích, svorkách apod.).

$$U_o = U_2 - R_c I_2 \quad (4)$$

(Skutečné napětí na oblouku je o málo nižší než U_o , ale jeho měření je obtížné.)

Proud nakrátko I_{2k} je ustálený proud při zvoleném nastavení ovládače, jsou-li výstupní svorky svařovacího transformátoru spojeny nakrátko. Přitom teoreticky je výstupní napětí $U_2 = 0$. Na obr. 1 je vyznačen největší proud nakrátko $I_{2k\max}$.

Normalizovaný cyklus ručního svařování (NRS) je pracovní cyklus při přerušovaném zatížení, napodobující ruční svařování elektrodami. Celková doba cyklu je stanovena na 5 min, z čehož doba zatížení $t_z = 3$ min (při jmenovitých hodnotách I_{2n} a U_{pn}) a doba přestávky $t_0 = 2$ min (chod naprázdno).

Zatěžovatel DZ (poměrná doba zatížení) je poměr doby zatížení t_z obloukového svařovacího transformátoru k době pracovního cyklu; např. pro NRS je jmenovitý zatěžovatel

$$DZ_r = \frac{t_z}{t_z + t_0} \cdot 100 = \frac{3}{3 + 2} \cdot 100 = 60 \% \quad (4a)$$

Při nastavení na největší svařovací proud musí být zatěžovatel nejmeně 35 %.

Pro transformátory k mechanizovanému svařování s proudem $I_{2n} = 1000$ A a větším stanoví ČSN 05 2210 při jmenovitých výstupních veličinách jmenovitý zatěžovatel $DZ_t = 100$ % (tj. trvalé zatížení).

U dodávaných svařovacích transformátorků je podle ČSN 05 2211 jako jmenovitý svařovací proud I_{2n} určen výstupní proud nastavitelný na nejvyšším stupni se jmenovitým zatěžovatelem $DZ_m = 20$ %, což představuje při proudu I_{2n} a napětí U_{pn} dobu svařování 1 min a pracovní přestávku 4 min. To je nutné respektovat při teplotě okolí 40 °C. Při nižších teplotách okolí nebo při menším zatížení jsou poměry příznivější — doba zatížení je delší (viz kap. 8). Některé zahraniční firmy uvádějí pro nastavené svařovací proudy počet za sebou vyvařených elektrod určitého průměru. Počet se udává nejprve pro přechod ze studeného do teplého stavu vinutí, např. pro první hodinu po zapnutí transformátoru, pro další hodinu, kdy se počet vyvařených elektrod zmenší, apod. [105].

Výhodné je do nejteplejšího místa vinutí transformátorku (i transformátoru) umístit SpencEROVU membránu nebo pozistor (vyrábí METAZ Šumperk), které při přetížení hlásí tepelné ohrožení vinutí nebo odpojí transformátorek od sítě. Po vychladnutí vinutí se napájení obnoví. Transformátorek je tak plně tepelně využit, aniž svářeč přihlíží k zatěžovateli. Toto řešení by mělo být předepsáno příslušnými čs. normami pro všechny zdroje pro ruční obloukové svařování.

Dynamické charakteristiky jsou obecně časové průběhy výstupního (svařovacího) proudu

$$i_2 = f(t)_{R \rightarrow} \quad (5)$$

a současně napětí snímaného v místě působení oblouku

$$u_2 = f(t)_{R \rightarrow} \quad (6)$$

při určitém nastavení ovládače. To znamená, že každé nastavené statické charakteristice odpovídají určité dynamické charakteristiky svařovacího transformátoru (obecně obloukové svářečky).

V praxi se dynamické charakteristiky vyhodnocují z oscilogramů při chodu „naprázdno—zkrat—naprázdno“, z nichž se posuzuje kvalita startů, a z oscilogramů při chodu „zatížení—zkrat—zatížení“, z nichž se hodnotí kvalita přenosu kovu z elektrod na základní materiál, je-li známo, že přenos u nich probíhá kapkami způsobujícími zkraty. Zatěžuje se do rezistoru připojeného zkušebním vodičem napodobujícím stav svařovacího obvodu při svařování. U svařovacích transformátorů lze z časových průběhů výstupního proudu posuzovat i stabilitu hoření oblouku. Oscilogramy se dobře vyhodnocují při rychlostech záznamu kolem 3 m/s.

Údaje na výkonnostním štítku svařovacího transformátoru, se kterými je zapotřebí se před jeho instalací a před využíváním seznámit, jsou:

jmenovité vstupní napětí U_{1n} (V),
jmenovitý vstupní kmitočet f_{1n} (Hz),
jmenovitý vstupní proud I_{1n} (A) nebo
jmenovitý zdánlivý příkon S_{1n} (kV · A),
nejvyšší napětí naprázdno U_{20max} (V),
jmenovitý svařovací proud I_{2n} (A) a k němu příslušející
jmenovité pracovní napětí U_{pn} (V) a DZ (%),
trvalý svařovací proud I_{2t} (A) a k němu příslušející
normalizované pracovní napětí U_t (V) při $DZ_{pn} = 100\%$,
nejmenší svařovací proud I_{2min} (A) a největší svařovací proud
 I_{2max} (A) a k nim příslušející
pracovní napětí U_p (V) (tj. rozsah nastavení),
hmotnost (kg).

Poznámka: Platí poměr $\left(\frac{I_{2t}}{I_{2r}}\right)^2 = \frac{DZ_r}{DZ_t}$

Z toho trvalý svařovací proud pro $DZ_r = 60\%$

$$I_{2t} = \sqrt{\frac{60}{100}} I_{2n} = \sqrt{0,6} I_{2n} \doteq 0,775 I_{2n}$$

Podobně pro $DZ_m = 20\%$ je $I_{2t} \doteq 0,447 I_{2n}$

1.5. POROVNÁNÍ RŮZNÝCH DRUHŮ SVÁŘEČEK

Vlastnosti různých druhů obloukových svářeček jsou porovnány v tab. 3 až 8. Porovnávají se v nich svářečky na stejnosměrný proud a na střídavý proud z hlediska sítě, vlastního stroje, operativnosti, hospodárnosti a bezpečnosti a hygieny práce. Vlastnosti svařovacích transformátorů jsou podrobněji popsány v dalších oddílech této publikace a v uvedené literatuře. Vlastnosti jiných druhů svářeček jsou důkladněji probrány např. v [1], [4], [14] až [21].

Hlavní výhody jednoduchých svařovacích transformátorů, patrné z tabulek v této kapitole, jsou tyto:

- odebírají méně elektrické energie,
- opatření proti rušení rádiového vysílání je jednoduché a levné,
- přechod na hliníkové vinutí místo měděného a na orientované elektrotechnické plechy je snadný,
- malé investiční náklady a malé náklady na údržbu,
- nenáročnost na kvalifikaci údržbáře (v porovnání např. s tyristorovými svařovacími usměrňovači),
- dlouhý technický život,
- okamžitá pohotovost, malá hmotnost a snadná manipulace,
- nepůsobí foukání oblouku jako u stejnosměrného proudu (to je mnohde rozhodující) např. v koutových svarech
- při bludných prouděch se neprojevuje elektrolytická koroze na potrubí a kabelech s kovovým povrchem, uložených v zemi,
- lepší provaření [93].

Nevýhody [93] při použití střídavého proudu (s kmitočtem 50 Hz) k obloukovému svařování, které v ČSSR nelze snadno odstranit, jsou např. tyto:

- nelze použít běžné bazické elektrody (zejména při malých prouděch, je-li U_{20} nízké, v době vydání knihy se však u nás výroba bazických elektrod připravuje,
- horší jakost svarů v nucených polohách,
- nižší produktivita vzhledem k činiteli tvaru β (čl. 2.4); zvýší se však při průběhu i_2 podle obr. 18,
- střídavý proud se nesmí použít v uzavřených nádobách (např. v kotlech), ve výškách a ve vlhkém prostředí.

1.6. KRÁTKÝ PŘEHLED O STAVU OBLOUKOVÉHO SVÁŘOVÁNÍ STŘÍDAVÝM PROUDEM V ČSSR

V ČSSR byl zatím jednoduchý přechod z ručního svařování stejnosměrným proudem na proud střídavý ve větším měřítku omezen skladbou výroby obalených elektrod, zaměřenou asi ze 75 % na bazické elektrody na stejnosměrný proud s kladnou polaritou. Jsou levnější

Tab. 3. Porovnání různých druhů svářeček z hlediska sítě

Hledisko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnosti	Stejnoseměrné soustrojí	Usměrňovač	Středofrekvenční (sf) soustrojí s usměrňovačem	Středofrekvenční soustrojí (popř. měnič kmitočtu)	Transformátor
A	Připojení na síť	trojfázové	trojfázové (jednofázové)	trojfázové	trojfázové	jednofázové (trojfázové)
B	Zatížení sítě	rovnoměrné	rovnoměrné (nerovnoměrné)	rovnoměrné	rovnoměrné	nerovnoměrné (částičně ho lze vyrovnat)
C	Vliv kolísání napětí sítě na statické charakteristiky	zanedbatelný; s cizím buzením dynamicky z usměrňovače bez stabilizace úměrný	úměrný; i žádný podle zavedení stabilizace	mizivý při buzení permanentními magnety; s cizím buzením bez stabilizace úměrný	totéž jako u 3	úměrný; u principů s řízenou tlumivkou a stabilizací zanedbatelný
D	Přenos nárazového zatížení na síť	tlumený	netlumený (u tyristorového tlumený)	tlumený	tlumený	netlumený
E	Přerušení jedné fáze	nebezpečné, může se zjistit pozdě a spálí se motor	zmenší se svařovací výkon, nebezpečné pro trojfázový motor ventilátoru i pro usměrňovací součástky (u jednofázového nelze svařovat)	nebezpečné jako u 1	nebezpečné jako u 1	nelze svařovat, nebezpečné pro trojfázový motor ventilátoru

F	Účinník ($\cos \varphi$) u svářeček s proudem větším než 125 A	dobrý 0,7 až 0,9	horší 0,5 až 0,75	dobrý	dobrý	dobrý	dobrý (u měničů kmitočtu horší)	špatný: 0,3 až 0,7, podstatně se zlepšuje kompenzací kondenzátorů
G	Odrůšení	žádné	jednoduché; u tyristorových složitě	jednoduché	jednoduché	jednoduché	jednoduché (u měničů kmitočtu složitě)	jednoduché (pro WI (složitě)
H	Pohon spalovacím motorem	možný	nemožný	možný	možný	možný	možný (u měničů kmitočtu ne)	nemožný

Tab. 4. Porovnání různých druhů svářeček z hlediska stroje

Hle- disko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnost	Stejnoseměrné soustrojí	Usměrňovač	Středofrekvenční (sf soustrojí) s usměrňovačem	Středofrek- venční soustrojí (popř. měnič kmitočtu)	Transfor- mátor ²⁾
A	Velikost, půdorysná plocha	100 %	100 až 70 %	70 %	60 %	60 %
B	Poměrný svařovací proud při $DZ_r = 60 \%$ (A/kg) ¹⁾	0,8 až 1,1	0,9 až 1,5 (asi)	1,8	2,8	1,5 až 2,4
C	Poměrné pořizovací náklady v ČSSR/ v cizině	1/1	2,4/0,9	—/asi 0,9	—/asi 0,8	0,7/0,6

Hle- disko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnost	Stejnoseměrné soustrojí	Usměrnovač	Středofrekvenční (sf) soustrojí s usměrňovačem	Středofrek- venční soustrojí (popř. měnič kmitočtu)	Transfor- mátor ²⁾
D	Složitost konstrukce	složitá, točivé části	jednoduchá; u tyristorových složitý regulátor	méně složitá než u 1	méně složitá než u 1	jednoduchá, transformátor s tyristory je složitý
E	Použitelnost orientovaných plechů	obtížná	snadná	obtížná	obtížná	snadná
F	Náhrada mědi hliníkovými vodiči	obtížná	snadná	méně snadná	méně snadná	snadná
G	Druh proudu	stejnoseměrný + —	+ —	+ —	střídavý 150 až 450 Hz i větší	střídavý 50 Hz nebo nebo 60 Hz
H	Vliv napětí naprázdno U_{20}	čím vyšší U_{20} , tím větší a těžší stroj	jako u 1	jako u 1	jako u 1	jako u 1
I	Přepínání vstupního napětí a kmitočtu	dodává se u typu Triodyn	v ČSSR se nedodává, jinde ano	v ČSSR se zatím běžné nevyrábí	totéž jako u 3	nedodává se v ČSSR
J	Vliv poklesu napětí sítě na oteplení	oteplení je větší u vinutí motoru	nevadí; motor ventilátoru je ale nutné správně dimenzovat	jako u 1	jako u 1	nevadí jako u 2

K	Přetížení na výstupu	za studeného stavu možné	nemožné se zřetelem na dimenzování součástek polovodičových	nemožné jako u 2	možné jako u 1	možné jako u 1
L	Paralelní chod	možný	u tyristorových nemožný, jinak možný	možný	nemožný	možný
M	Náchylnost k přepólování	je podle principu; u dynama s cizím buzením není	není	není	nemůže nastat	nemůže nastat
N	Rozsah proudu až 1 : 10 v jednom stupni	obtížné	snadné	obtížné	obtížné	méně snadné
O	Vliv oteplení na stálou svarařovacího proudu nebo napětí	svarařovací hodnoty jsou závislé na změně odporu vinutí s teplotou	u polovodičových součástek Si jako u 1; lze jej zmenšit v automatickém regulátoru, u polovodičů Se se kompen- zuje samočinně	jako u 1	jako u 1	jako u 1; v elektrickém regulátoru ho lze kompenzovat
P	Spolehlivost provozu	dostatečná, avšak je nutná údržba	kromě tyristo- rových dobrá	lepší než u 1	lepší než u 1	velká spolehlivost
R	Údržba	týdně čistit, za 1/2 roku vyměnit kartáče, za rok ložiska	týdně čistit, udržovat	týdně čistit, po roce mazat ložiska	jako u 3	týdně čistit stlačeným suchým vzdu- chem, udržovat ventilátor

Hle- disko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnost	Stejnoseměrné soustroje	Usměrňovač	Středofrekvenční (sf) soustroje s usměrňovačem	Středofrekvenční soustroje (popř. měnič kmitočtu)	Transformátor ²⁾
S	Technický život	krátký, nutné generální opravy	delší než 1	delší než 1	delší než 1	dlouhý
T	Změna statických charakteristik	buď s konstantním proudem, nebo s konstantním výkonem a konstantním napětím	možnost všech druhů statických charakteristik	s konstantním výkonem nebo proudem	s konstantním výkonem	s konstantním výkonem někdy i s konstant- ním proudem (např. pro WIG), nyní i s konstant- ním napětím
U	Změna dynamických charakteristik	nelze snadno uskutečnit	snadno měnitelná buď tlumivkou, nebo v regulátoru pro tyristory	jako u 1	jako u 1	nelze snadno uskutečnit, u elektronice- kého regulátoru ano
V	Ztráty naprázdno přibližně (vztažené na trvalý příkon)	18 %	8 %	19 %	18 %	5 %

¹⁾ Od poloviny 70. let se v zahraničí vyrábějí svářečky s dvojnásobným usměrněním a střídacím na 2 Hz až 30 kHz. Jedna z posledních je anglický zdroj POWPAK 400; při proudu 315 A a zatěžovateli 60 % má poměrný svařovací proud 9 A/kg η_n nad 80 %, $\cos \varphi_n \approx 0,99$. Od roku 1984 se tyto svářečky vyrábějí v k. p. MEZ Bromov a v k. p. BEZ Bratislava.

²⁾ Finská firma Kemppi dodává univerzální svářečku, jejíž průběh střídavého proudu i_2 má obdélníkový tvar podle obr. 18; viz čl. 4.8; kap. 11.

Tab. 5. Porovnání různých druhů svářeček z hlediska operativnosti

Hle- disko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnost	Stejnoseměrné soustroje	Usměrňovač	Středofrekvenční soustroje s usměrňovačem	Středofrek- venční soustroje	Transformátor
A	Pohotovost	nutné spouštět přepínačem	okamžitá	jako u 1	jako u 1	okamžitá
B	Dálkové spuštění	složitá automatika	jednoduché stykačem	jako u 1	jako u 1	jednoduché stykačem
C	Zapalování oblouku	snadné	snadné	snadné	dostí obtížné	méně snadné než 1
D	Dálková nastavitelnost statických cha- rakteristik (I_2 nebo U_0)	snadná, nutné však přepínat stupně	snadná	generátor s cizím buzením lze dálkově nastavovat	většinou stupňové nastavování, nelze dálkově	některé principy nelze, s tlumivkou ano
E	Jemnost nasta- vování I_2 nebo U_0	podle principu většinou méně jemné	podle nastavo- vacího odporu až jemné	jako u 1	hrubší nastavení	v hrubých stupních až jemné
F	Nastavitelnost sklonu statických charakteristik	u moderních svářeček možné z konstantního výkonu na konstantní napětí pře- pínačem	na všechny druhy statických charakteristik přepínačem	nepoužívá se	nepoužívá se	pro automatic- ké svařování se přepíná napětí na- prázdko na svorkách
G	Nastavitelnost dynamických charakteristik	nepoužívá se	používá se, viz tab. 4, řádek U, sloupec 2	jako u 1	jako u 1	jako u 1
H	Transport bez jeřábu	obtížný	u tyristorové snadný	snadnější než 1	snadnější než 1	snadný podle konstrukce

Hle- disko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnost	Stejnoseměrné soustroji	Usměrňovač	Středofrekvenční soustroji s usměrňovačem	Středofrek- venční soustroji	Transformátor
I	Změna polarity	na výstupních svorkách; u cizí- ho buzení ma- lým přepínačem	na výstupních svorkách	jako u 2	není třeba	není třeba
J	Vliv napětí naprázdno	někdy značný vliv na start a stabilitu procesu	menší než 1	menší než 1	podstatný	podstatný; zvláště u ten- kých elektrod jako u 1
K	Vliv tvaru statických charakteristik	na stálost hloubky průvaru nebo na samo- regulaci	jako u 1	jako u 1	jako u 1	jako u 1
L	Vliv dynamických charakteristik	na kvalitu startu a ztrátu kovu	jako u 1	jako u 1	jako u 1	jako u 1

Tab. 6. Porovnání různých druhů svářeček z hlediska technologie

Hle- disko	Druh svářečky	1	2	3	4	5
	Vlastnost	Stejnoseměrné	Usměrňovač	Středofrek- venční soustroji s usměrňovačem	Středofrek- venční soustroji	Transformátor
A	Vhodnost pro ruční elektrody	vhodné i pro ocelové tence obalené, bazické, legované a barev- né kovy	jako u 1	jako u 1	poněkud lepší než u 5	pro ocelové elektrody kyselé, rutilové a spe- ciální bazické

B	Vhodnost pro tenké elektrody a tenké plechy	ano	ano	ano	lepší než 5	nehodí se, jen při zvětšené stabilitě procesu; při U_{20} vyšším nebo při kolmém průběhu proudu k ose času vhodná, zvláště pro proudy větší než 800 A nepoužívá se
C	Vhodnost pro automaty pod tavidlem	ano, jen do proudu 800 A	ano	nepoužívá se	nepoužívá se	se zvýšením sta- bility pomoci vř zvláště pro lehké kovy
D	Vhodnost pro metodu MIG a MAG ¹⁾	vhodné pro MIG méně pro MAG	vhodná pro MIG i MAG	nepoužívá se	nepoužívá se	dobré, když je dobrá stabilita oblouku
E	Vhodnost pro metodu WIG	vhodné jen pro barevné kovy a legované oceli	jako u 1	jako u 1	vhodné pro lehké kovy, zvětšená sta- bilita od sf	malé
F	Vlastnosti svaru	velmi dobré	dobré až velmi dobré	jako u 2	dobré kolem 300 Hz	malé
G	Foukání oblouku a magnetizování svařence	značné; u proudů nad 800 A se mnohde nedá svařovat	poněkud menší než u 1	poněkud menší než u 1	malé	nižší než u 1; zvětší se změnou svařovacího proudu sinuso- vého na obdélníkový
H	Produktivita u ručních elektrod	vyšší než u 5	jako u 1	jako u 1	poněkud nižší než u 1	

¹⁾ Svařovací metoda MIG (Metal Inert Gas) používá strojní podávání svařovacího drátu konstantní rychlostí, svářečka je na stejnosměrný proud s konstantním napětím. Ochranný plyn argon, helium (Ar, He) nebo směs s O₂, CO₂ s převládajícím obsahem netečného plynu. Tato metoda je vhodná pro lehké a barevné kovy a legované oceli. Svařovací metoda MAG (Metal Activ Gas) je založena na stejném principu jako MIG, ale ochranný plyn je CO₂; do ocelového svařovacího drátu se musí přidat dezoxidací prvky (Mg, Si). Je to velmi produktivní metoda zvláště pro svařování běžných ocelí.

Tab. 7. Porovnání různých druhů svářeček z hlediska hospodárnosti

Hledisko	Druh svářečky				
	Vlastnost	1	2	3	4
		Stejnoseměrné ústrojí	Usměrňovač	Středofrekvenční soustrojí s usměrňovačem	Středofrekvenční soustrojí
A	Střední ztráty při chodu svářečky naprázdno (kW)	1,8 až 2,3	0,25 až 0,5	asi 2,0	asi 1,8
B	Střední účinnost stroje při ručním svařování (%)	45 až 55	60 až 75	55 až 65	60 až 75
C	Náklady na údržbu (Kčs/rok) asi	600	300	400	350
D	Součinitel navaření u kyselých elektrod α_n (g/A . h) [93]	asi 12,5	asi 11 až 12	—	—
E	Ztráta kovu v (%) u kyselých elektrod	asi 7,5	asi 8,5	—	—
F	Roční náklady na energii a svářečku ve velkém závodě asi (Kčs/rok) [14]	11 000	10 500	—	—
G	Několkamístné svařování	méně hospodárné než u 2 a 5	méně hospodárné než u 5	nepoužívá se	nepoužívá se
					hospodárné
					asi 11 i více podle kvality transformátoru
					asi 10
					7 100
					0,4 až 0,8
					75 až 85 i lepší
					100

Tab. 8. Porovnání různých druhů svářeček z hlediska bezpečnosti a hygieny práce

Hledisko	Druh svářečky				
	Vlastnost	1	2	3	4
		Stejnoseměrné soustrojí	Usměrňovač	Středofrekvenční soustrojí s usměrňovačem	Středofrekvenční soustrojí
A	Maximální napětí naprázdno podle normy (V)	100	100 do zvlnění 10 %; jinak 80	100	80 V pro ruční
B	Bezpečnost obsluhy z elektrického hlediska ze strany svorek	bezpečnější než u 5; lze svařovat i v uzavřených prostorech	jako u 1	jako u 1	nelze použít v uzavřených nádobách jako u 5
C	Zajištění obsluhy proti úrazu elektrickým proudem	1. ochranné pomůcky apod. 2. odpojení napětí naprázdno stykačem u automatického svařování	jako u 1	jako u 1	jako u 5
D	Bezpečnost po mechanické stránce	některé svářečky jsou vratké	usměrňovač je stabilnější	lepší než u 1	lepší než u 1
E	Nebezpečí požárů	větší vzhledem k motoru	méně než u 1	jako u 1	jako u 1
F	Hlučnost	velká	malá	velká	velká
G	Bludné proudy	působí elektrolytickou korozi	jako u 1	jako u 1	nepůsobí jako u 1
					malá
					nepůsobí jako u 1
					80 V pro ruční, pro automaty 100 až 140 V
					střídavý proud je životu nebezpečný tím, že působí křeče svalů a fibrilaci srdce
					1. ochranné pomůcky apod. podle ČSN
					2. odpojení napětí naprázdno stykačem u automatického svařování
					transformátor je stabilnější
					méně než u 1

a mají lepší technologické vlastnosti než kyselé a rutilové, mají však nižší produktivitu.

V zahraničí se již delší dobu vyrábějí bazické elektrody i na střídavý proud; některé typy hoří stabilně při napětí naprázdno nižším než 70 V. V ČSSR však dnes existuje dosti elektrod (v r. 1973 jich bylo 14 druhů [93]), kterými lze bez obtíží svařovat ručně. Jsou to elektrody kyselé a rutilové, běžné i vysokovýkonné; ve VÚZ Bratislava byly vyvinuty i elektrody bazické na střídavý proud BS 48 a BS 52. Dříve se osvědčila elektroda BH 48T [110]. ŽAZ Vamberk připravuje výrobu podobných elektrod typu BS 45, které se již osvědčily ve zkušebním provozu.

Od r. 1980 se dodávají obloukové svařovací transformátory WT 315 (kap. 10) střední velikosti. Technologové a technici zabývající se svařováním by si měli předem tuto situaci uvědomit a vhodně rozhodnout, pro které práce by v jejich provozu bylo možné svařování střídavým proudem. Měly by se rozvíjet i nové efektivní svařovací metody, kde se tento druh proudu uplatní (gravitační svařování nebo svařování trubičkou bez ochranné atmosféry). V roce 1984 měly některé závody již desítky transformátorů WT 315.

V ČSSR se v posledních letech rozšířilo používání obloukových svařovacích transformátorů jak v menších výrobních a údržbářských dílnách apod., tak u svářečů-amatérů (viz kap. 9 a 10).

Pro automatické svařování pod tavidlem se s výhodou používá střídavý proud od 400 do 1000 A a při paralelním spojení dvou svařovacích transformátorů se využívá proud až do 2000 A. S úspěchem se využívá i trojfázové zapojení transformátorů (např. do hvězdy), kde jsou oblouky uspořádány do tandemu a dosahuje se svařovacích rychlostí až 120 m/h (čl. 3.12). Výhodné jsou i kombinace střídavých a stejnosměrných oblouků. Svařování po tavidlem je metoda velmi efektivní,

zvláště při větších proudech (tab. 9, [22]). V ČSSR se používá již od začátku padesátých let.

Další možností pro rozšíření použití střídavého svařovacího proudu je ruční i automatické svařování lehkých kovů a jejich slitin metodou WIG. V ČSSR je metoda zavedena např. v chemickém a leteckém průmyslu, při výrobě jaderných energetických zařízení apod. Její použití se bude rozšiřovat, avšak stránka hospodárnosti spíše ustupuje náročným požadavkům metody a z nich plynoucí složitosti svařovacího zařízení, jako je např. souprava MA 315 (kap. 10).

Jedním ze stěžejních zájmů československého hospodářství je bezesporu šetření elektrickou energií. Zejména ruční obloukové svařování střídavým proudem je jednou z významných možností úspor elektrické energie [93], [117], [118], [119]. Je třeba je tedy zavádět všude tam, kde to technologická a jiná hlediska dovolí, jak v malých, tak ve velkých strojírenských závodech, i jinde.

Tab. 9. Produktivita a elektrická energie při ručním svařování a automatickém svařování pod tavidlem.

Způsob svařování	Ruční	Pod tavidlem
Hustota proudu elektrody (A/mm ²)	4 až 25	25 až 200
Součinitel navaření α_n (g/A · h)	7 až 15 vysokovýkonné až 18,5	9 až 25
Měrná spotřeba elektrické energie (kW · h/kg)	3,2 až 3,6 [110] uvádí až 4,5	2,5 až 3,1 jednofázové 1,8 až 2,3 trojfázové svařování

2. Nástin fyzikální teorie svařovacího oblouku

Využití elektrického oblouku jako samostatného výboje bylo známo už dříve, např. pro světlo nebo ve rtuťových usměrňovačích, nyní se využívá např. v obloukových pecích. Obtíže působí při rozpojování elektrických obvodů, kdy oblouk napadá kontakty spínacích přístrojů. Zvláště užitečný je elektrický oblouk svařovací, u kterého se uplatňuje především jeho tepelná energie. Dosud se však nepodařilo všechny děje v elektrickém oblouku dokonale vysvětlit. V posledních letech se mnohé děje postupně vyjasňují pomocí moderních měřicích přístrojů a metod. Obtíže se ale vyskytly např. při měření vysokých teplot za značné rychlosti dějů apod.

2.1. VZNIK ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Pro svařovací oblouk má význam elektrický výboj v plynu při atmosférickém tlaku. Plynná prostředí mají stejné elektrické vlastnosti jako izolanty, zatímco kovy se chovají jako vodiče, tj. dobře vedou elektrický proud.

Vodič se skládá z pevné mřížky kladných iontů kovu a k nim příslušejících volných elektronů se záporným nábojem. Elektrony se mohou stát nosiči proudu: začnou se pohybovat od záporného pólu ke kladnému pólu, jestliže se na kovový vodič přiloží elektrické napětí. Ionty při tom zůstávají na svém místě. Nárazy mezi ionty a elektrony při průchodu proudu vodičem vzniká teplo, jehož velikost je dána vztahem

$$Q = RI^2t \quad (J; \Omega, A, s) \quad (7)$$

kde R je činný odpor vodiče,
 I elektrický proud,
 t čas.

V běžných podmínkách platí mezi přiloženým napětím U , procházejícím proudem I a odporem R vodiče Ohmův zákon

$$U = RI \quad (V; \Omega, A) \quad (8)$$

Ztráty P_z ve vodiči s odporem R při průchodu proudu I jsou

$$P_z = RI^2 \quad (W; \Omega, A) \quad (9)$$

Naproti tomu, aby elektrický proud procházel plynem, je třeba v něm způsobit výboj. Plyn však nemá za normálních okolností žádné volné elektrony; aby tomu tak bylo, je nutné jej ionizovat, tj. oddělit v atomech elektrony od iontů a uvést je do pohybu. Prostředky k dosažení ionizace jsou tyto:

- vysoká teplota (termoionizace),
- elektrické pole (vysoké napětí),
- radioaktivní záření (částice α),
- elektromagnetické záření (ultrafialové záření, paprsky X, paprsky γ).

Samostatný výboj ve svařovacím oblouku se uskuteční

- dotykem elektrod (záporné katody a kladné anody) a jejich oddálením (termoionizace),
- přiložením přídatného vysokého napětí na elektrody (ionizace elektrickým polem),
- zavedením ionizovaného plynu mezi elektrody.

Zapálení oblouku dotykem (škrtnutím nebo fuknutím) je nejvíce používaný způsob ve svařovací technice, zvláště při svařování ručními elektrodami. I když je zapalovací konec elektrody velký a čistý a tlak mezi elektrodou a materiálem je dostatečný, dotknou se na výstupu asi jen v 1 % plochy. Na přechodu elektrody a materiálu vznikne zkratový proudem i_{zk} za čas nejvíce asi 50 ms velké množství tepla a při odtržení elektrod se vytvoří rozžhavené ionizované páry s velkou hustotou. Katoda dosáhne takové teploty, že je schopna emise elektronů.

K podpoře zapálení oblouku přispívá další jev, mající charakter ionizace elektrickým polem. Při rychlém odtržení elektrody z dotyku urychlením a (cm/s^2) vzniká účinek analogický rychlému oddálení dvou polepů plochy S kondenzátoru, napájených přes odpor R ze zdroje napětí U_0 [2]. Maximální intenzitu elektrického pole lze vyjádřit podle Seny vztahem

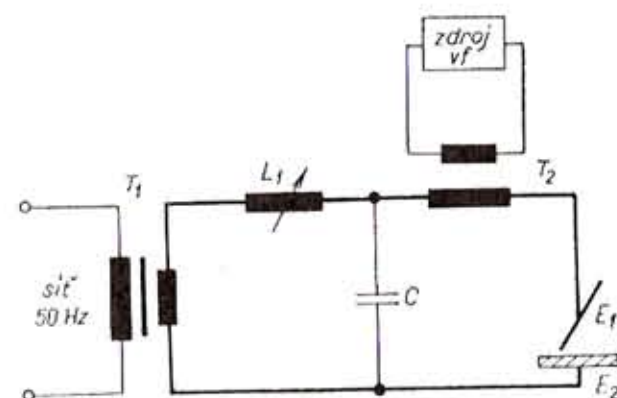
$$E_{\max} = \frac{3 \cdot 10^8 U_0}{\sqrt[3]{R^2 S^2 a}} \quad (V/\text{cm}; V, \Omega, \text{cm}^2, \text{cm/s}^2) \quad (10)$$

Jsou-li ve svařovacím obvodu uvedené veličiny dány hodnotami $U_0 = 50 \text{ V}$, $R = 1 \Omega$, plocha dotyku $S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, $a = 1 \cdot 10^6 \text{ cm/s}^2$, odpovídá jim intenzita elektrického pole $E_{\max} = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ V/cm}$. To je značně velká hodnota, která výrazně podporuje vznik ionizace.

Zapálení oblouku vysokým napětím umožňuje ta okolnost, že atomy plynu mezi elektrodou a materiálem jsou vždy zčásti ionizovány zářením. Pak stačí nepříliš vysoké napětí (1000 V až 5000 V), aby se uskutečnila nárazová ionizace a vznikl obloukový výboj. Tuto emisi lze nazvat emisí elektrického pole nebo elektrostatické emise.

K zapálení oblouku tímto způsobem se používají ionizátory, tj. zdroje vysokého napětí do 5000 až 7000 V s vysokým kmitočtem řádu

kHz až MHz, při němž značná rychlost narůstání napětí způsobí velké urychlení nosičů nábojů. Ionizátor je třeba zejména při svařování WIG, kde při průchodech střídavého proudu průmyslového kmitočtu nulou ochranný plyn svým ochlazujícím účinkem ještě zvětšuje deionizaci a bez podpory vysokého napětí s vysokým kmitočtem (vf) by oblouk při proudtech menších než 200 A zhasl. Vf vysoké napětí má i tu výhodu, že není životu nebezpečné. Princip uspořádání obvodů svařovacího transformátoru a vf zdroje je na obr. 2 a je popsán v článku 3.4.

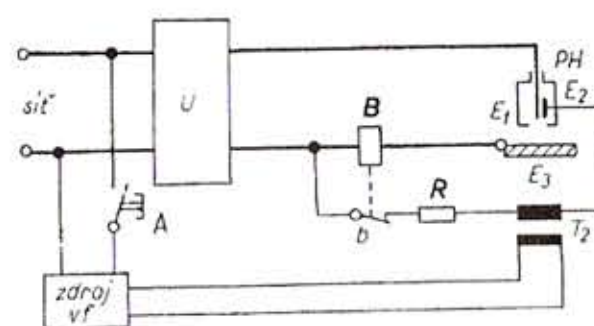


Obr. 2. Vysokofrekvenční zapalování oblouku
 T_1 , L_1 svařovací transformátor;
 T_2 vazební transformátor pro vf;
 E_1 elektroda; E_2 základní materiál;
 C kondenzátor pro ochranu T_1 , L_1
 před vf vysokým napětím

Princip zapálení oblouku zavedením ionizovaného plynu mezi hlavní elektrodu E_1 plazmového hořáku a materiál E_3 (obr. 3), které jsou pod napětím naprázdno zdroje proudu U , je vlastně odvozen od předcházejícího způsobu. Mezi pomocnou elektrodou E_2 a hlavní elektrodou E_1 je napětí naprázdno zdroje U připojeno přes omezovací rezistor R . Stlačením tlačítka A se mezi elektrodami E_2 a E_1 objeví vysokofrekvenční proud a v plynném prostředí (např. argon) zapálí v plazmovém hořáku pomocný oblouk s proudem několik desítek ampérů. Přiblížením hořáku k materiálu E_3 vznikne hlavní oblouk (s proudem až několik set ampérů) mezi hlavní elektrodou a materiálem. Kontakt b proudového relé B pak přeruší proud k pomocné elektrodě a pomocný oblouk zhasne.

2.2. FYZIKÁLNÍ DĚJE VE SVAŘOVACÍM OBLOUKU

Pro fyzikální děje v elektrickém oblouku je významné geometrické uspořádání elektrod, druh jejich materiálu, druh a rychlost plynů kolem obloukového sloupce a velikost a polarita proudu.



Obr. 3. Zapalování oblouku pomocnou elektrodou

Mezi nejjednodušší pozorovatelné vlastnosti oblouku patří jeho tvar. Oblouk se v podstatě dělí na tři části (obr. 4). Je to

katodová oblast,
 obloukový sloupec,
 anodová oblast.

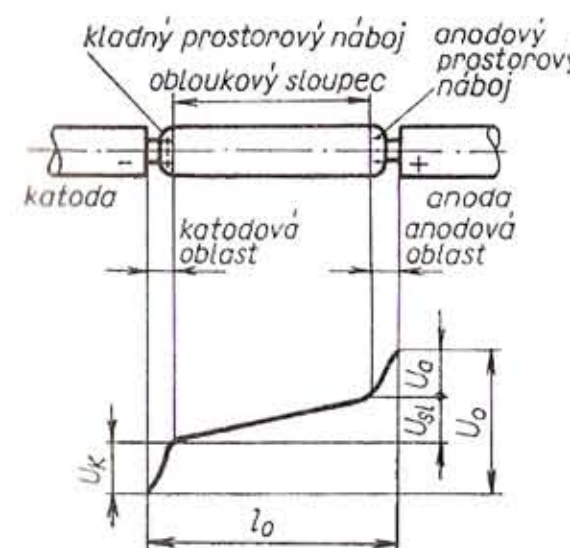
Pro napětí na oblouku platí

$$U_o = U_k + U_{sl} + U_a \quad (11)$$

Protože katodová a anodová oblast jsou vzhledem k délce obloukového sloupce velmi malé, lze říci, že napětí na oblouku U_o je přímo úměrné délce oblouku l_o .

Katoda může být kovová nebo nekovová (uhlík), může mít tvar tenkého válce nebo kovové desky. U katodové oblasti dosahuje teplota až 4270 K, hustota proudu je asi 10^3 A/cm^2 . Oblouk může mít tři podoby [3]:

oblouk bez katodové skvrny,
 oblouk se stacionární katodovou skvrnou,
 oblouk s nestacionární katodovou skvrnou.



Obr. 4. Rozdělení napětí na oblouku
 U_k napěťový úbytek katodové oblasti;
 U_{sl} napětí obloukového sloupce;
 U_a napěťový úbytek anodové oblasti

Oblouk bez katodové skvrny vznikne např. na thoriované wolframové elektrodě pro její vysokou teplotu tavení; obloukový sloupec se u katody nezúží. Oblouk se stacionární katodovou skvrnou vykazuje zúžení obloukového sloupce u katody, ale katodová skvrna se nemění. Oblouk s nestacionární katodovou skvrnou se vyskytuje např. při svařování nebo navařování lehkotavitelných kovů (hliník) v argonu. Oblouk má značně zúžený sloupec v katodové oblasti a skvrna se

pohybuje nahodile a s velkou rychlostí. Hustota proudu katodové skvrny je značně větší (až 10^8 A/cm^2) než v předcházejících případech a působí velké odpařování povrchu oxidované vrstvy hliníku, a tím jej čistí.

Kromě katodové termoemise a emise dané intenzitou elektrického pole zvětšuje tok elektronů i pozitivní prostorový náboj poblíž katody. Elektrony jsou na své dráze k anodě intenzitou elektrického pole urychlovány a svou kinetickou energií vyražejí z plyných atomů další elektrony, což zesiluje ionizaci v obloukovém sloupci. Obloukovým sloupcem je myšlen plynový sloupec (obr. 4), který obsahuje elektrony, ionty, atomy a molekuly; v tomto stavu se nazývá plazma. Na objemovou jednotku plazmatu připadá téměř stejné množství záporných a kladných nosičů nábojů. Vzniká tak jakási rovnováha mezi vytvořenými nosiči nábojů a energetickou ztrátou difúzí a rekombinací na chladném plynu na okraji plazmatu. Na vyrovnání ztrát je nutné dodat elektrický výkon, přičemž je žádoucí určitá intenzita elektrického pole. Stupeň ionizace, který je určen poměrem iontů a elektronů k neutrálním částicím, je při atmosférickém tlaku úměrný teplotě plazmatu a ionizačnímu napětí. Obloukový sloupec má hustotu proudu 10^2 až 10^3 A/cm^2 a teplotu asi 4500 až 8300 K [2].

Mechanismus oblouku v anodové oblasti je analogický mechanismu v blízkosti katody. U anody se však tvoří zóna negativního prostorového náboje, který umožňuje postup elektronů k anodě a iontů do obloukového sloupce. V anodovém prostoru vzniká anodový napěťový úbytek (obr. 4). Zúžení obloukového sloupce u anody je menší než u katody. Výpočtem [3] zjištěná teplota by dosáhla hodnoty vyšší než 8000 K a hustota proudu by byla 10^4 až 10^5 A/cm^2 .

Tato kapitola jen naznačila teorii svařovacího oblouku, kde katodou může být tenká kovová nebo nekovová elektroda a anodou kovový materiál určený ke svařování nebo navařování. Podle potřeby může být svařovací elektrodou anoda. U střídavého proudu průmyslového kmitočtu 50 Hz se polarita svařovací elektrody a materiálu mění stokrát za sekundu. Nabízí se částečné vysvětlení, proč se oblouk udrží v ustáleném stavu v tak velkém rozsahu svařovacího proudu (např. 15 až 2000 A) s napětím několik desítek voltů (10 až 55 V) na svařovacím oblouku dlouhém několik milimetrů.

Při svařovacím procesu vznikají i různé poruchy, např. při zkratech kapkami, které se většinou vyskytují nepravidelně. U střídavého proudu existují kromě toho pravidelné změny dané kmitočtem (50 až 450 i 2880 Hz).

Kromě fyzikálních jevů přispívají k vytvoření příznivých podmínek pro získání vysoké teploty v oblouku a na elektrodách a pro jeho stabilní hoření i chemické, metalurgické a jiné pochody. Moderní pojetí fyziky oblouku nalezne čtenář v [109].

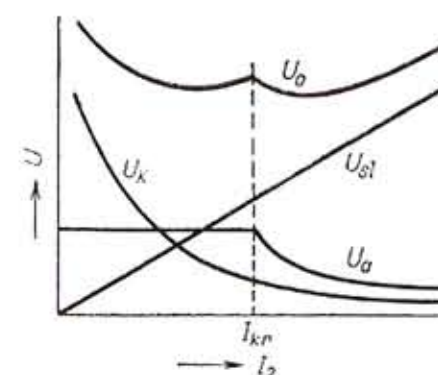
2.3. STATICKÉ CHARAKTERISTIKY SVAŘOVACÍHO OBLOUKU

Jsou to křivky závislosti napětí na oblouku na svařovacím proudu při určitých stálých délkách oblouku

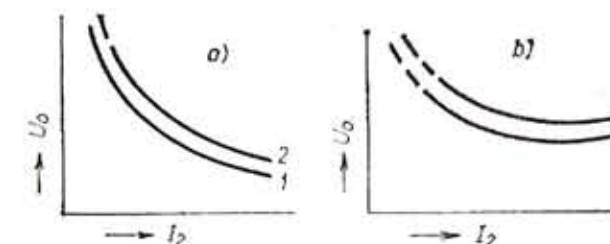
$$U_o = f(I_2)l_o \quad (V; A, \text{ mm}) \quad (12)$$

kde l_o je délka oblouku (měnitelný parametr).

Minimální charakteristika je dána také stabilním hořením oblouku, maximální charakteristika je dána technickou použitelností nebo je omezena statickými charakteristikami svařovacího zdroje u maxima rozsahu.



Obr. 5. Statické charakteristiky složek oblouku
 I_{kr} kritický proud, kdy se na anodě překročí bod varu



Obr. 6. a) Statické charakteristiky oblouků ručních elektrod; b) Totéž, ale pro svařování pod tavidlem
1 kratší oblouk, 2 delší oblouk

Na velikost napětí oblouku má kromě velikosti a polarity svařovacího proudu a délky oblouku vliv také druh materiálu elektrod a jeho uspořádání (např. průměr drátu), složení atmosféry oblouku a rychlost jejího proudění, teplota plazmatu a další.

Koncem minulého století byl na základě pokusů pro statické charakteristiky oblouku objeven vztah Ayertonové

$$U_o = A + Bl_o + \frac{C + Dl_o}{I_2}$$

kde A až D jsou konstanty dané materiálem elektrod, jejich tvarem apod. Později byl proud I_2 ve vztahu povýšen exponentem $n \approx 2,62$. $\Theta \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, kde Θ je absolutní teplota (K) v ose plazmatu.

V minulém desetiletí byl výraz znovu upraven; jednotlivé složky oblouku podle vztahu (11) a obr. 4 mohou mít průběh podle obr. 5. Průběhy statických charakteristik dobře viditelných oblouků (např. u neodtavující se wolframové elektrody v argonu) se získávají optickým měřením délky oblouku [25]. Používá se i speciální přístroj, na němž

se vytvoří oblouk nastavené délky l_0 a nastaveného napětí U_0 . Proud I_2 se měří oscilografy v krátké době po zapálení. Je to výhodné pro získání statických charakteristik oblouku pod tavidlem, u obalovaných elektrod a všude tam, kde délku oblouku nelze změřit. Charakteristické průběhy $U_0 = f(I_2)_{l_0}$ jsou vyznačeny na obr. 6. V nakreslených oblastech neplatí tedy Ohmův zákon jako u pevných vodičů.

Průběhy na obr. 6a jsou obvyklé pro běžné ruční elektrody při hustotě proudu od 4 do 25 A/mm² a pro svařování pod tavidlem při hustotě proudu asi od 25 do 50 A/mm².

Průběhy na obr. 6b se vyskytují při svařování pod tavidlem a při hustotě proudu elektrod asi 50 až 150 A/mm². Některé praktické příklady těchto charakteristik jsou v [25]. Vzhledem k odlišnosti průběhů při kladné nebo záporné polaritě na svařovacím drátu pod tavidlem nelze statické charakteristiky oblouku pro střídavý proud jednoznačně vyjádřit.

2.4. PŘENOS KOVU

Základním procesem obloukového svařování je tavení elektrod pomocí energie dodávané obloukem. Elektrody (tj. svařovací elektroda a základní materiál) se slíjí v jednu lázeň a po ztuhnutí svarového kovu vytvoří housenku. Kromě chemických jevů se při tom uplatňují fyzikální jevy — ohřev, tavení a přenos kovu obloukem a jejich působení na oblouk a svařovací zdroj.

Pomocí časové lupy byly zjištěny některé základní druhy vytváření kapek kovu na žhavicím se konci svařovací elektrody (obr. 7) a způsob jejich přenosu [2]. Přenos se může uskutečnit:

- a) velkými kapkami při malých proudech a obou polaritách,
- b) menšími kapkami lišícími se při možném odtlačení kapek nad konec záporné elektrody při velkém proudu,



Obr. 7. Druhy přenosu kovu

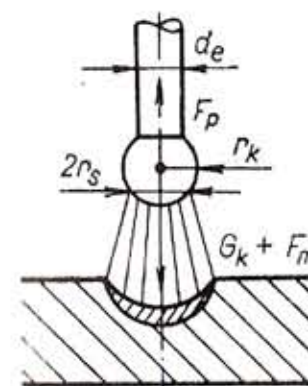
c) velkými kapkami při možném odtlačení kapek nad konec záporné elektrody při velkém proudu,

d) malými kapkami (tzv. sprchový přenos) při kladné polaritě a velké hustotě proudu (proces MIG),

e) při značném odklonu velkých kapek od osy záporné elektrody a při velkém proudu vedeném roztaveným krčkem s velkým průřezem,

f) velkými kapkami s odkloněnou kapkou na tenkém krčku, který vybuchuje při vypaření proudem za podmínek uvedených v bcdě e) (např. při koutových svařích většími proudy v CO₂),

g) krátkým obloukem, kde dříve než se vytvoří pravidelná kapka, dotkne se nastavený kov na konci elektrody tekuté lázně a je do ní vtažen (používá se např. při svařování v CO₂ v nucených polohách).



Obr. 8. Přenos kapky obloukem

Pro svařování střídavým proudem se ve větší míře uplatní způsoby a) až c). Mohou vznikat i zkraty kapkami podle druhu elektrod. Způsob c), uskutečněný střídavým proudem, může nastat např. u koutových svarů s menším odklonem kapky vzhledem k menšímu vlivu elektromagnetických sil. U svařování WIG střídavým proudem se wolframová elektroda neodtavuje, může se však přidávat svařovací drát ohříváný zvláště zdrojem střídavého proudu. Tím se podstatně zvětší výkon navaření [31].

Hlavní síly, které působí při přenosu roztaveného kovu na svařovací elektrody, jsou tíha kapky, síla povrchového napětí, reaktivní síla vyvolaná tlakem vystupujících par, tlakem proudu elektronů a tlakem neutralizovaných iontů u katody, elektromagnetická síla, síla vznikající při výbuchu plynu tvořícího se v kapce, síla při výbuchu tenkého krčku mezi elektrodou a kapkou při zkratovém přenosu, síla z dynamického plynového rázu při vzniku výboje do zkratu.

Některé tyto síly podle polohy svařování nebo navařování v prostoru přenos kovu podporují, jiné působí opačně. Jisté však je, že za vyhovujících podmínek — např. do určitého průměru drátu elektrody, při vhodné velikosti svařovacího proudu (i střídavého) a při vhodném napětí na oblouku — lze bez obtíží svařovat v poloze nad hlavou.

Činnost některých sil je vysvětlena, jiné dosud čekají na matematické odvození. Nutný však je zjednodušující předpoklad, že obloukový sloupec se nepohybuje, je souosý s elektrodou a že dění v oblouku je po dobu pozorování ustálené.

Nejjednodušší případ nastane při navařování na vodcovnou plochu shora, když volně, vlastní tíhou G_k odpadávající kapka s poloměrem r_k je brzděna silou F_p povrchového napětí roztaveného kovu na konci

elektrody s průměrem d_e (obr. 8). Kapka projde obloukem, aniž způsobí elektrický zkrat (bezzkratový přenos, obr. 9 a 11). Přenos je možný za předpokladu, že tíha kapky se rovná síle povrchového napětí [2] nebo je větší

$$G_k \geq F_p$$

$$\frac{4}{3} \pi r_k^3 \gamma g \geq \pi d_e \sigma$$

kde γ je hustota roztaveného kovu,

g zemské zrychlení,

σ součinitel povrchového napětí na hranici kapky a elektrody.

Jestliže se kapka při svém zvětšování dotkne tavné lázně na materiálu dříve, než opustí elektrodu (přenos se z elektrického hlediska nazývá zkratový, obr. 10 a 12), je vtahována do lázně silou povrchového napětí v místě dotyku, čímž je přenos podporován. V praxi se však povrch lázně vlní, a proto nelze velikost této síly přesně stanovit; uskutečněná měření v tomto případě potvrdila, že kapky mají menší průměr než kapky procházející volně obloukem.

Reaktivní síla F_r vyvolaná tlakem vystupujících par působí na elektrodu proti přenosu kapky a její velikost je dána vztahem [2]

$$F_r = A \frac{I_2^2}{S}$$

kde A je součinitel,

I_2 svařovací proud,

S plocha skvrny, z níž vystupují páry.

Vliv této síly je na anodě čtyřikrát až pětikrát menší než na katodě, takže kapky vznikající na anodě jsou menší. Reaktivní síla může vychylovat kapku z osy elektrody.

Elektromagnetická síla F_m (tzv. pinch-efekt) [2] je vyvolána svařovacím proudem a působí zejména v místě přechodu pevné válcové elektrody do tekutého stavu. Má složku radiální, stahující krček kapky, a složku axiální, jež ovlivňuje přenos kapky ve směru podélné osy elektrody. Směr axiální síly však není určen směrem proudu, ale velikostí průměru obloukového sloupce $2r_s$ vzhledem k průměru elektrody $d_e = 2r_e$. Pro axiální sílu byl odvozen vztah

$$F_{ma} = \frac{\mu I_2^2}{4\pi} \ln \frac{r_s}{r_e}$$

Pro roztavený kov elektrody je možné považovat permeabilitu μ za blízkou permeabilitě ve vakuu $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ a potom platí

$$F_{ma} = I_2^2 \ln \frac{r_s}{r_e} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N; A, m}) \quad (13)$$

Elektromagnetickou sílu ovlivňuje svařovací proud s druhou mocninou. Při malých svařovacích proudech platí:

je-li $r_s > r_e$, působí elektromagnetická síla proti přenosu kapky;

je-li $r_s = r_e$, vznikne kritický proud a vliv elektromagnetické síly se neprojeví.

Vznikne-li nadkritický svařovací proud, je $r_s < r_e$ a elektromagnetická síla podporuje přenos kapky. (Toho se využívá při svařování dlouhými impulsy, kdy se v pravidelných intervalech přidávají k nosnému proudu velké impulsy a přenos kovu probíhá v malých kapkách bez rozstříku.)

I. I. Zaruba v [26] až [28] dokázal, že při zkratovém svařovacím přenosu působí sice elektromagnetická síla a síla povrchového napětí zúžení tekutého krčku mezi koncem elektrody a kapkou, ale že daleko větší silou působí dvě v krátkém čase po sobě následující rázové vlny, způsobené výbuchy v místě krčku.

První výbuch vznikne při náhlém přerušení tenkého krčku (např. 0,06 mm v průměru), kde je značně velká hustota proudu (např. 10^7 až $5 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$). Tím je vyvolána síla, která hmotě krčku udělí značnou rychlost a způsobí také rozstřík kovu. Tato síla je mnohokrát větší než elektromagnetická síla (13).

Po prvním výbuchu následuje druhý, vyvolaný elektrickým výbojem v plynu a v parách kovu při obnovení obloukového procesu. V okamžiku prvního výbuchu se může vyskytnout podle dynamických vlastností svářečky značně velká okamžitá hodnota zkratového proudu. V okamžiku druhého výbuchu za stejných podmínek je k dispozici velký okamžitý výkon, daný zkratovým proudem a obnoveným napětím oblouku. Při přenosu velkými kapkami působí obojí nepříznivě a vyvolává značnou ztrátu kovu. Vhodným opatřením, popsáním v čl. 3.3, tomu lze zabránit.

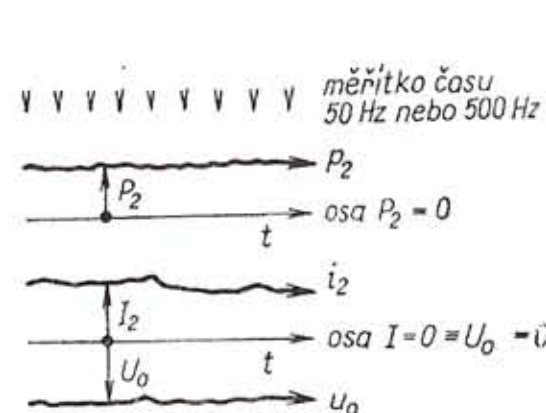
U svařování střídavým proudem jde buď o bezzkratový přenos kovu (většinou při svařování pod tavidlem kapkový), nebo o přenos kovu se zkraty kapkami (např. při svařování bazickými elektrodami na střídavý proud).

Síly působící na tvořící se a přenášené kapky kovu jsou většinou obdobné jako při svařování stejnosměrným proudem. Důkazem toho je, že odtavovací rychlost v_t elektrody napájené střídavým proudem s obdélníkovým průběhem, který má činitel tvaru $\beta = 1$, je stejná jako u stejnosměrného proudu, vezme-li se střední hodnota odtavovacích rychlostí u obou polarit. U sinusového průběhu proudu je činitel tvaru $\beta = 1,11$. Obvykle se vyskytuje průběh proudu s činitelem tvaru vyšším než 1,11 a odtavovací rychlost je mu nepřímo úměrná [29]. To je nevýhoda střídavého proudu. Činitel tvaru je poměr efektivní a střední hodnoty střídavého svařovacího proudu

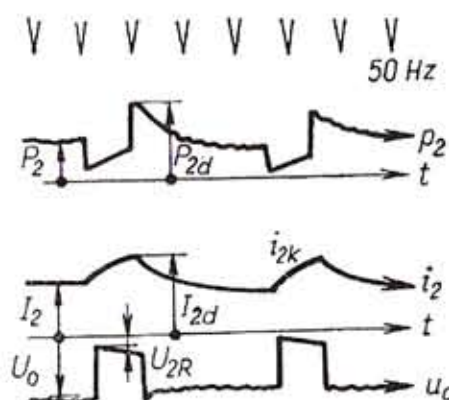
$$\beta = \frac{I_2}{I_{2s}}$$

2.5. ZVLÁŠTNOSTI OBLOUKU NAPÁJENÉHO STŘÍDAVÝM PROUDEM

Pro snadnější pochopení problému nejprve vysvětlíme napájení oblouku stejnosměrným svařovacím proudem. Typické časové průběhy stejnosměrného napětí na oblouku u_o , svařovacího proudu i_2 a výkonu oblouku p_2 na oscilogramu jsou na obr. 9 a 10. Na obrázku 9 jsou průběhy při bezzkratovém přenosu kovu, kde U_o , I_2 a P_2 znamenají v měřítku vynesené hodnoty napětí na oblouku, svařovacího proudu a výkonu oblouku. První dvě veličiny se měří např. magnetoelektrickými přístroji, třetí se vypočítá.



Obr. 9. Časové průběhy svařovacích veličin stejnosměrného procesu bez zkratů



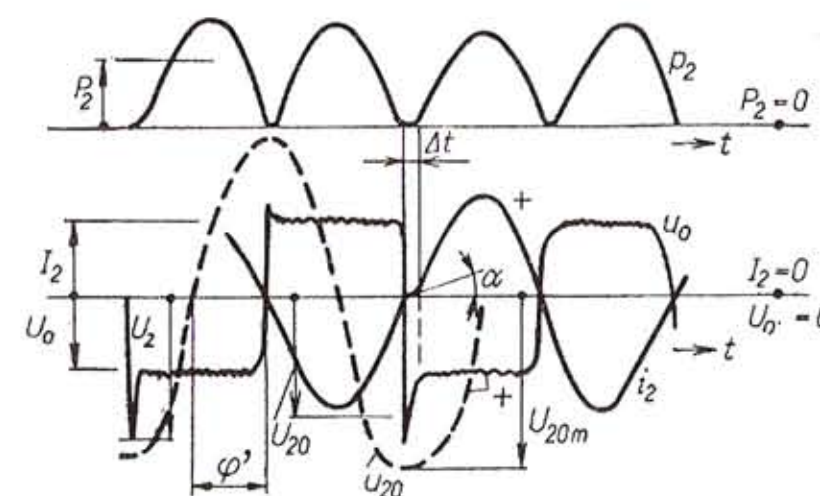
Obr. 10. Časové průběhy svařovacích veličin stejnosměrného procesu se zkraty

Na obrázku 10 je znázorněn průběh stejných veličin při svařovacím procesu probíhající se zkraty kapkami, při jejichž trvání oblouk nehoří. V okamžiku dotyku odtavující se kapky s materiálem klesne napětí na oblouku u_o skokem na velikost danou úbytkem napětí U_{2R} . Jeho velikost závisí na součinu okamžité hodnoty proudu i_2 a činného odporu ve svařovacím obvodu vzhledem k místu měření napětí v něm; proud i_2 se v tom okamžiku ještě přibližně rovná proudu I_2 . Pak zkratový proud i_{2k} vzrůstá až na hodnotu I_{2d} podle křivky dané přibližně dynamickou charakteristikou svářečky, zjištěné včetně vnějšího svařovacího obvodu (viz čl. 3.3). Přitom se úbytek napětí peněkuje zvětší až do okamžiku, kdy při náhlém přerušení krčku mezi koncem elektrody a kapkou zkrat náhle pomine. V tom okamžiku se obnoví napětí na oblouku u_o s mírným zvýšením nad hodnotu U_o . Jeho součin s hodnotou I_{2d} určí velikost maximální špičky výkonu P_{2d} . Ta je rozhodující pro kvalitu přenosu kovu, posuzovanou podle jeho ztráty zvláště rozstřikem. Čím je větší P_{2d} , tím je větší rozstřik.

Ani v jednom z obou případů nejsou elektrické veličiny U_o , I_2 , P_2 ve zcela ustáleném stavu; vždy více či méně kolísají kolem střední hodnoty.

Rozdíl mezi střídavým a stejnosměrným svařovacím proudem je v tom, že při střídavém proudu se U_o a I_2 měří (obr. 11) jako hodnoty efektivní, např. elektromagnetickými přístroji, dále že okamžité hodnoty u_o , i_2 neustále mění 2/krát za sekundu polaritu (f je kmitočet výstupního napětí svářečky, u svařovacího transformátoru je to kmitočet sítě). Oblouk tedy zhasne 2/krát za sekundu (napětí na oblouku a svařovací proud při tom klesnou na nulovou hodnotu) a opět se zapálí, navenek se však oblouk jeví stabilní. Spolehlivost jeho znovuzapálení je důležitou podmínkou pro použití střídavého proudu ke svařování. Proto je studiu a výzkumu jeho mechanismu věnována pozornost [2]. Po zapálení se proud i_2 stále mění, mění se radiální rozměry obloukového sloupce, teplota jednotlivých vrstev a aktivních skvrn. Pod některými tavidly byla naměřena teplota sloupce od 5000 K do 7000 K během půlperiody.

Průběhy střídavých elektrických veličin v oblouku při procesu bez zkratů jsou na obr. 11. Svařovací proud i_2 má průběh podobný sinusoidě. Napětí na oblouku u_o s téměř obdélníkovým průběhem je charakterizováno špičkami zapalovacího (komutačního) napětí U_z (dále zapalovací špičky). Výkon oblouku p_2 by měl teoreticky sinusový průběh s dvojnásobným kmitočtem, kdyby průběhy u_o a i_2 byly sinusové. Ve skutečnosti jsou to téměř pulsusoidy, z nichž některé mají menší amplitudu.

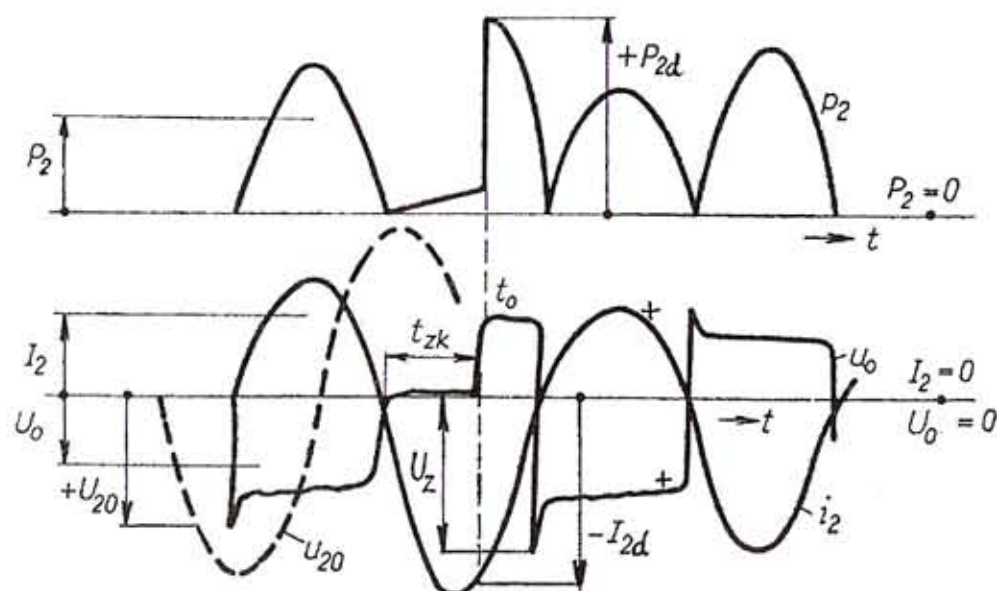


Obr. 11. Časové průběhy svařovacích veličin střídavého procesu bez zkratů

Vyazuje-li plyn plazmatu vysoké ionizační napětí (např. obsahuje-li obal elektrody nebo tavidlo fluor), je zapalovací špička vysoká a široká, proud prochází nulou při značně nižším sklonu α než u sinusoidy a průběh příkonu p_2 má široké intervaly Δt s nepatrným příkonem. V takovýchto případech má oblouk snahu zhasnout, je málo stabilní. Nestejně vysoké zapalovací špičky ukazují na nedostatečnou stálost podmínek pro znovuzapálení v různých půlperiodách. Obvykle jsou kladné zapalovací špičky $+U_z$ vyšší než záporné. Je nutná určitá rezerva velikosti napětí naprázdno U_{20} svařovacího transformátoru (na obr. 11 čárkovaně).

Ještě složitější situace nastane, svařuje-li se elektrodami s přenosem velkými kapkami a zkraty, jako je tomu u bazických elektrod na střídavý

proud. Ukázka časového průběhu elektrických veličin je na obr. 12. V časovém intervalu t_{zk} , kdy trvá zkrat kapkou, klesne u_0 na malou hodnotu (jako na obr. 10 u stejnosměrného proudu). Proud i_2 vzroste podle dynamické charakteristiky a dosáhne nahodile nějaké hodnoty (např. I_{2d}), v další půlperiodě je i_2 menší než v ustáleném stavu, v další je větší podle toho, jak rychle doznívá dynamická charakteristika (obr. 95 a 96). Průběh p_2 při zkratu má velmi malou maximální hodnotu.



Obr. 12. Časové průběhy svařovacích veličin střídavého procesu se zkraty

Až se po skončení zkratu v čase t_0 skokem obnoví napětí u_0 , výkon p_2 náhle vzroste. Okamžitá hodnota p_2 může v tomto okamžiku dosáhnout hodnoty P_{2d} , která je rozhodující pro kvalitu přenosu kovu a pro velikost rozstřiku. Protože však tvar dynamické charakteristiky závisí na okamžité hodnotě napětí, při němž zkrat začne, může P_{2d} nabýt nahodilých libovolných velikostí mezi dvěma mezními hodnotami, tj. minimální a maximální. Naproti tomu je svařování stejnosměrným proudem při použití svařovacího dynama jako zdroje charakterizováno tím, že špičky P_{2d} se od sebe málo liší a že jejich velikost je při určitém nastavení svařovacího proudu na zdroji dána téměř jen dobou trvání kapky (obr. 10).

Pro získání pokud možno věrohodného průběhu u_0 a i_2 při deionizaci a znovuzapálení je u střídavého oblouku výhodné použít katodový oscilograf s velkou rychlostí paprsků. Pro elektrodu CM-7 [2] byl získán oscilogram uvedený na obr. 13, kde po průchodu u_0 a i_2 nulou nenastane proces okamžitě, ale teprve asi za 1 ms. Napětí u_0 narůstá přibližně podle exponenciály až do hodnoty zapalovací špičky U_z , kde se náhle znovu vytvoří oblouk. Do tohoto okamžiku se zvětšuje rovněž proud i_2 v podobě předobloukového výboje pomalu do hodnoty 6 A. Pak teprve proud i_2 rychleji vzroste na svařovací proud.

Transformátory vybavené tyristory pro získání obdélníkového ča-

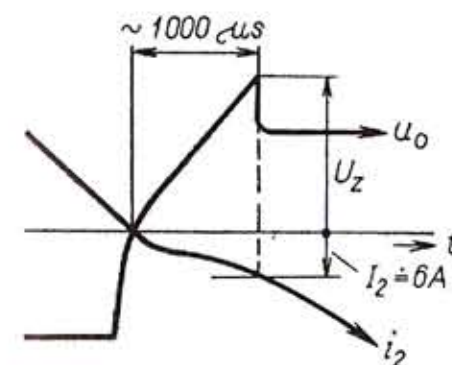
sového průběhu svařovacího proudu dosahují trvání zapalovací špičky pouze 80 až 150 μs (kap. 11), což je výhodné.

Zvláštní průběh střídavých svařovacích veličin u_0 a i_2 nastane, jsou-li např. v atmosféře argonu použity elektrody z různého materiálu, např. ve dvojicích wolfram a hliník. První kov tvoří materiál elektrody v držáku, druhý kov materiál svařovaného předmětu.

Na wolframové elektrodě s vyšší teplotou tavení, než má hliník, vznikne při záporné polaritě nižší napětí na oblouku než při kladné polaritě. Při tom při záporné polaritě prochází obloukem větší proud, než když je na těžkotavitelné elektrodě polarita kladná. Takto vznikne usměrňovací jev, který ve výstupním obvodu svařovacího transformátoru vyvolá stejnosměrnou složku proudu, jež působí nepříznivě rovněž na svařovací proces. Existují prostředky jak toto usměrnění potlačit (čl. 2.6).

Při uvedené metodě může ještě při střídavém proudu nastat částečné usměrnění, když oblouk po průchodu svařovacího proudu i_2 nulou z polarity $-$ do polarity $+$ určitou dobu, kratší než jedna půlvlna, nezapálí a současně se místo napětí na oblouku u_0 objeví na wolframové elektrodě po tuto dobu napětí naprázdno u_{20} kladné polarity a svařovací proud $i_2 = 0$. Jestliže oblouk po celou kladnou půlperiodu nehoří (tj. $i_2 = 0$) a na wolframové elektrodě je vzhledem k základnímu materiálu kladné napětí naprázdno, mluvíme o úplném usměrnění.

Tyto dva jevy, vyvolané příliš vysokou napěťovou komutační špičkou $+U_z$, způsobí nestabilitu hoření oblouku, popř. jeho zhasnutí (obr. 145). Lze je však rovněž potlačit (čl. 3.1, 3.4).



Obr. 13. Komutace střídavého napětí na oblouku a svařovacího proudu

2.6. RUČNÍ ELEKTRODY, TAVIDLO A OCHRANNÉ PLYNY Z HLEDISKA OBLOUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ STŘÍDAVÝM PROUDEM

Pro ruční svařování střídavým proudem nelze vůbec použít holé elektrody, jako u stejnosměrného proudu. Oblouk by se nezapálil a nehořel by. Do oblouku je nutné zavést stabilizační prostředky, které se dodávají především v obalu kovových tyčinek, elektrod. Obal však má

ještě několik funkcí, které se využívají i při svařování stejnosměrným proudem — formuje svarovou housenku, zlepšuje její jakost z hlediska metalurgického, zvyšuje produktivitu svařování apod. Existují ruční elektrody, které jsou běžně vhodné pro střídavý proud, např. kyselé a rutilové. Ty mohou být napájeny ze svařovacího transformátoru s horšími svařovacími vlastnostmi, s menší hmotností a menšími rozměry, a tedy levnějšího. To však vyvolá menší odtavovací rychlost, protože činitel tvaru svařovacího proudu $\beta > 1,11$ (čl. 2.4).

Je-li třeba pro náročnější svary použít elektrody s bazickým obalem (pro ně byl dříve předepsán pouze stejnosměrný proud), je nutné věnovat návrhu transformátoru větší pozornost. Lépe vyhovuje transformátor s vyšším napětím naprázdno ($U_{20} = 75 \text{ V}$ až 80 V) a když aktivní železo je méně syceno, časový průběh svařovacího proudu má téměř tvar sinusoidy. Transformátor však vyjde s většími rozměry a větší hmotností nebo má jádro z orientovaných plechů; v obou případech je nákladnější. Obalovou hmotu elektrody lze speciálním způsobem upravit, aby se poněkud potlačil vliv fluóru, který má vysoké ionizační napětí [2] a zhoršuje stabilitu hoření střídavého oblouku.

V zemích západní Evropy se téměř všechny bazické elektrody vyrábějí pro použití na stejnosměrný i na střídavý proud. Na obalu elektrod je většinou jejich označení, druh použitelného proudu a minimální napětí naprázdno (u některých i $U_{20} = 60 \text{ V}$). V katalogích elektrod se mnohdy kromě rozsahů proudů uvádějí i rozsahy napětí na oblouku.

Zde vykazuje čs. výrobce značný dluh [110]. To se však může zlepšit produkcí transformátorů s časovým průběhem svařovacího proudu kolmým na osu času (obr. 18, čl. 4.8 a kap. 11).

Podobné vlastnosti jako obalový materiál ručních elektrod má tavidlo. Je to drobně zrnitý materiál přiváděný násypkou kolem oblouku a při mechanizovaném svařování kolem nepřetržitě dodávaného svařovacího drátu. Mezi návrhem transformátoru pro svařování ručními elektrodami a transformátoru pro svařování pod tavidlem je rozdíl v tom, že pro svařování pod tavidlem se vždy uvažují bazická tavidla s obsahem fluóru (fluór je dodáván např. jako kazivec, CaF_2), která působí stejně jako u ručních elektrod. Pokud jde o napětí naprázdno, povoluje ČSN 05 2210 efektivní hodnotu napětí $U_{20} = 100 \text{ V}$ až 140 V (čl. 1.4).

I pro nedávno objevenou metodu svařování do úzké spáry pod tavidlem lze použít střídavý proud. Transformátor má ploché statické charakteristiky a jeho časový průběh proudu je rovněž kolmý na osu času (kap. 11).

Pro napájení svařovací trubičky bez ochranné atmosféry [11], [12] ze svařovacího transformátoru se provedení transformátoru řídí náplní trubičky. Pro bazickou náplň budou nároky vyšší, podobně jako pro bazická tavidla nebo obaly bazických elektrod.

Jako ochranný plyn v souvislosti se svařováním metodou WIG střídavým proudem se používá argon (ČSN 65 4305), helium nebo je-

jich směs. Nároky na koncepci transformátorů pro tuto metodu jsou značné.

Především je nutné odstranit stejnosměrnou složku svařovacího proudu, a tím odstranit jí vyvolanou stejnosměrnou magnetizaci, která tepelně ohrožuje železné jádro transformátoru a zhoršuje účinek [31]. Nedostatek pozitivního proudu navíc zeslabuje čistící účinek oblouku, tj. odstraňování oxidů z povrchu hliníku (nebo hořčíku). Střídavý proud se mění v pulsující, což vyvolá špatný vzhled povrchu svaru [111].

Usměrňovací jev se potlačuje filtračními kondenzátory sestavenými paralelně do bloku s poměrně velkou kapacitou. Blok se zapojí ve svařovacím obvodu do série (C_1 na obr. 26).

K filtraci stejnosměrné složky se v zahraničí někdy používá akumulátorová baterie. V současnosti se podařilo stejnosměrnou složku eliminovat i automatikou elektronického regulátoru bez použití filtračních kondenzátorů (kap. 11).

3. Stabilita svařovacího oblouku a požadavky na zdroj střídavého proudu

Stabilita svařovacího oblouku je dána především prostředím, ve kterém oblouk hoří, a druhem svařovacího proudu. Svařovací zdroj svými svařovacími vlastnostmi může stabilitu podpořit nebo ji může zhoršit; někdy se oblouk vůbec nevytvoří. Zapálí-li se oblouk spolehlivě a hoří-li pak klidně bez velkých výkyvů napětí na oblouku a svařovacího proudu, je-li možné jeho délku pružně prodloužit nebo zkrátit a nemusí-li svářeč vynakládat větší úsilí, aby oblouk udržel, je stabilita oblouku dobrá. S ohledem na to musí být transformátor navržen.

3.1. STATICKÁ STABILITA OBLOUKU A POŽADAVKY NA STATICKÉ CHARAKTERISTIKY ZDROJE

Poruchy, které vznikají ve svařovacím procesu většinou nahodile, mají rychlost obnovení zadaného režimu u stejnosměrného proudu [2] danou vztahem

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{i_{20}}{L} \left(\frac{\partial U_0}{\partial I_2} - \frac{\partial U_2}{\partial I_2} \right) \exp - \frac{1}{L} \left(\frac{\partial U_0}{\partial I_2} - \frac{\partial U_2}{\partial I_2} \right) t$$

kde i_{20} je okamžitá hodnota proudu v obvodu z počátečních podmínek při $i = 0$,

L indukčnost svařovacího obvodu,

exp základ přirozených logaritmů.

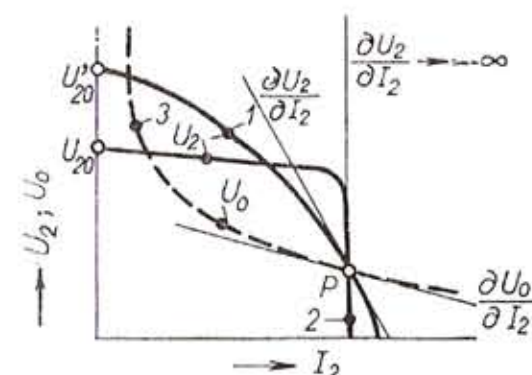
Rychlost změny $\frac{di_2}{dt}$ roste, zvětšuje-li se kladná hodnota výrazu

$$\frac{\partial U_0}{\partial I_2} - \frac{\partial U_2}{\partial I_2} > 0 \quad (14)$$

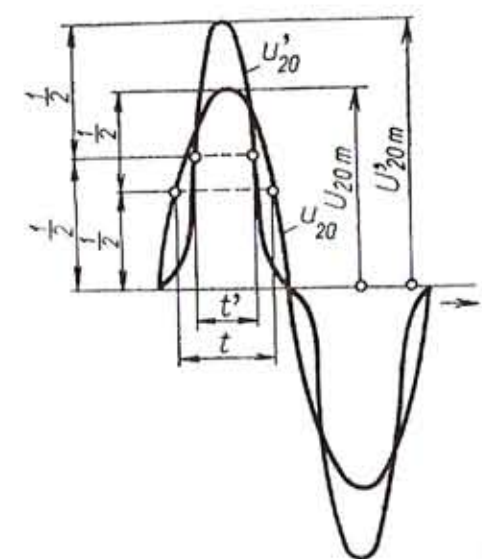
Nejpříznivější případ nastane, má-li sklon statické charakteristiky svářečky zápornou hodnotu blízkou nekonečnu, $\partial U_2 / \partial I_2 \rightarrow -\infty$ (obr. 14), tj. je-li statická charakteristika svářečky (2) v pracovním bodě P značně strmá. To je výhodné u ručního svařování a u svařovacích automatů s regulací podle napětí oblouku, ale nevýhodné pro automaty a poloautomaty s konstantním podáváním svařovacího drátu, kde se vzhledem k samoregulaci obvodu „oblouk—zdroj“ žádá plošší charakteristika (1). Statická charakteristika oblouku (3) má tečnu v bodě P se směnicí $\partial U_0 / \partial I_2$.¹⁾

¹⁾ Uvedené závěry platí i pro svařování střídavým proudem.

Pro stabilitu procesu se střídavým svařovacím proudem platí obr. 11. Tvoří se napěťové zapalovací (komutační) špičky U_z , které podle okolností vyžadují od svařovacího transformátoru dostatečnou rezervu napětí U_{20} . Např. pro kyselé a rutilové elektrody stačí efektivní hodnota napětí naprázdno $U_{20} \approx 50$ V. Pro bazické elektrody vyráběné v ČSSR (používané na stejnosměrný proud) je zapotřebí $U_{20} = 75$ až 80 V; průběh u_{20} se předpokládá sinusový. Podle [33] se v NSR podařilo dosáhnout u bazických elektrod stabilního procesu při efektivní hodnotě napětí naprázdno $U_{20} = 63$ V a při průběhu u'_{20} zkráceném tak, že U'_{20m} bylo 120 V (obr. 15). Průřez aktivního železa byl pod sekundárním vinutím zmenšen.



Obr. 14. Statické charakteristiky oblouku a svářečky



Obr. 15. Sinusový průběh napětí u_{20} zkrácený lichými harmonickými napětí u'_{20}

Svařovací obvod má vždy určitý činný odpor, který by však sám o sobě způsobil, že by oblouk každou půlperiodu na určitou delší dobu zhasl. Stabilitu udrží indukčnost svařovacího obvodu, jež se získá např. z rozptýlu magnetického obvodu transformátoru, zapojením tlumivky, transduktoru apod. Vlivem indukčnosti se posouvá zapalovací špička U_z proti průchodu napětí naprázdno u_{20} nulou o úhel Φ' (obr. 11), takže po deionizaci je v každé půlperiodě pro znovuzapálení oblouku k dispozici dostatečně vysoká okamžitá hodnota $U_{20m} \sin \Phi'$. Nepřerušovaný svařovací proces má podmínky platící pro první harmonickou [2] (viz čl. 5.3, kde na obr. 91 $\varphi' = \varphi$).

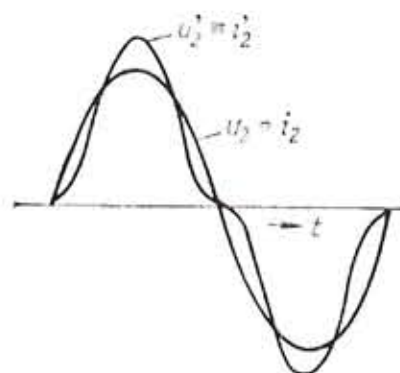
$$U_{20m} \sin \varphi' \geq U_z \quad (15)$$

$$\cos \varphi' = \frac{U_0}{U_{20m}}$$

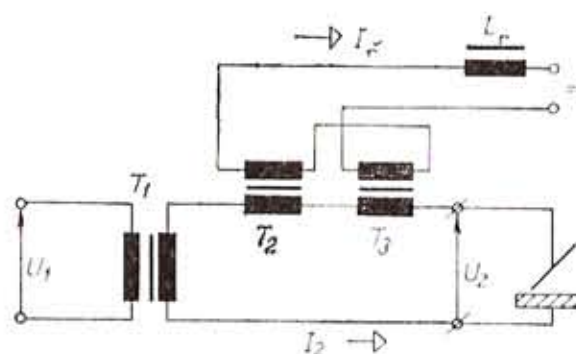
Hodnota $U_{20m} \sin \varphi'$, jež má umožnit bezpečné znovuzapálení oblouku, je však podle konstrukce a provedení zmenšena o tlumivý účinek

ΔU_2 [2], vyvolaný vířivými proudy v konstrukci svařovacího transformátoru.

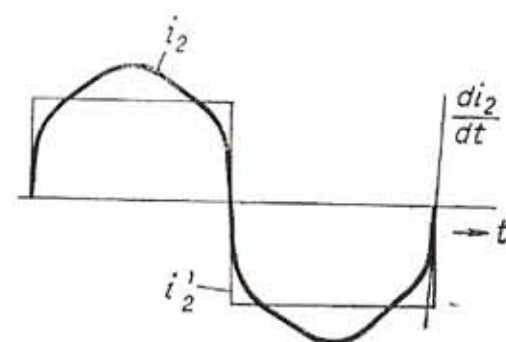
Je-li svařovací transformátor navržen tak, že při odporovém zatížení na hodnoty U_2 a I_2 (jako při svařování) mají napětí u_2 a proud i_2 časový průběh sinusový, nečiní při napětí naprázdno např. 80 V znovuzapálení oblouku u bazických elektrod zvláštní potíže. Probíhá-li u_2 , i_2 podle obr. 16 (je-li např. jádro transformátoru přesyceno), obsahuje i svařovací proud vyšší liché harmonické a znovuzapálení oblouku je znesnadněno zvětšením širokých a vysokých zapalovacích špiček především v kladné půlplně napětí. Tentýž jev lze sledovat i u čs. bazických tavidel a rovněž při svařování lehkých kovů střídavým proudem metodou WIG.



Obr. 16. Průběhy napětí a proudu při zatížení svařovacího transformátoru do činného odporu



Obr. 17. Zapojení svařovacího transformátoru se dvěma přesytkami, T_2 a T_3 , a s tlumivkou L_r v řídicím obvodu

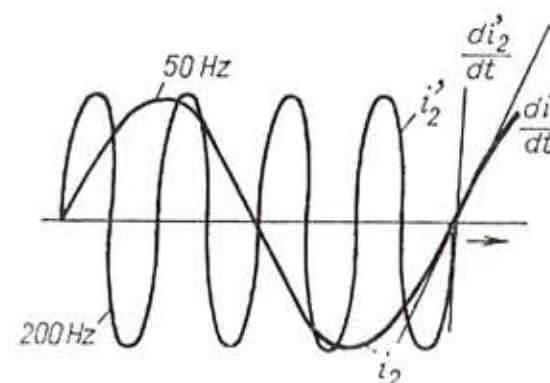


Obr. 18. Průběh svařovacího proudu pro zapojení podle obr. 17

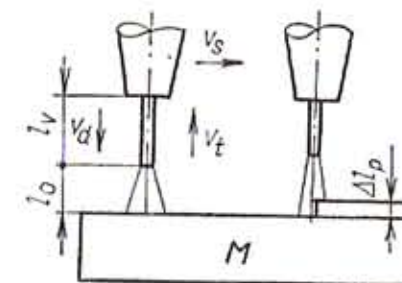
Zpočátku se pro metodu WIG vyráběly svařovací transformátory s téměř sinusovým průběhem svařovacího proudu a s napětím naprázdno až 120 V (efektivní hodnota). To nestačilo k zapálení oblouku a k jeho udržení a transformátor byl vybaven ještě vysokofrekvenčním ionizátorem (obr. 2 a 26), který zabráňoval částečnému nebo úplnému usměrnění.

Lepším řešením byl transformátor se sériovým transduktorem a s vnucenou magnetizací (obr. 17), jenž dodává svařovací proud s časovým průběhem i_2 (obr. 18) téměř kolmým na osu času ($di_2/dt \approx \infty$).

Princip je vysvětlen v čl. 4.1. (Podobného, ale menšího účinku se dosáhne, napájí-li se oblouk ze středofrekvenční svářečky např. s kmitočtem 200 až 450 Hz nebo i 2880 Hz. Čím vyšší je kmitočet, tím větší je absolutní hodnota di_2/dt — obr. 19). U zapojení podle obr. 17 stačí napětí naprázdno pouze 80 V. Výhodou je také to, že transformátor pracuje jako stabilizátor při kolísání napětí sítě; vzhledem ke strmým statickým charakteristikám se nemění svařovací proud (obr. 166, 167).



Obr. 19. Průběh svařovacího proudu s kmitočtem 50 Hz a 200 Hz



Obr. 20. Změna délky oblouku a výběhu

Pro zapálení oblouku se využívá buď vysokofrekvenční, nebo výbojový ionizátor. Po zapálení oblouku obvykle udržuje jeho stabilitu impulsový ionizátor (obr. 28 nebo 29), takže svářeč není ohrožován vř. zářením.

Koncem sedmdesátých let se přešlo na lehčí zdroj se stejnými vlastnostmi — transformátor s výkonovými tyristory (čl. 4.8 a kap. 11). Tento zdroj má mimo jiné vynikající vlastnosti pro svařování střídavým proudem ručními elektrodami bazického typu.

3.2. SAMOREGULACE OBVODU „OBLOUK—ZDROJ“

Rozumí se jí také samoregulace délky oblouku l_0 u svařovacího stroje s tavícím se drátem podávaným do tavné lázně konstantní rychlostí v_d (obr. 20). Oblouk hoří mezi materiálem M a koncem drátu. Vyběh drátu z napájecího průvlaku svařovací hubice má délku l_v . Hubice se pohybuje podél svaru svařovací rychlostí v_s . Rychlost tavení drátu je

$$v_t = \frac{\alpha_r}{G} I_2 \quad (\text{m/s})$$

kde α_r je součinitel roztavení ($\text{g/A} \cdot \text{s}$),
 G hmotnost 1 m drátu (g/m).

V rovnovážném stavu $v_d = v_t$. Postaví-li se oblouku do cesty náhlá překážka s malou výškou Δl_p , délka oblouku se zmenší o počáteční změnu délky oblouku Δl_{op} . Výsledná rychlost změny délky oblouku je

$$\frac{dl_o}{dt} = v_t - v_d$$

Na úkor zkrácení výběhu o hodnotu Δl_v se zmenšená délka oblouku l_o zvětší o $\Delta l_o = -\Delta l_v$. Časový průběh změny délky oblouku [2] je

$$\Delta l_o = \Delta l_{op} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

kde t je čas,

τ časová konstanta samoregulace.

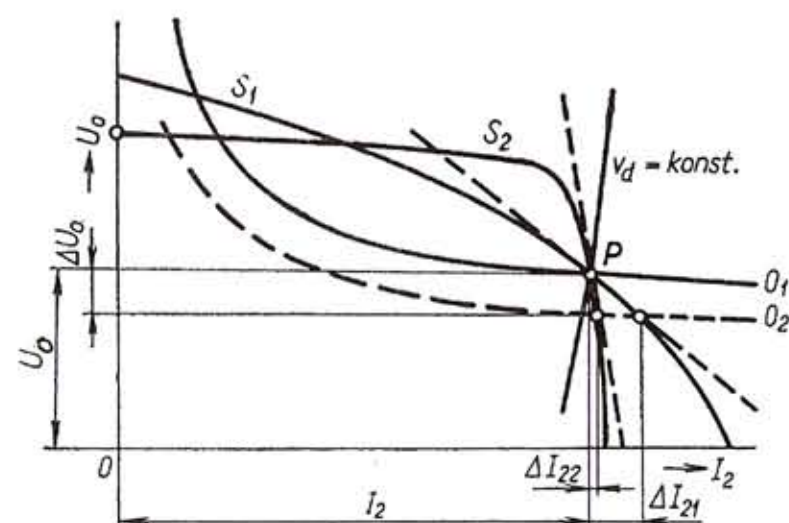
Časová konstanta τ je dána vztahem

$$\tau = \frac{\gamma}{J \left(\frac{\partial \alpha_r}{\partial l_{ob}} - E \frac{\partial \alpha_r}{\partial I_2} \cdot \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \right)} \quad (16)$$

kde γ je hustota svařovacího drátu (g/cm^3),

J hustota proudu ve svařovacím drátu (A/cm^2),

E intenzita elektrického pole ve svařovacím oblouku (V/cm).



Obr. 21. Statické charakteristiky svářeček při samoregulaci

Výraz $\partial I_2 / \partial U_2$ je převrácená hodnota směrnice tečny (sklonu) statické charakteristiky svářečky v pracovním bodě P (obr. 21). V uvažovaném případě je vždy záporná. Tečny v bodě P jsou na obr. 21 čárkovány.

Aby se změna délky oblouku Δl_o rychleji uskutečnila, tj. aby samoregulace byla kvalitnější a svařovací proces byl stabilní, vyžaduje se malá hodnota τ . Toho se dosáhne za těchto podmínek:

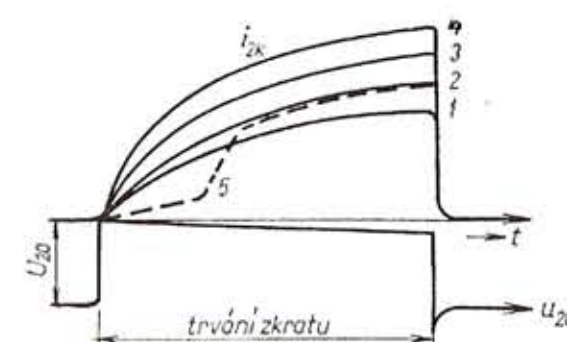
— hustota proudu je velká (tenký drát nebo velký svařovací proud),

— směrnice tečny $\partial U_2 / \partial I_2$ má pokud možno malou zápornou hodnotu, tzn. že statická charakteristika svářečky je v pracovním bodě např. polostrmá,

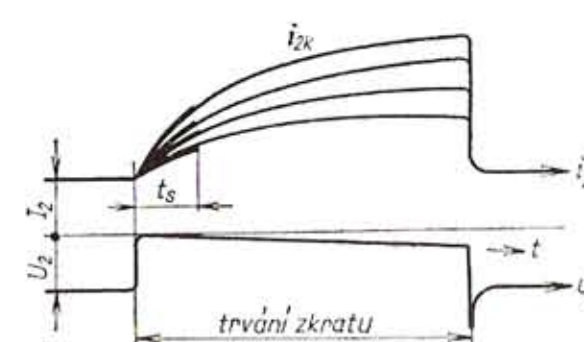
— elektrické pole ve svařovacím oblouku má velkou intenzitu E (závisí na prostředí v oblouku),

— hodnota $\partial \alpha_r / \partial I_2$ je velká.

Posledního požadavku by se dosáhlo prodloužením délky výběhu, avšak na úkor kvality přenosu kovu při přehřátém svařovacím drátu. Při dlouhém výběhu sleduje konec drátu nepřesně drážku, což rovněž znehodnocuje svar.



Obr. 22. Dynamické charakteristiky stejnosměrné svářečky při chodu $U_{20} - i_{2k} - U_{20}$



Obr. 23. Dynamické charakteristiky stejnosměrné svářečky při chodu $U_2; I_2 - i_{2k} - U_2; I_2$

Vliv tvaru statické charakteristiky svářečky na časovou konstantu τ je patrný z obr. 21. Statická charakteristika S_1 je polostrmá, statická charakteristika S_2 je strmá. Pracovním bodem P prochází v ustáleném stavu statická charakteristika oblouku O_1 a statická charakteristika automatu s konstantním podáváním drátu ($v_d = \text{konst}$). Zkrátí-li se náhle délka oblouku o Δl_{op} , přejde pracovní bod přechodně na fiktivní statickou charakteristiku oblouku O_2 . Při charakteristice svářečky S_1 je okamžité zvětšení svařovacího proudu $\Delta I_{21} > \Delta I_{22}$. Proudem $I_2 + \Delta I_{21}$ se konec drátu rychleji utaví na původní hodnotu l_o . Podobně, ale s opačným účinkem, působí porucha vzniklá prodloužením oblouku; v_t se zmenší. Hodnota ΔI_{22} u svářečky se statickou charakteristikou S_2 je pro samoregulaci nevyhovující. Svařovací proces je nestabilní.

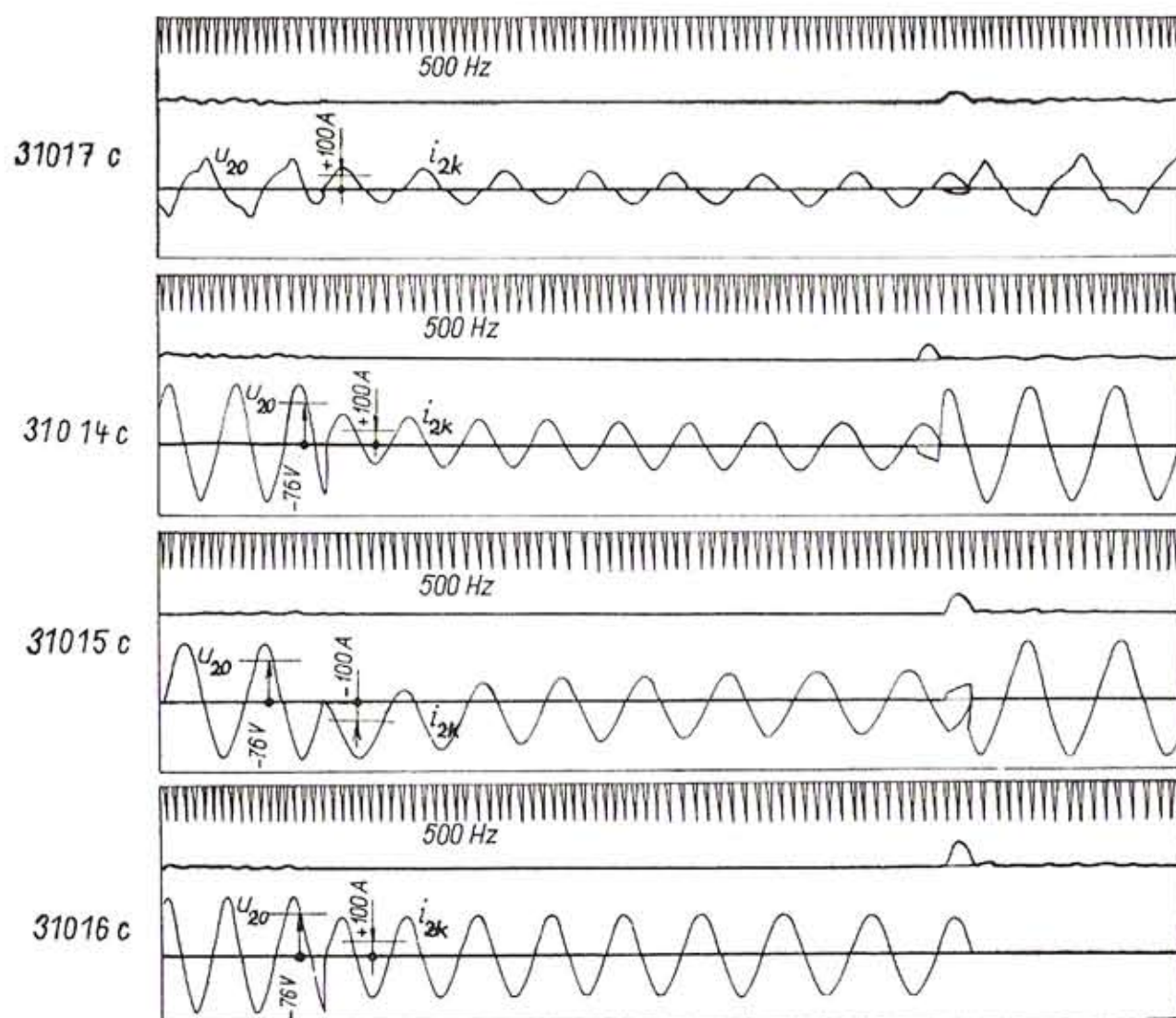
3.3. DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SVÁŘEČEK, ZVLÁŠTĚ SVÁŘOVACÍCH TRANSFORMÁTORŮ

Dynamické vlastnosti se zjišťují z oscilogramů dynamických charakteristik chodu svářečky „naprázdno—zkrat—naprázdno“ a „zatížení—zkrat—zatížení“. Zatěžuje se do rezistoru na hodnoty napětí U_2 a proudu I_2 jako při svařování.

Nejdůležitější částí dynamických charakteristik chodu „ $U_{20}-i_{2k}-U_{20}$ “ (naprázdno—zkrat—naprázdno) jsou průběhy $i_{2k} = f(t)_{R-}$ pro různé nastavení ovládače. Velmi jednoduché exponenciální průběhy 1 až 4 podle obr. 22 má stejnosměrná svářečka s plochými statickými charakteristikami (s konstantním napětím), nemá-li ve svařovacím obvodu žádný člen přesycený magnetický obvod. Čím vyšší je napětí naprázdno U_{20} , tím větší číslo na obrázku má dynamická charakteristika. Čárkovaná křivka 5 označuje nevhodnou dynamickou charakteristiku (je-li např. přesycena stejnosměrná tlumivka ve svařovacím obvodu).

Na obrázku 23 jsou analogické dynamické charakteristiky chodu „ $I_2, U_2-i_{2k}-I_2, U_2$ “ (zatížení—zkrat—zatížení). Zkraty $i_{2k} = f(t)_{R-}$ však začínají z hodnoty I_2 ; tlustě vytažené části znázorňují zkrat kapkou v souladu s obr. 10.

Průběhy dynamických charakteristik ovlivňuje zvláště celková indukčnost L_c , činný odpor R_c ve svařovacím obvodu a napětí naprázdno



Obr. 24. Oscilogramy dynamických charakteristik svařovacího transformátoru při chodu $u_{20}-i_{2k}-u_{20}$

U_{20} [35] a nyní také koncepce elektronického automatického regulátoru ovládacího zařízení. Pro různé procesy je lze vhodně seřadit.

Z charakteristik na obr. 22 lze posuzovat kvalitu startů, podle obr. 23 lze posuzovat kvalitu přenosu kovu vzhledem k jeho ztrátě, je-li známa střední doba t_s zkratu kapkou. Dynamické charakteristiky svařovacích dynam lze zpravidla při určitém nastavení regulátoru reprodukovat.

U svařovacích transformátorů se dynamické charakteristiky $i_{2k} = f(t)_{R-}$ zjišťují obdobně, průběhy jsou střídavé. Pro určité nastavení ovládače je však nelze snadno reprodukovat, neboť se zaznamenají nahodile mezi dvěma krajními průběhy, odvozenými početně v odst. 5.3b [rovnice (79) a (81), obr. 95 a 96].

Rozborem rovnice (81), jež byla odvozena v [8], je možné zjistit, že poměr velikosti nárazového zkratového proudu I_{2dz} k velikosti proudu před zkratem I_2 za krajních podmínek je tím menší, čím je menší poměr U_2/U_{20} ; to znamená, že čím je vyšší efektivní hodnota napětí naprázdno, tím budou menší výkonové špičky P_{zd} na konci zkratů kapkami. U svařovacích transformátorů je tomu tedy naopak než u stejnosměrných svářeček např. pro svařování v CO_2 .

Závisí to na okamžité hodnotě napětí naprázdno u_{20} , při níž zkrat začne. Na průběh proudu i_2 může mít vliv i přesycení jádra transformátoru nebo zkraty kapkami (obr. 11 a 12).

Ukázka průběhů dynamických charakteristik chodu „ $u_{20}-i_{2k}-u_{20}$ “ svařovacího transformátoru RT 200 (vývoj ZEZ Hořice) je pro několik nastavení ovládače uvedena na obr. 24. Charakteristiky chodu „ $i_2, u_2-i_{2k}-i_2, u_2$ “ ukazuje obr. 25. Byly nastaveny tyto parametry svářečky (tab. 16):

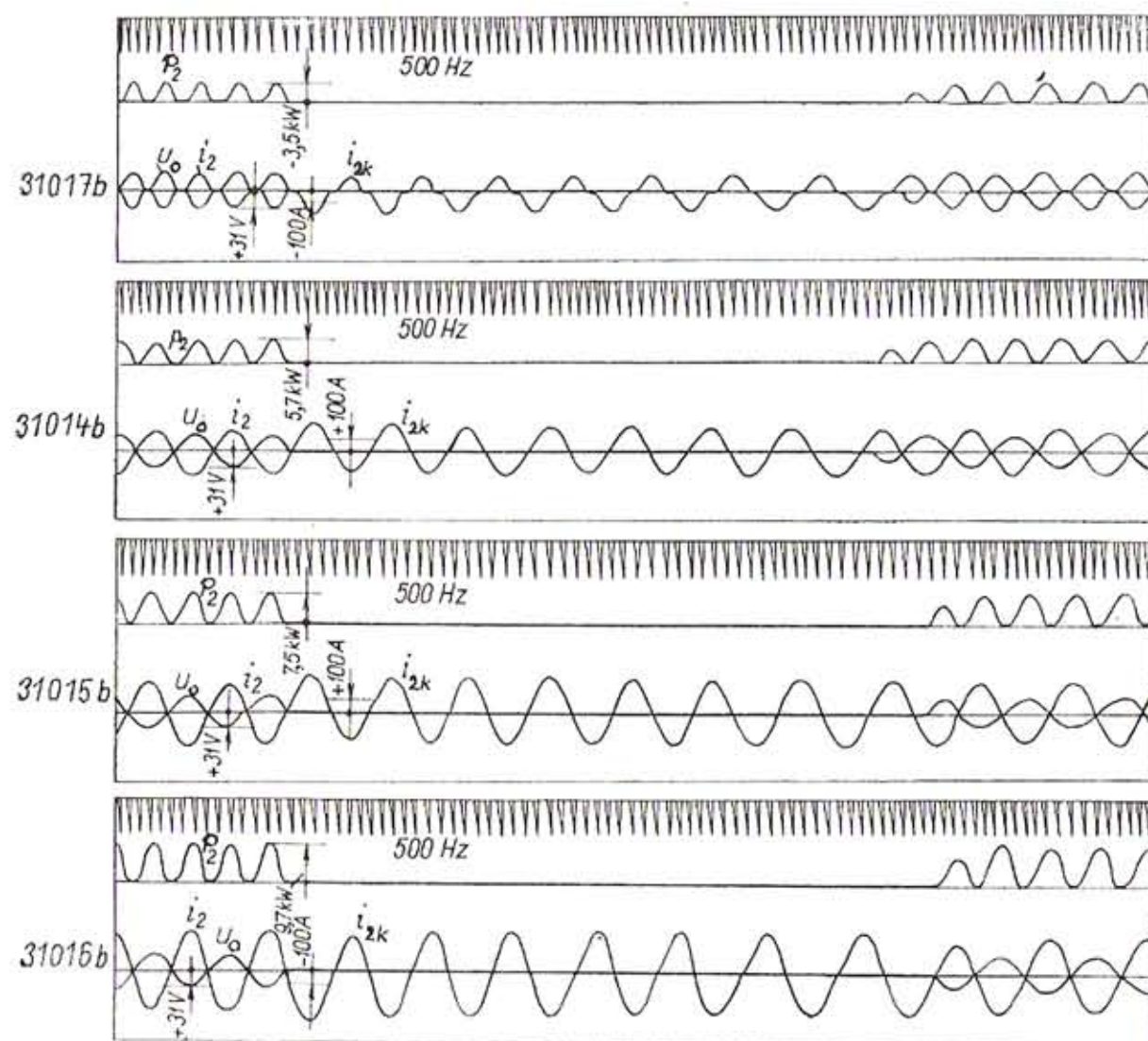
pro oscilogramy 31017b, c	$I_2 = 80 \text{ A};$	$U_2 = 22 \text{ V},$
pro oscilogramy 31014b, c	$I_2 = 130 \text{ A};$	$U_2 = 22 \text{ V},$
pro oscilogramy 31015b, c	$I_2 = 170 \text{ A};$	$U_2 = 22 \text{ V},$
pro oscilogramy 31016b, c	$I_2 = 220 \text{ A};$	$U_2 = 22 \text{ V}.$

Transformátor RT 200 má pro nastavování svařovacího proudu I_2 posuvné cívky a průběhy $i_{2k} = f(t)_{R-}$ jsou sinusovky, kromě 31017b, c, kde je patrný vliv přesycení magnetického obvodu způsobeného přidavnými cívkami pro dosažení minima rozsahu svařovacího proudu. Provedení s přidavnými cívkami na jádru je nevhodné, neboť by nedovolilo použití bazických elektrod a snížilo by součinitel roztavení α_r u všech použitelných druhů elektrod; horší je i start.

Po připojení usměrňovače (jednfázového můstku) na výstupní svorky svařovacího transformátoru vyjdou dynamické charakteristiky $i_{2k} = f(t)_{R-}$ rovněž nahodile mezi dvěma krajními průběhy, ale s pulsujiícími průběhy. (Příklad je uveden v [4], obr. 131a). Jestliže se do takového svařovacího obvodu zapojí tlumivka se vzduchovou mezerou s indukčností asi 4 mH, impulsy přejdou do téměř vyhlazeného průběhu

(obr. 22 a 23). Principiální schéma je na obr. 122, výpočet tlumivky je v čl. 5.11.

U svařovacích transformátorů se dynamické charakteristiky (obr. 24) používají pro posouzení kvality startu. Ta je závislá na velikosti a tvaru první amplitudy i_{2k} ; poněkud větší amplituda zajišťuje



Obr. 25. Oscilogram dynamické charakteristiky svařovacího transformátoru při chodu u_2 ; i_2 — i_{2k} — u_2 ; i_2

spolehlivější start. Dynamické charakteristiky (obr. 25) dávají možnost posoudit svařovací transformátor, pokud jde o jeho vliv na ztrátu kovu, především rozstříkem. Čím je první amplituda menší, tím je menší i výkonová špička P_{2d} na obr. 12, a menší je i ztráta kovu. Vykazují-li průběhy $i_{2k} = f(t)_{R-}$ superpozici lichých harmonických (viz oscilogramy 31017b, c), bude kromě větší ztráty kovu svařovací proces málo stabilní a zapalovací špičky budou vysoké a široké. Ukázky oscilografických záznamů svařovacích veličin při svařování svařovacími transformátory RT 200 a TR 260 jsou v čl. 7.1 (obr. 139 a 140).

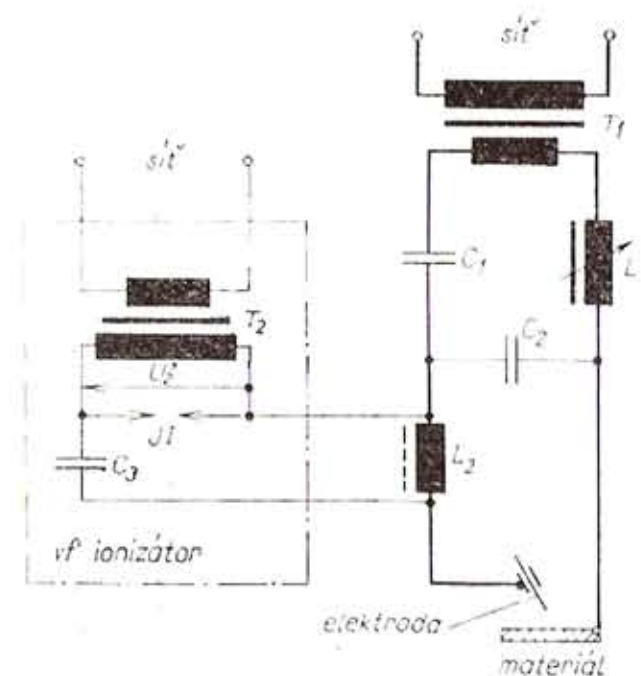
3.4. OPATŘENÍ PRO ZLEPŠENÍ STABILITY STŘÍDAVÉHO SVAŘOVACÍHO OBLOUKU

Ke zlepšení stability střídavého svařovacího oblouku, především s průmyslovým kmitočtem 50 Hz, a pro bezdotykové starty svařování lze použít buď vysokofrekvenční ionizátory, nebo zdroje synchronizovaných impulsů napětí (tzv. impulsové ionizátory).

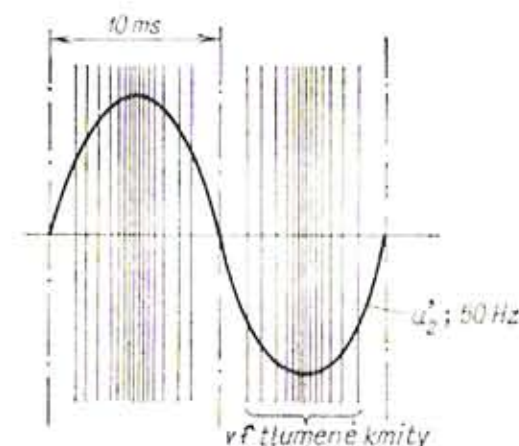
Ionizátory by se uplatnily u ručního svařování střídavým proudem a bazičnými elektrodami, kde by bylo možné snížit U_{20} např. z 80 V na 60 V. Vzhledem ke zkomplikování a zdražení svařovacího transformátoru, k častějšímu výskytu poruch, popř. k nepřijatelnému ozařování ruky a jiných částí těla svářeče vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, k nepříjemnému pocitu svářeče při náhodném proražení standardního držáku elektrod nebo při dotyku elektrody a z toho plynoucích následků nebyl uvedený způsob zaveden.

Pro automatické svařování bazičnými tavidly nejsou ionizátory rovněž vhodné, protože roztavené tavidlo tvoří obvod paralelní k oblouku. Ionizátory by vyžadovaly velký výkon s vysokým napětím, které by působilo potíže při izolování automatu.

Velké uplatnění mají ionizátory pro bezdotykové starty a udržení stabilního oblouku při svařování WIG střídavým proudem (při stejnosměrném proudu se používají pouze pro bezdotykové starty). Ke svařovacímu transformátoru se ionizátor připojuje paralelně nebo je zapojen (např. pomocí vysokofrekvenční tlumivky) do svařovacího obvodu jako sériový ionizátor.



Obr. 26. Vf ionizátor připojený sériově do svařovacího obvodu



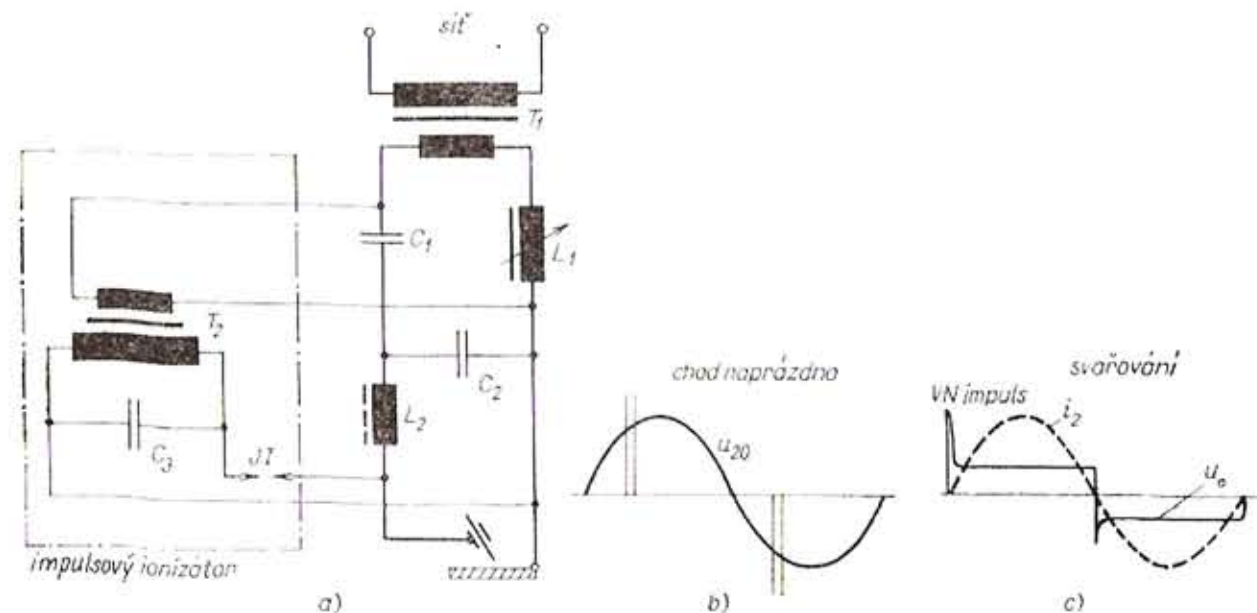
Obr. 27. Oscilogram napětí u_2' s Vf superpozicí

Vysokofrekvenční ionizátory mají výstupní vf napětí asi od 1 kV do 7 kV, kmitočtové pásmo sahá řádově od kHz do MHz. Princip zapojení a funkce vf ionizátoru jsou na obr. 26 a 27. Na schématu na obr. 26 je T_1 , L_1 svařovací transformátor; jeho efektivní hodnota napětí naprázdno může být i o něco více než 100 V; C_1 jsou filtrační kondenzátory k potlačení usměrňovacího jevu, C_2 je blokovací kondenzátor, který nepropustí vf napětí do obvodu T_1 , $L_1 - C_1$. L_2 je vf tlumivka.

Ve výstupním obvodu transformátorku T_2 se vysokým napětím nabíjí kondenzátor C_3 a přes jiskřiště JI se v tlumených vf kmitech vybíjí pomocí L_2 do obvodu, v němž leží elektroda a materiál. Mezi nimi se pomocí vf vysokého napětí zapálí a udržuje svařovací oblouk.

V každé půlperiodě (obr. 27) vznikne řada tlumených zákmitů od určitého průrazného napětí na jiskřišti JI ; jejich kmitočet je nejvyšší u vrcholu sinusovky vysokého napětí u_2 výstupu transformátorku T_2 .

Nevýhodou vf ionizátorů je značně široké spektrum kmitočtů, které způsobuje nežádoucí rušení rádiových vln a elektronických přístrojů a při nadměrné hodnotě intenzity vf elektromagnetického pole škodí zdraví.

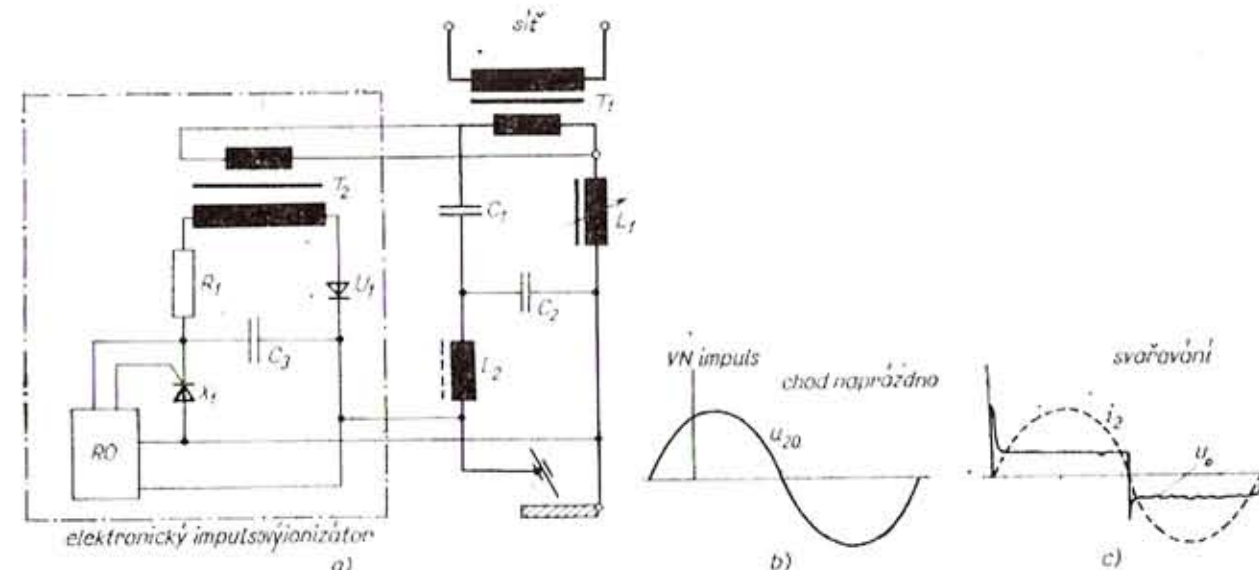


Obr. 28. Impulsový ionizátor s jiskřištěm, připojení paralelní

Uvedené nevýhody odstraňuje použití impulsových ionizátorů, které mezi elektrodou a materiál dodávají synchronizované úzké vf impulsy vysokého napětí (do 2,5 kV) v okamžiku, kdy napětí oblouku prochází nulou. Zde stačí napětí naprázdno svařovacího transformátoru $U_{20} = 80$ V. Impulsový ionizátor s jiskřištěm je na obr. 28, bez jiskřiště na obr. 29.

Svařovací obvod na obr. 28a je shodný s obvodem na obr. 26. Impulsový ionizátor je na výstupu transformátorku T_2 napájen pracovním napětím svařovacího transformátoru T_1 , L_1 . Vysokým napětím z T_2

se nabije kondenzátor C_3 a po dosažení průrazného napětí na jiskřišti JI se vybije v mezeře mezi elektrodou a materiálem. Při chodu svařovacího transformátoru T_1 naprázdno je na vstupu transformátorku T_2 napětí naprázdno u_{20} (obr. 28b). Při pozvolném dosažení okamžité hodnoty blízké maximu sinusoidy u_{20} vznikne na elektrodě výbojem C_3 přes jiskřiště JI



Obr. 29. Impulsový ionizátor bez jiskřiště, připojení paralelní

několik impulsů, které zapálí oblouk. Vzniklé napětí na oblouku má při průchodu nulou velkou strmost (du_2/dt). Při této strmosti se rychle nabíjí kondenzátor C_3 a okamžitě se přes jiskřiště vybíjí. Vzniklými impulsy mezi elektrodou a materiálem se podporuje stabilita hoření střídavého svařovacího oblouku (obr. 28c). Připojení ionizátoru na oblouk je zde paralelní.

Schéma svařovacího obvodu na obr. 29a je shodné se schématem na obr. 26. Paralelně k oblouku je ve zjednodušené formě připojen elektronický impulsový ionizátor, kde místo jiskřiště (obr. 28a) pracuje tyristor X_1 se svým řídicím obvodem RO .

Kondenzátor C_3 se nabíjí přes rezistor R_1 z jednocestného usměrňovače U_1 na vrcholovou hodnotu jeho napětí. Řídicí obvod tyristoru dá vhodný signál, tyristorem projde stejnosměrný impuls, kterým se zapálí mezi elektrodou a základním materiálem oblouk (obr. 29b) nebo se jím udržuje stabilita oblouku (obr. 29c).

3.5. STRUČNÉ ZÁKLADY AUTOMATICKÉ REGULACE SVAŘOVACÍHO PROCESU

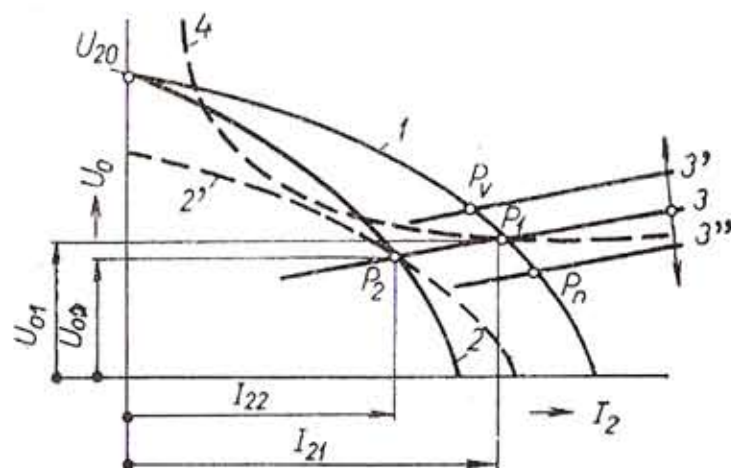
Výhody automatické regulace obloukového svařování pod tavidlem jsou známé. Nejčastěji se používají svařovací automaty nebo poloautomaty regulované

a) podle napětí oblouku, jež se udržuje konstantní (podobně pracuje i svářeč při použití ručních elektrod),

b) nezávisle na napětí oblouku, udržující konstantní rychlost podávání drátu.

Někdy jsou regulátory zabudovány do společné regulační skříně, takže automat lze použít pro několik svařovacích metod. Takovou koncepci měly některé československé automaty již před 25 lety (např. traktor typu SUM 1000, vyvinutý ve VÚSSTS Chotěboř). Automaty mohou být umístěny na vozíku s nastavitelnou svařovací rychlostí (je udržována na stálé hodnotě). Někdy se používají stacionární automaty — svařovací hlavy. U poloautomatů obvykle svářeč vede podél svaru hubici umístěnou na konci hadicového kabelu.

Nejjednodušší, ale málo přesná byla regulace přímá, podle napětí na oblouku — napětí na oblouku se po malé úpravě vedlo na svorky podávacího motoru. Dokonalejší regulaci se všemi možnostmi zpětných vazeb zajistily tyratrony, transduktor s elektronkovým předzesilovačem, Leonardova skupina aj. a nakonec nejmodernější provedení s tyristorem. Vzájemnou vazbu mezi automatem a svařovacím transformátorem ukazuje obr. 30. Na ovládací skříňce automatu je potenciometrem nastavena statická charakteristika automatu, označená 3. Ovládačem svařovacího transformátoru jsou nastaveny statické charakteristiky 1 nebo 2, jež se protínají s 3 v bodě P_1 nebo P_2 . Ty leží také na statických charakteristikách oblouku 4 (zakreslena čárkováně pouze jedna). Svařovací proud I_{22} je mnohem menší než I_{21} , ale napětí na oblouku $U_{02} \doteq U_{01}$; tj. při tomto druhu regulace automatu se ovládačem svařovacího transformátoru nastavuje svařovací proud I_2 .

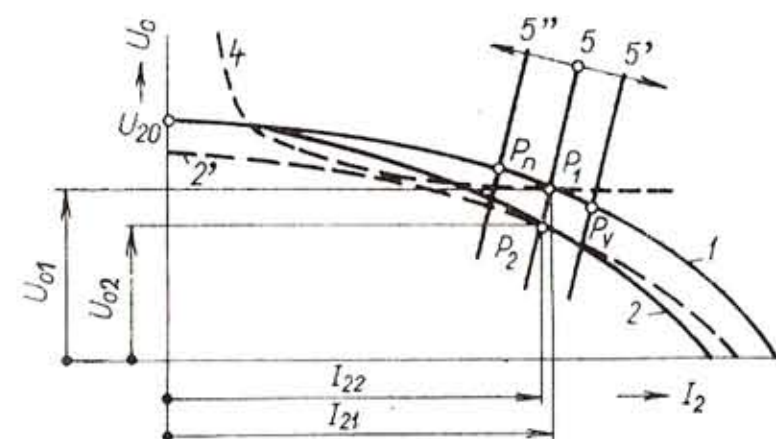


Obr. 30. Princip regulace automatu podle napětí oblouku

Napětí na oblouku se nastavuje potenciometrem (ovládačem) na ovládací skříňce automatu mezi body P_v (vyšší U_0) a P_n (nižší U_0) na obr. 30. Čím je statická charakteristika svařovacího transformátoru strmější (místo U_2 je zde vzhledem ke skutečnosti uvažováno napětí na oblouku U_0 , rovnice (4)), tím méně se přitom změní svařovací proud

a nemusí se přestavovat napětí na oblouku; proto se zde volí vyšší napětí naprázdno U_{20} , má-li transformátor tuto možnost přepínání (přepojovač A1—A2 na obr. 163). Nejpohodlnější je, je-li nastavování U_0 a I_2 plynulé a lze je kontrolovat voltmetrem a ampérmetrem ovládací skřínky.

Nezávislá regulace používá jako nejjednodušší podávací ústrojí asynchronní motor s převodovou skříní s výměnnými páry ozubených kol. Dokonalejší zařízení mají regulátor s plynulým nastavením podávací rychlosti (transduktor s elektronkovým předzesilovačem, s tranzistery), nejnovější s tyristorem, obvykle se zpětnou vazbou z tachogenerátoru.



Obr. 31. Princip regulace automatu s konstantním podáváním drátu

Princip nastavování veličin U_0 a I_2 lze odvodit z obr. 31 s analogickými charakteristikami jako na obr. 30. Zde jsou charakteristiky automatu (také odtavovací křivky) 5 až 5'' téměř svislé a pro každou platí určitá konstantní podávací rychlost svařovacího drátu v_d . Bodem P_n prochází charakteristika 5'' s menší rychlostí než bodem P_1 (s charakteristikou 5); větší rychlost vyvolá větší svařovací proud I_2 . U automatu s asynchronním motorem se nastavuje svařovací proud I_2 stupňovitě, je-li automat v klidu.

U dokonalejších automatů s regulací nezávislou na napětí na oblouku se svařovací proud I_2 nastavuje plynule během svařování. Pro plynulé nastavení napětí na oblouku U_0 se používá (jako u automatů s asynchronním motorem) ovládač svařovacího transformátoru (např. podle obr. 31), při změně nastavení statické charakteristiky transformátoru z 1 na 2 se sníží napětí na oblouku z U_{01} na U_{02} . Svařovací proud se přitom zmenší pouze nepatrně, $I_{22} \doteq I_{21}$. Čím je statická charakteristika transformátoru méně strmá, tím je proces stabilnější (čl. 3.2). Napětí naprázdno U_{20} se však nesmí snížit na hodnotu, která by nevyhověla druhu tavidla.

Oba druhy regulací automatů mají u složitějších zařízení stabilizováno referenční napětí a svařovací veličina, která se na nich nastavuje, se při kclísání napětí sítě nemění.

Na ovládací skříněce automatů bývá dále řídicí člen pro posuv drátu oběma směry ručně a řídicí prvek pro začátek a konec svařování. Rele pro tyto úkony, automatický regulátor a napájecí transformátory jsou vestavěny do zvláštní regulační skříně. Poslední československý automat — traktor typu WST 1000 z bývalé VZS Chotěboř, s tyristorovými regulátory pro podávání drátu a posuv vozíku, má většinu uvedených dílů v ovládací skříněce a regulační skříně odpadá.

3.6. DÁLKOVÁ NASTAVOVÁNÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK SVAŘOVACÍCH TRANSFORMÁTORŮ

Jestliže při použití automatu s regulací podle napětí na oblouku klesne vlivem poklesu napětí sítě U_1 napětí naprázdno U_{20} na hodnotu danou charakteristikou $2'$ (obr. 30), klesne při původním nastavení potenciometru ovládací skříňky svařovací proud z hodnoty I_{21} na I_{22} (ukáže to ampérmetr). Kdyby svářeč tento stav nepostřehl, svar by neměl dostatečný průvar; na ovládací skříňce nebo poblíž ní má svářeč k dispozici prvek (tlačítka, přesmykač nebo potenciometr dálkového ovládání svařovacího transformátoru), kterým nastaví svařovací proud na správnou hodnotu.

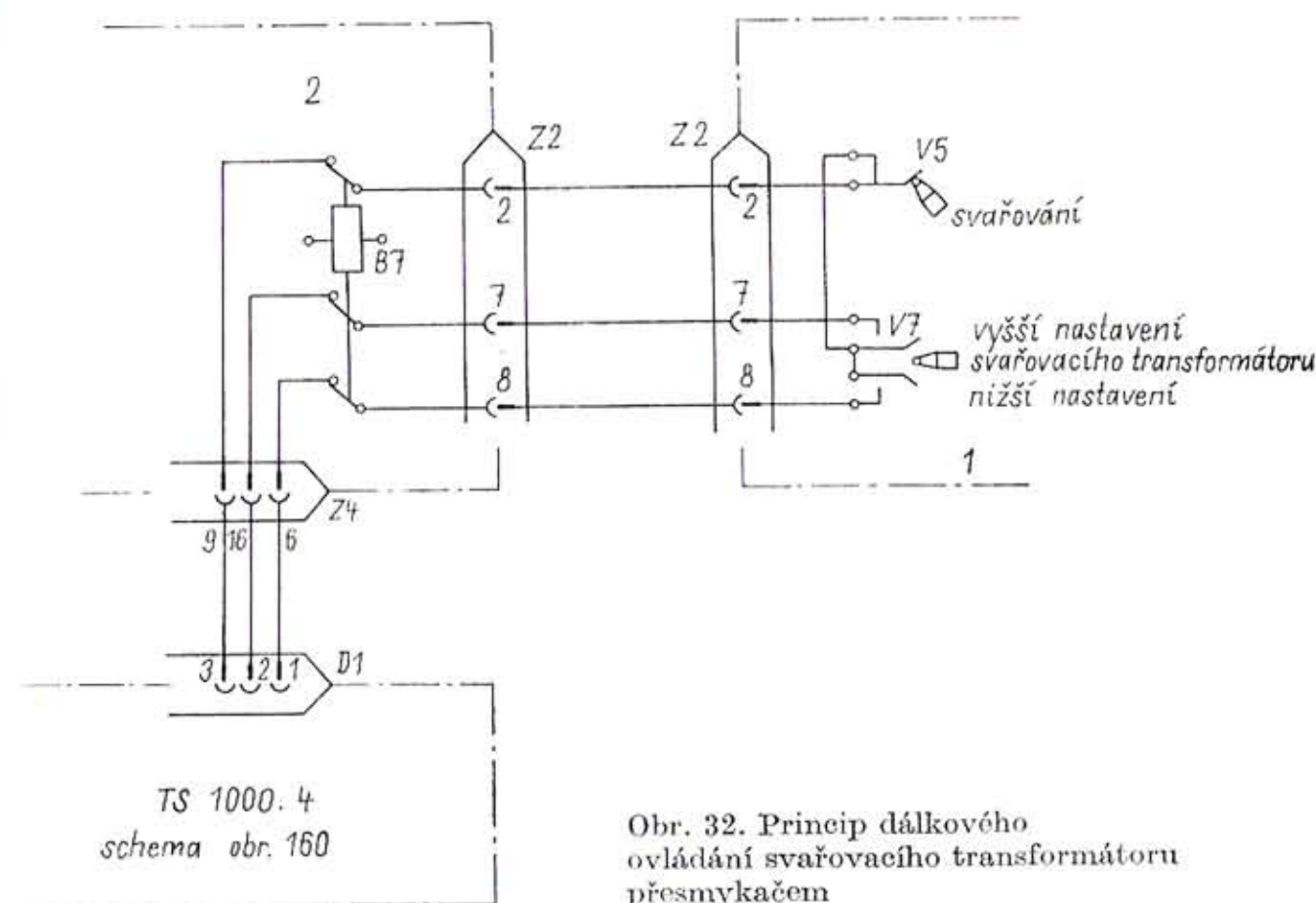
U automatu s konstantní rychlostí podávání drátu klesne při poklesu napětí sítě napětí na oblouku z U_{01} na U_{02} (obr. 31). Svařeč je nastaven podle voltmetru na původní hodnotu tímtež prvkem dálkového ovládání svařovacího transformátoru jako při regulaci podle napětí oblouku, jinak by se šířka svaru nepřipustně zmenšila, popř. by vznikly vruby.

Příklad na obr. 32 ukazuje provedení dálkového nastavování svařovacích veličin I_2 nebo U_0 pomocí přesmykače V_7 na ovládací skříňce 1 svařovacího traktoru SST 1000, jehož propojovací vodiče ve šňůrách vedou přes zásuvky Z2 a Z4 a přes relé přepínání funkcí B7 regulační skříňce SUM 1000.8 (označena 2) do zásuvky D1 svařovacího transformátoru TS 1000.4 (jeho schéma je na obr. 160). V transformátoru je pomocí reverzačních stykačů S3 a S4 napájen servomotor M2, posouvající jádro 4 tlumivky (obr. 62a). Krajní polohy jádra chrání koncové vypínače K1 a K2.

Svařovací transformátor typu TSM 1000 používá pro nastavování svých strmých statických charakteristik stejnosměrnou magnetizaci magnetického bočníku a má samočinné vyrovňování změn napětí sítě, které automaticky zabrání vadným svarům.

Transformátor TSM 1000 pracuje se svařovacím automatem, např. WST 1000, přepnutým na regulaci podle napětí na oblouku tak, že do oblouku je dodáván téměř konstantní výkon a geometrické rozměry svaru jsou dostatečně stálé. Svářeč není nucen na začátku svařování nastavené svařovací veličiny opravovat. Dálkové i místní nastavování

svařovacího proudu I_2 se děje malým potenciometrem ovládacím tyristorový regulátor stejnosměrné magnetizace. Pohled na transformátor je na obr. 165. Jeho schéma je na obr. 163; do zásuvky D2 se připojuje dálkový ovládač — potenciometr R11. Místní ovládač je R1.



Obr. 32. Princip dálkového ovládání svařovacího transformátoru přesmykačem

Stejný způsob dálkového a místního ovládání svařovacího proudu potenciometrem je použit u soupravy pro WIG typu MA 315, kde svařovací proud je rovněž nezávislý na kolísání napětí sítě a na změně teploty vinutí a výstupního napětí.

Dálkové ovládání je velmi výhodné a mohlo by být zabudováno i u transformátoru střední velikosti pro ruční svařování, pokud má ovládací zařízení posuvný magnetický bočník nebo posuvné cívky. Servomotor v transformátoru by zajistil posuv.

3.7. SAMOČINNÉ ODPÍNÁNÍ NAPĚTÍ NAPRÁZDNO

Protože podle ČSN 05 2210 je pro mechanizované svařování pod tavidlem dovoleno napětí naprázdno U_{20} svařovacího transformátoru vyšší než 80 V, a protože je pro manipulaci se svařovacím automatem pro svařování pod tavidlem nutné, aby byl svařovací drát mimo vlastní

svarování bez napětí, jsou transformátory TS 1000.4 a TSM 1000 opatřeny proudovými relé B1 (schéma na obr. 160 a 163), jejichž kontakt při průchodu svařovacího proudu zapne a po dobu svařování zůstane v zapnuté poloze. Jakmile se svařovací proud přeruší, kotva proudového relé odpadne a kontakt vypne. Kdyby se tento kontakt v zapnuté poloze používal přímo jako pomocný přídržný kontakt pro cívku hlavního stykače ve vstupním obvodu svařovacího transformátoru, často by se stalo, že by proudové relé při vysoké a široké zapalovací špičce napětí U_z , při které je svařovací proud nulový, způsobilo odpadnutí hlavního stykače a přerušení svařovacího procesu. Proto je mezičlánkem mezi proudovým relé a hlavním stykačem časové relé nastavené na 0,2 až 0,5 s, které stykač po uvedení do zapnuté poloze, i když již svařovací proud neprochází. Časové relé se využívá také k odtavení konce svařovacího drátu do určité výšky nad tavnou lázeň při ručním ukončení svařování prvkem na ovládací skřínce, který dá impuls k přerušení proudu do podávacího motoru. Drát se ještě okamžik (pokud hoří oblouk) utavuje a nezataví se setrvačností podávacího motoru do lázně.

Proudové relé pro odpínání napětí naprázdno se používá i u ručního svařování WIG, kde může být i $U_{20} = 120$ V. Napětí naprázdno nesmí být na výstupních svorkách déle než 0,2 s.

Transformátory pro ruční svařování bývají v zahraničí někdy opatřovány zařízením pro samočinné odpojování U_{20} a pro snižování výstupního napětí na efektivní hodnotu 42 V, popř. 36 V nebo 12 V, aby bylo možné svařovat na kovových konstrukcích i uvnitř kovových nádob. Po prvním dotyku elektrody se základním materiálem se U_{20} obnoví, po druhém dotyku se zapálí oblouk. Tím se však transformátor zdrazuje a může být poruchovější. Příklady podobných zapojení jsou v [36] až [39].

3.8. ÚČINNOST A ÚČINÍK SVAŘOVACÍHO TRANSFORMÁTORU

Účinnost svařovacího transformátoru je dána vztahem

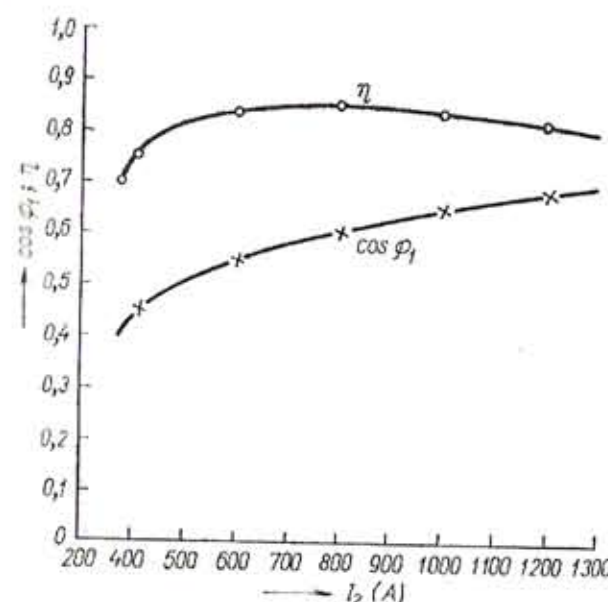
$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1 \cos \varphi} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (17)$$

kde P_1 je příkon (kW),

P_2 výkon na výstupních svorkách (kW).

Zjišťuje se měřením a pohybuje se pro jmenovité hodnoty U_{2n} , I_{2n} od 75 do 85 % podle velikosti a provedení transformátoru. Účinnost je menší než u transformátorů např. síťových, protože se žádá nastavitelnost statických charakteristik v poměrně širokém rozsahu (1 : 5). Téměř vždy mají chlazení ventilátorem, který stále běží, i v přestávkách.

Využívá se izolace vinutí vyšších teplotních tříd, aby vyšla menší hmotnost a menší rozměry a aby transformátory zvláště pro ruční svařování bylo možné snadněji transportovat; z toho vyplývají větší ztráty ve vinutí. Orientačně se účinnost vypočítá podle vztahu z čl. 5.3a, přesněji se určí z výpočtu ztrát podle (107).



Obr. 33. Průběh účinnosti a účinku u TS 1000.3

Účinek $\cos \varphi$ svařovacího transformátoru vyplývá z hospodárného nastavování statických charakteristik; při jeho určité hodnotě se podporuje i stabilita svařovacího procesu. Účinek se orientačně zjistí rovněž podle čl. 5.3a, kde je uveden vztah mezi η a $\cos \varphi$ (75). Přesně se účinek stanoví podle výrazu

$$\cos \varphi = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1 \eta} = \frac{P_1}{S_1} \quad (18)$$

kde S_1 je zdánlivý příkon (kV · A).

Účinek se při jmenovitých hodnotách svařovacího transformátoru podle jeho velikosti pohybuje od 0,4 do 0,7.

Průběhy veličin η a $\cos \varphi$ pro svařovací transformátory typu TS 1000.3 (pro automaty pod tavidlem) v závislosti na svařovacím proudu jsou na obr. 33. Pro menší transformátory (pro ruční svařování) by v celém rozsahu svařovacího proudu I_2 byl účinek asi od 0,4 do 0,6, i méně.

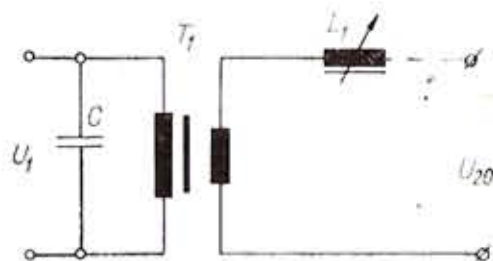
3.9. KOMPENZACE ÚČINÍKU

Ve velkých závodech, které jsou závislé na veřejné síti a mají převážně indukční zátěž, se instalují centrální kompenzační stanice, které udržují účinek na neutrální hodnotě 0,98. Jednotlivá paralelní kom-

penzace svařovacích transformátorů by zde měla význam, kdyby např. do místa svařovacího automatu pod tavidlem vedla nedostačující přípojka, jejíž rekonstrukce by byla nákladná, a kde by se v důsledku svařování projevilo nepříjemné kolísání napětí sítě. Náklady na kompenzační kondenzátory při jednotlivé kompenzaci se amortizují za půl roku až jeden rok provozu.

Kompenzace je nutná, je-li zřízeno svařovací místo v menším závodě s málo dimenzovanou veřejnou přípojkou a napájecím transformátorem. Totéž platí o malých opravárenských dílnách a pro malé montážní svařovací transformátory, které lze přenášet na různá pracoviště, kde síťová přípojka ani elektroměr podle štítku nedovolí odběr proudu udaného pro svařovací transformátor.

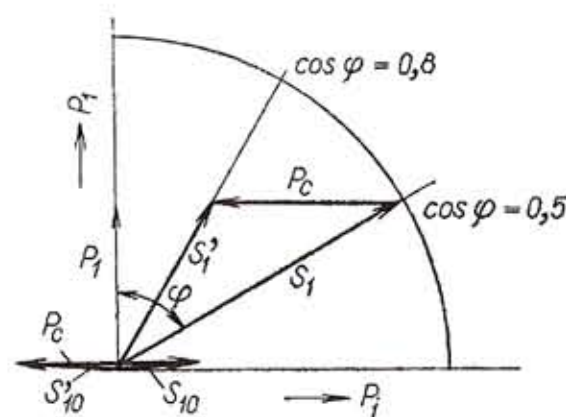
V zahraničí se jednofázové kompenzační kondenzátory pro tyto účely vyrábějí a výrobci svařovacích transformátorů a transformátorků je montují na přání zákazníka do krytu transformátoru (schéma na obr. 34). Bez kompenzace je zdánlivý příkon svařovacího transformátoru např. S_1 (obr. 35) při $\cos \varphi = 0,5$. Při individuální kompenzaci s jalovým výkonem kondenzátoru P_c se zmenší zdánlivý příkon transformátoru na S'_1 a $\cos \varphi$ se zvětší např. na hodnotu 0,7 až 0,8.



Obr. 34. Paralelní připojení kompenzačního kondenzátoru C

Avšak při chodu transformátoru naprázdno, při němž se odebírá ze sítě pouze zdánlivý příkon S_{10} a kompenzační výkon P_c zůstává nezměněn, by mohla nastat značná překompenzace S'_{10} , kdyby P_c byl velký. Proto se u středních svařovacích transformátorů omezuje kompenzace na výkon kondenzátoru rovný zdánlivému příkonu transformátoru naprázdno nebo jeho 1,5násobku. Transformátor se má v delších pracovních přestávkách vypínat, ať je opatřen kompenzací nebo není.

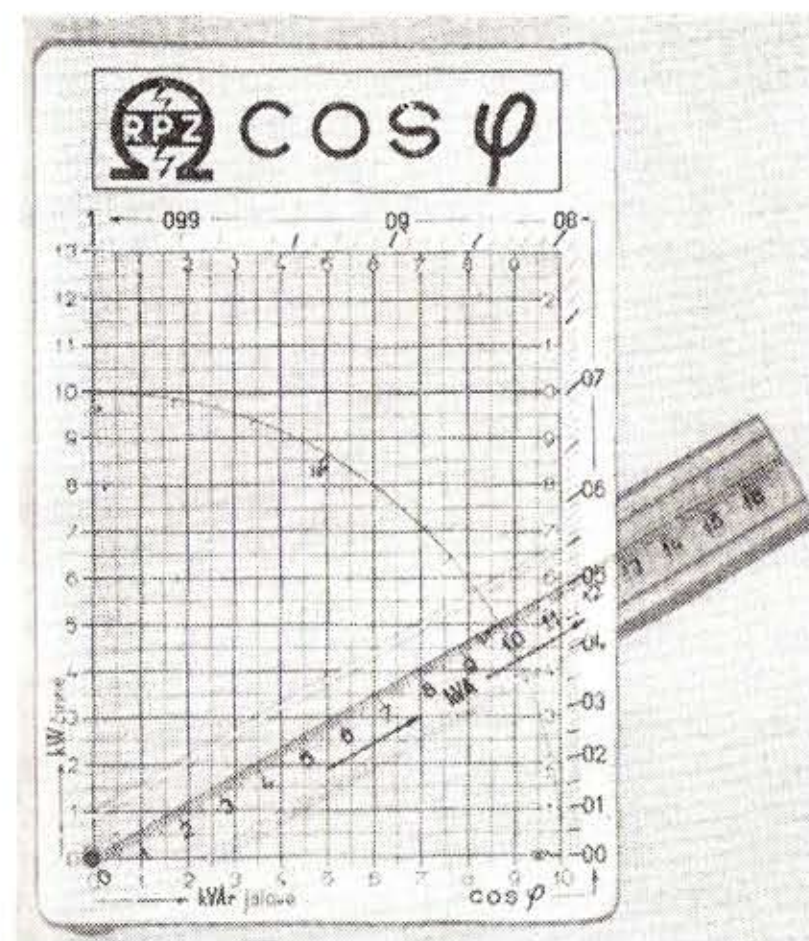
Svařovací transformátory pro svařování pod tavidlem (např. pro $I_{2n} = 1000$ A) se odpojují od sítě stykačem automaticky po skončení svařování a chod naprázdno u nich trvá pouze zlomek sekundy.



Obr. 35. Fázorový diagram kompenzace účinníku

Zdánlivý příkon podle obr. 33 např. pro nejmenší svařovací proud I_2 a příslušné normalizované pracovní napětí U_p je

$$S_1 = \frac{U_p I_2 \cdot 10^{-3}}{\eta \cos \varphi} = \frac{36 \cdot 400 \cdot 10^{-3}}{0,75 \cdot 0,45} = 42,6 \text{ kV} \cdot \text{A}$$



Obr. 36. Nomogram pro stanovení výkonu kompenzační baterie

Při kompenzaci na $\cos \varphi = 0,8$ vyjde podle diagramu na obr. 36

$$P_c = 30 \text{ kvar}$$

Pro svařovací proud $I_2 = 800$ A a týž výkon kondenzátorů by byl $\cos \varphi = 0,98$.

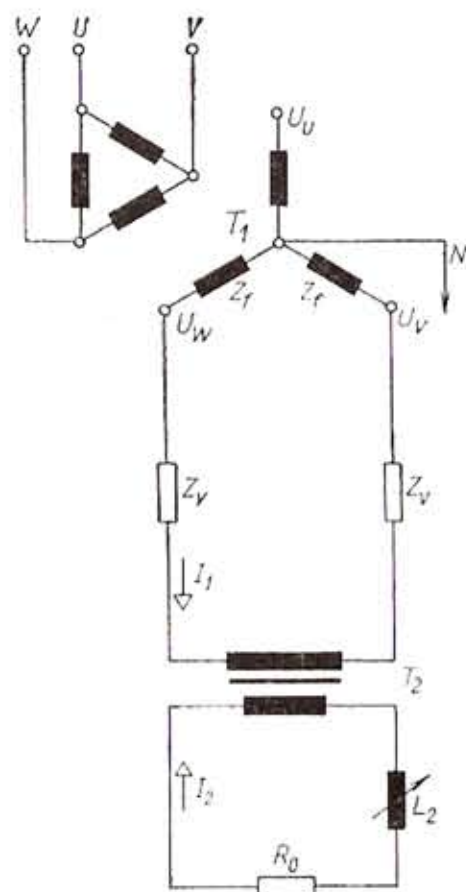
Podle podnikové normy PN 35 8204 k. p. ZEZ Praha, závod Žamberk, lze pro tento účel objednat tři kusy jednofázových kompenzačních kondenzátorů typu CTAK 1-04/10, každý pro 10 kvar, 400 V, 50 Hz, v běžném provedení s nehořlavou náplní. Proti překompenzaci by v tomto případě mělo být navrženo automatické vypínání stykače vstupního vinutí, je-li transformátor zapnut naprázdno déle než jednu sekundu.

Vzhledem k tomu, že se tolik rozšířilo používání svařovacích transformátorků, bylo by třeba, aby se vyráběly kompenzační konden-

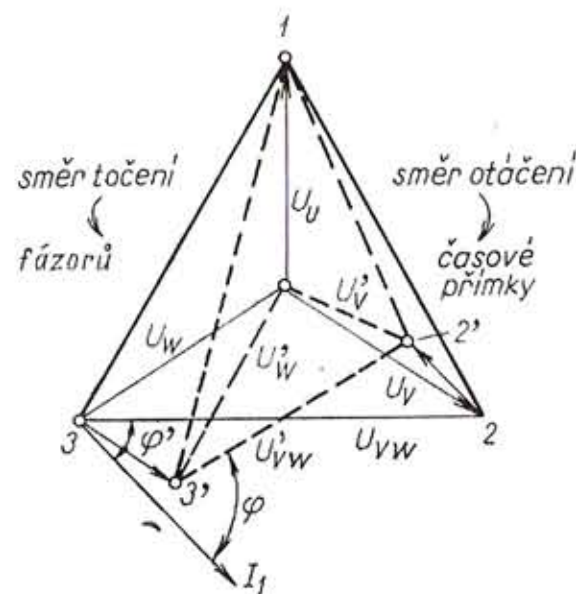
zátory s malými rozměry pro montáž naplocho, s výkonem např. kolem 2 kvar pro 400 V, 50 Hz. (V NSR někteří výrobci montují do transformátorků kondenzátory s výkonem až 3 kvar a kompenzují je i na $\cos \varphi = 0,95$.)

3.10. NEROVNOMĚRNÉ ZATÍŽENÍ SÍTĚ

Nevýhodou jednofázového svařovacího transformátoru je bezesporu nerovnoměrné zatížení sítě, která je běžně trojfázová. Poměry v síti, popř. na svorkách napájecího transformátoru T_1 s výstupem 3×400 V a svařovacího transformátoru T_2 podle schématu na obr. 37, jsou znázorněny na fázorovém diagramu na obr. 38.



Obr. 37. Schéma jednofázového nesouměrného zatížení sítě



Obr. 38. Fázorový diagram jednofázového nesouměrného zatížení sítě

Vstupní vinutí transformátoru T_1 je zapojeno do trojúhelníku, protože se v něm lépe vyrovnává nerovnoměrné zatížení, a výstupní vinutí je zapojeno do hvězdy s vyvedeným středním vodičem. Fázová napětí výstupního vinutí jsou označena U_U , U_V , U_W , impedance fází transformátoru T_1 mají velikost Z_f a impedance vedení je Z_v . Vstupním vinutím T_2 prochází vstupní proud I_1 , výstupním vinutím svařovací proud I_2 do oblouku s odporem R_0 .

Na fázorovém diagramu jsou konce fázorů fázových napětí pro T_1

označeny 1 pro U_U , 2 pro U_V , 3 pro U_W . Při zatížení T_2 do oblouku bude jeho vstupní proud I_1 posunut o fázový úhel φ' za sdruženým napětím U_{VW} (body 2–3). Na celkové impedanci vstupního obvodu vznikne úbytek napětí ZI_1 . Na fázorovém diagramu jsou to fázory mezi body 3–3' a 2–2'. Body 2'–3' představují sdružené napětí U'_{VW} na vstupních svorkách T_2 ; φ je fázový posun mezi U'_{VW} a I_1 . Na T_1 tedy existuje souměrná soustava napětí s vrcholy fázorového trojúhelníku 1–2–3, na T_2 nesouměrná soustava 1–2'–3', kterou lze rozložit na souslednou a zpětnou [40]. Nulová soustava odpadá, neboť těžiště trojúhelníků 1–2–3 a 1–2'–3' jsou shodná. Fázor fázového napětí U_U se nezměnil, což je výhodné pro připojení např. regulační skříně svařovacího automatu se vstupním napětím 1×220 V.

Z obrázku 38 a výpočtem lze dokázat, že fázory U'_V a U_V předbíhají fázory U'_W a U_W . U'_V je menší než U_V a U'_W větší než U_W . Velikost těchto změn závisí na impedanci napájecího vedení a transformátoru T_1 . Proto se doporučuje napájet svařovací transformátor T_2 z transformátoru T_1 s několikrát větším výkonem, než je příkon T_2 , použít samostatné dobře dimenzované vedení, nejlépe s úbytkem napětí 2 až 3 %, jde-li o zařízení pro svařování pod tavidlem. U málo dimenzovaného vedení a T_1 lze v tomto případě využít kompenzace podle čl. 3.9.

Je-li v závodě svařovna rozsáhlá, s mnoha svařovacími místy pro svařování pod tavidlem i ruční, rozdělí se svařovací transformátory rovnoměrně mezi fázové vodiče, takže napájecí vedení i síťový transformátor jsou téměř symetricky zatíženy. Je-li připojován jednotlivý střední nebo malý svařovací transformátor na síť pro malocdběratele, jsou poměry v jejím zatížení stejné jako u velkých transformátorů; je nutné vzít rovněž v úvahu možnost výskytu nerovnoměrného zatížení sítě a zavést opatření k jeho omezení.

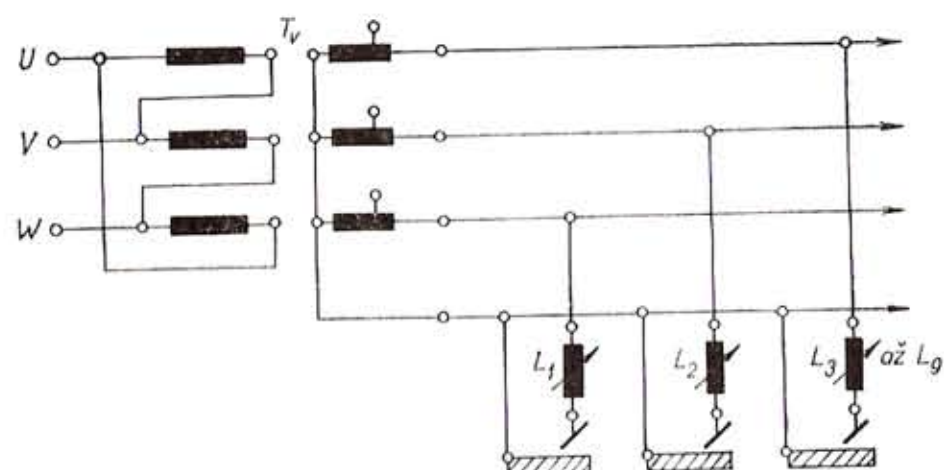
3.11. VÍCEMÍSTNÉ SVAŘOVÁNÍ

Tento způsob svařování má význam tam, kde je v závodě zřízeno více stabilních svařovacích míst blízko sebe a je třeba ušetřit plochu, kterou by zabraly jednotlivé svařovací transformátory. Investiční náklady se zmenší až o 60 %. Příklad zapojení je na obr. 39. Nastavování svařovacího proudu se děje hospodárně tlumivkami L_1 až L_3 , popř. až L_9 . Napájecí transformátor T_v pro vícemístné svařování má několik tvrdých statických charakteristik s poklesem z U_{20} na U_{2n} 3 až 5 %; jeho účinnost dosahuje 90 až 95 %. Provozní náklady se zmenší o 20 až 30 % vzhledem ke stejnému počtu jednotlivých transformátorů; neexistuje chod naprázdno, neboť součinitel současnosti je větší než 0,6.

Nevýhodou je velký průřez napájecích přípojníc k tlumivkám, popř. impedance přípojníc, která může způsobit velký úbytek napětí

a potíže při startu. Proto je počet míst omezen na 9 až 12. Vznikne-li porucha na transformátoru T_v , je vyřazena celá skupina; to vyžaduje rezervní transformátor.

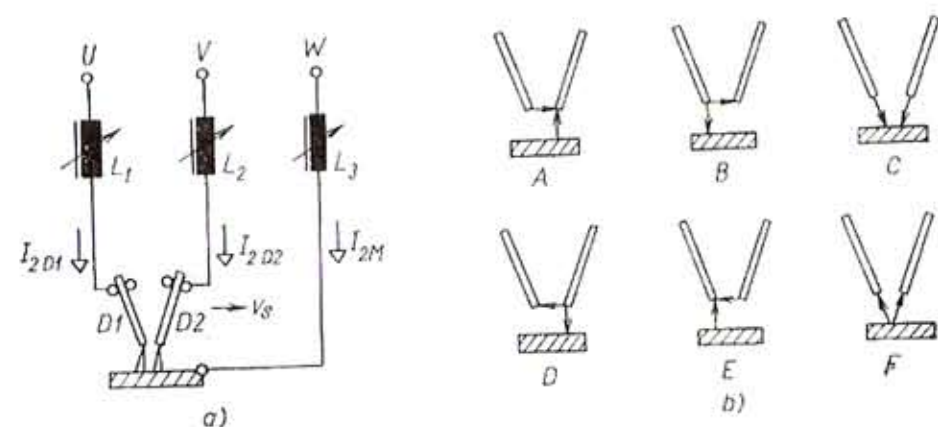
V ČSSR není tento způsob napájení oblouku obvyklý, spíše se využívají vícemístné usměrňovače s nastavitelnými rezistory pro nastavení statických charakteristik; účinnost je však poměrně menší.



Obr. 39. Schéma vícemístného svařování

3.12. VÍCEFÁZOVÉ SVAŘOVÁNÍ

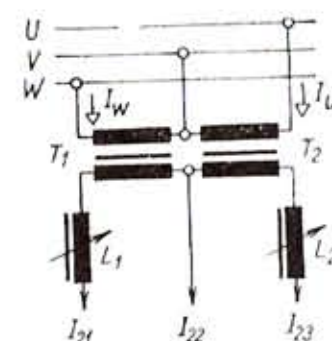
Tento způsob svařování lze využít především pro automatické svařování pod tavidlem a pro proces MIG. Má několik výhod. Zvětšuje rovnoměrnost zatížení trojfázové sítě, neboť napájí svařovací transformátory ze tří fází. Jsou-li konce elektrod blízko sebe, oblouky hoří vždy ve skupinách po dvou postupně trojfázově, jak ukazuje obr. 40. Je možné snížit napětí U_{20} jednotlivých transformátorů; jak vyplývá z odvození v [21], může být poměr $U_{20}/U_0 = 1,17$. Oblouk hoří stabilněji než jednofázový, kde je minimální poměr $U_{20}/U_0 = 1,8$. Netvoří se špičky



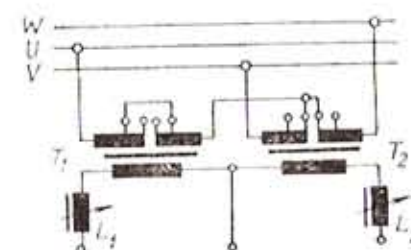
Obr. 40. Princip trojfázového svařování

zapalovacího napětí, neboť hoří vždy dva oblouky, z nichž jeden dohořívá, a zapálí se třetí (obr. 40b). Technologicky se trojfázový oblouk blíží stejnosměrnému oblouku, je zde však ještě větší množství odtaveného kovu drátů D1, D2 (obr. 40a) při navařování, jestliže se v nich zvětší I_{2D1} a I_{2D2} pomocí tlumivek L_1 a L_2 vzhledem k proudu do materiálu I_{2M} , nastavenému pomocí L_3 na menší hodnotu. Je-li na jednu z elektrod použit legovaný drát, lze v něm změnou proudu měnit obsah legur v návaru.

Sít je zatížena trojfázově, i když jsou dráty D1, D2 od sebe vzdáleny a jsou různě skloněny. Na každém drátu hoří samostatný oblouk, např. v tandemovém uspořádání. Při tomto způsobu se zvýší produktivita svařování. Technologickými výhodami jsou možnosti změny průvaru nebo šířky svaru a úspora elektrické energie. Lze použít zapo-



Obr. 41. Zapojení svařovacích transformátorů do V nebo do hvězdy



Obr. 42. Scottovo zapojení pro trojfázové svařování

jení do trojúhelníku se dvěma oblouky [41]. Nejobvyklejší je zapojení do hvězdy podle obr. 41 nebo Scottovo zapojení podle obr. 42.

U zapojení do hvězdy jsou svařovací proudy v drátech fázově posunuty o 60° , což není vzhledem ke stabilitě oblouků výhodné. Stabilita se zvětší, zapojí-li se do fáze k materiálu tlumivka. Oba transformátory lze zatížit jmenovitým svařovacím proudem. Odběr proudů ze sítě není rovnoměrný, $I_U = I_W$, $I_V = 1,73I_U$, i když svařovací proudy jsou souměrně a rovnoměrně rozloženy. Napětí naprázdno U_{20} všech fází jsou stejná. Na kvalitu svaru má vliv i sled fází, např. první je proud do materiálu, druhý zadní oblouk, poslední přední oblouk.

Pro Scottovo zapojení lze s výhodou použít dva transformátory typu TS 1000 . 3, protože jsou vyvedeny středy vstupních vinutí. Napětí naprázdno je např. $2 \times 75 \text{ V} + 1 \times 106 \text{ V}$. Na jednotlivých obloucích lze snadno ve velkém rozsahu nastavovat U_0 a I_2 . Fázový posun mezi proudy oblouku je příznivější (90°), oblouky jsou stabilnější. Transformátory nelze však zatížit na plný výkon, vstupní vinutí prvního transformátoru dodává proud i do druhého (teoreticky je možné odebírat 85 % plného výkonu z výstupního vinutí). Aby se dosáhlo souměrného odběru ze sítě, nastaví se na prvním transformátoru nižší napětí U_2 , na druhém

vyšší napětí. V obou případech zapojení se doporučuje použít regulace automatů podle napětí oblouků, fázový úhel blízký 90° a vhodnou volbu sledu fází [41].

Proces trojfázového svařování se stále zkoumá; v [42] bylo navrženo použití jednoduchých a spolehlivých automatů s konstantní rychlostí podávání drátu pouze v tom případě, jsou-li oba dráty v hubicích souběžné.

Od šedesátých let se víceobloukové svařování ve větším rozsahu uplatňuje při stavbě lodí, tlakových nádob, trub a nosníků, a sice pro vysokou produktivitu práce a pro dobrou jakost svarového kovu. Přitom se podle technologických požadavků využívá různých kombinací oblouků [90], jejich uspořádání podle elektrických úhlů napětí vzhledem ke geometrickému postavení svařovacích drátů (resp. hubic), kombinací trojfázového střídavého napájení a stejnosměrného napájení apod. Podle [90] je nejběžnější střídavé napájení z jednofázových svařovacích transformátorů zapojených do trejúhelníku. Jeden jeho vrchol napájí materiál, dva ostatní vrcholy napájejí dva svařovací dráty. Oblouky buď pracují do jednoho místa, nebo jsou uspořádány v tandemu. K nim se v tandemu může přidat svařovací hlava s drátem napájeným stejnosměrným proudem s kladnou polaritou. Např. u třídrátového uspořádání pro svařované desky s tloušťkou 20 mm se zvýší svařovací rychlost na 2 m/min proti 0,5 m/min u jednodrátového uspořádání.

V letech 1968–1969 byly z ČSSR dodány do podniku Trubnyj zavod ve Volžském v SSSR linky na svařování šroubovicových rour velkých průměrů, u nichž se využívá tříobloukové svařování střídavým proudem. Dvě takové linky pracují v k. p. VSŽ Košice. Svařovací zařízení pro oba podniky projektoval a dodal bývalý závod VZS Chotěboř.

4. Principy ovládání svařovacích transformátorů

Transformátory pro obloukové svařování střídavým proudem musí mít při klesajících statických charakteristikách možnost nastavovat svařovací proud v poměrně značném rozsahu.

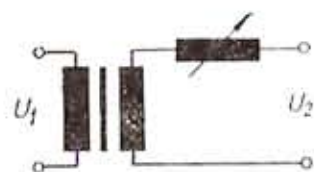
Je známo velké množství různých konstrukcí; podle způsobu ovládání je lze rozdělit přibližně takto:

1. Transformátory s tlumivkou
 - a) magneticky oddělenou od transformátoru,
 - s přepínáním počtu závitů tlumivky,
 - se změnou velikosti vzduchové mezery tlumivky,
 - transduktor,
 - úsporný transformátor — transduktor,
 - b) magneticky spojenou s transformátorem,
 - s přepínáním počtu závitů tlumivky,
 - se změnou velikosti vzduchové mezery tlumivky.
2. Transformátory rozptylové:
 - a) s přepínáním počtu závitů
 - b) s posuvnými cívkami,
 - c) s magnetickým bočníkem,
 - s pohyblivým bočníkem,
 - se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočníku,
 - d) s jinými způsoby ovládání rozptylu.
3. Transformátory s kombinací způsobů ovládání.
4. Transformátory s tyristorovou regulací svařovacího proudu.

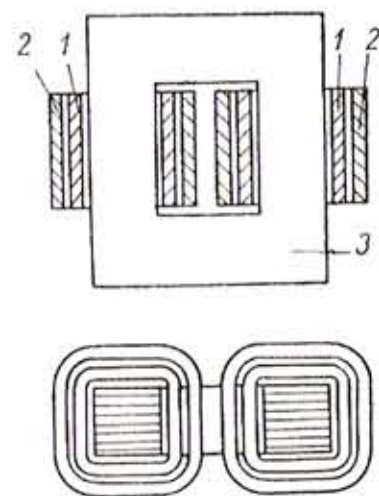
Každý z uvedených způsobů ovládání svařovacího proudu má své výhody a nevýhody. Nelze říci, že určitý typ konstrukce je nejvýhodnější bez ohledu na výkon, požadovaný rozsah nastavení proudu, podmínky použití atd. Praxe zatím ukazuje, že takováto optimální konstrukce neexistuje; pro určitý způsob použití se jako nejvýhodnější jeví jedna konstrukce transformátoru, pro jiný způsob použití jiná konstrukce. Může se dokonce stát, že určitá dílčí principiální nebo konstrukční změna vynese do popředí zájmu konstrukci, která byla dříve zavržena jako nevhodná. Některé způsoby svařování (je-li požadováno dálkové ovládání, stabilizace a popř. programové řízení svařovacích parametrů) vyžadují použití zdrojů svařovacího proudu splňujících určité požadavky, a to bez ohledu na jejich případné nevýhody (např. velká hmotnost a vysoká cena).

4.1. TRANSFORMÁTOR S TLUMIVKOU MAGNETICKY ODDĚLENOU OD TRANSFORMÁTORU

Nejčastěji používané spojení transformátoru a proměnné tlumivky je schematicky znázorněno na obr. 43, kde je tlumivka zapojena sériově ve svařovacím obvodu. Je možné použít i zapojení tlumivky v sérii se vstupním vinutím transformátoru.



Obr. 43. Schéma spojení transformátoru s tlumivkou



Obr. 44. Transformátor pro spojení s tlumivkou
1 vstupní vinutí, 2 výstupní vinutí, 3 jádro

Reaktanci tlumivky lze měnit přepínáním počtu závitů, změnou velikosti vzduchové mezery nebo sycením jádra pomocí přídavných vinutí, kterými prochází stejnosměrný proud.

Transformátory určené pro spojení s oddělenými tlumivkami jsou běžné výkonové transformátory se vzduchovým chlazením. Aby se získal co největší rozsah nastavení svařovacího proudu, je třeba použít transformátor s co nejnižším napětím nakrátko (do 10 %). Vstupní a výstupní vinutí jsou proto nejčastěji zhotovena ve formě souosých cívek stejné výšky. Náčrt typického uspořádání transformátoru je na obr. 44.

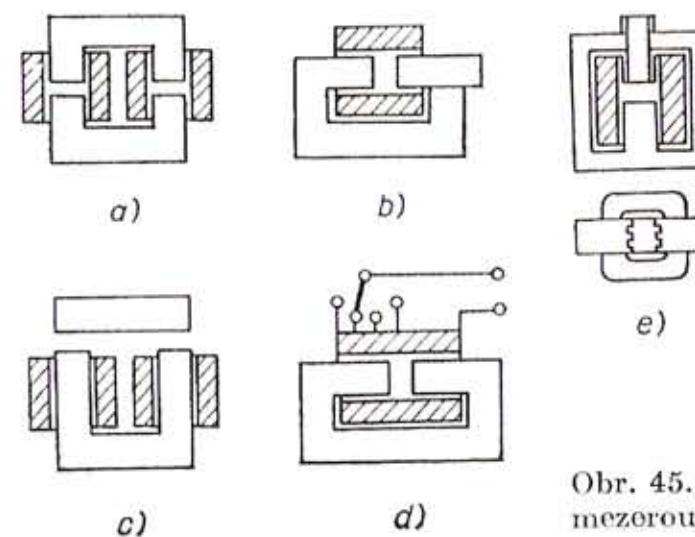
a) *Tlumivka s přepínáním počtu závitů.* Příklad možného konstrukčního uspořádání ukazuje obr. 45d. V železném jádru tlumivky je neproměnná vzduchová mezera, z vinutí tlumivky jsou vyvedeny odbočky. Změna indukčnosti (reaktance) tlumivky se uskutečňuje změnou počtu zapojených závitů. Vzhledem k velikosti přepínače odboček je výhodnější zapojit tlumivku do série se vstupním vinutím transformátoru, kde prochází menší proud než ve svařovacím obvodu (napětové dimenzování přepínače zpravidla nečiní potíže).

Výhodou této tlumivky je, že nemá pohyblivé části, a má proto

velkou životnost; nevýhodou je stupňová změna reaktance. Kromě toho je při požadavku dostatečně jemného nastavení reaktance ve velkém rozsahu nutné vyvést velký počet odboček z vinutí. Průřez železa jádra musí být tak velký, aby se při největším svařovacím proudu (kdy je zapojena jen část vinutí) jádro nepřesýtilo. Při nejmenším svařovacím proudu, kdy je zapojeno celé vinutí tlumivky, je magnetická indukce v železe jádra malá. Stupeň využití aktivních materiálů tlumivky tohoto typu je značně menší než např. u tlumivky s proměnnou vzduchovou mezerou; tlumivka je větší a těžší (za předpokladu stejného rozsahu nastavení svařovacího proudu).

Z těchto důvodů nenašly tlumivky se změnou počtu závitů příliš velké uplatnění. Jejich použití je vhodné tam, kde stačí stupňové nastavování svařovacího proudu v menším rozsahu, tedy u malých svařovacích transformátorů pro potřeby amatérů.

b) *Tlumivka se změnou velikosti vzduchové mezery.* Příklady konstrukcí jsou zjednodušeně nakresleny na obr. 45a, b, c, e. Železné jádro tlumivky je rozděleno do dvou částí. Zvláštní zařízení (na obrázku není kresleno) umožňuje vzájemný pohyb obou částí jádra, tzn. změnu velikosti vzduchové mezery mezi nimi.



Obr. 45. Některé typy tlumivek se vzduchovou mezerou v jádře

Lze dosáhnout poměrně značného rozsahu nastavení svařovacího proudu, nevýhodou však je nutnost zachytit dynamické síly působící mezi oběma částmi jádra a možnost vibrací pohyblivé části jádra. Dálkové ovládání je možné pomocí servomotoru s převodů. Při správném návrhu tlumivky (tak, aby při žádném provozním stavu nebylo přesycováno železo magnetického obvodu) jsou svařovací vlastnosti dobré.

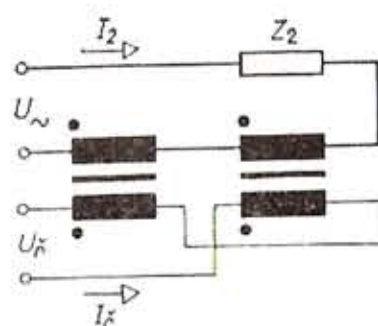
Největší použití našly typy z obr. 45a, b; u typu b) vznikají menší obtíže při zachycování síly působící na pohyblivou část jádra a při odstraňování vibrací jádra. V praxi však byl popsán princip zapojení svařovacího transformátoru vytlačen úsporným uspořádáním uvedeným dále v čl. 4.2b.

c) *Transduktor*. Použití transduktorů pro ovládání proudu svařovacích transformátorů není dosud příliš rozšířené, především pro značnou hmotnost zdroje a větší ztráty elektrické energie v porovnání s jinými způsoby ovládání. Transduktory mají však vedle uvedených nedostatků i tyto značné výhody:

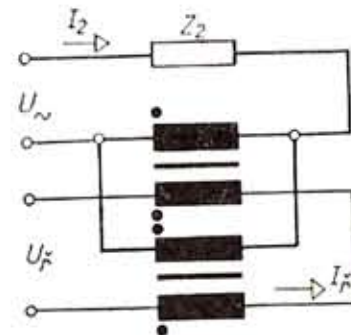
- neobsahují pohyblivé části, a jsou proto provozně spolehlivější,
- dálkové ovládání je rychlé a je možné bez dalších pomocných mechanických zařízení,
- lze použít programové řízení a stabilizaci svařovacích parametrů,
- velký rozsah nastavení svařovacího proudu,
- velká strmost statických charakteristik zdroje svařovacího proudu,

— při použití tzv. sériového transduktoru s vnucenou magnetizací lze dosáhnout velké rychlosti narůstání svařovacího proudu na začátku každé púlperrody (při změně polarity svařovacího proudu), a tím i lepší stability svařovacího procesu.

Konstrukčních uspořádání transduktorů (magnetických zesilovačů) je velké množství. Základním prvkem transduktoru je tlumivka, jejíž jádro je možné sytit stejnosměrným magnetickým tokem, tzv. přesytka. Z toho důvodu obsahuje přesytka dvě vinutí — řídicí a pracovní



Obr. 46. Schéma zapojení sériového transduktoru

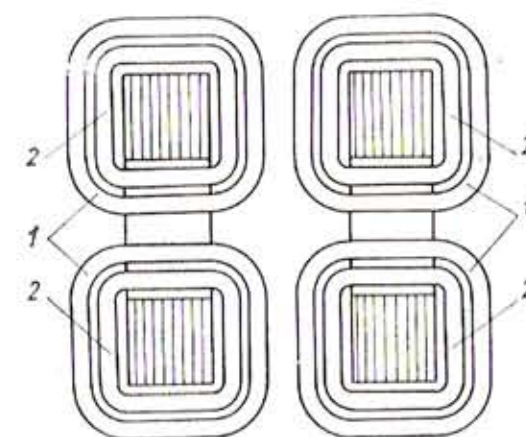


Obr. 47. Schéma zapojení paralelního transduktoru

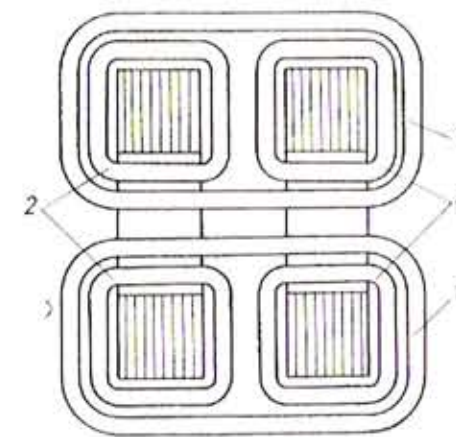
Řídicím vinutím prochází stejnosměrný řídicí proud, na jehož velikosti závisí magnetický odpor železného jádra přesytka, a tím i reaktance pracovního vinutí přesytka. Reaktance pracovního vinutí přesytka při dané velikosti střední hodnoty řídicího proudu je nelineárně závislá na okamžité velikosti napětí na pracovním vinutí a na okamžité polaritě tohoto napětí (pracovní vinutí je zapojeno v obvodu střídavého proudu, jehož velikost chceme regulovat). Aby se odstranila závislost reaktance na polaritě napětí, skládá se jednofázový transduktor ze dvou přesytek, jejichž pracovní vinutí se spojují paralelně (paralelní transduktor) nebo do série (sériový transduktor) tak, aby reaktance pracovního vinutí

celého transduktoru byla stejná pro obě polarity napětí na pracovním vinutí. Vliv závislosti reaktance na okamžité hodnotě napětí na pracovním vinutí ukážeme dále. Podrobně je možné seznámit se s principy transduktorů např. v [43]; předcházející výklad je velmi zjednodušený.

Schéma zapojení sériového transduktoru je na obr. 46, schéma zapojení paralelního transduktoru na obr. 47. Střídavý proud (svařovací proud) I_2 prochází z výstupního vinutí napájecího transformátoru (U_{\sim} — transformátor není nakreslen) zátěží s impedancí Z_2 (v našem případě svařovací oblouk) přes pracovní vinutí transduktoru. Řídicími vinutími prochází stejnosměrný proud I_F ze zdroje napětí U_F .



Obr. 48. Řez transduktorem složeným ze dvou samostatných přesytek
1 řídicí vinutí, 2 pracovní vinutí



Obr. 49. Náčrt uspořádání jednofázového transduktoru
1 řídicí vinutí, 2 pracovní vinutí

Příklad konstrukčního uspořádání (zjednodušený náčrtek) transduktoru složeného ze dvou přesytek je na obr. 48. Často se používá jedno řídicí vinutí obepínající obě přesytky (obr. 49). Uspoří se tím určité množství mědi a transduktor zabírá menší prostor; vznikne však poněkud volnější elektromagnetická vazba mezi pracovním a řídicím vinutím. Jednofázový transduktor je možné konstrukčně uspořádat i tak, že magnetické obvody (jádra) obou přesytek tvoří jeden celek (třísloupkové jádro).

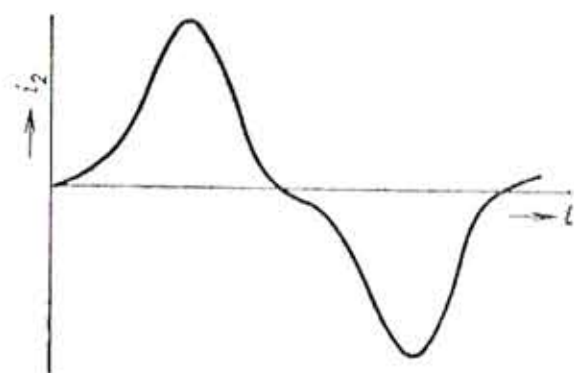
Nelineární závislost reaktance pracovního vinutí na okamžité hodnotě napětí přiloženého na svorky tohoto vinutí se prakticky projevuje ve zkreslení křivky procházejícího střídavého proudu vyššími harmonickými i při sinusovém průběhu napětí na výstupu napájecího transformátoru.

Rychlost nárůstu proudu po průchodu nulou je v porovnání se sinusovým průběhem malá (obr. 50), což se při svařování nepříznivě projevuje na stabilitě hoření oblouku.

Transduktory dosud popsaných provedení tedy nejsou vhodné pro svařování střídavým proudem.

Je známo několik způsobů jak zlepšit časový průběh pracovního proudu, a umožnit tak použití transduktorů pro regulaci zdrojů střídavého svařovacího proudu.

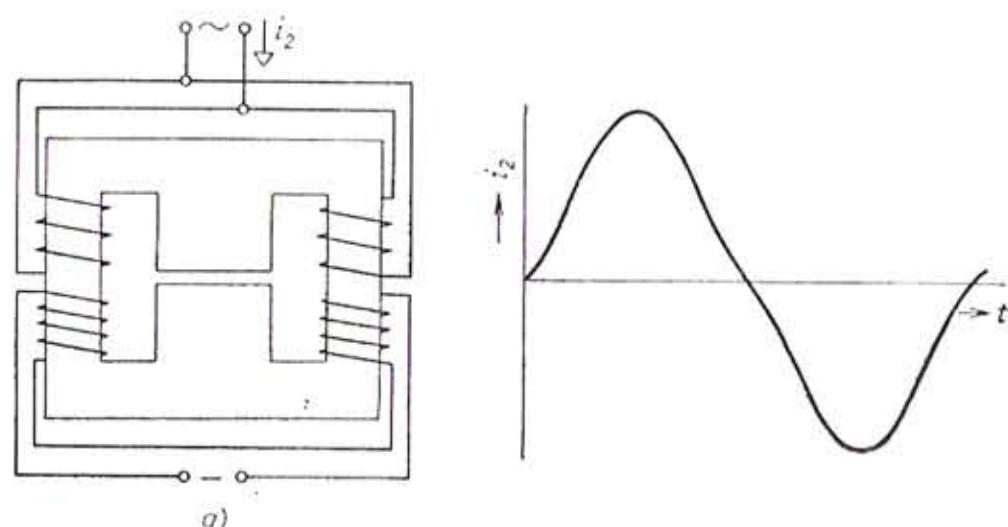
Prvním z nich je spojení magnetických obvodů obou přesytek v jeden celek a umístění vzduchové mezery v té části magnetického



Obr. 50. Příklad křivky časového průběhu pracovního proudu transduktoru

obvodu, kterou neprochází stejnosměrný magnetický tok buzený magnetomotorickým napětím řídicího vinutí. Příklad je na obr. 51a. Z obrázku je patrný i smysl vinutí a způsob propojení cívek transduktoru. Na obr. 51b je typický průběh pracovního proudu. Část pracovního vinutí lze umístit i na střední sloupek jádra se vzduchovou mezerou (obr. 52). Všechny tři cívky pracovního vinutí se zapojí tak, aby se jejich magnetomotorická napětí sčítala.

Nevýhodou transduktoru se vzduchovou mezerou je zmenšení rozsahu nastavení pracovního proudu. Pro splnění požadavků kladených na zdroje svařovacího proudu je proto často nutné rozdělit celý rozsah nastavení proudu do několika stupňů, což má za následek menší využití aktivních materiálů, a tím i zvětšení hmotnosti. Křivka průběhu pracov-

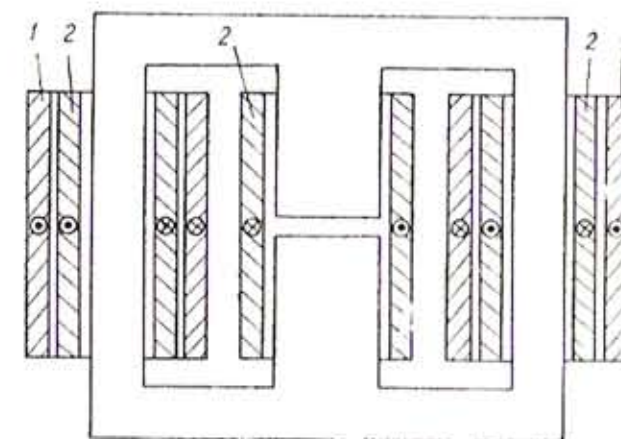


Obr. 51. Transduktor se vzduchovou mezerou v jádře a průběh jeho pracovního proudu

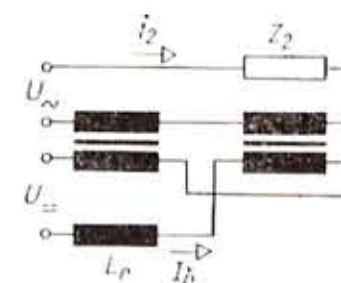
ního proudu se v nejlepším případě může pouze přiblížit sinusoidě, to však pro většinu svařovacích procesů stačí.

Podstatného zlepšení časového průběhu svařovacího proudu lze dosáhnout použitím tzv. sériového transduktoru s vnucenou magnetizací. V tomto případě může mít křivka proudu teoreticky obdélníkový průběh. Transduktor s vnucenou magnetizací (obr. 53) je sériový transduktor, v jehož řídicím obvodu je zapojena tlumivka L_T s velkou indukčností.

Tlumivka omezuje střídavou složku řídicího proudu způsobenou napětím indukovaným do řídicího vinutí při činnosti transduktoru a umožňuje velmi rychlou změnu syčení přesytek tvořících transduktor.



Obr. 52. Příklad uspořádání transduktoru se vzduchovou mezerou v jádře
1 řídicí vinutí, 2 pracovní vinutí

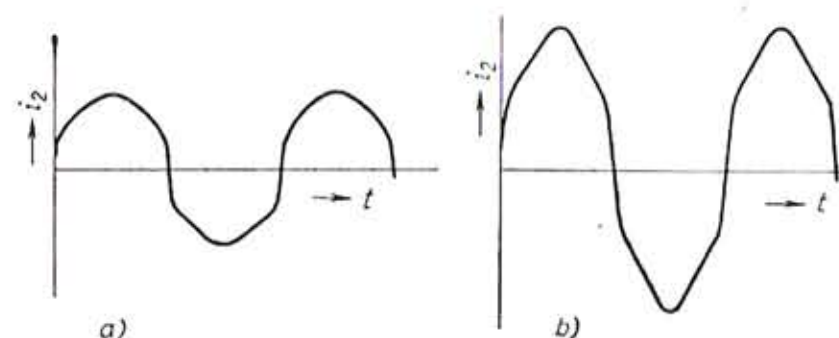


Obr. 53. Schéma zapojení transduktoru s vnucenou magnetizací

Podrobné vysvětlení činnosti je v [43]. Jádro tlumivky zapojené v řídicím obvodu transduktoru musí mít vzduchovou mezeru, aby nebylo přesycováno stejnosměrným magnetickým tokem. Průběh pracovního proudu transduktoru se tím více blíží obdélníkovému, čím méně se magnetizační křivka plechů, ze kterých jsou složena jádra transduktoru, liší od ideálního pravoúhlého průběhu, čím větší je indukčnost tlumivky v řídicím obvodu a čím těsnější je vazba mezi pracovním a řídicím vinutím transduktoru. Je tedy nutné jádra transduktoru skládat z orientovaných elektrotechnických plechů válcovaných zastudena a použít konstrukce s těsnou magnetickou vazbou mezi pracovním a řídicím vinutím (např. jako na obr. 48). Tlumivka v řídicím obvodu značně zvětšuje hmotnost zařízení. Přesto se pro výborné svařovací vlastnosti transduktor s vnucenou magnetizací používá. Příkladem mohou být zařízení pro svařování wolframovou elektrodou v atmosféře argonu.

Příklady časového průběhu pracovního proudu jsou na obr. 54, porovnání průběhu statických charakteristik svařovacích zdrojů se sériovým transduktorem a s transduktorem s mezerou v jádře je na obr. 55.

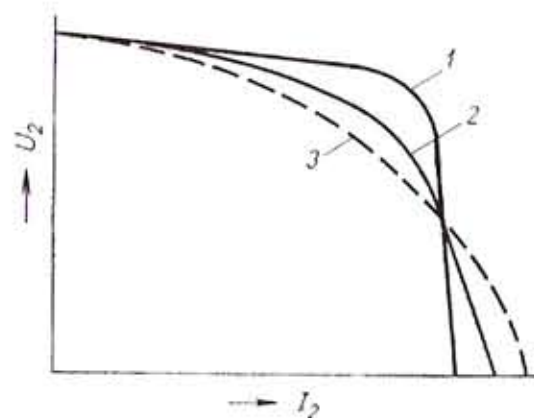
Tlumivku v řídicím obvodu lze nahradit magnetickým bočníkem (železným jádrem) se vzduchovou mezerou. Transduktor je potom uspořádán tak, že řídicí vinutí kromě hlavního magnetického obvodu obepíná ještě magnetický bočník. Potom odpadá tlumivka s vinutím navrženým na poměrně vysoké napětí (počet závitů řídicího vinutí bývá větší než počet závitů pracovního vinutí). Při dostatečně velkém průřezu železa



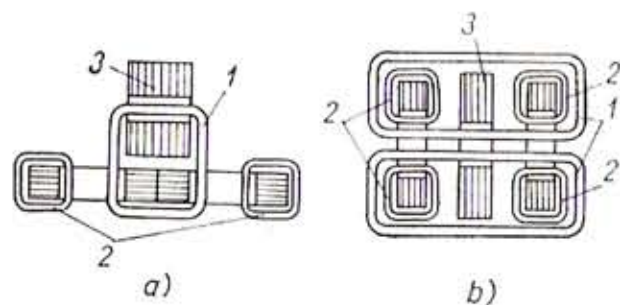
Obr. 54. Příklad časového průběhu pracovního proudu transduktoru s vnucenou magnetizací při malých (a) a velkých (b) hodnotách proudu

magnetického bočnicku a při správně zvolené velikosti vzduchové mezery je reaktance řídicího vinutí dostatečná pro zmenšení střídavé složky řídicího proudu. Příklady provedení takového transduktoru jsou na obr. 56; na obr. 56a je ukázka nevhodného uspořádání, u kterého je nedostatečná magnetická vazba mezi pracovním a řídicím vinutím. Vhodnější je konstrukce na obr. 56b, která je použita např. u sovětského transformátoru STDN 2000 pro svařování pod tavidlem.

Dalším způsobem zmenšení střídavé složky řídicího proudu je zapojení paralelního obvodu LC do série s řídicím vinutím. Přitom je možné dosáhnout průběhu pracovního proudu blízkého průběhu obdélníkovému. Tento způsob má nevýhodu v tom, že je nutná poměrně velká



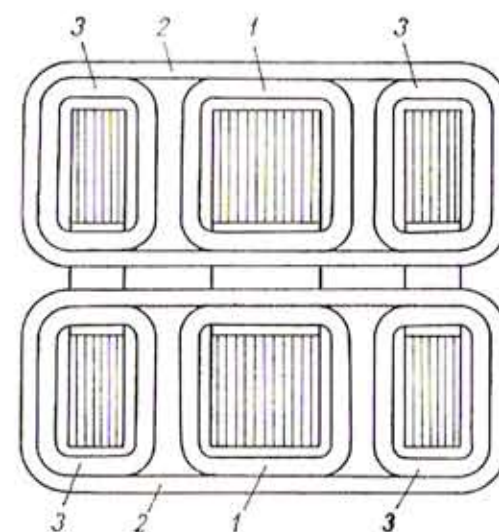
Obr. 55. Porovnání průběhu statických charakteristik svařovacích transformátorů
1 se sériovým transduktorem,
2 s transduktorem s mezerou v jádře,
3 s tlumivkou



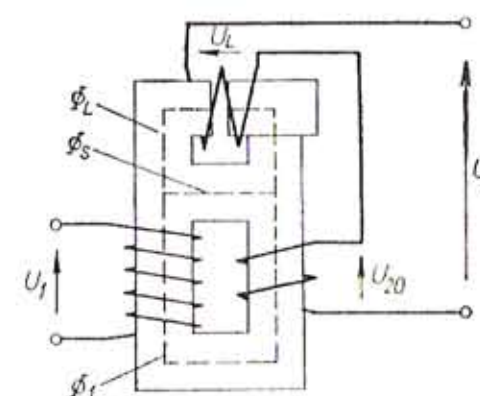
Obr. 56. Transduktor s vnucenou magnetizací v úsporném provedení
1 řídicí vinutí, 2 pracovní vinutí,
3 železné jádro, nahrazující tlumivku v řídicím obvodu

kapacita kondenzátoru. Nejpraktičtější (přestože drahé) je použití tlumivky.

Rozhodujeme-li se, zda použít transduktor s vnucenou magnetizací pro ovládání střídavého svařovacího proudu, musíme mít na zřeteli, že pro získání velkého rozsahu nastavení a potřebného průběhu statických charakteristik je nutné magnetický obvod transduktoru dimenzovat přibližně stejně jako magnetický obvod napájecího transformátoru. Připočteme-li ještě materiál tlumivky nebo magnetického bočnicku v řídicím vinutí, můžeme odhadnout hmotnost aktivních materiálů celého svařovacího zdroje přibližně na 2,5násobek až 3násobek hmotnosti samotného napájecího transformátoru, což znamená poměrnou hmotnost zdroje blízkou 1 kg/A při napětí naprázdno 80 V a při trvalém zatížení. Velká hmotnost aktivních materiálů má za následek větší ztráty elektrické energie, a tím i menší účinnost zdroje. To je značná nevýhoda transduktoru. Při návrhu je třeba posoudit, zda nad touto nevýhodou převažují výhody uvedené na začátku této kapitoly. Rozhodující roli pravděpodobně vždy hraje způsob použití, pro který je navrhovaný zdroj střídavého svařovacího proudu určen.



Obr. 57. Úsporný transformátor — transduktor
1 vstupní vinutí, 2 výstupní vinutí,
3 řídicí vinutí



Obr. 58. Transformátor s tlumivkou magneticky spojenou s jádrem transformátoru

d) *Úsporný transformátor — transduktor.* Určité úspory materiálu na vinutí v porovnání s transduktorem lze dosáhnout spojením napájecího transformátoru a transduktoru do jednoho celku. Výstupní vinutí transformátoru a pracovní vinutí transduktoru je nahrazeno jediným vinutím, obepínajícím jádro transformátoru i jádra přesýtek transduktoru (obr. 57).

Úsporný transformátor — transduktor má proti transduktoru menší rozsah nastavení pracovního proudu. Příčinou jsou velké rozměry cívky

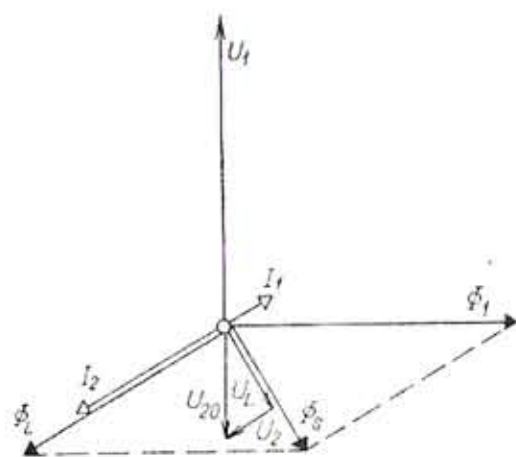
výstupního vinutí, a tím i velká rozptylová reaktance. Pro dosažení potřebného tvaru křivky časového průběhu svařovacího proudu je možné použít stejné prostředky jako u transduktoru (viz předcházející odstavec). Vzhledem k většímu rozptylu, a tedy k menší elektromagnetické vazbě mezi řídicím a pracovním vinutím bývá zařazení tlumivky do řídicího obvodu méně účinné než u transduktoru. Vhodnější je volit konstrukci se vzduchovou mezerou v jádře přesytiky.

Výhody a nevýhody jsou přibližně stejné jako u transduktoru, použití pro konstrukci zdrojů střídavého svařovacího proudu se však omezilo jen na funkční vzorky bez následujících výrobních sérií.

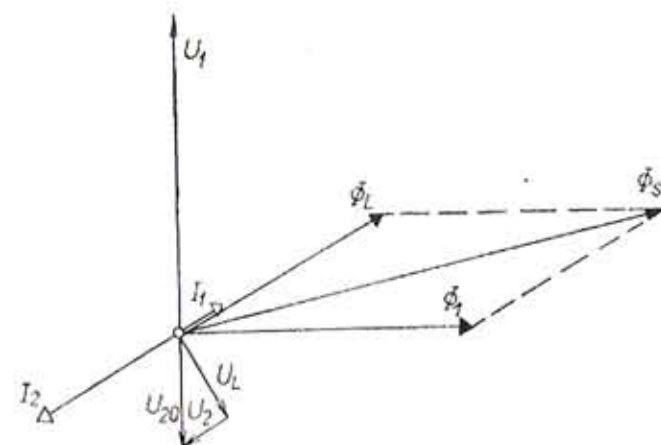
4.2. TRANSFORMÁTOR S TLUMIVKOU MAGNETICKY SPOJENOU S JÁDREM TRANSFORMÁTORU

Úsporou železa v porovnání s transformátorem s oddělenou tlumivkou se vyznačuje konstrukce spojující tlumivku s transformátorem nejen elektricky, ale i magneticky (obr. 58). Část magnetického obvodu transformátoru je současně částí magnetického obvodu tlumivky.

Při chodu transformátoru naprázdno se magnetický tok Φ_1 vstupního vinutí transformátoru dělí do dvou větví; jeho část Φ_s prochází společným jádrem transformátoru a tlumivky, část Φ_L je spřažena s vinutím tlumivky. Napětí naprázdno celého svařovacího transformátoru je vektorovým součtem napětí na výstupním vinutí transformátoru a napětí na vinutí tlumivky. Při zapojení výstupního vinutí a vinutí tlumivky ve shodném smyslu se napětí na výstupních svorkách svařovacího transformátoru rovná součtu napětí na výstupním vinutí transformátoru a na vinutí tlumivky, při zapojení vinutí v opačném smyslu se rovná rozdílu těchto napětí.



Obr. 59. Zjednodušený fázorový diagram transformátoru z obr. 58



Obr. 60. Fázorový diagram transformátoru z obr. 58 při shodném smyslu zapojení výstupního vinutí a vinutí tlumivky

Velikost magnetického toku Φ_L závisí na poměru magnetických odporů společného jádra a jádra nesoucího vinutí tlumivky. Se zmenšováním vzduchové mezery v jádru tlumivky se tok Φ_L zvětšuje. Zmenšování vzduchové mezery však má za následek zvětšování vibrací jádra při práci transformátoru. Ve skutečnosti bývá vzduchová mezera vždy tak velká, že napětí na vinutí tlumivky při chodu transformátoru naprázdno je velmi nízké a je možné ho zanedbat.

Smysl vzájemného propojení výstupního vinutí transformátoru a vinutí tlumivky má velký vliv na velikost magnetického toku ve společném jádru při zatížení transformátoru.

Zanedbáme-li rozptylové magnetické toky všech vinutí a ztráty celého svařovacího transformátoru, můžeme psát pro sinusové průběhy magnetických toků a napětí rovnice ve fázorovém tvaru

$$\Phi_1 = -j \frac{U_1}{\omega N_1}; \quad \Phi_L = -j \frac{U_L}{\omega N_L}; \quad U_1 = -\frac{N_1}{N_2} U_{20}$$

kde N_1 je počet závitů vstupního vinutí transformátoru,
 N_2 počet závitů výstupního vinutí transformátoru,
 N_L počet závitů vinutí tlumivky,
 U_1 napětí na vstupním vinutí transformátoru,
 U_{20} napětí na výstupním vinutí transformátoru,
 U_L napětí na vinutí tlumivky,
 ω úhlový kmitočet napětí U_1 .

Magnetický tok společného jádra je

$$\Phi_s = \Phi_1 + \Phi_L$$

S použitím předchozích rovnic a za předpokladu, že $N_2 = N_L$ (v praxi se pro zapojení podle obr. 58 počet závitů vinutí tlumivky volí stejný jako počet závitů výstupního vinutí transformátoru), je magnetický tok společného jádra při opačném smyslu zapojení výstupního vinutí transformátoru a vinutí tlumivky

$$\Phi_s = \frac{j}{\omega N_2} (U_{20} - U_L)$$

Poměry v zatíženém transformátoru ukazuje zjednodušený fázorový diagram na obr. 59.

Protože platí $U_{20} - U_L = U_2$, je magnetický tok ve společném jádru úměrný napětí U_2 na výstupních svorkách celého svařovacího transformátoru a nikdy nebude větší než tok Φ_1 při chodu naprázdno, protože $U_2 \leq U_{20}$.

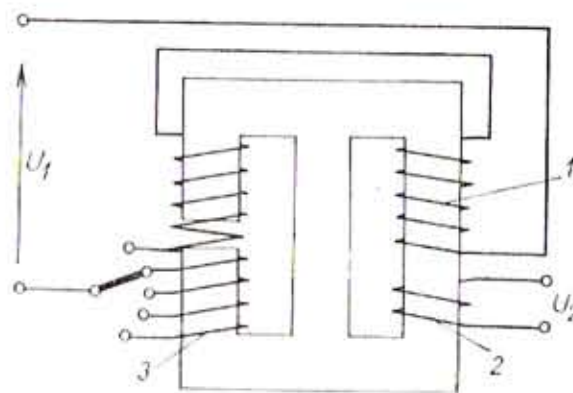
Při shodném smyslu zapojení výstupního vinutí a vinutí tlumivky prochází magnetický tok Φ_L společným jádrem v opačném směru než v předcházejícím případě a platí

$$\Phi_s = \frac{j}{\omega N_2} (U_{20} + U_L)$$

Ze zjednodušeného fázorového diagramu na obr. 60 je vidět zvětšení toku Φ_s v porovnání se zapojením vinutí v opačném smyslu. Například při zkratu na výstupních svorkách svařovacího transformátoru je $U_L = U_{20}$ a magnetický tok ve společném jádru je přibližně dvakrát větší než tok při chodu naprázdno. Má-li společné jádro stejný průřez jako jádro nesoucí vinutí transformátoru, přesyť se. Přitom vzroste magnetizační proud a časový průběh svařovacího proudu se bude lišit od sinusoidy, čímž se zhorší svařovací vlastnosti. Shodný smysl zapojení výstupního vinutí transformátoru a vinutí tlumivky je z tohoto důvodu pro praxi nepoužitelný. Tlumivku je nutné zapojit tak, aby se magnetický tok ve společném jádru při zatěžování transformátoru zmenšoval (opačný smysl zapojení vinutí tlumivky a výstupního vinutí transformátoru).

Pro dosažení co největšího rozsahu nastavení svařovacího proudu je třeba, aby byl rozptyl transformátoru bez tlumivky malý. Proto se vstupní a výstupní vinutí zhotovují jako souosé cívky stejné výšky pokud možno vinuté těsně na sebe.

V předcházejícím popisu byla uvažována tlumivka s vinutím zapojeným v sérii s výstupním vinutím transformátoru. V případě potřeby lze při návrhu volit tlumivku v sérii se vstupním vinutím transformátoru. Potom má vinutí tlumivky větší počet závitů (srovnatelný s počtem závitů vstupního vinutí) z drátu s menším průřezem.



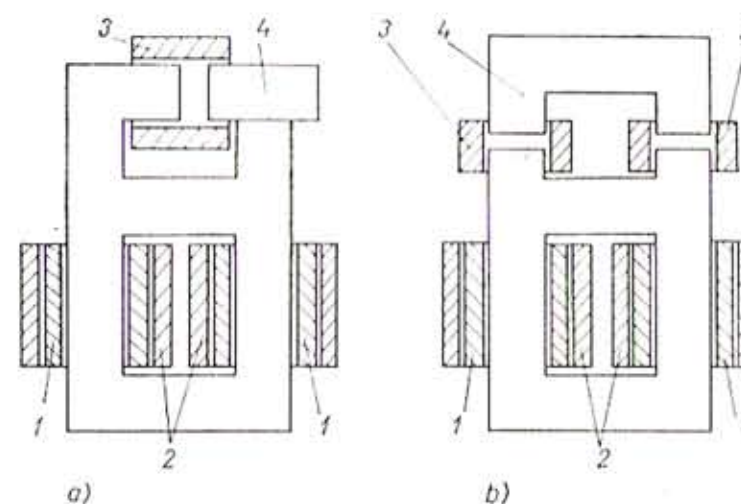
Obr. 61. Příklad uspořádání transformátoru s tlumivkou magneticky spojenou s jádrem transformátoru. Ovládání svařovacího proudu přepínáním počtu závitů tlumivky

Indukčnost tlumivky lze měnit přepínáním počtu závitů nebo změnou vzduchové mezery v jádru nesoucím vinutí tlumivky.

a) *Přepínání počtu závitů tlumivky.* Možné řešení je na obr. 61. V jádru nesoucím vinutí tlumivky je neproměnná vzduchová mezera, z vinutí tlumivky jsou vyvedeny odbočky. Svařovací proud se mění ve stupních přepínáním jednotlivých odboček. Tento princip je možné použít především pro přenosné svařovací transformátory. Aby bylo možné k přepínání odboček použít běžně dostupné přepínače s malými rozměry, je nutné zapojit vinutí tlumivky do série se vstupním vinutím transformátoru. V tom případě také větší počet závitů tlumivky umožňuje jemnější nastavení svařovacího proudu. Průřez vodiče vinutí tlumivky lze při větším rozsahu nastavení proudu odstupňovat.

Při správném návrhu jsou svařovací vlastnosti dobré. V porovnání s rozptylovými transformátory s přepínáním počtu závitů je tato konstrukce těžší a výrobně náročnější, rozptylový magnetický tok vně transformátoru je však nepatrný, takže na charakteristiky transformátoru nemá vliv blízkost předmětů z magnetických materiálů.

Na tomto principu se vyrábí bulharský přenosný svařovací transformátor IZ-E-01 s jmenovitým svařovacím proudem 125 A při zatěžení 60 %.



Obr. 62. Transformátor s tlumivkou magneticky spojenou s jádrem transformátoru a se změnou velikosti vzduchové mezery v jádru tlumivky
1 vstupní vinutí, 2 výstupní vinutí, 3 vinutí tlumivky, 4 pohyblivé jádro tlumivky

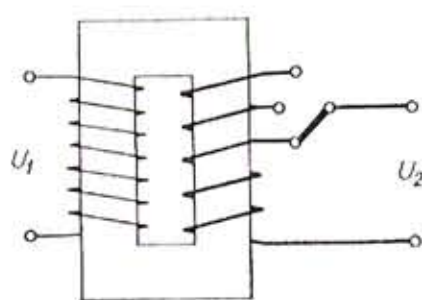
b) *Změna velikosti vzduchové mezery tlumivky.* Příklady uspořádání jsou na obr. 62. Část jádra tlumivky je pohyblivá a umožňuje v potřebných mezích měnit velikost vzduchové mezery v jádru. Potíže činí zachycení sil působících mezi pevným a pohyblivým jádrem a odstranění vibrací pohyblivého jádra. Pro změnu vzduchové mezery se používá šroub, který se opírá o pevnou část jádra a prochází maticí uloženou v pohyblivé části jádra. Z hlediska omezení vibrací pohyblivého jádra je výhodná konstrukce podle obr. 62a, kde k zachycení síly napomáhá tření mezi pevným a pohyblivým jádrem.

Svařovací vlastnosti jsou lepší při větších proudech, kde velká vzduchová mezera při vysunutém jádru značně linearizuje magnetický obvod.

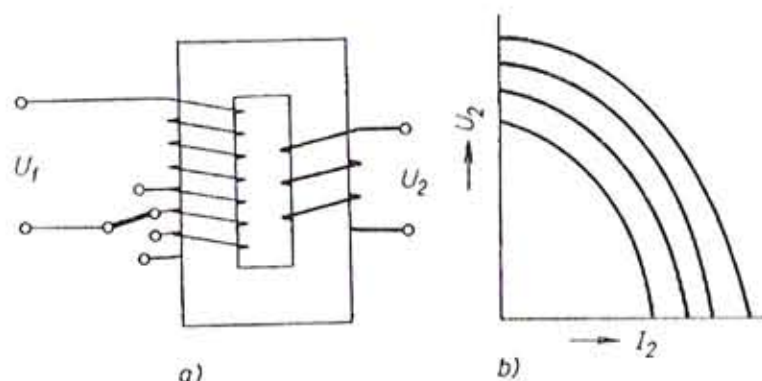
Výhodou tohoto uspořádání v porovnání s oddělenou tlumivkou je menší hmotnost, nevýhodou je složitý, a tím i výrobně náročný tvar plechů jádra. Všeobecnou nevýhodou je existence pohyblivé části magnetického obvodu, která má sklon k vibracím. Přesto je použití tohoto principu dosti rozšířené, zejména u velkých transformátorů pro svařování pod tavidlem.

4.3. ROZPTYLOVÉ TRANSFORMÁTORY S PŘEPÍNÁNÍM POČTU ZÁVITŮ

Tyto transformátory se nejčastěji zhotovují jako jádrové s vinutím rozloženým tak, že na jednom sloupku jádra převládá magnetomotorické napětí vstupního vinutí a na druhém sloupku magnetomotorické napětí výstupního vinutí (v krajním případě je na jednom sloupku umístěno jen vstupní vinutí a na druhém jen výstupní vinutí). Značná část rozptylového magnetického toku se uzavírá vzduchem vně svařovacího transformátoru. Jsou známy různé způsoby zapojení.



Obr. 63. Rozptylový transformátor s přepínáním závitů na výstupním vinutí



Obr. 64. Rozptylový transformátor s přepínáním závitů na vstupním vinutí a jeho statické charakteristiky

Nejmenší hmotnost aktivních materiálů má transformátor podle obr. 63. Nevýhodou je, že při nastavení menšího svařovacího proudu klesá napětí naprázdno a že je nutné přepínat velké proudy. Použití menšího přepínače umožňuje zapojení znázorněné na obr. 64. I tento transformátor má proměnné napětí naprázdno, a jeho svařovací vlastnosti jsou proto při menších proudcích horší.

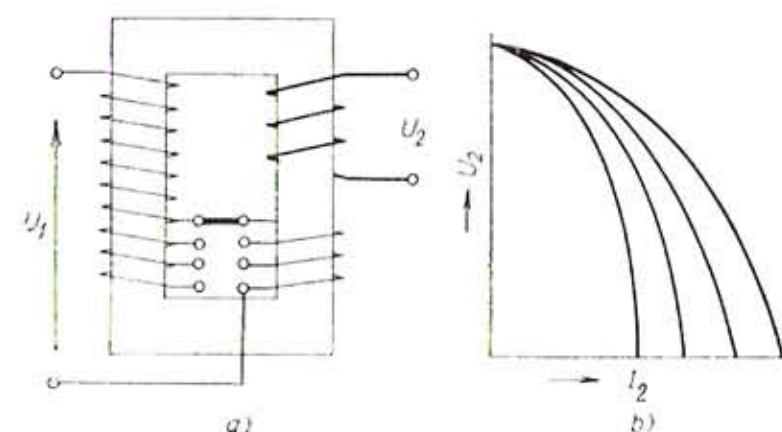
Snaha o udržení konstantního napětí naprázdno v celém rozsahu nastavení svařovacího proudu vedla k zapojení, které se dnes nejvíce používá (obr. 65). Na levém sloupku jádra transformátoru je umístěno vstupní vinutí, na pravém sloupku výstupní vinutí a přídavné vstupní vinutí, jehož počet závitů závisí na požadovaném rozsahu nastavení svařovacího proudu. Vstupní vinutí má na obou sloupcích jádra vyvedeny odbočky, které se přepínají tak, že v každé poloze přepínače je zapojen stejný počet vstupních závitů. Mění se jen poměr mezi počtem zapojených závitů na jednotlivých sloupcích jádra. Mezi přídavným vstupním vinutím a výstupním vinutím je těsná elektromagnetická vazba, takže rozptylová reaktance celého svařovacího transformátoru je tím menší, čím více závitů přídavného vstupního vinutí je zapojeno. Nejmenší svařovací proud tedy prochází, když se na vstupní

svorky připojí jen vstupní vinutí umístěné na levém sloupku jádra; největší svařovací proud se získá při zapojení celého přídavného vstupního vinutí umístěného na pravém sloupku a při současném zmenšení počtu zapojených závitů vstupního vinutí na levém sloupku. Výstupní napětí naprázdno je ve všech polohách přepínače téměř stejné.

Uvedené způsoby zapojení lze kombinovat, a tak dosáhnout zvětšení počtu stupňů nastavení, zpravidla však za cenu zhoršení svařovacích vlastností v té části rozsahu nastavení, kde se sníží napětí naprázdno.

Rozptylové transformátory s přepínáním odboček na vinutí jsou konstrukčně jednoduché a poměrně lehké. Při sycení magnetického obvodu v lineární části magnetizační křivky a při napětí naprázdno nad 60 V mají velmi dobré svařovací vlastnosti. Neobsahují žádné pohyblivé součásti, výroba je jednoduchá, technický život je omezen pouze životem použitých přepínačů a vlastním životem vinutí transformátoru.

Nevýhodou je nastavování svařovacího proudu ve stupních a skutečnost, že rozptylový magnetický tok se uzavírá vně jádra transformátoru a zahřívá všechny vodivé součástky umístěné v jeho cestě. Proto musí být stahovací rámy a kryty transformátoru zhotoveny z elektroizolačního materiálu. Rovněž umístění transformátoru při svařování blízko masivní ocelové konstrukce má vliv na velikost svařovacího proudu. Uvedené nevýhody omezují použití tohoto způsobu ovládání pouze na malé výkony transformátorů pro montážní a amatérské účely. Je to velmi vhodný a často používaný princip pro stavbu přenosných svařovacích transformátorků.

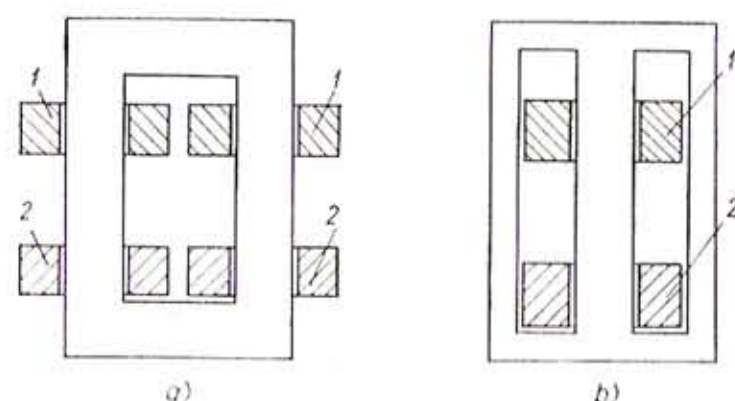


Obr. 65. Rozptylový transformátor s přepínáním závitů na vstupním vinutí a s konstantním napětím naprázdno a jeho statické charakteristiky

4.4. TRANSFORMÁTORY S POSUVNÝMI CÍVKAMI

Rozptylová reaktance těchto transformátorů se mění změnou vzdálenosti mezi cívkami vstupního a výstupního vinutí. Dva charakteristické způsoby uspořádání transformátoru s posuvnými cívkami jsou na obr. 66. Obr. 66a představuje transformátor jádrového typu, na

obr. 66b je plášťový typ transformátoru. Při zvětšení vzdálenosti cívek se část magnetického toku i při chodu naprázdno uzavírá vzduchovou mezerou okna transformátoru v prostoru mezi cívkami a neprochází výstupním vinutím. Proto napětí naprázdno klesá se zvětšováním vzdálenosti cívek. V běžných konstrukcích však změna napětí naprázdno odpovídající krajním polohám pohyblivé cívky nepřesahuje 5 % a při návrhu transformátoru ji není třeba uvažovat.



Obr. 66. Jádrový (a) a plášťový (b) typ transformátoru s posuvnými cívkami

§ 4.1 Rozptylová reaktance transformátoru závisí na počtu závitů vinutí, na vzdálenosti cívek, na šířce okna a na tloušťce jádra. Z toho je zřejmé, že k dosažení velkého rozsahu nastavení svařovacího proudu musí být okno jádra úzké a sloupky jádra dlouhé. Z těchto důvodů je použití hliníku na vinutí omezeno, neboť při zvětšování objemu vinutí velmi vzrůstají rozměry jádra, a tím i hmotnost transformátoru. Hmotnost transformátoru závisí především na velikosti rozsahu svařovacího proudu. Čím je větší rozsah nastavení uskutečňovaný změnou vzdálenosti cívek, tím delší jsou sloupky jádra, a tím je větší hmotnost transformátoru. Uskutečnit rozsah nastavení větší než 3 : 1 jen posouváním pohyblivé cívky je ekonomicky neúnosné. Problém zvětšení rozsahu se řeší rozdělením celého rozsahu do dvou stupňů. Používají se dva způsoby. U prvního řešení se pro rozsah menších proudů zapojí do série se svařovacím obvodem přídatná tlumivka montovaná ve skříni transformátoru, při větších svařovacích proudcích se svařovací kabely připojí přímo na svorky výstupního vinutí transformátoru. Výhodou je jednoduché přepojení svařovacího kabelu na vnějších svorkách transformátoru, nevýhodou je zvětšení hmotnosti a ceny transformátoru. Druhým řešením je možné rozšířit rozsah nastavení bez zvětšení hmotnosti transformátoru, a to přepínáním cívek vstupního a výstupního vinutí z paralelního spojení na sériové. Transformátor musí mít dvě vstupní a dvě výstupní cívky; nejlépe se pro tento účel hodí konstrukční uspořádání podle obr. 66a. Nevýhodou tohoto řešení je komplikované přepojování, neboť je nutné vstupní a výstupní cívky přepojovat současně.

Transformátory s posuvnými cívkami mají velmi dobré svařovací vlastnosti, které se na rozdíl od jiných konstrukcí zlepšují při nastavování svařovacího proudu směrem k menším hodnotám. To je velmi dobrá vlastnost, protože při menším proudu má svařovací oblouk větší tendenci k nestabilnímu hoření. Další výhodou je, že pohyblivé cívky mají mnohem menší náchylnost k vibracím než pohyblivá magnetická jádra u jiných principů.

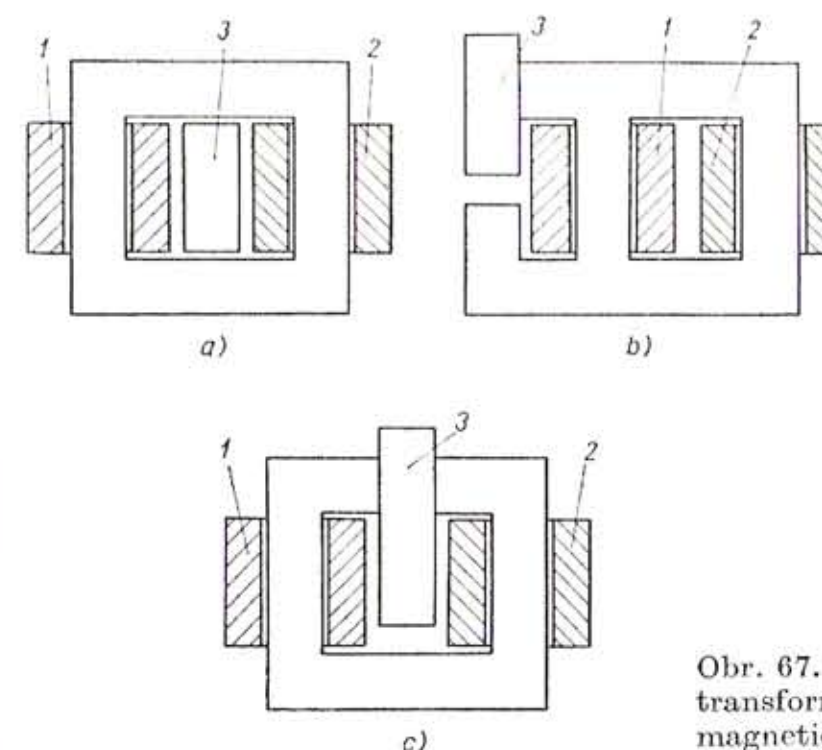
Hlavními nevýhodami jsou pohyblivé části a větší hmotnost v porovnání s některými jinými principy (ze známých konstrukcí lze odhadovat, že hmotnost bude asi o 30 % až 40 % větší než u transformátoru s tlumivkou magneticky spojenou s jádrem transformátoru).

Transformátory s posuvnými cívkami pro jejich přednosti vyrábí mnoho firem.

4.5. TRANSFORMÁTORY S MAGNETICKÝM BOČNÍKEM

Magnetický obvod transformátoru je uspořádán tak, aby se rozptylový magnetický tok uzavíral přes přídatné železné jádro, tzv. magnetický bočník. Změnou magnetického odporu bočníku se mění velikost rozptylové reaktance transformátoru. Transformátory s magnetickým bočníkem lze rozdělit na dva základní typy.

První typ transformátorů je charakterizován tím, že vstupní a výstupní vinutí je umístěno na různých sloupcích jádra, popř. na stejných sloupcích, ale tak, že na každém ze sloupků převládá magnetomotorické napětí jednoho z vinutí (stejně jako u rozptylových transformátorů

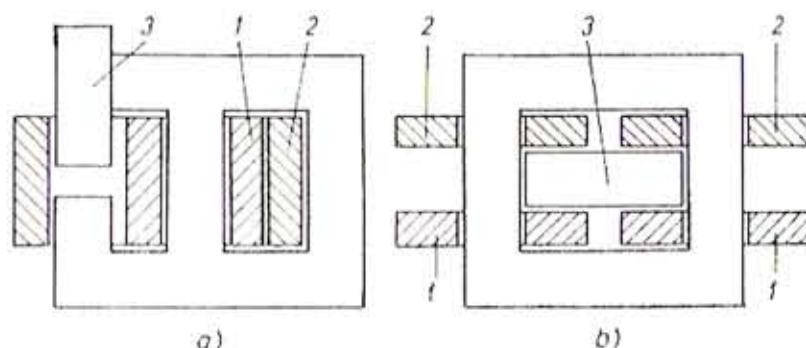


Obr. 67. Příklady uspořádání transformátorů s pohyblivým magnetickým bočníkem prvního typu

v čl. 4.3). Tím vzniká rozptylový magnetický tok, který se uzavírá magnetickým bočником vloženým mezi sloupky jádra transformátoru. Příklady konstrukce transformátorů tohoto typu (s nastavováním magnetického odporu bočniku změnou vzduchové mezery) jsou na obr. 67.

Pro transformátory druhého typu je charakteristické to, že podstatná část rozptylového magnetického toku se uzavírá prostorem mezi vstupním a výstupním vinutím. V tomto prostoru je umístěn magnetický bočník, jehož magnetický odpor lze měnit (obr. 68).

Transformátory s magnetickými bočniki podobně jako transformátory s posuvnými cívkami nemají v celém rozsahu nastavení konstantní napětí naprázdno; jeho velikost se mění se změnou magnetického odporu bočniku. U běžných konstrukcí však tato změna není velká a napětí naprázdno lze při návrhu považovat za konstantní.

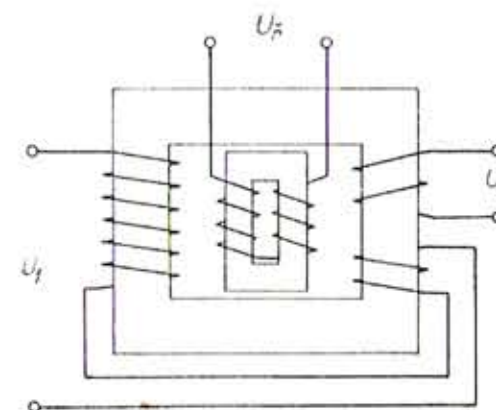


Obr. 68. Transformátory s pohyblivým magnetickým bočnikiem druhého typu

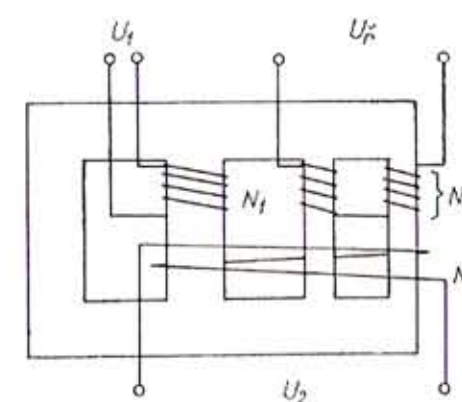
a) *Transformátory s pohyblivým bočnikiem.* Rozptylová reaktance se mění změnou velikosti vzduchové mezery mezi magnetickým bočnikiem a jádrem transformátoru (obr. 67, 68). Transformátory jsou výhodné pro svou poměrně malou hmotnost a při vhodně zvolené nejmenší velikosti vzduchové mezery mají dobré svařovací vlastnosti. Vyrábějí se pro menší a střední výkony (svařovací proudy do 500 A), protože při velkých výkonech je obtížné zachycování sil působících na magnetický bočník. Dálkové ovládání je spojeno s konstrukčními obtížemi podobně jako u ostatních principů svařovacích transformátorů s mechanickým ovládáním — magnetický bočník je nutné v nastavené poloze mechanicky zajišťovat, aby se zabránilo jeho vibraci.

b) *Transformátory se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočniku.* U těchto transformátorů se magnetický odpor bočniku, a tím i rozptylová reaktance transformátoru mění prostřednictvím změny stejnosměrné magnetizace bočniku. Příklad transformátoru prvního typu (odpovídající obr. 67) je na obr. 69. Vzduchová mezera mezi magnetickým bočnikiem a jádrem transformátoru linearizuje magnetický obvod a zlepšuje průběh svařovacího proudu. Řídicí vinutí na bočniku je zapojeno v takovém smyslu, aby se stejnosměrný magnetický tok uzavíral v magnetickém bočniku a nesytíl jádro transformátoru.

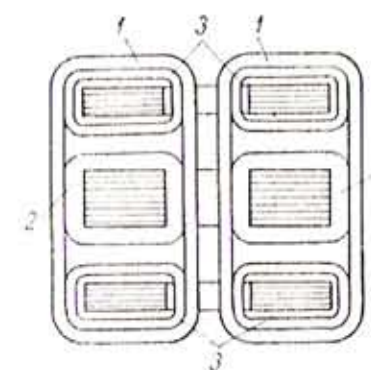
Transformátor druhého typu (náhrada typu podle obr. 68a) je schematicky znázorněn na obr. 70. Magnetický bočník se skládá ze dvou sloupků, na nichž je umístěno řídicí vinutí zapojené tak, aby magnetickým obvodem transformátoru neprocházel stejnosměrný magnetický tok.



Obr. 69. Transformátor se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočniku, první typ



Obr. 70. Transformátor se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočniku, druhý typ



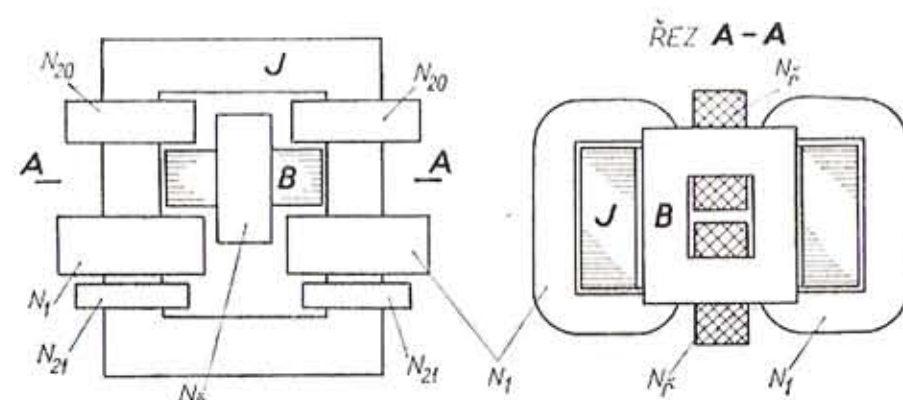
Obr. 71. Jiný příklad provedení transformátoru s magnetickým bočnikiem
1 vstupní vinutí, 2 výstupní vinutí,
3 řídicí vinutí

Pro zlepšení tvaru křivky časového průběhu svařovacího proudu je nutné do řídicího obvodu zapojit tlumivku podobně jako u transduktoru s vnucenou magnetizací, transformátor má však větší rozsah nastavení svařovacího proudu než transformátor se vzduchovou mezerou mezi magnetickým bočnikiem a jádrem. Výrobně náročné je složité jádro transformátoru. V literatuře [44] jsou uvedeny transformátory s magnetickým bočnikiem připomínající svým tvarem úsporný transformátor — transduktor. Od něj se však zásadně liší záměnou umístění vstupního a výstupního vinutí transformátoru. Jeden příklad konstrukčního uspořádání je na obr. 71. Na jádru transformátoru je navinuto výstupní vinutí, na magnetických bočnících je řídicí vinutí. Vstupní vinutí obklopuje jak jádro transformátoru, tak magnetické bočníky. Do řídicího obvodu je nutné zapojit tlumivku pro zlepšení průběhu svařovacího proudu.

Další typ představují svařovací transformátory se stejnosměrnou magnetizací bočniku, nahrazující typ z obr. 68b. Náčrt konstrukčního

řešení je na obr. 72. Vzduchová mezera mezi jádrem J transformátoru a magnetickým bočником B linearizuje magnetický obvod. Doplnková část výstupního vinutí N_{21} posouvá rozsah svařovacího proudu do potřebné oblasti.

Transformátory se stejnosměrnou magnetizací bočníku jsou větší a těžší než transformátory s pohyblivým bočníkem. Nemají však žádné pohyblivé části, a lze proto předpokládat jejich větší spolehlivost v provozu a delší život. Svařovací vlastnosti transformátorů se vzduchovou mezerou mezi jádrem transformátoru a bočníkem jsou závislé na velikosti rozsahu nastavení svařovacího proudu. Při rozdělení rozsahu alespoň do dvou stupňů lze získat příznivý tvar křivky časového průběhu svařovacího proudu.



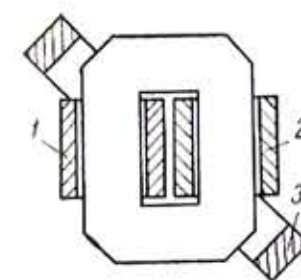
Obr. 72. Transformátor s magnetickým bočníkem druhého typu
J jádro transformátoru, B magnetický bočník, N_1 vstupní vinutí,
 N_{20} hlavní část výstupního vinutí, N_{21} doplňková část výstupního vinutí,
 N_f řídicí vinutí

4.6. TRANSFORMÁTORY S JINÝMI ZPŮSOBY OVLÁDÁNÍ ROZPTYLU

Jednu z dalších možností ovládání rozptylové reaktance znázorňuje obr. 73. Transformátor je jádrového typu, se vstupním vinutím 1 a výstupním vinutím 2, z nichž každé je navinuto na jiném sloupcu jádra. V sérii s výstupním vinutím 2 je zapojeno otáčivé vinutí 3, které obepíná oba sloupky jádra transformátoru. V jedné krajní poloze otáčivého vinutí 3 se magnetický tok vinutí a rozptylový magnetický tok transformátoru sčítají, v druhé krajní poloze se odečítají (vinutí 3 je otočné o 180° , v krajních polohách jsou osy všech tří vinutí rovnoběžné). Otáčením vinutí 3 se tedy plynule mění rozptylová reaktance celého transformátoru. Uspořádání lze použít jen u transformátorů menších výkonů.

Uvedený princip lze použít k velmi jednoduché konstrukci malého svařovacího transformátoru. Stejně jako u předcházejícího typu má transformátor vstupní a výstupní vinutí umístěna na různých sloupcích

jádra. Třetí vinutí však je navinuto na transformátor pevně, bez možnosti otáčení. Vinutí lze buď vůbec nepřipojit, nebo ho zapojit do série s výstupním vinutím ve dvou opačných smyslech. Tím se získají tři základní velikosti rozptylové reaktance, a tím i tři velikosti svařovacího proudu. Jemné nastavení svařovacího proudu je možné navíjením



Obr. 73. Transformátor s otočnou cívkou
1 vstupní vinutí, 2 výstupní vinutí, 3 otáčivé vinutí

svařovacího kabelu kolem transformátoru. Rozptylová reaktance transformátoru se mění v závislosti na směru navíjení a na počtu navinutých závitů kabelu.

4.7. TRANSFORMÁTORY S KOMBINACÍ ZPŮSOBŮ OVLÁDÁNÍ

V některých případech se dosáhne zmenšení hmotnosti svařovacího transformátoru použitím kombinace několika způsobů ovládání. Jako příklad uvedeme transformátor s posuvnými cívkami, doplněný pohyblivým magnetickým bočníkem. Zřejmou nevýhodou je složitější konstrukce těchto transformátorů. Více se používá např. přídavná tlumivka pro rozšíření rozsahu nastavení směrem k menším hodnotám svařovacího proudu (rozsah je pak rozdělen do dvou stupňů). V patentové literatuře se vyskytují popisy nejrůznějších kombinací způsobů ovládání, prakticky se jich však využívá poměrně málo.

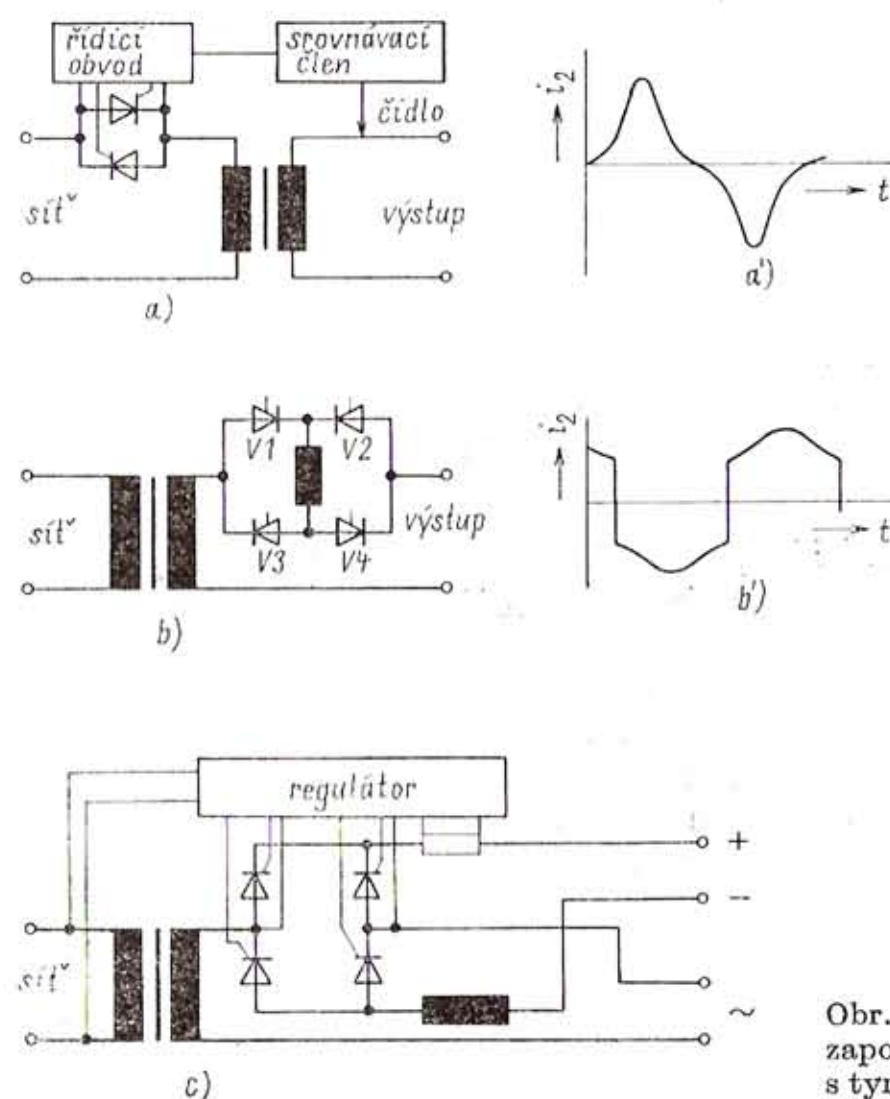
4.8. TRANSFORMÁTORY S TYRISTOROVOU REGULACÍ SVAŘOVACÍHO PROUDU

S rozvojem aplikace tyristorů v různých odvětvích elektrotechniky se objevila snaha použít tyristory k ovládání proudu i u střídavých svařovacích zdrojů.

Principiální schéma jednoduchého zapojení tyristorové regulace je na obr. 74a. Svařovací proud je řízen dvěma tyristory zapojenými anti-paralelně ve vstupním obvodu transformátoru. Vhodný regulátor ve spojení s proudovým čidlem zapojeným ve svařovacím obvodu umožňuje získat potřebný průběh statických charakteristik.

Zřejmou nevýhodou tohoto zapojení je značná deformace křivky časového průběhu svařovacího proudu (obr. 74a'). Deformace je větší

než u transduktorů a lze ji zmenšit pouze zapojením tlumivky do série s tyristory (použití filtrů LC by bylo příliš nákladné). Aby se v celém rozsahu nastavení získal průběh svařovacího proudu vyhovující alespoň méně náročným způsobům svařování, bylo by nutné vytvořit několik rozsahů s různými velikostmi indukčnosti. Tím by se zvětšila hmotnost



Obr. 74. Principiální schéma zapojení transformátoru s tyristorovou regulací proudu

a zvýšila cena a odpadla by možnost plynulé regulace v celém rozsahu, tj. zmizely by výhody tyristorové regulace a tím více by vystoupily do popředí nevýhody (vysoká cena, velká složitost, horší svařovací vlastnosti). Z toho vyplývá, že zapojení podle obr. 74a není pro obloukové svařování střídavým proudem vhodné.

Obvod velmi vhodný pro svařování, s výstupním proudem přibližně obdélníkového průběhu, je na obr. 74b. U tohoto zapojení se s kmitočtem napájecího napětí střídavě zapínají tyristory V1, V4 a V2, V3. Velikost výstupního proudu se mění fázovým posunem zapínacích impulsů pro tyristory. Tlumivka L , kterou prochází stejnosměrný proud, je dimenzována tak, aby proud procházející jejím vinutím byl nepřeru-

šovaný v celém rozsahu. Potřebné statické a dynamické charakteristiky zajistí elektronický regulátor ve spojení s proudovým čidlem.

Zapojení podle obr. 74b lze poměrně jednoduše změnit na usměrňovač; je to tedy zapojení vhodné pro univerzální svařovací zdroje se střídavým i stejnosměrným vstupem. Zjednodušené schéma zapojení u zdroje MARC 500 firmy Kemppi je na obr. 74c. Svařovací kabely se připojí na výstupní svorky pro střídavý nebo stejnosměrný proud (podle potřeby) a zbývající výstupní svorky se spojí nakrátko. Technické údaje jsou v tab. 20, popis je v kap. 11.

5. Způsoby výpočtu svařovacích transformátorů

Z předcházející kapitoly je známo, že transformátory pro obloukové svařování jsou jednofázové transformátory, u nichž se potřebné velikosti reaktance ve svařovacím obvodu dosahuje v podstatě dvěma způsoby. První způsob spočívá v zapojení tlumivky s proměnnou indukčností do série s některým vinutím transformátoru s malým rozptylem, druhou možností je zvětšení rozptylového toku mezi vstupním a výstupním vinutím.

Výpočet svařovacího transformátoru s tlumivkou se dělí na výpočet běžného výkonového transformátoru a na výpočet tlumivky s potřebným rozsahem nastavení indukčnosti.

Výpočet rozptylového svařovacího transformátoru se liší od výpočtu běžného výkonového transformátoru. Jedním z hlavních požadavků je rozsah nastavení svařovacího proudu. Základní rozměry transformátoru pak nejsou určeny jen výkonem a účinností; velký vliv na celou konstrukci transformátoru má potřebný rozsah nastavení svařovacího proudu. Zadanému rozsahu nastavení odpovídají určité velikosti rozptylových reaktancí. Rozptylové transformátory však mají složitá magnetická rozptylová pole, a výpočet rozptylové reaktance je proto obtížný a v mnoha případech málo přesný. Ještě větší obtíže činí výpočty přídatných ztrát vířivými proudy ve vinutích, jádrech a krytech rozptylových svařovacích transformátorů.

Pro stanovení hlavních rozměrů svařovacích transformátorů nejsou vypracovány podrobné směrnice. Postupuje se obvykle metodou postupného přibližování. Na základě zadání se předběžně určí hlavní rozměry transformátoru, přičemž se podobně jako při výpočtu běžného výkonového transformátoru volí např. velikost magnetické indukce, hustoty proudu a počet závitů některých vinutí. Potom se vypočítají potřebné veličiny předběžně navrženého transformátoru a porovnají se se zadáním. Na základě porovnání se upřesní konstrukční rozměry a výpočet se opakuje, dokud není nalezena nejvýhodnější konstrukce. Způsob výpočtu je zdoluhavý, nicméně dosud nutný a používaný, neboť vypracování pokynů pro optimální návrh svařovacího transformátoru naráží na obtíže dané složitostí rozptylových magnetických polí a velkým množstvím principů ovládání svařovacího proudu (často je nutné při projektu transformátoru experimentovat). Kromě toho normou daná řada jmenovitých proudů obloukových svařovacích transformátorů vyžaduje poměrně malé množství typových velikostí transformátorů.

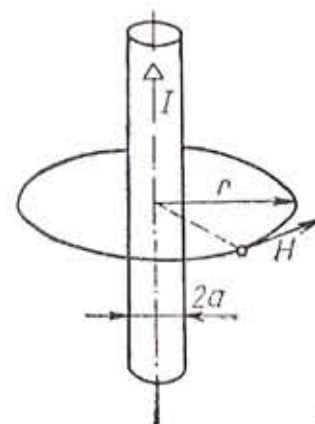
V následujících odstavcích bude proto věnována pozornost způsobu

určení rozsahu nastavení svařovacího proudu u svařovacích transformátorů s různými principy ovládání. Nejprve bude stručně popsán princip transformátoru a vliv parametrů transformátoru na jeho statické a dynamické charakteristiky.

Pro objasnění působení transformátoru a tlumivky je vhodné předem shrnout některé základní pojmy magnetismu a vztahy pro výpočet magnetických obvodů.

5.1. NĚKTERÉ ZÁKLADNÍ ZÁKONY MAGNETISMU

a) *Magnetické účinky elektrického proudu.* Elektrický proud je vždy doprovázen magnetickým polem. Prochází-li nekonečně dlouhým přímým vodičem proud I , vytvoří se v rovinách kolmých na vodič uzavřené kruhové magnetické silové čáry, jejichž smysl je určen pravidlem vývrtky (obr. 75).



Obr. 75. Magnetické pole přímého vodiče

V soustavě SI platí vztah

$$\oint H_s ds = I \quad (19)$$

kde H_s je složka intenzity magnetického pole ve směru elementárního úseku dráhy ds .

Výraz $\oint H_s ds$ představuje magnetomotorické napětí a označuje se F_m . Jednotkou magnetomotorického napětí je ampér (dříve se u výpočtů magnetických obvodů pro F_m používala jednotka ampérzávit).

Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti r od středu vodiče je v prostoru mimo vodič

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{A/m; A, m})$$

Intenzita magnetického pole uvnitř vodiče kruhového průřezu s poloměrem a ve vzdálenosti r od středu vodiče za předpokladu rovnoměrného

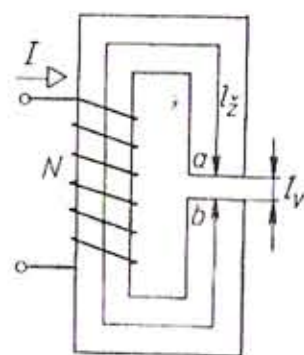
rozložení elektrického proudu v průřezu vodiče je

$$H = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{r}{a^2} \quad (\text{A/m; A, m})$$

Intenzita magnetického pole H obecně vyvolá magnetickou indukci B , jejíž velikost závisí na velikosti H a na prostředí.

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (\text{T; —, H/m, A/m}) \quad (20)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua,
 μ_r poměrná permeabilita prostředí.



Obr. 76. Magnetický obvod pro vysvětlení pojmu magnetický odpor

V soustavě SI je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, velikost μ_r se u diamagnetických a paramagnetických látek nepatrně liší od 1, u feromagnetických může být $\mu_r = 10^3$ až 10^5 .

Jako magnetický tok Φ procházející plochou S se definuje počet všech indukčních čar procházejících plochou S . Matematicky

$$\Phi = \iint_S B_n dS \quad (21)$$

kde B_n je složka magnetické indukce kolmá k diferenciálu plochy dS .

V nejjednodušším případě homogenního magnetického pole, jehož všechny indukční čáry procházejí kolmo k ploše S , platí

$$\Phi = BS \quad (\text{Wb; T, m}^2)$$

Pro řešení magnetických obvodů buzených proudem je důležitý Hopkinsonův zákon, který je analogií Ohmova zákona pro elektrické obvody.

$$F_m = R_m \Phi \quad (\text{A; H}^{-1}, \text{Wb}) \quad (22)$$

kde R_m je magnetický odpor neboli reluktance.

Pro určení významu magnetického odporu budeme sledovat magnetický obvod na obr. 76. Na železném jádru s průřezem S_z , přerušeném vzduchovou mezerou délky l_v , je navinuto N závitů drátu, kterým prochází proud I . Předpokládáme, že indukční čáry vystupují ze železa do vzduchu jen na rozhraních vzduchové mezery a pokračují

ve vzduchové mezeře stejným průřezem jako v železe (ve skutečnosti nastává v mezeře vyklenutí indukčních čar; při výpočtu se často tento jev respektuje uvažováním většího průřezu vzduchové mezery, než je průřez železa). Intenzita magnetického pole v železe H_z není všude stejná, počítá se proto se střední velikostí H_z , která je podél střední silové čáry s délkou l_z , jdoucí středem průřezu. Celkové magnetomotorické napětí se potom dělí mezi železné jádro a vzduchovou mezeru.

$$\oint H_s ds = \int_a^b H_z ds + \int_b^a H_v ds$$

Protože podle uvedených předpokladů jsou indukce B_z v železe a B_v v mezeře stejné ($B_z = B_v = B$), je

$$H_z = \frac{B}{\mu_{rz} \mu_0}$$

$$H_v = \frac{B}{\mu_{rv} \mu_0}$$

Z toho plyne

$$\oint H_s ds = \frac{B}{\mu_0} \left(\frac{l_z}{\mu_{rz}} + \frac{l_v}{\mu_{rv}} \right)$$

Není-li průřez magnetického obvodu konstantní, není ani indukce B konstantní; musí však být $\Phi = BS = \text{konst}$, takže lze psát

$$\oint H_s ds = \Phi \left(\int_a^b \frac{ds}{\mu_{rz} \mu_0 S_z} + \int_b^a \frac{ds}{\mu_{rv} \mu_0 S_v} \right)$$

Výraz $\int_a^b \frac{ds}{\mu_r \mu_0 S} = R_m$ udává magnetický odpor.

V našem případě bude $R_m = R_{mz} + R_{mv}$.

$$\oint H_s ds = F_m = NI$$

a tedy

$$NI = R_m \Phi \quad (\text{A; H}^{-1}, \text{Wb}) \quad (23)$$

Při zjednodušujících předpokladech uvedených dříve budou magnetické odpory obvodu podle obr. 76

$$R_{mz} = \frac{l_z}{\mu_{rz} \mu_0 S_z} \quad (\text{H}^{-1}; \text{m, —, H/m, m}^2)$$

a při $\mu_{rv} = 1$ (soustava SI)

$$R_{mv} = \frac{l_v}{\mu_0 S_v} \quad (\text{H}^{-1}; \text{m, H/m, m}^2)$$

Převrácená hodnota magnetického odporu R_m se nazývá magnetická vodivost neboli permeance a značí se Λ . Jednotkou permeance je

henry (H). Protože

$$A = \frac{1}{R_m}$$

je možné Hopkinsonův zákon psát také ve tvaru

$$\Phi = F_m A \quad (\text{Wb}; A, H) \quad (24)$$

V mnoha případech je magnetický odpor železného jádra v porovnání s magnetickým odporem vzduchové mezery zanedbatelný, protože permeabilita železa je mnohem větší než permeabilita vzduchu. Pak se počítá pouze s magnetomotorickým napětím potřebným pro vzduchovou mezeru.

b) *Faradayův indukční zákon.* Základ ke konstrukcím elektromagnetických strojů byl dán objevem elektromagnetické indukce. Změnou magnetického pole dochází ke vzniku (indukci) indukovaného napětí, jehož velikost je dána vztahem

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \quad (25)$$

Máme-li cívku tvořenou N závitů a prochází-li plochami všech závitů časově proměnný magnetický tok Φ , je napětí indukované v cívkce dáno vztahem

$$u_i = N \frac{d\Phi}{dt}$$

V technické praxi mívá magnetický tok často sinusový průběh. Okamžitá hodnota magnetického toku pak je

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

kde Φ_m je maximální hodnota (amplituda) magnetického toku,

$\omega = 2\pi f$ úhlový kmitočet magnetického toku,
 f kmitočet.

Okamžitá hodnota indukovaného napětí je

$$u_i = N \Phi_m \omega \cos \omega t$$

Amplituda indukovaného napětí, a tedy i napětí naprázdno U_m na otevřených svorkách cívky je

$$U_m = \omega N \Phi_m \quad (26)$$

Efektivní hodnota napětí je

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$U = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \Phi_m$$

neboli

$$U = 4,44 f N \Phi_m \quad (\text{V}; \text{Hz}, -, \text{Wb}) \quad (27)$$

Pro obvody s homogenním magnetickým polem (např. je-li cívka navinuta na železném jádru s průřezem S) můžeme psát

$$\Phi_m = B_m S$$

a získat tak vztah mezi efektivní hodnotou sinusového napětí na svorkách cívky a amplitudou magnetické indukce B_m uvnitř cívky

$$U = 4,44 f N S B_m \quad (\text{V}; \text{Hz}, -, \text{m}^2, \text{T}) \quad (28)$$

Tato rovnice se používá ve výpočtech velmi často (např. u transformátorů a tlumivek) ke stanovení počtu závitů vinutí při dané velikosti a daném kmitočtu napájecího napětí v závislosti na průřezu železa jádra a na požadované velikosti amplitudy magnetické indukce.

c) *Vlastní a vzájemná indukčnost.* Důležitou vlastností magnetických obvodů je indukčnost. Jednotkou indukčnosti v soustavě SI je henry (H).

Vlastní indukčnost L cívky lze staticky definovat součtem všech magnetických toků uzavřených jednotlivými závitů (tzv. cívkový tok Φ_c), vyvolaných jednotkovým proudem procházejícím vinutím cívky.

$$\Phi_c = LI \quad (\text{Wb}; \text{H}, \text{A}) \quad (29)$$

Zavedení tzv. cívkového toku respektuje případy, kdy všemi závitů cívky neprochází stejný magnetický tok a cívkový tok je pak součtem toků ve všech N závitech cívky.

$$\Phi_c = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N$$

Cívka je potom nahrazena jedním závitěm, kterým prochází tok Φ_c . Předpokládáme-li, že všemi závitů cívky prochází stejný tok Φ , zní statická definice vlastní indukčnosti cívky takto:

$$N\Phi = LI \quad (\text{Wb}; \text{H}, \text{A}) \quad (30)$$

Dynamicky je vlastní indukčnost cívky definována napětím indukovaným při jednotkové rychlosti časové změny proudu v cívkce.

$$u = L \frac{di}{dt}$$

Kromě těchto definic existuje ještě energetická definice vlastní indukčnosti, která udává závislost energie W magnetického pole na indukčnosti L cívky, kterou prochází proud I .

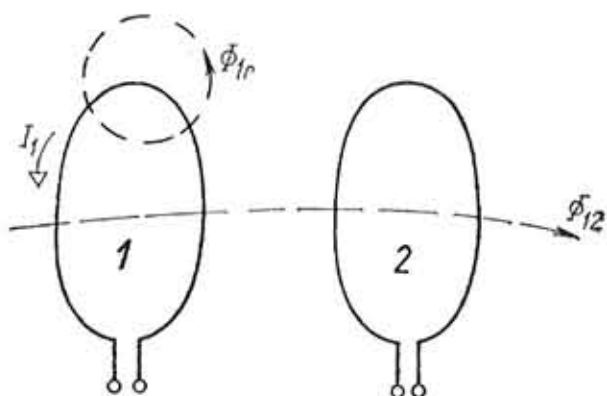
$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{J}; \text{H}, \text{A}) \quad (31)$$

Je-li v prostoru umístěno více cívek a část magnetického toku je pro ně společná, zavádí se pojem vzájemná indukčnost. Na obrázku 77

jsou dva závity, 1 a 2, umístěné v prostředí s konstantní permeabilitou. Prochází-li závitem 1 proud I_1 , vyvolá tok $\Phi_1 = L_1 I_1$, kde L_1 je vlastní indukčnost závitu 1. Část toku Φ_1 prochází plochou závitu 2 a je označena Φ_{12} , část označená Φ_{1r} se uzavírá prostorem mimo zavit 2. Je tedy $\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{1r}$. Napíšeme-li

$$\Phi_{12} = L_{12} I_1$$

je součinitel L_{12} číselně dán počtem indukčních čar, které zavit 1 vysílá do závitu 2 při jednotkovém proudu procházejícím závitem 1.



Obr. 77. Uspořádání pro vysvětlení vzájemné indukčnosti

Prochází-li naopak závitem 2 proud I_2 , vysílá tento zavit tok Φ_2 , jehož část Φ_{21} prochází závitem 1. Mimo zavit 1 se uzavírá tok $\Phi_{2r} = \Phi_2 - \Phi_{21}$. Pro tok Φ_2 platí $\Phi_2 = L_2 I_2$, kde L_2 je vlastní indukčnost závitu 2, pro tok Φ_{21} můžeme napsat

$$\Phi_{21} = L_{21} I_2$$

Pro součinitele L_{12} a L_{21} (pro náš případ, tedy dva na sebe působící závity) platí

$$L_{12} = L_{21} = M \quad (32)$$

kde M je vzájemná indukčnost závitů 1 a 2.

Vztahy

$$\Phi_{12} = M I_1; \quad \Phi_{21} = M I_2 \quad (33)$$

jsou statickou definicí vzájemné indukčnosti.

Máme-li místo jednotlivých závitů dvě cívky s počtem závitů N_1 a N_2 a prochází-li v každé cívkě všemi závity stejný magnetický tok, zní statická definice vzájemné indukčnosti takto:

$$N_2 \Phi_{12} = M I_1$$

$$N_1 \Phi_{21} = M I_2$$

Jsou-li toky, které procházejí plochou jednotlivých závitů cívky, různé, je nutné opět (jako u definice vlastní indukčnosti) zavést pojem cívkový tok.

Mění-li se s časem proud i_1 cívky 1, mění se časově i magnetický tok Φ_{12} a časová změna toku indukuje v cívkě 2 napětí

$$u_{12} = N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = M \frac{di_1}{dt}$$

a podobně při časové změně proudu i_2 v cívkě 2 se indukuje v cívkě 1 napětí

$$u_{21} = N_1 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = M \frac{di_2}{dt}$$

Tyto dva vztahy jsou dynamickou definicí vzájemné indukčnosti za předpokladu, že všemi závity cívky prochází stejný magnetický tok.

Vzájemná indukčnost je staticky definována cívkovým tokem pasivní cívky, vyvolaným jednotkovým proudem v aktivní cívkě.

Vzájemná indukčnost je dynamicky definována napětím indukovaným v pasivní cívkě při jednotkové rychlosti změny proudu v aktivní cívkě.

Jednotkou vzájemné indukčnosti v soustavě SI je henry (H) (stejně jako u vlastní indukčnosti).

V souvislosti s pojmem vzájemná indukčnost se zavádějí pojmy rozptyl a vazba. U dvou cívek s počtem závitů N_1 a N_2 , kde u každé cívky prochází všemi závity stejný magnetický tok, platí podle uvedených úvah tyto vztahy:

U první cívky

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{1r}$$

$$N_1 \Phi_1 = L_1 I_1$$

$$N_1 \Phi_{12} = L_{12} I_1$$

$$N_1 \Phi_{1r} = L_{1r} I_1$$

$$N_2 \Phi_{12} = M I_1$$

U druhé cívky

$$\Phi_2 = \Phi_{21} + \Phi_{2r}$$

$$N_2 \Phi_2 = L_2 I_2$$

$$N_2 \Phi_{21} = L_{21} I_2$$

$$N_2 \Phi_{2r} = L_{2r} I_2$$

$$N_1 \Phi_{21} = M I_2$$

Označíme-li

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_{12}} = v_1; \quad \frac{\Phi_2}{\Phi_{21}} = v_2 \quad (34)$$

je

$$M = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{N_2}{N_1} L_1$$

$$M = \frac{1}{r_2} \cdot \frac{N_1}{N_2} L_2$$

kde r_1 a r_2 jsou Hopkinsonovy činitele rozptylu cívek 1 a 2. Vzájemnou indukčnost M je tedy možné vyjádřit vlastními indukčnostmi obou cívek L_1 a L_2 .

$$M = \sqrt{\frac{L_1 L_2}{r_1 r_2}} \quad (35)$$

Činitel $\kappa = \frac{1}{\sqrt{r_1 r_2}}$ se nazývá činitel vazby cívek, takže

$$M = \kappa \sqrt{L_1 L_2} \quad (36)$$

Činitel vazby se může rovnat nejvýše jedné, a to při dekonalé vazbě. Ve skutečnosti toho nelze dosáhnout, protože se vždy určitý rozptylový tok uzavírá mimo plochu druhé cívky (popř. závitů), takže je vždy $\kappa < 1$.

Vzájemná indukčnost M může být vyjádřena pomocí fiktivních indukčností L_{12} a L_{21} , použijeme-li dříve uvedené soustavy rovnic. Potom

$$M = \frac{N_2}{N_1} L_{12}$$

$$M = \frac{N_1}{N_2} L_{21}$$

a tedy

$$M = \sqrt{L_{12} L_{21}}$$

Tyto vztahy jsou důležité pro odvození náhradního schématu transformátoru.

Statická definice se používá k výpočtu indukčnosti tam, kde můžeme určit magnetický odpor (reluktanci) R_m dráhy magnetického toku Φ . Máme-li cívku s N závitů a uvažujeme-li tok všech závitů stejný, platí

$$N\Phi = LI \quad (-, \text{Wb}; \text{H}, \text{A})$$

Za Φ dosadíme z Hopkinsonova zákona a dostaneme

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (\text{H}; -, \text{H}^{-1}) \quad (37)$$

Dynamickou definici nemůžeme použít k výpočtu indukčnosti, používá se však k měření indukčnosti tlumivek. Prochází-li vinutím cívky

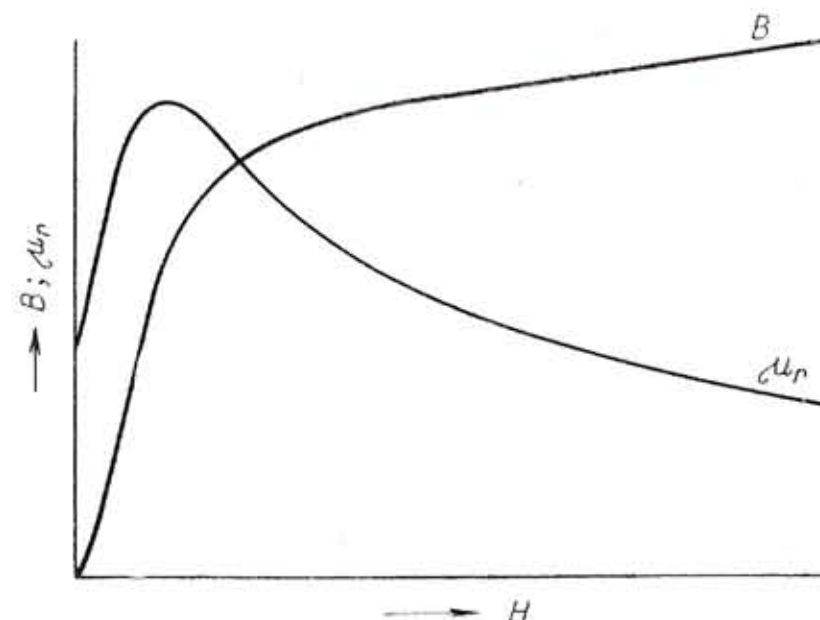
sinusový střídavý proud $i = I_m \sin \omega t$, má indukované napětí také sinusový průběh.

$$u_i = \omega L I_m \cos \omega t$$

Efektivní hodnota napětí U na svorkách cívky je tedy

$$U = \omega L I \quad (\text{V}; \text{s}^{-1}, \text{H}, \text{A}) \quad (38)$$

kde I je efektivní hodnota procházejícího sinusového střídavého proudu, ω úhlový kmitočet střídavého proudu.



Obr. 78. Příklad průběhu magnetizační křivky $B = f(H)$ a závislosti poměrné permeability μ_r na intenzitě magnetického pole H u feromagnetických materiálů

Často se používá výraz $X = \omega L$, kde X je reaktance cívky napájené proudem s úhlovým kmitočtem ω .

Z energetické definice je možné vycházet při určování sil působících mezi konstrukčními součástmi elektromagnetických strojů. Síla působící mezi částmi obvodu, kterým prochází proud I , je

$$F = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{da} \quad (\text{N}; \text{A}, \text{H}, \text{m}) \quad (39)$$

Výraz dL/da představuje změnu indukčnosti obvodu, která by nastala při pohybu části obvodu o elementární vzdálenost da . Je zřejmé, že síly působí jen mezi součástmi, jejichž vzájemný pohyb by měl za následek změnu indukčnosti obvodu. Smysl působení síly je takový, že se snaží zvětšovat indukčnost soustavy.

d) *Feromagnetické obvody.* Magnetické obvody elektromagnetických strojů se většinou zhotovují ze železa, jehož permeabilita není konstantní, ale mění se s velikostí intenzity magnetického pole. Závislost mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B při střídavé

magnetizaci obecně udává tzv. hysterezní smyčka, která se však pro magneticky měkké materiály nahrazuje křivkou prvotní magnetizace neboli magnetizační křivkou. Z příkladu na obr. 78 je vidět, že při zvětšování intenzity magnetického pole H se nejprve indukce B zvětšuje téměř lineárně, při dalším zvětšování intenzity magnetického pole H se magnetická indukce zvětšuje stále pomaleji, až dosáhne bodu, od kterého zůstává neměnná. Za tímto bodem je materiál magneticky nasycen. Křivka poměrné permeability μ_r vykazuje maximum v oblasti malých hodnot intenzity magnetického pole, se zvětšováním intenzity magnetického pole H , a tím i magnetické indukce železa poměrná permeabilita klesá. Na tuto skutečnost je nutné brát ohled při návrhu elektromagnetických strojů a magnetické obvody velít tak, aby magnetická indukce a intenzita magnetického pole měly hodnoty potřebné pro požadovanou funkci stroje.

5.2. PRINCIP TRANSFORMÁTORU A ZÁKLADNÍ ROVNICE PRO VÝPOČET

Transformátor je elektromagnetický stroj, který mění velikost střídavého napětí při zachování kmitočtu. Obsahuje nejméně dvě vinutí uspořádaná tak, aby magnetický tok jednoho vinutí procházel druhým vinutím. Aby co největší část toku prvního (vstupního) vinutí procházela druhým (výstupním) vinutím, umísťují se vinutí na společné uzavřené železné jádro. Schematicky je uspořádání znázorněno na obr. 79.

Za předpokladu ideálního transformátoru (žádné ztráty v transformátoru, permeabilita jádra $\mu \rightarrow \infty$) určíme vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami.

Vycházíme-li ze vztahu mezi magnetickým tokem a indukovaným napětím pro sinusový průběh veličin, lze psát pro vstupní (index 1) a výstupní (index 2) vinutí

$$U_{11} = 4,44/\Phi_m N_1 \quad (40)$$

$$U_{12} = 4,44/\Phi_m N_2 \quad (41)$$

kde Φ_m je magnetický tok (vrcholová hodnota) společný oběma vinutím. Potom

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{N_1}{N_2} = p \quad (42)$$

tj. poměr indukovaných napětí obou vinutí transformátoru se rovná poměru počtu závitů. Nazývá se převod transformátoru a označuje se p .

Zanedbáme-li část magnetického toku vstupního vinutí, která neprochází vinutím výstupním (rozptylový tok vstupního vinutí), můžeme

místo indukovaných napětí psát svorková napětí, takže pro transformátor naprázdno přibližně platí

$$\frac{U_1}{U_{20}} \doteq \frac{N_1}{N_2} = p \quad (43)$$

kde U_{20} je výstupní napětí naprázdno.

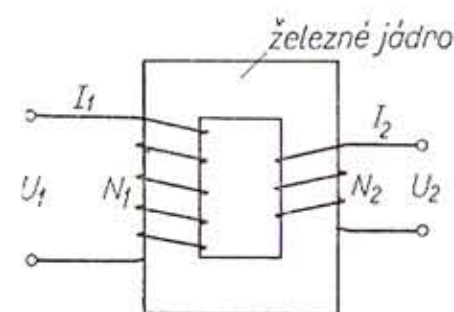
Pro výkon transformátoru přibližně platí

$$U_1 I_1 \doteq U_2 I_2 \quad (44)$$

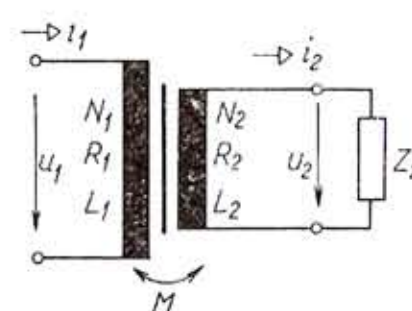
a z tohoto vztahu lze odvodit

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{p} \quad (45)$$

Vstupní a výstupní proud transformátoru jsou v nepřímém poměru k převodu p .



Obr. 79. Princip transformátoru



Obr. 80. Schematické znázornění jednofázového transformátoru Z_2 zátěž

Transformátor tedy můžeme znázornit jako dvě cívky s počtem závitů N_1 a N_2 s odpory vinutí R_1 a R_2 a vlastními indukčnostmi cívek L_1 a L_2 (obr. 80). Mezi cívkami je vzájemná indukčnost M , takže v souladu se statickou definicí vlastní a vzájemné indukčnosti můžeme psát

$$L_1 = L_{12} + L_{1r} \quad (46)$$

$$L_2 = L_{21} + L_{2r} \quad (47)$$

$$M = \frac{N_2}{N_1} L_{12} \quad (48)$$

$$M = \frac{N_1}{N_2} L_{21} \quad (49)$$

kde L_{12} je část indukčnosti vstupní cívky, která podle statické definice odpovídá té části toku vstupní cívky, která prochází výstupní cívkou; indukčnost L_{21} je definována stejně, avšak pro výstupní cívkou.

Pro schéma na obr. 80 platí rovnice

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (50)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (51)$$

Při sinusovém průběhu napětí a proudu s použitím symbolického počtu, obvyklého u výpočtů obvodů se střídavým proudem, platí

$$U_1 = R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \quad (52)$$

$$U_2 = R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 \quad (53)$$

Pro usnadnění rozboru vlastností transformátoru se skutečné schéma zapojení transformátoru nahrazuje zjednodušeným náhradním schématem. K tomu účelu se převádějí konstanty všech obvodů na jedno základní vinutí (buď na vstupní, nebo na výstupní, podle toho, co je v dané situaci výhodnější).

Při převodu výstupních veličin na vstupní vinutí platí pro indukované napětí $U'_2 = U_2$ a tedy

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 = p U_2 \quad (54)$$

kde U'_2 je výstupní napětí přepočtené na vstupní vinutí.

Stejným způsobem se všechna napětí z výstupního vinutí přepočítávají na vstupní vinutí.

Vycházíme-li ze vztahu (44), dostaneme s použitím (54) vztah

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{p} \quad (55)$$

kde I'_2 je výstupní proud přepočtený na vstupní vinutí.

Při odvozování přepočtu odporů a reaktancí je možné opět vyjít ze vztahu (44). Podle toho pro odpor výstupního vinutí přepočtený na vstupní vinutí platí

$$R'_2(I'_2)^2 = R_2 I_2^2$$

Dosadíme-li za I'_2 z rovnice (55), dostaneme

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 = p^2 R_2 \quad (56)$$

Při přepočtu reaktance výstupního vinutí na vstupní vinutí dostaneme

$$X'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 = p^2 X_2 \quad (57)$$

Přepočet reaktance odpovídající vzájemné indukčnosti na vstupní

vinutí je zřejmý z rovnice (48). Použijeme-li vztahy $X_{12} = \omega L_{12}$, $X_M = \omega M$, $X_{21} = \omega M L_{21}$, dostaneme

$$X_{12} = \frac{N_1}{N_2} X_M = p X_M \quad (58)$$

$$X_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{21} = p^2 X_{21} \quad (59)$$

Zcela obdobně lze odvodit vztahy pro přepočet veličin na výstupní vinutí

$$U'_1 = \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{U_1}{p} \quad (60)$$

$$I'_1 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = p I_1 \quad (61)$$

$$R'_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 R_1 = \frac{R_1}{p^2} \quad (62)$$

$$X'_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_1 = \frac{X_1}{p^2} \quad (63)$$

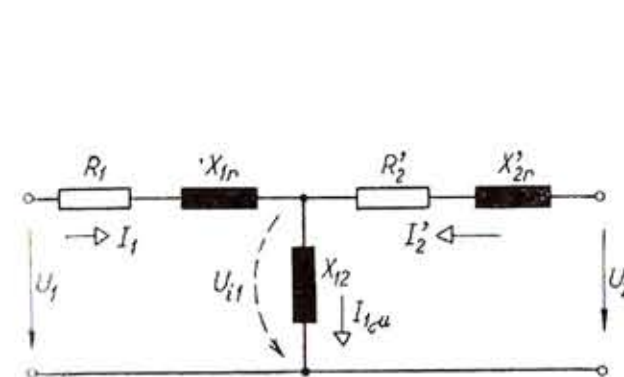
$$X_{21} = \frac{N_2}{N_1} X_M = \frac{X_M}{p} \quad (64)$$

$$X_{21} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_{12} = \frac{X_{12}}{p^2} \quad (65)$$

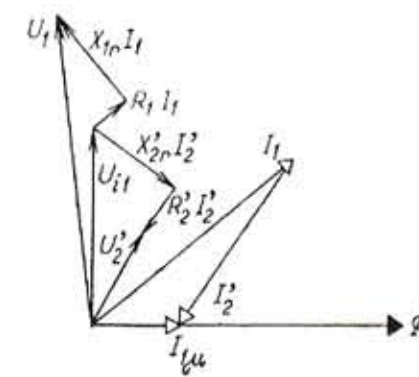
S použitím rovnic (46) až (49) a (54) až (59) lze upravit rovnice (52) a (53) do tvaru

$$U_1 = (R_1 + jX_{1r}) I_1 + jX_{12}(I_1 + I'_2) \quad (66)$$

$$U'_2 = (R'_2 + jX'_{2r}) I'_2 + jX_{12}(I_1 + I'_2) \quad (67)$$



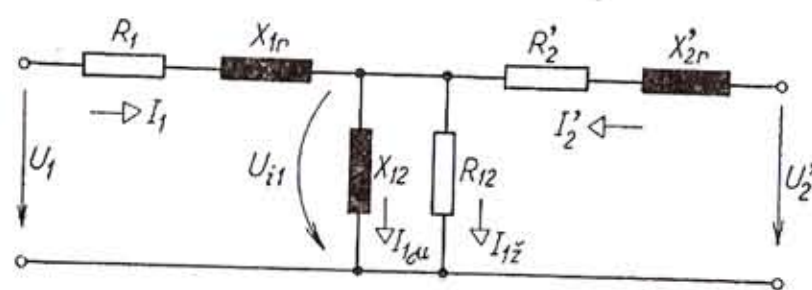
Obr. 81. Náhradní schéma transformátoru bez železného jádra



Obr. 82. Fázorový diagram zatíženého transformátoru bez železného jádra

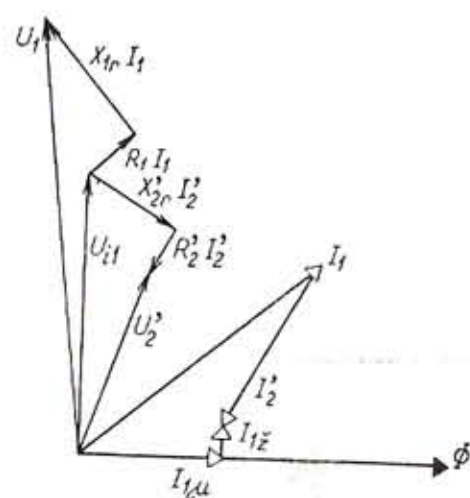
- kde U_1 je vstupní napětí,
 U_2' výstupní napětí přepočtené na vstupní vinutí,
 R_1 odpor vstupního vinutí,
 R_2' odpor výstupního vinutí přepočtený na vstupní vinutí,
 X_{1r} rozptylová reaktance vstupního vinutí,
 X_{2r}' rozptylová reaktance výstupního vinutí přepočtená na vstupní vinutí,
 X_{12} reaktance odpovídající vzájemné indukčnosti vstupního a výstupního vinutí, vztažená na vstupní vinutí,
 I_1 vstupní proud,
 I_2' výstupní proud přepočtený na vstupní vinutí.

Rovnicím (66) a (67) vyhovuje náhradní schéma transformátoru nakreslené na obr. 81. V tomto schématu je spojen vstupní a výstupní obvod společným fiktivním napětím $U_{11} = jX_{12}I_{1\mu}$. Magnetizační proud $I_{1\mu} = I_1 + I_2'$ je vektorový součet proudů I_1 a I_2' . Z uvedených rovnic lze nakreslit fázorový diagram (obr. 82).



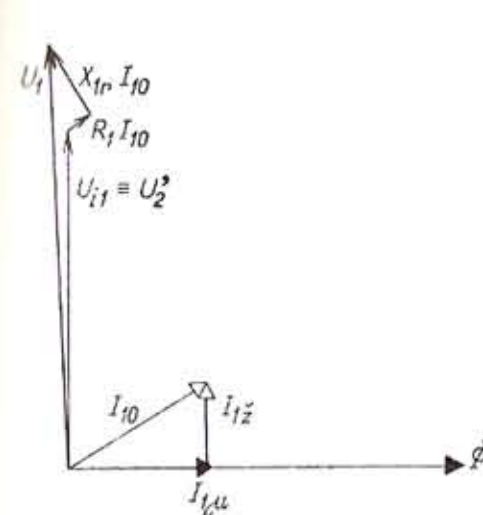
Obr. 83. Náhradní schéma transformátoru se železným jádrem

U technických transformátorů se železným jádrem vznikají při změnách magnetického toku činné ztráty v železe. Tyto ztráty lze respektovat v náhradním schématu zařazením odporu R_{12} podle obr. 83. Odpovídající fázorový diagram je na obr. 84. Oba fázorové diagramy ukazují poměry při zatížení transformátoru.

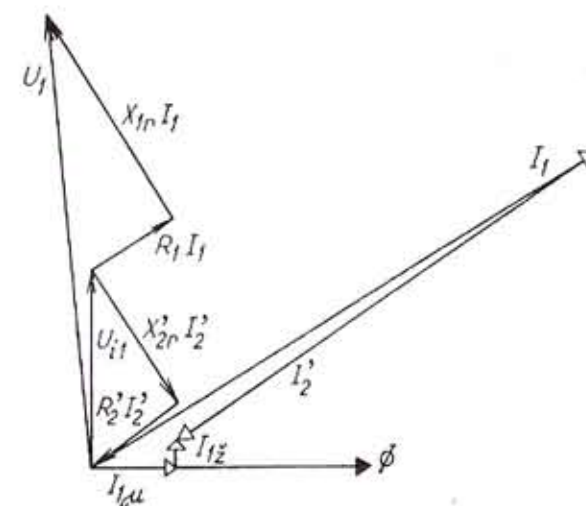


Obr. 84. Fázorový diagram zatíženého transformátoru se železným jádrem

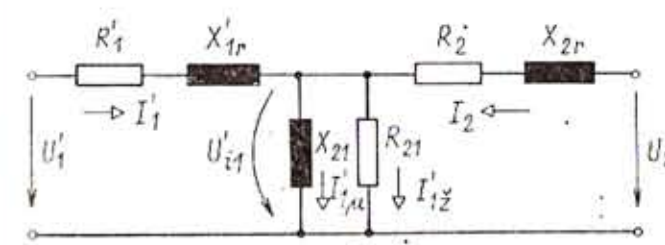
Fázorový diagram pro chod transformátoru naprázdno ($I_2 = 0$) je na obr. 85. Při chodu naprázdno odebírá transformátor ze sítě proud naprázdno I_{10} , jehož činná složka I_{1z} je dána ztrátami v železe a jalová složka $I_{1\mu}$ je magnetizační proud.



Obr. 85. Fázorový diagram transformátoru naprázdno



Obr. 86. Fázorový diagram transformátoru při chodu nakrátko

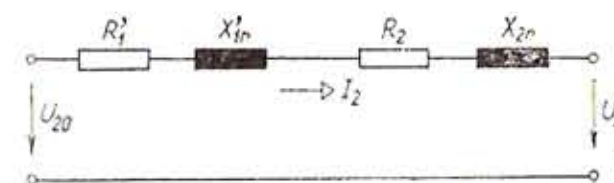


Obr. 87. Náhradní schéma transformátoru s veličinami přepočtenými na výstupní vinutí

Při chodu transformátoru nakrátko ($U_2 = 0$) se musí celé vstupní napětí spotřebovat na úbytky napětí na vinutí. Příslušný fázorový diagram je na obr. 86. Proud nakrátko je tedy určen velikostí rozptylových reaktancí a odporů vinutí transformátoru.

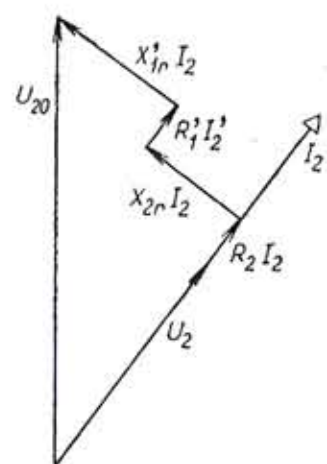
Použijeme-li vztahy pro přepočet vstupních veličin na výstupní vinutí, dospějeme k náhradnímu schématu na obr. 87. Fázorové diagramy pro toto náhradní schéma jsou až na označení fázorů stejné jako fázorové diagramy uvedené dříve a není je zapotřebí kreslit.

Zanedbáme-li magnetizační proud a ztráty naprázdno transformátoru, nejsou ve schématu na obr. 87 odpor R_{21} a reaktance X_{21} , tedy $I_{1\mu}' = 0$ a $I_{1z}' = 0$. Proud $I_2 = -I_1'$ a místo napětí U_1' můžeme psát



Obr. 88. Náhradní schéma transformátoru při zanedbání proudu naprázdno

výstupní napětí naprázdno U_{20} . Za těchto předpokladů se náhradní schéma transformátoru zjednoduší (obr. 88 — šipku proudu I_2 kreslíme jako pro zdroj); příslušný fázorový diagram takto zjednodušeného transformátoru, odporově zatíženého, je na obr. 89.



Obr. 89. Fázorový diagram transformátoru s odporovou zátěží při zanedbání proudu naprázdno

5.3. STATICKÉ A DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY TRANSFORMÁTORU

Ze zjednodušeného náhradního schématu na obr. 88 je zřejmé, že velikost úbytku napětí transformátoru při určité velikosti proudu lze měnit změnou hodnoty odporů a reaktancí, přičemž je lhostejné, zda se tato změna uskutečňuje v samotném transformátoru (např. změnou velikosti rozptylové reaktance) nebo mimo transformátor, změnou odporu nebo reaktance ve vstupním nebo výstupním obvodu transformátoru.

Pro znázornění vlivu odporu a reaktance na statické a dynamické charakteristiky transformátoru je vhodné náhradní schéma z obr. 88 ještě dále zjednodušit sečtením odporů a reaktancí v jeden výsledný odpor R a reaktanci X .

$$R = R'_1 + R_2 + R_{t1}$$

$$X = X'_{1r} + X_{2r} + X_{t1}$$

kde R'_1, X'_{1r} jsou odpor a rozptylová reaktance vstupního vinutí přepočtené na výstupní vinutí,

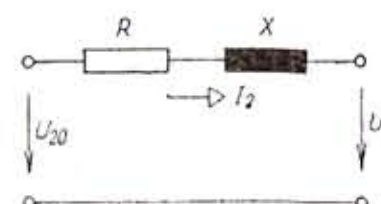
R_2, X_{2r} odpor a rozptylová reaktance výstupního vinutí,
 R_{t1}, X_{t1} odpor a reaktance sériové tlumivky, pokud jde o transformátor s tlumivkou (je-li tlumivka zapojena ve vstupním obvodu, jsou R_{t1} a X_{t1} hodnoty přepočtené na výstupní vinutí).

Po této úpravě dostaneme velmi jednoduché náhradní schéma, uvedené na obr. 90.

a) *Statické charakteristiky transformátoru.* Podle čs. norem se statické charakteristiky svařovacích transformátorů měří při odporovém zatěžování transformátoru. Zatěžovacím rezistorem se tedy nahrazuje elektrický oblouk, který tvoří skutečnou zátěž při svařování. Představíme-li si, že ve schématu na obr. 90 je mezi svorkami s napětím U_2 zapojen rezistor, jehož odpor lze měnit od nuly do nekonečna (tzn. že napětí U_2 se mění od nuly do U_{20}), můžeme psát

$$U_{20}^2 = (U_2 + RI_2)^2 + X^2I_2^2 \quad (68)$$

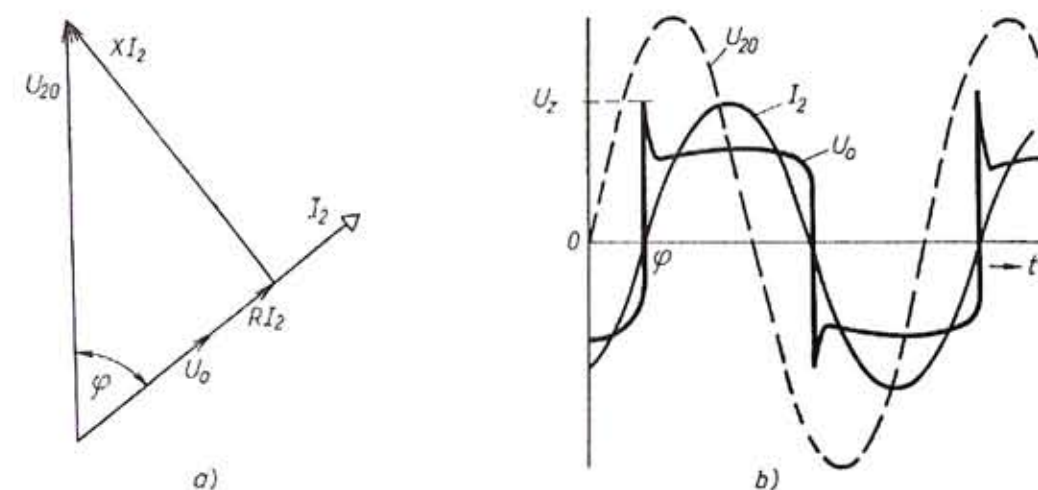
Tato rovnice analyticky vyjadřuje průběh statické charakteristiky $U_2 = f(I_2)$ transformátoru. Je to rovnice elipsy, jejíž hlavní osa je proti ose proudu I_2 pootočená ve směru hodinových ručiček, a to za předpokladu, že ani odpor, ani reaktance se při změnách napětí U_2 nemění.



Obr. 90. Zjednodušené náhradní schéma transformátoru

Z rovnice (68) je zřejmé, že ovládání proudu I_2 , to je změnu I_2 při daném napětí U_2 , lze teoreticky uskutečnit třemi způsoby: změnou odporu R , změnou napětí naprázdno U_{20} a změnou reaktance X .

Nastavování proudu zapojením sériového rezistoru se u transformátorů pro obloukové svařování nepoužívá ze dvou důvodů. Prvním důvodem jsou velké činné ztráty elektrické energie v rezistoru. Druhým důvodem je zajištění stabilního hoření oblouku napájeného střídavým proudem. Oblouk během každého průchodu proudu nulou zhasíná a k opětovnému zapálení potřebuje určitou velikost zapalovacího napětí. To je možné zajistit fázovým posunem mezi napětím naprázdno a svařovacím



Obr. 91. Zjednodušený fázorový diagram (a) a průběh elektrických veličin (b) při svařování

proudem (napětí na oblouku je ve fázi se svařovacím proudem) a dostatečnou velikostí napětí naprázdno v poměru k napětí na oblouku. Oběma požadavkům vyhovuje nastavování proudu změnou reaktance ve svařovacím obvodu při poměrně malém činném odporu v obvodu. Fázový diagram a průběh veličin jsou na obr. 91. Svařovací proud I_2 a napětí oblouku U_0 jsou za napětím naprázdno U_{20} (resp. za napětím na vstupním vinutí transformátoru) opožděny o úhel φ , daný velikostí R , X , U_0 a U_{20} . Napětí naprázdno musí být voleno tak vysoké, aby potřebná velikost zapalovacího napětí při svařování U_z byla menší než okamžitá velikost napětí u_{20} při průchodu proudu i_2 nulou. Je tedy zřejmé, že při nastavování svařovacího proudu odporem při malé velikosti reaktance X by nebyl svařovací proces stabilní, protože napětí naprázdno by bylo téměř ve fázi se svařovacím proudem, a při průchodu proudu nulou by tedy nebylo k dispozici potřebné napětí pro opětné zapálení oblouku.

Nastavování proudu změnou velikosti napětí naprázdno se někdy používá u malých montážních transformátorů při menších rozsazích nastavení. Nevýhodou je, že se při snižování napětí naprázdno obvykle zhoršují svařovací vlastnosti.

Nejvíce používaným způsobem je ovládání svařovacího proudu změnou sériové indukční reaktance, a to buď rozptylové reaktance transformátoru, nebo reaktance přidavné tlumivky.

Z rovnice (68) můžeme vypočítat potřebnou velikost reaktance X při daných napětích U_{20} a U_2 pro požadovanou velikost proudu I_2

$$X = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - (U_2 + RI_2)^2}}{I_2} \quad (69)$$

a trvalý proud nakrátko ($U_2 = 0$) při dané reaktanci X

$$I_{2k} = \frac{U_{20}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (70)$$

Pro proud do 600 A je pro napětí U_2 normalizován empirický vztah

$$U_2 = 20 + 0,04I_2 \quad (\text{V; A})$$

Velikost odporu R_2 se při počátečních výpočtech zpravidla odhaduje, u větších transformátorů a pro přibližné výpočty ji lze zanedbat. Potom platí vztah

$$U_{20}^2 = U_2^2 + X^2 I_2^2 \quad (71)$$

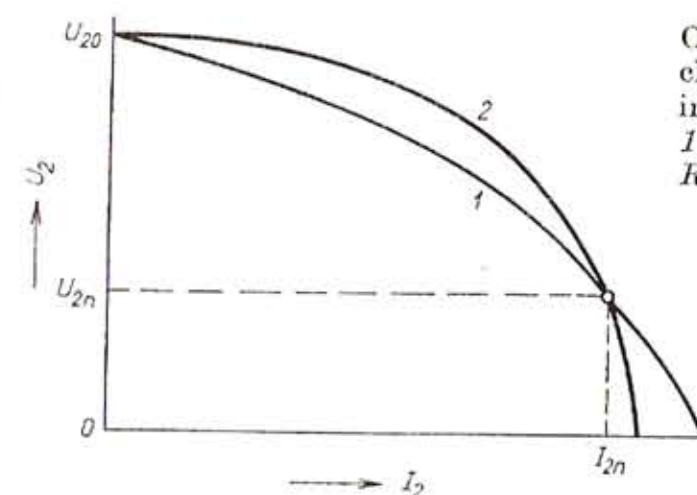
což je rovnice elipsy, jejíž osy jsou totožné s osami napětí a proudu. Potřebná reaktance je

$$X = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_2^2}}{I_2} \quad (72)$$

a trvalý proud nakrátko je

$$I_{2k} = \frac{U_{20}}{X} \quad (73)$$

Na obrázku 92 je porovnání průběhu statických charakteristik podle rovnice (68) (křivka 1) a podle rovnice (71) (křivka 2) pro stejnou velikost napětí naprázdno U_{20} a pro stejný pracovní bod daný napětím U_{2n} a proudem I_{2n} .



Obr. 92. Průběh statických charakteristik transformátoru s lineární indukčností
1 odpor vinutí $R > 0$, 2 odpor vinutí $R = 0$

Rovnici (71) lze pomocí rovnice (73) vyjádřit ve tvaru

$$\left(\frac{U_2}{U_{20}}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{I_{2k}}\right)^2 = 1 \quad (74)$$

Vynásíme-li v souřadnicovém systému přímo poměrné hodnoty

$$\frac{U_2}{U_{20}} \text{ a } \frac{I_2}{I_{2k}}$$

vznikne pro kladné hodnoty veličin čtvrtkruh s jednotkovým poloměrem (obr. 93a). Vliv odporu R vinutí transformátoru je možné znázornit graficky sestavením přímky spojující průsečík souřadnicových os a koncový bod vektoru poměrného úbytku napětí RI_{2n}/U_{20} způsobeného odporem R při proudu I_{2n} (obr. 93b). Poměrné pracovní napětí je pak na obrázku znázorněno vektorem mezi přímkou a kružnicí.

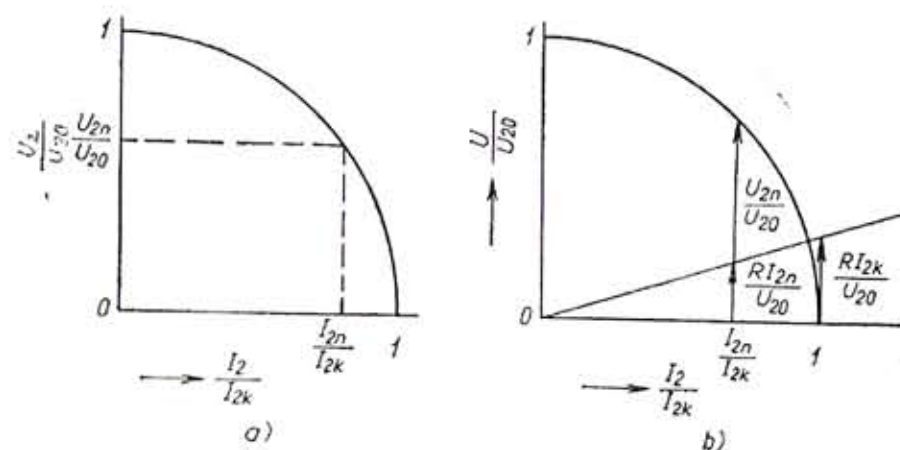
Je třeba znovu připomenout, že uvedené rovnice a křivky průběhu statických charakteristik platí pro lineární obvod, tzn. pro obvod, kde se reaktance nemění s velikostí výstupního napětí U_2 . Ve skutečnosti se u některých konstrukcí při zmenšování napětí U_2 zvětšuje sycení železa, zmenšuje se reaktance a statické charakteristiky mají průběh odlišný od elipsy. Zcela jiný průběh statických charakteristik mají transformátory s transduktory, kde záleží na tvaru magnetizačních křivek použitého železa a popř. i na způsobu regulace řídicího proudu transduktoru.

Z fázorového diagramu na obr. 91a, který platí za předpokladu zanedbání magnetizačního proudu a ztrát v železe, je možné odvodit přibližný vztah pro účinník transformátoru. Pro účinník transformátoru platí podle diagramu

$$\cos \varphi = \frac{U_0 + RI_2}{U_{20}}$$

Účinnost transformátoru (bez ztrát naprázdno) je

$$\eta = \frac{U_0}{U_0 + RI_2}$$



Obr. 93. Konstrukce statických charakteristik transformátoru pomocí poměrných hodnot

Spojením posledních dvou rovnic dostaneme

$$\eta \cos \varphi = \frac{U_0}{U_{20}} \quad (75)$$

Při zanedbání ztrát (účinnost transformátorů bývá velká) lze napsat přibližný vztah pro rychlé a přibližné určení velikosti účinníku transformátoru při různých režimech práce

$$\cos \varphi \approx \frac{U_0}{U_{20}}$$

b) *Dynamické charakteristiky transformátoru.* Dynamické charakteristiky se nejčastěji znázorňují jako průběh proudu a napětí při zkratu z chodu naprázdno a ze zatížení rezistorem.

Obvod pro zjištění průběhu zkratového proudu je na obr. 94. Odpor R představuje součet odporů vinutí transformátoru přepočtených na výstupní vinutí, indukčnost L odpovídá celkové rozptylové reaktanci transformátoru (popř. včetně reaktance tlumivky) po přepočtení na výstupní vinutí.

Vycházíme z diferenciální rovnice

$$L \frac{di_{2k}}{dt} + Ri_{2k} = u_{20} \quad (76)$$

kde $u_{20} = U_{2m} \sin(\omega t + \psi)$ je výstupní napětí naprázdno,

i_{2k} zkratový proud ve výstupním vinutí,

t čas

$\omega = 2\pi f$ úhlový kmitočet napětí napájecí sítě,

U_{2m} vrcholová hodnota výstupního napětí naprázdno,

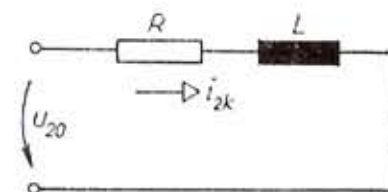
ψ úhel určující velikost napětí naprázdno v okamžiku začátku zkratu.

Řešením rovnice (76) získáme obecný vztah pro průběh zkratového proudu

$$i_{2k} = K \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) + \frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (77)$$

kde $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$,

K je konstanta závislá na počátečních podmínkách.



Obr. 94. Náhradní obvod transformátoru pro výpočet průběhu zkratového proudu

Zkrat z chodu naprázdno. Počáteční podmínka pro zkrat z chodu naprázdno je $t = 0$, $i_{2k} = 0$. Dosazením počáteční podmínky do rovnice (77) se vypočítá integrační konstanta K .

$$K = -\frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\psi - \varphi)$$

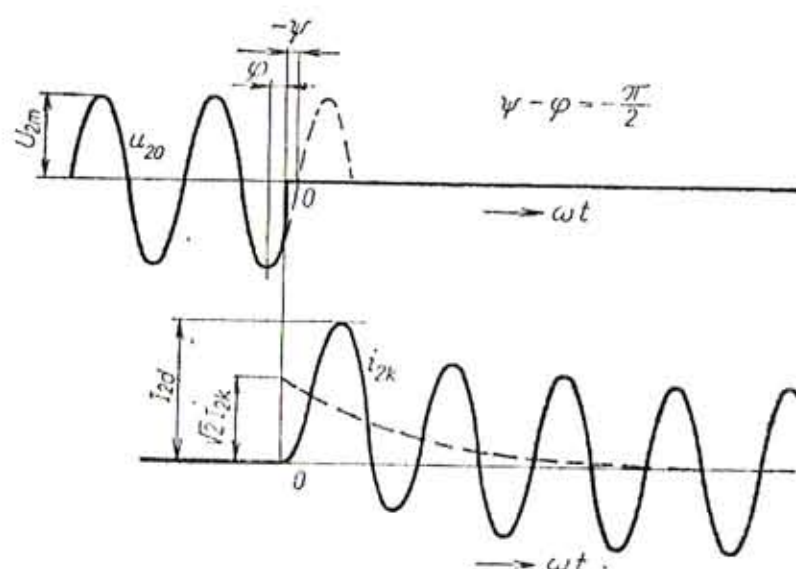
Dosazením za K do rovnice (77) a úpravou dostaneme výraz pro časový průběh zkratového proudu v závislosti na R , L , U_{2m} a na okamžiku začátku zkratu, vyjádřeném úhlem ψ .

$$i_{2k} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \right] \quad (78)$$

Pro zjištění závislosti průběhu zkratového proudu na okamžiku začátku zkratu stačí uvažovat dva extrémní případy, a to maximální a minimální náraz zkratového proudu.

Největší náraz zkratového proudu nastane, je-li $\psi - \varphi = \frac{\pi}{2} + k\pi$, kde $k = 0, \pm 1, \pm 2$ atd. Potom

$$i_{2k} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) \mp \exp \left(-\frac{R}{L} t \right) \right] \quad (79)$$



Obr. 95. Průběh zkratového proudu transformátoru při zkratu v okamžiku odpovídajícím největšímu nárazu zkratového proudu

Zkratový proud dosáhne maxima za 0,01 s po začátku zkratu. Pro $\psi - \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ se amplituda prvního kyvu dynamického (nárazového) zkratového proudu I_{2d} vypočítá ze vztahu

$$\begin{aligned} I_{2d} &= \mp \frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[1 + \exp \left(-\frac{R}{L} 0,01 \right) \right] = \\ &= \mp I_{2k} \sqrt{2} \left[1 + \exp \left(-\frac{R}{L} 0,01 \right) \right] \end{aligned} \quad (80)$$

kde $I_{2k} = \frac{U_{20}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ je efektivní hodnota trvalého zkratového proudu, který obvodem prochází po doznění přechodného jevu. Průběh zkratového proudu je graficky znázorněn na obr. 95.

Nejmenší náraz zkratového proudu vznikne při $\psi - \varphi = 0 + k\pi$. Potom

$$i_{2k} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \omega t$$

a zkratový proud neobsahuje žádnou přechodnou složku (obr. 96). Při $R \ll \omega L$ vznikne největší náraz zkratového proudu při zkratu přibližně v okamžiku průchodu napětí nulovou hodnotou, nejmenší náraz vznikne při zkratu v maximum napětí.

U některých svařovacích transformátorů může při zkratu nastat nasycení železa. Indukčnost L obvodu není konstantní, zkratový proud obsahuje vyšší harmonické a nárazový zkratový proud má větší hodnotu, než je uvedeno.

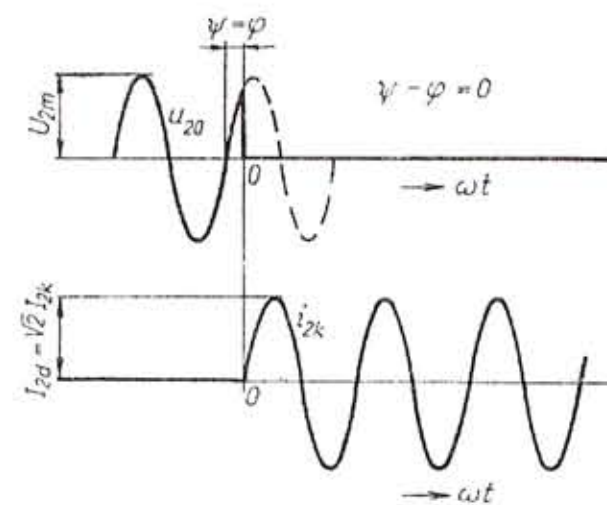
Zkrat ze zatížení odporem. Podobným způsobem jako v minulém odstavci dostaneme tento výraz pro průběh zkratového proudu:

$$\begin{aligned} i_{2k} &= \frac{U_{2m}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin (\omega t + \psi - \varphi) - \sin (\psi - \varphi) \exp \left(-\frac{R}{L} t \right) \right] + \\ &+ \frac{U_{2m}}{\sqrt{(R + R_z)^2 + \omega^2 L^2}} \sin (\psi - \alpha) \exp \left(-\frac{R}{L} t \right) \end{aligned} \quad (81)$$

kde $\alpha = \arctg \frac{\omega L}{R + R_z}$,

R_z je odpor zatěžovacího rezistoru připojeného na výstupní vinutí transformátoru před zkratem.

Ostatní označení je stejné jako v předcházejícím odstavci.



Obr. 96. Průběh zkratového proudu transformátoru při zkratu v okamžiku odpovídajícím nejmenšímu nárazu zkratového proudu

Z rozboru rovnice (81) vyplývá, že poměr nárazového zkratového proudu k velikosti proudu před zkratem (uvažujeme-li nejnepříznivější okamžik začátku zkratu) je tím menší, čím je menší poměr U_2/U_{20} , tj. poměr napětí na zátěži před zkratem k napětí transformátoru naprázdno. Protože velikost nárazového zkratového proudu má vliv na rozstřík kovu při svařování, plyne z tohoto poznatku požadavek volby co nejvyššího napětí naprázdno.

c) Připojení nezatíženého transformátoru na síť. Jde o připojení transformátoru, jehož výstupní vinutí je otevřeno, na napájecí síť se střídavým napětím

$$u_1 = U_{1m} \sin (\omega t + \psi) \quad (82)$$

kde úhel ψ udává velikost napětí u_1 v okamžiku připojení transformátoru.

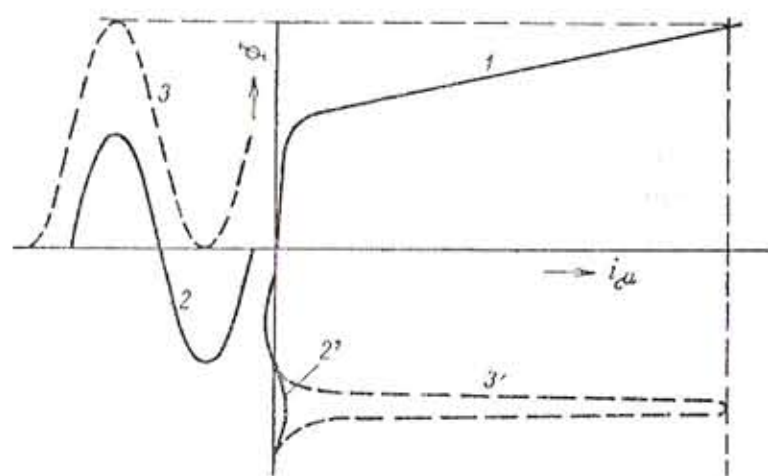
Zanedbáme-li odpor vstupního vinutí, platí

$$u_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (83)$$

kde Φ je celkový magnetický tok vstupního vinutí včetně rozptylu. Spojením (82) a (83) a integrací dostaneme

$$\Phi = \frac{U_{1m}}{\omega N_1} [\cos \psi - \cos (\omega t + \psi)] + \Phi_0 \quad (84)$$

kde Φ_0 je zbytkový tok jádra v čase $t = 0$.



Obr. 97. Grafické znázornění poměrů při připojení transformátoru naprázdno

Pro $\omega t = \pi$ a $\psi = 0$ (průchod napětí sítě nulou) dosáhne magnetický tok nejvyšší hodnoty

$$\Phi_{\max} = \Phi_0 + \frac{2U_{1m}}{\omega N_1} \quad (85)$$

Z rovnice (85) je patrné, že amplituda magnetického toku může při připojení transformátoru naprázdno přesáhnout dvojnásobek amplitudy toku v ustáleném stavu.

Připojení transformátoru naprázdno je graficky znázorněno na obr. 97. Křivka 1 je magnetizační křivka železa jádra, křivky 2 a 2' představují magnetický tok a magnetizační proud při ustáleném chodu transformátoru naprázdno, křivky 3 a 3' jsou průběhy toku a magnetizačního proudu při připojení transformátoru v okamžiku, kdy střídavé napětí sítě mění polaritu (má nulovou hodnotu), a za předpokladu, že v jádru transformátoru nebyl v okamžiku připojení žádný zbytkový tok.

Náraz magnetizačního proudu při připojení transformátoru naprázdno může dosáhnout několikanásobku jmenovitého proudu transformátoru. Na tuto skutečnost je třeba pamatovat při volbě jističů síťového přívodu; ve většině případů je nutné volit jističí členy s pomalou charakteristikou.

5.4. PROUD TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO

Proud naprázdno I_{10} se skládá ze dvou složek, a to z magnetizačního proudu $I_{1\mu}$ (jalové složky) a z proudu I_{1z} (činné složky), způsobeného ztrátami v železe. Obě složky se vektorově sčítají, takže platí

$$I_{10} = \sqrt{I_{1\mu}^2 + I_{1z}^2} \quad (86)$$

a) *Jalová složka proudu naprázdno.* Magnetizační proud $I_{1\mu}$ lze vypočítat dvěma způsoby: pomocí magnetizační křivky a pomocí měrného jalového výkonu.

Při výpočtu pomocí magnetizační křivky přečteme z magnetizační křivky použitých elektrotechnických plechů potřebnou intenzitu magnetického pole H_m příslušející magnetické indukci B_m předem zjištěné ze vztahu

$$B_m = \frac{U_1}{4,44fN_1S_z}$$

Je-li magnetizační proud sinusový, je jeho efektivní hodnota

$$I_1 = \frac{\Sigma H_m l_z}{\sqrt{2} N_1} \quad (87)$$

kde $\Sigma H_m l_z$ je potřebné magnetomotorické napětí na celou délku železa jádra, N_1 počet závitů vstupního vinutí.

Při větších magnetických indukcích se křivka časového průběhu magnetizačního proudu liší od sinusovky a poměr maximální hodnoty k efektivní hodnotě (činitel výkyvu) je větší než $\sqrt{2}$.

Obecně je tedy efektivní hodnota magnetizačního proudu

$$I_{1\mu} = \frac{H_m l_z}{k_v N_1} \quad (88)$$

kde k_v je činitel výkyvu, jehož hodnoty (podle Richtera) ukazuje tab. 10. Hodnoty k_v podle tab. 10 je třeba brát orientačně, protože skutečná hodnota činitele k_v závisí na průběhu magnetizační křivky a může se pro různé druhy plechů značně různit.

Tab. 10. Činitel výkyvu k_v pro různé magnetické indukce B_m

B_m (T)	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
k_v	1,55	1,62	1,72	2,00	2,20	2,35	2,45

Při druhém způsobu výpočtu magnetizačního proudu se používají tabulky nebo křivky měrného jalového výkonu (jalového výkonu na jednotku hmotnosti železa). Měrný jalový výkon se udává v závislosti na velikosti magnetické indukce zpravidla ve var/kg.

Protože veličiny H_m i k_v jsou funkcí indukce B_m , je měrný jalový výkon q jen funkcí indukce B a lze jej graficky nebo v tabulkách vyjádřit v závislosti na indukci B_m . Z měrného jalového výkonu se pak vypočítá magnetizační proud podle vztahu

$$I_{1\mu} = \frac{\Sigma G_z q}{U_1} \quad (89)$$

kde G_z je hmotnost železa části jádra s konstantní indukci B ,

q měrný jalový výkon odpovídající indukci pro použitý druh plechů,

U_1 efektivní hodnota vstupního napětí.

b) *Činná složka proudu naprázdno a ztráty v železe.* Činná složka proudu naprázdno je způsobena hysterezními a vířivými ztrátami v železe a Joulovými ztrátami vznikajícími průchodem proudu naprázdno vstupním vinutím. Poslední část ztrát naprázdno bývá v porovnání se ztrátami v železe velmi malá a je možné ji zanedbat.

Při praktických výpočtech se nerozlišují hysterezní a vířivé ztráty v železe, ale používají se tzv. měrné ztráty plechů, které udává výrobce plechů a stanoví je měřením. Měrné ztráty se udávají ztrátou ve wattech na 1 kg plechu při kmitočtu $f = 50$ Hz a při dané maximální indukci B_m . Pro indukci $B_m = 1$ T se měrné ztráty označují $\Delta p_{1,0}$, pro indukci 1,5 T se označují $\Delta p_{1,5}$.

Skutečné ztráty jsou větší než ztráty odpovídající měrným ztrátám, protože ve stahovací konstrukci a jiných kovových částech v blízkosti magnetického obvodu vznikají přídavné ztráty. Přídavné ztráty je možné respektovat násobením měrných ztrát součinitelem 1,2.

Při použití plechů s měrnými ztrátami $\Delta p_{1,0}$ jsou celkové ztráty v železe při kmitočtu $f = 50$ Hz za předpokladu stejné magnetické indukce B_m (maximální hodnota) v celém magnetickém obvodu

$$P_z = 1,2 G_z \Delta p_{1,0} B_m^2 \quad (90)$$

Při použití plechů s měrnými ztrátami $\Delta p_{1,5}$ jsou ztráty

$$P_z = 1,2 G_z \Delta p_{1,5} \left(\frac{B_m}{1,5} \right)^2 \quad (91)$$

V případě, že různé části magnetického obvodu mají různou magnetickou indukci, je třeba spočítat ztráty v každé části magnetického obvodu zvlášť a pak je sečíst.

Je-li třeba zjistit ztráty při jiném kmitočtu napájecí sítě než 50 Hz, je možné v rozmezí průmyslových kmitočtů použít empirický

vzorec

$$P_z = 1,2 G_z \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \Delta p_{1,0} B_m^2 \quad (92)$$

kde f je kmitočet napájecí sítě.

Činnou složku proudu naprázdno, způsobenou ztrátami v železe, vypočítáme pro jednofázový transformátor ze vzorce

$$I_{1z} = \frac{P_z}{U_1} \quad (93)$$

Pokud se nezanedbá ztráta v mědi naprázdno, vypočítá se pro jednofázový transformátor ze vztahu

$$P_{0Cu} = R_1 I_{10}^2 \quad (94)$$

kde R_1 je odpor vstupního vinutí.

Ztráty naprázdno transformátoru jsou tedy

$$P_0 = P_z + P_{0Cu} \quad (95)$$

5.5. ZTRÁTY A ÚČINNOST TRANSFORMÁTORU

Celkové ztráty v zatíženém transformátoru se skládají ze ztrát v železe P_z , ztráta ve vstupním vinutí P_{1Cu} a ztrát ve výstupním vinutí P_{2Cu} . U svařovacích transformátorů ještě vznikají další ztráty (podle principu řídicího zařízení), např. u transformátoru s tlumivkou ztráty v železe a mědi tlumivky, u transduktoru ztráty v železe a v pracovním a řídicím vinutí transduktoru, u transformátoru s magnetickým bočnickem ztráty v železe magnetického bočnicku atd. Zásady pro výpočet jsou stejné jako při výpočtu ztrát v transformátoru, takže není třeba každý princip svařovacího transformátoru zvlášť rozebírat. Potíže činí zejména určení velikosti a směru magnetického toku, a to zvlášť u rozptylových transformátorů.

Ztráty v železe se mohou počítat způsobem uvedeným v čl. 5.4b, po vypočítání velikosti magnetické indukce ve všech částech magnetického obvodu svařovacího transformátoru.

Pro určení ztrát ve vinutí je nejdříve nutné určit odpor vstupního a výstupního vinutí. Odpor, který klade vodič vstupního vinutí stejnosměrnému proudu, je

$$R_1 = \rho_1 \frac{N_1 l_1}{S_1} \quad (96)$$

kde ρ_1 je rezistivita vodiče při předpokládané pracovní teplotě,

N_1 počet závitů vstupního vinutí,

l_1 střední délka závitu vstupního vinutí,

S_1 průřez vodiče vstupního vinutí.

Podobně pro výstupní vinutí platí

$$R_2 = \varrho_2 \frac{N_2 l_2}{S_2} \quad (97)$$

Potom by byla ztráta ve vstupním vinutí

$$P_{1Cu} = R_1 I_1^2 \quad (98)$$

kde I_1 je efektivní hodnota vstupního proudu.

Ztráta výstupním vinutím by byla

$$P_{2Cu} = R_2 I_2^2 \quad (99)$$

kde I_2 je efektivní hodnota výstupního proudu.

Ve skutečnosti kladou vodiče s většími průřezy větší odpor střídavému proudu než stejnosměrnému proudu, a to vlivem nerovnoměrného rozložení proudu po průřezu vodiče. Nerovnoměrné rozložení proudu po průřezu vzniká při střídavém proudu vytlačováním proudových vláken střídavým magnetickým polem od proudu vlastního vodiče i sousedních vodičů.

Rozdělení rozptylového magnetického pole ve vinutí bývá podobné jako u vodičů uložených v drážkách elektrických točivých strojů. Proto lze pro výpočet použít vzorce, které se používají pro výpočet přídavných ztrát ve vinutí uloženém v drážkách. Činitel zvětšení odporu (činitel přídavných ztrát) je nutné určit pro každé vinutí zvlášť, protože každé vinutí má jiný průřez vodiče a může mít i jiné uspořádání vzhledem ke směru rozptylového magnetického toku.

Jestliže je na obr. 98 uloženo v železe m vodičů vedle sebe a n vodičů nad sebou, potom při vyznačeném směru střídavého magnetického toku je činitel zvětšení odporu pro celé vinutí

$$k_p = \varphi(\xi) + \frac{n^2 - 1}{3} \psi(\xi) \quad (100)$$

kde ξ je redukovaná výška vodiče, která se určí ze vztahu

$$\xi = 2\pi h \sqrt{\frac{mbf}{l_r \varrho \cdot 10^7}} \quad (101)$$

kde f je kmitočet,

ϱ rezistivita vodiče (ostatní označení podle obr. 98),

l_r u transformátoru délka střední silové čáry rozptylového magnetického toku (o jejím určení bude pojednáno dále).

Uvažujeme-li pro zjednodušení vzorce u měděného vinutí rezistivitu $2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ (odpovídá přibližně mědi při teplotě $75^\circ C$) a $4\pi^2 \doteq 40$, zjednoduší se vzorec (101) na

$$\xi = 100h \sqrt{\frac{mb}{l_r} \frac{f}{50}} \quad (102)$$

Pro hliníkové vinutí bude

$$\xi_{Al} = 76h_{Al} \sqrt{\frac{mb_{Al}}{l_r} \frac{f}{50}} \quad (103)$$

Funkce

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi}$$

jsou graficky znázorněny na obr. 99.

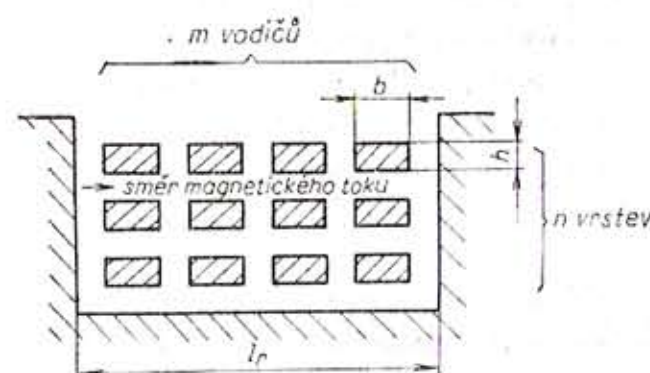
Rozvinutím funkcí $\varphi(\xi)$ a $\psi(\xi)$ do řad a zanedbáním vyšších členů se pro $0 < \xi < 1$ zjednoduší výrazy na

$$\varphi(\xi) = 1 + \frac{4}{45} \xi^4$$

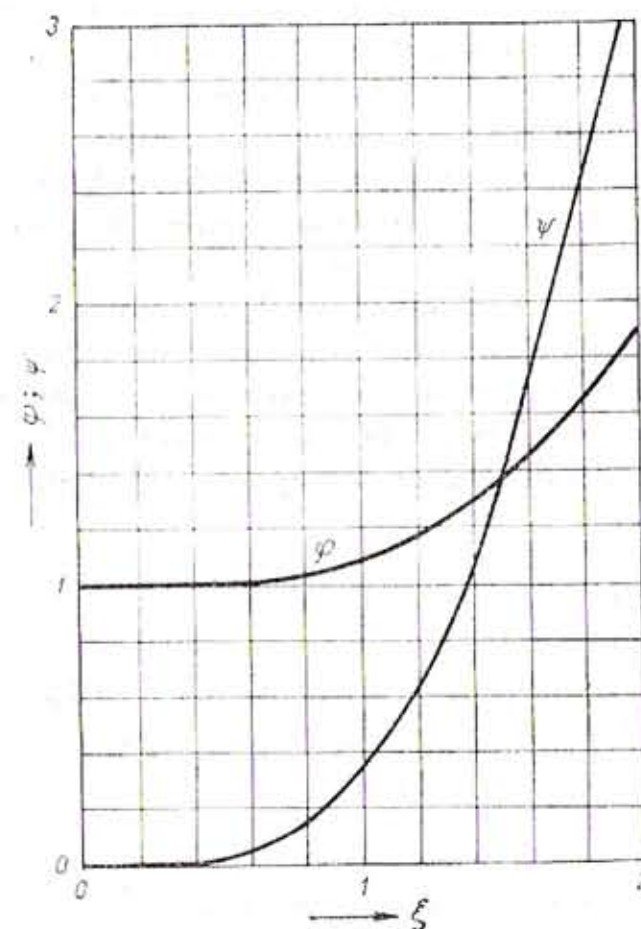
$$\psi(\xi) = \frac{1}{3} \xi^4$$

a s tímto zjednodušením je činitel zvětšení odporu (přídavných ztrát)

$$k_p = 1 + \frac{n^2 - 0,2}{9} \xi^4 \quad (104)$$



Obr. 98. Uspořádání vinutí vzhledem ke směru magnetického toku pro výpočet přídavných ztrát



Obr. 99. Grafické znázornění průběhu funkcí φ a ψ

S respektováním přídavných ztrát potom rovnice (98) a (99) přejdou do tvarů

$$P_{1Cu} = k_{p1} R_1 I_1^2 \quad (105)$$

$$P_{2Cu} = k_{p2} R_2 I_2^2 \quad (106)$$

kde k_{p1} a k_{p2} jsou činitele přídavných ztrát vstupního a výstupního vinutí.

Účinnost transformátoru pak je

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_z + P_{1Cu} + P_{2Cu}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (107)$$

kde P_2 je činný výkon odebíraný z výstupního vinutí,

P_1 činný příkon přiváděný do vstupního vinutí (odebíraný ze sítě).

Zmenšení přídavných ztrát lze dosáhnout rozdělením vodiče do několika paralelních vodičů. Musí se přitom zajistit takové vystřídání vodičů, aby každý z paralelních vodičů postupně prošel všemi polohami. Cílem vystřídání vodičů je zajistit rovnoměrné rozdělení proudu mezi všechny paralelní vodiče.

Aplikace rovnic (100) a (101) pro výpočet přídavných ztrát ve vinutí svařovacích transformátorů je podmíněna určením směru rozptylového magnetického toku vzhledem k vinutí (určením, který rozměr vodiče se označí písmenem b a který písmenem h) a určením délky střední silové čáry l_r rozptylového magnetického toku.

U transformátorů se soustřednými vinutími (běžné transformátory s malou rozptylovou reaktancí) mají silové čáry rozptylového magnetického toku ve vinutí směr rovnoběžný s osou vinutí a délku l_r je možné nahradit výškou vinutí, popř. přesněji součtem výšky vinutí a dvojnásobku tloušťky jednoho z vinutí.

U rozptylových svařovacích transformátorů jsou rozptylová pole složitější, směr rozptylového toku a délku l_r je nutné určovat pro každý princip ovládání svařovacího proudu zvlášť. Protože tato záležitost souvisí s velikostí rozptylové reaktance, bude jí věnována pozornost v kapitole pojednávající o výpočtu rozptylových reaktancí (poznámky v čl. 5.8).

5.6. OTEPLENÍ

Při odvádění tepla daného ztrátami P_z chlazením stěny s povrchem S je oteplení $\Delta\theta$ stěny v ustáleném stavu dáno obecně vztahem

$$\Delta\theta = \frac{P_z}{\alpha S} \quad (108)$$

kde α je součinitel přestupu tepla ($W/K \cdot m^2$).

Převod tepla z teplého předmětu do okolí se děje sáláním, vedením a prouděním.

Svařovací transformátory se téměř výhradně chladí vzduchem, jenž je špatným tepelným vodičem, takže převod tepla vedením je zanedbatelný.

Součinitel přestupu tepla sáláním α_s pro oteplení 10 až 100 K lze přibližně určit z číselného vztahu

$$\alpha_s = 1,7 + 0,01\Delta\theta \quad \text{pro} \quad c_s = 0,3$$

$$\alpha_s = 4,8 + 0,03\Delta\theta \quad \text{pro} \quad c_s = 0,85$$

kde c_s je relativní sálání, které se v elektrických strojích pohybuje od 0,3 do 0,85. Většina povrchů v transformátorech má c_s blízké vyšší hodnotě, tj. 0,85 (pro absolutně černé těleso je $c_s = 1$).

Je-li teplé těleso umístěno v klidném vzduchu (tzv. přirozené chlazení vzduchem — bez nuceného pohybu vzduchu např. pomocí ventilátoru), vzniká přirozeným vztlakem podél ohříváných stěn proudění vzduchu směrem vzhůru. Pro součinitel přestupu tepla tímto prouděním (včetně přestupu vedením, protože obě složky nelze zvlášť měřit) při oteplení 10 až 100 K platí číselný vztah

$$\alpha_{vp} = 6,5 + 0,05\Delta\theta$$

Pro povrch, z něhož se může teplo odvádět sáláním i prouděním, se oba součinitele přestupu tepla mohou sečíst, takže výsledný součinitel přestupu tepla pro relativní sálání $c_s = 0,85$ je

$$\alpha = 11,3 + 0,08\Delta\theta$$

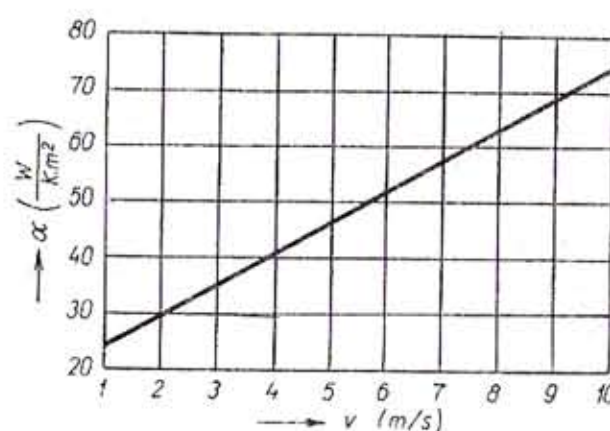
Pro praxi se v [45] uvádí při střední hodnotě oteplení asi 50 K součinitel přestupu tepla $\alpha = 14 W/K \cdot m^2$ pro plochy chlazené sáláním i prouděním a $\alpha = 8 W/K \cdot m^2$ pro plochy chlazené jen prouděním. V chladicích kanálech mezi vinutími nebo mezi vinutím a jádrem je povrch chlazen jen prouděním, přičemž se může počítat jen s plochou, která není zakryta klíny nebo izolačními vložkami. Pokud je kanál užší než 8 mm, uvažuje se u přirozeného vzduchového chlazení, že nechladí vůbec. U kanálu šířky 8 mm až 16 mm se uvažuje, jako by chladil jen jednou stěnou (tj. polovinou celého vnitřního povrchu kanálu). V kanálu šířky nad 16 mm se uvažuje chlazení obou stěn.

Odvod tepla se zlepší tzv. nuceným vzduchovým chlazením, při kterém se ventilátorem vytvoří proud vzduchu kolem částí ohříváných ztrátovým teplem. Empirické hodnoty součinitele přestupu tepla v závislosti na rychlosti chladicího vzduchu, které uvádí [45] podle Rotha, jsou v grafu na obr. 100. Údaje zjištěné z tohoto grafu lze použít pouze k předběžným výpočtům, protože rychlost vzduchu v různých místech transformátoru můžeme při návrhu pouze přibližně odhadovat. Výpočet můžeme zpřesnit, známe-li příslušné hodnoty z měření na transformátoru podobného provedení.

Potřebné množství chladicího vzduchu Q_v se určí z celkových ztrát v transformátoru P_z a dovoleného oteplení vzduchu $\Delta\vartheta_v$ (volí se obvykle 10 až 20 K).

$$Q_v = \frac{P_z}{1200\Delta\vartheta_v} \quad (\text{m}^3/\text{s}; \text{W}, \text{K})$$

Dostatečné množství vzduchu není samo o sobě zárukou dostatečného chlazení. Mnohdy lze obtížně dosáhnout toho, aby vzduch proudil jen těsně kolem částí, které je třeba chladit, a aby na těchto částech setrval po dobu potřebnou k převzetí tepla.



Obr. 100. Závislost součinitele přestupu tepla α na rychlosti chladicího vzduchu v

Odvod tepla sáláním lze poněkud zlepšit nastříkáním povrchu chráněných částí černým lakem. Dodatečná izolace cívek podstatně zhoršuje chlazení, protože vzduchová vrstvička mezi povrchem cívky a izolací brání přestupu tepla.

5.7. VOLBA PRŮŘEZU JÁDRA

Zanedbáme-li malý úbytek napětí na vstupním vinutí vlivem jeho rozptylové reaktance a odporu při chodu transformátoru naprázdno, platí vztah

$$U_1 = 4,44fB_mN_1S_z$$

kde U_1 je efektivní hodnota vstupního napětí (V),

f kmitočet vstupního napětí (sítě) (Hz),

B_m maximální hodnota (amplituda) magnetické indukce v jádru (T),

N_1 počet závitů vstupního vinutí,

S_z průřez železa (m²).

Při zadání transformátoru je dáno vstupní napětí a kmitočet; velikost magnetické indukce se volí podle použitých plechů jádra. Zbývá

určit počet závitů a průřez železa. Obvykle se volí průřez železa a pro tento průřez se určí počet závitů.

U distribučních transformátorů jsou normou předepsány ztráty v železe P_z a ztráty v mědi P_{Cu} . Je-li dán poměr ztrát v železe ke ztrátám v mědi, je možné podle [46] určit průřez železa S_z (cm²) ze vzorce

$$S_z = 500C \sqrt{\frac{S_1 P_z J}{P_{Cu} \Delta p_{1,0} B_m^3 f}} \quad (109a)$$

kde $S_1 = U_1 I_1 \cdot 10^{-3}$ je jmenovitý zdánlivý příkon transformátoru (při výpočtu se uvažuje obvykle transformátor bez ztrát a bez magnetizačního proudu),
 J střední hodnota hustot proudů vstupního a výstupního vinutí (A/mm²),
 $\Delta p_{1,0}$ měrné ztráty plechů jádra (W/kg),
 B_m amplituda magnetické indukce jádra (T),
 f kmitočet (Hz),
 C činitel tvaru cívky.

Velikost činitele C se volí u jednofázových jádrových transformátorů pro kulaté cívky $C = 0,50$, pro obdélníkové cívky $C = 0,65$ a u jednofázových plášťových transformátorů $C = 0,9$.

Vztah (109a) je vhodný pro výpočet průřezu železa transformátoru s malým rozptylem, určeného pro spojení s proměnnou tlumivkou.

Při návrhu rozptylového svařovacího transformátoru lze průřez železa předběžně určit ze zjednodušených vztahů:

Pro jádrové typy

$$S_z = 20 \sqrt{S_1} \quad (\text{cm}^2; \text{kV} \cdot \text{A}) \quad (109b)$$

Pro plášťové typy

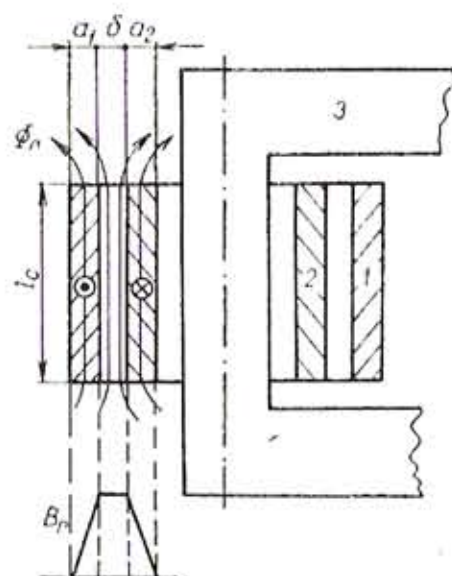
$$S_z = 25 \sqrt{S_1} \quad (\text{cm}^2; \text{kV} \cdot \text{A}) \quad (109c)$$

Hlavní rozměry rozptylového svařovacího transformátoru značně závisí na požadovaném rozsahu nastavení svařovacího proudu. Může se stát (především u transformátorů s magnetickým bočníkem), že pro předběžně určený průřez železa a z toho vyplývající počet závitů má transformátor příliš velké rozptylové reaktance, takže je nutné průřez železa zvětšit. Při návrhu transformátoru, jehož vstupní a výstupní vinutí je na různých sloupcích jádra (bez magnetického bočníku), a transformátoru s posuvnými cívkami bývá naopak nutné volit průřez železa přibližně o 10 % menší než vypočítaný. Menší průřez železa se volí u transformátorů, u nichž lze rozptylovou reaktanci upravit jiným způsobem, jestliže se požaduje co nejmenší hmotnost a nemus

se brát ohled na cenu aktivních materiálů. Volbu hlavních rozměrů svařovacího transformátoru značně usnadní porovnání s jinými transformátory s podobným principem ovládání svařovacího proudu.

5.8. VÝPOČET ROZPTYLOVÝCH REAKTANCÍ

U svařovacích transformátorů s různými principy ovládání proudu je metodika výpočtu rozptylové reaktance odlišná. Proto dále věnujeme pozornost jednotlivým principům ovládání proudu odděleně. Kromě toho u některých případů ukážeme způsob určení hlavního směru rozptylového magnetického toku, aby bylo možné použít rovnice (100) až (104) k výpočtu přídatných ztrát v jednotlivých vinutích.



Obr. 101. K výpočtu rozptylové reaktance transformátoru s válcovým souosým vinutím

a) Transformátor s válcovým souosým vinutím a s deskovým vinutím. Jde o transformátory s malou rozptylovou reaktancí, které se pro účely obloukového svařování spojují s nastavitelnou tlumivkou nebo s transduktorem.

Uspořádání vstupního a výstupního vinutí transformátoru s válcovým souosým vinutím na sloupku jádra ukazuje obr. 101, kde jsou označeny i některé rozměry důležité pro výpočet. Obě vinutí jsou stejně vysoká, se závity rovnoměrně rozdělenými po celé ploše průřezu vinutí. Výpočet se zjednodušuje tím, že se předpokládá pro celý rozptylový magnetický tok stejná délka střední silové čáry l_r a dále se předpokládá průběh magnetické indukce B_r rozptylového toku podle obr. 101 (indukce lineárně roste od krajů vinutí až k mezeře mezi vinutími, v níž má konstantní velikost).

Rozptylová reaktance X_r (Ω) obou vinutí na jednom sloupku jádra přepočítaná na výstupní vinutí je

$$X_r = 8fN_2^2 \frac{l_z}{l_r} \left(\frac{a_1 + a_2}{3} + \delta \right) \cdot 10^{-6} \quad (110)$$

kde f je kmitočet (Hz),
 N_2 počet závitů výstupního vinutí na sloupku jádra,
 l_z střední délka závitu (střední hodnota pro obě vinutí) (m),
 a_1, a_2 šířka vstupního a výstupního vinutí (m),
 δ mezera mezi vinutími (m),
 l_r délka střední rozptylové silové čáry (m) ($8 \cdot 10^{-6} \text{ H/m} \div 2\pi\mu_0$).

Délka l_r je poněkud větší než výška cívky l_c a závisí na rozměrech vinutí.

$$l_r = \frac{l_c}{k_R} \quad (111)$$

kde k_R je tzv. činitel Rogowskiho a počítá se ze vztahu

$$k_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + \delta}{\pi l_c} \quad (112)$$

kde l_c je výška vinutí (m).

U soustředných jednoduchých vinutí se k_R obvykle málo liší od jedničky, takže je možné jej zanedbat a za l_r do rovnice (110) dosadit přímo výšku vinutí l_c .

Poznámka: Při výpočtu přídatných ztrát ve vinutí podle rovnice (100) a (101) se za l_r dosadí hodnota vypočítaná z rovnice (111), popř. výška vinutí l_c , směr rozptylového magnetického toku je zřejmý z obr. 101. Směrem toku je dána i orientace průřezu vodiče vzhledem k toku, a tím i správné dosazení za b a h do vztahu (101) v souladu se směrem magnetického toku a s označením na obr. 98.

Rozdělením jednoho z vinutí do dvou částí, které obklopují druhé vinutí (obr. 102), lze rozptylovou reaktanci transformátoru zmenšit. Rozptylová reaktance vinutí na jednom sloupku transformátoru je

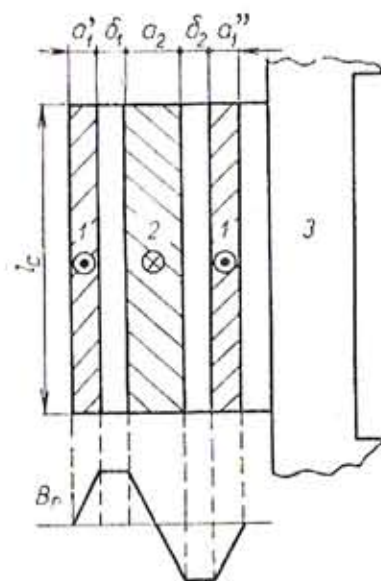
$$X_r = 4fN_2^2 \frac{l_z k_R}{l_c} \left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} + \frac{a'_1 + a''_1 + a_2}{6} \right) \cdot 10^{-6} \quad (113)$$

Střední délka závitu l_z je téměř stejná jako střední délka závitu vnitřního vinutí; zmenšovací činitel Rogowskiho k_R je v tomto případě

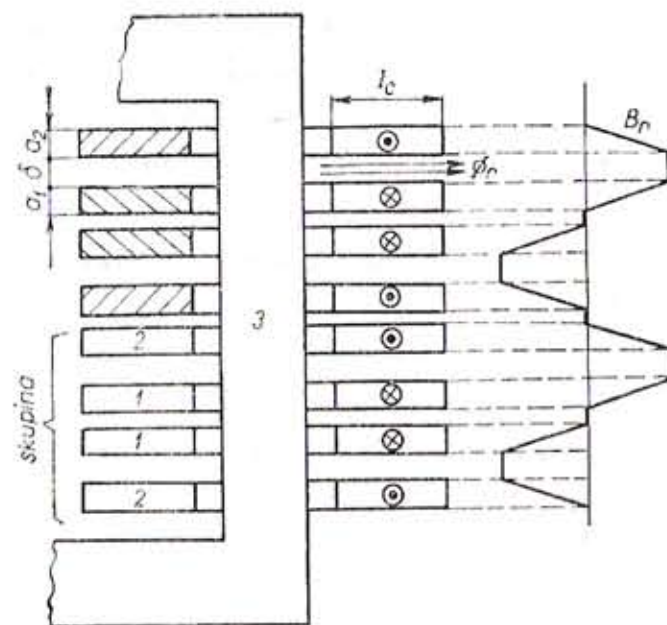
$$k_R = 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2 + a'_1 + a''_1 + a_2}{2\pi l_c} \quad (114)$$

Pokud nejsou délky vstupního a výstupního vinutí stejné, je nutné uvažovat ještě radiální složku rozptylového magnetického toku, jejíž velikost a průběh závisí na geometrickém uspořádání cívek. Vzorci pro výpočet rozptylové reaktance těchto nesouměrných vinutí jsou v [47], [48].

Transformátor s deskovým (kotoučovým) souměrným vinutím má celé vinutí na jednom sloupku jádra rozděleno do n skupin (obr. 103) uspořádaných tak, že na koncích jádra jsou půlcívky náležející téměř vinutí.



Obr. 102. Rozptylové pole u děleného válcového sousého vinutí



Obr. 103. Rozptylové magnetické pole souměrného deskového vinutí

Rozptylová reaktance

$$X_r = 4fN^2 \frac{l_z k_R}{nl_c} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) \cdot 10^{-6} \quad (115)$$

Vliv činitele k_R je zde větší než u sousých válcových vinutí. Činitel je možné přibližně určit ze vztahu

$$k_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + 2\delta}{2\pi l_c} \quad (116)$$

V rovnici (115) je dále

N počet závitů celého vinutí (buď vstupního, nebo výstupního, podle toho, na které vinutí chceme mít hodnotu reaktance vztaženu),
 l_z střední délka závitu cívky,
 n počet skupin (obr. 103),
 l_c šířka cívky (obr. 103).

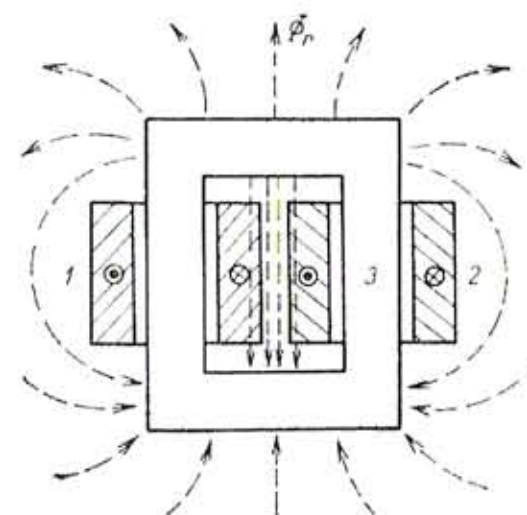
Ostatní označení je podle obr. 103, všechny rozměry jsou v soustavě SI.

Podklady pro výpočet rozptylových reaktancí prostřídávaných nesouměrných deskových (kotoučových) vinutí lze najít v [47], [48].

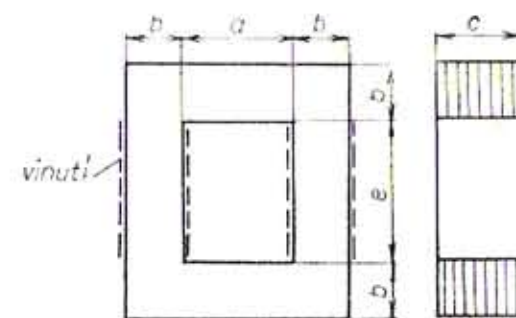
Poznámka: Pro výpočet přídavných ztrát ve vinutí podle rovnice (100) a (101) se l_r určí ze vztahu $l_r = l_c/k_R$, kde se za k_R dosadí ze (116). Směr silových čar rozptylového toku je zřejmý z obr. 103.

b) Transformátor se vstupním a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra. Transformátor je uspořádán podle obr. 104. Jde o jádrový transformátor, který má na jednom sloupku jádra umístěno vstupní vinutí a na druhém sloupku výstupní vinutí.

Zanedbáme-li magnetizační proud, prochází při zatížení transformátoru vstupním vinutím 1 a výstupním vinutím 2 proud ve směrech naznačených na obr. 104, a rozptylový tok Φ_r tedy prochází prostorem v okně jádra transformátoru a prostorem vně transformátoru. Rozptylové magnetické pole je složité a nelze ho přesně vypočítat. Používané metody výpočtu rozptylové reaktance jsou proto založeny na určitých zjednodušujících předpokladech, které přesnost výpočtu zmenšují. Z praxe je známo, že např. při vývoji malých rozptylových svařovacích transformátorů se obvykle nedosáhne shody skutečných hodnot s vypočítanými, takže je nutné upravovat návrh na základě výsledků měření na vzorku transformátoru.



Obr. 104. Uspořádání jádrového rozptylového transformátoru a tvar jeho rozptylového magnetického pole



Obr. 105. K výpočtu rozptylové reaktance transformátoru se vstupním vinutím a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra

Dále uvedený způsob výpočtu rozptylové reaktance podle [45] je zkrácený; jeho odvození je v [49]. Při výpočtu se předpokládá, že vliv prostoru vinutí na rozptyl je malý, vinutí se nahrazuje tenkou vrstvou proudu na povrchu sloupků jádra (obr. 105). Při odvození metody byly nejdříve kresleny rozptylové čáry a vyčíslena magnetická vodivost. Pro vytvoření početního řešení na základě nakresleného průběhu bylo využito poznatku, že hodnoty magnetických vodivostí nezávisí na absolutních rozměrech jádra, ale na poměrech rozměrů; byly sestaveny křivky, jejichž použití značně usnadňuje a urychluje výpočet (obr. 106 až 108).

Při odvození byl celkový rozptylový tok rozdělen na tři části: Tok Φ_{1r} prochází mezi vnitřními plochami jádra, tok Φ_{2r} prochází mezi bočními plochami jádra a tok Φ_{3r} prochází mezi horní a dolní plochou jádra. Tyto tři prostory mají magnetické vodivosti Λ_1 , Λ_2 a Λ_3 , které se zjistí ze vztahů

$$\Lambda_1 = \mu_0 \lambda_1 \quad (117)$$

$$\Lambda_2 = \mu_0 \lambda_2 \left[a + b \left(2 + \pi \frac{m}{b} \right) + c \right] \quad (118)$$

$$\Lambda_3 = \mu_0 \lambda_3 \left[a + b \left(1 + \pi \frac{n}{b} \right) + c \right] \quad (119)$$

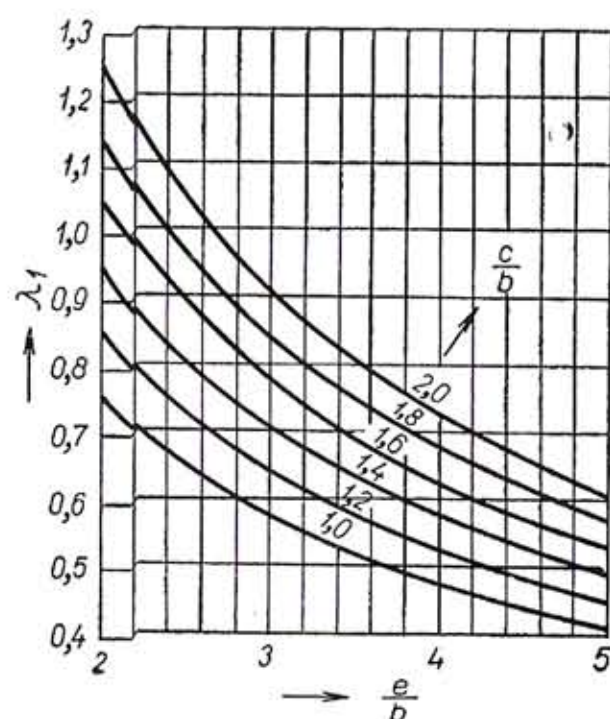
kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m je permeabilita vakua,

a, b, c, e rozměry jádra transformátoru (m) z obr. 105,
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ jednotkové magnetické vodivosti jednotlivých částí prostoru kolem jádra — určí se z obr. 107 a 106,

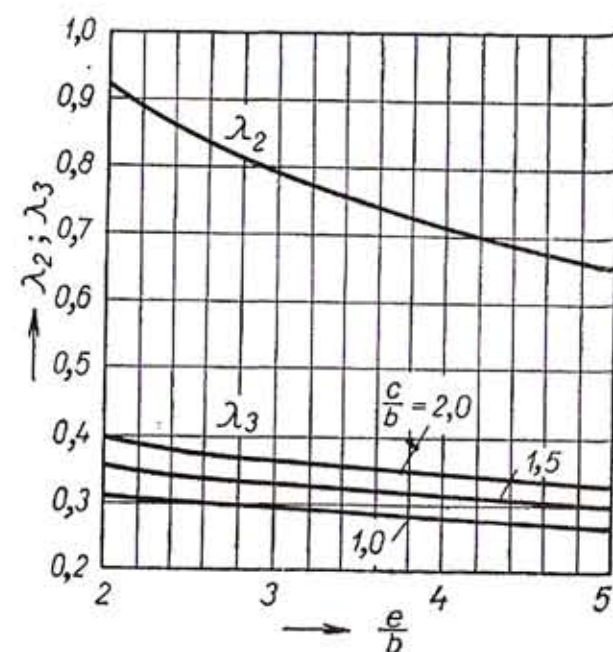
m, n součinitele zavádějící do výpočtu prostory kolem rohů jádra transformátoru (poměry $m/b, n/b$ se zjistí z obr. 108).

Celková rozptylová vodivost transformátoru je

$$\Lambda_r = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 \quad (120)$$



Obr. 106. Jednotková magnetická vodivost pro výpočet rozptylové reaktance



Obr. 107. Jednotková magnetická vodivost pro výpočet rozptylové reaktance

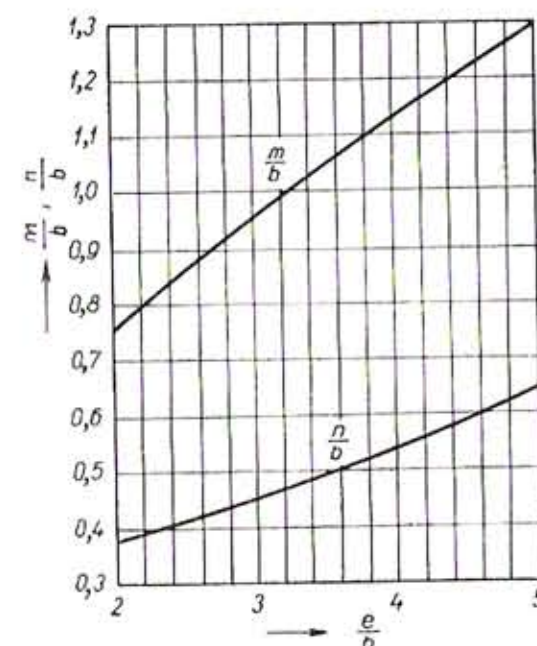
a rozptylová reaktance vztažená na výstupní vinutí je

$$X_r = 2\pi f N_2^2 \Lambda_r \quad (121)$$

kde f je kmitočet sítě,

N_2 počet závitů výstupního vinutí.

Z výpočtu podle rovnic (117) až (119) vycházejí velikosti rozptylové reaktance o 20 až 50 % menší, než jsou skutečné hodnoty, jak bylo zjištěno aplikací výpočtové metody na několik už hotových a proměřených transformátorů různých velikostí.



Obr. 108. Poloměry zakřivení náhradního pole pro výpočet rozptylové reaktance

Lépe se shoduje se skutečností výpočet podle rovnic (122) až (124), které vznikly úpravou a zjednodušením metody fiktivních vinutí [21]. Výpočet je určen pro nejčastěji se vyskytující transformátory s obdélníkovým nebo čtvercovým průřezem jádra. Pro transformátory s odstupňovaným průřezem jádra dává výpočet poněkud větší hodnoty rozptylové reaktance v porovnání se skutečností. Magnetické vodivosti se určí ze vztahů

$$\Lambda_1 = \mu_0 \frac{c}{e} a \quad (122)$$

$$\Lambda_2 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left[1,1 + \ln \left(1 + \frac{2b}{e} \right) \right] \quad (123)$$

$$\Lambda_3 = \mu_0 \lambda'_3 (a + 2b) \quad (124)$$

kde $l_s = 2(a + 2b + c) + 1,1(e + 2b)$,

a, b, c, e jsou rozměry jádra (m) podle obr. 105,

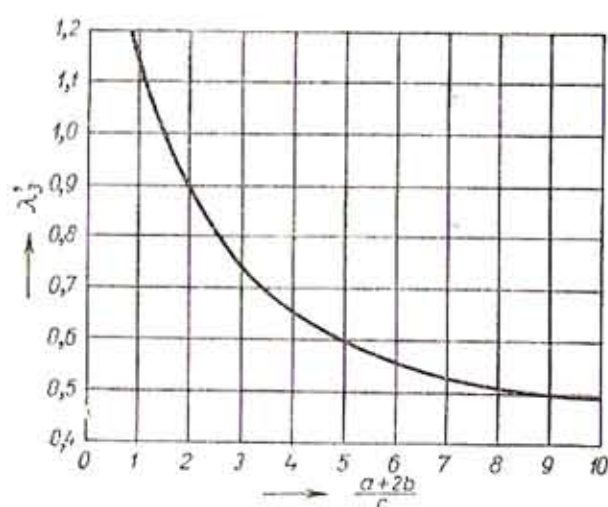
λ'_3 je jednotková magnetická vodivost z obr. 109,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

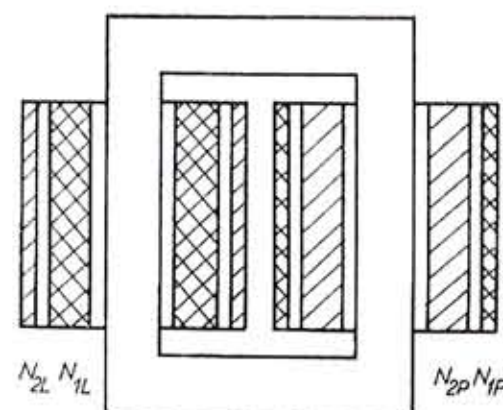
Rozptylová reaktance se určí z rovnic (120) a (121).

Při porovnávání výpočtů byly odchylky vypočítané rozptylové reaktance od skutečnosti menší než 20 %, většinou se pohybovaly kolem 10 %.

Změna rozptylové reaktance (nastavování svařovacího proudu) tohoto typu transformátoru se nejčastěji uskutečňuje přepínáním odboček na některém vinutí tak, že celkový počet zapojených závitů je stále stejný a mění se jen počet zapojených závitů na jednotlivých sloupcích jádra, přičemž vždy na jednom sloupku převládá magnetomotorické napětí vstupního proudu a na druhém magnetomotorické napětí výstupního proudu.



Obr. 109. Jednotková magnetická vodivost



Obr. 110. Transformátor s neúplným rozdělením vinutí

Obecný případ rozložení vstupního a výstupního vinutí na sloupcích transformátoru při určitém zapojení přepínače odboček ukazuje obr. 110. Na levém sloupku je zapojeno N_{1L} závitů vstupního vinutí a N_{2L} závitů výstupního vinutí. Na pravém sloupku je zapojeno N_{2P} závitů výstupního vinutí a N_{1P} závitů vstupního vinutí. Celkový počet zapojených závitů vstupního a výstupního vinutí je

$$N_1 = N_{1L} + N_{1P}$$

$$N_2 = N_{2L} + N_{2P}$$

Zavedeme-li pojem činitel rozdělení vinutí k_{rv}

$$k_{rv} = \frac{N_{1L}}{N_1} - \frac{N_{2L}}{N_2} = \frac{N_{2P}}{N_2} - \frac{N_{1P}}{N_1} \quad (125)$$

můžeme pro rozptylovou reaktanci takto zapojeného transformátoru psát vztah

$$X_r = 2\pi f N_2^2 A_r k_{rv}^2 \quad (126)$$

Magnetická vodivost A_r se určí z rovnice (120).

V mnoha případech se rozděljuje jen jedno vinutí; u transformátorů s přepínáním odboček je to obvykle vstupní vinutí, tzn. $N_{2L} = 0$. Potom je

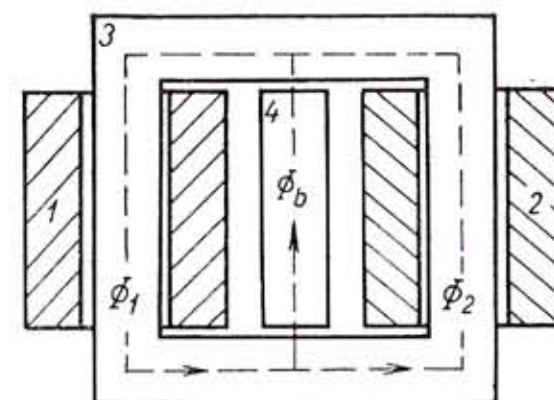
$$k_{rv} = \frac{N_{1L}}{N_1} \quad (127)$$

a rozptylová reaktance se vypočítá ze vztahu (126).

Rovnice (126) zanedbává rozptylový tok mezi vinutími umístěnými na jednom sloupku. Rozptylovou reaktanci odpovídající tomuto toku lze vypočítat z rovnice (110); dosadí se počet závitů a rozměry odpovídající doplňkovému vinutí (např. N_{1P} podle obr. 110 při výpočtu rozptylové reaktance vinutí na pravém sloupku, přičemž N_{1P} je počet zapojených závitů vstupního vinutí na pravém sloupku přepočtených na výstupní stranu).

c) *Transformátor s pohyblivým magnetickým bočником.* Uvažujme transformátor podle obr. 111. Vstupní vinutí a výstupní vinutí jsou umístěna na různých sloupcích jádra, v okně jádra je mezi vstupním a výstupním vinutím umístěn magnetický bočník.

Pro volbu průřezu magnetického bočníku je třeba znát velikost magnetického toku procházejícího bočníkem při zatížení transformátoru. Velikosti toku v jednotlivých částech transformátoru z obr. 111 ukazuje vektorový diagram na obr. 112. Předpokládá se, že bočník je zasunut do okna jádra transformátoru. Z diagramu je zřejmé, že tok Φ_b magnetického bočníku se mění od nulové hodnoty při chodu transformátoru naprázdno až k velikosti Φ_1 při chodu transformátoru nakrátko.



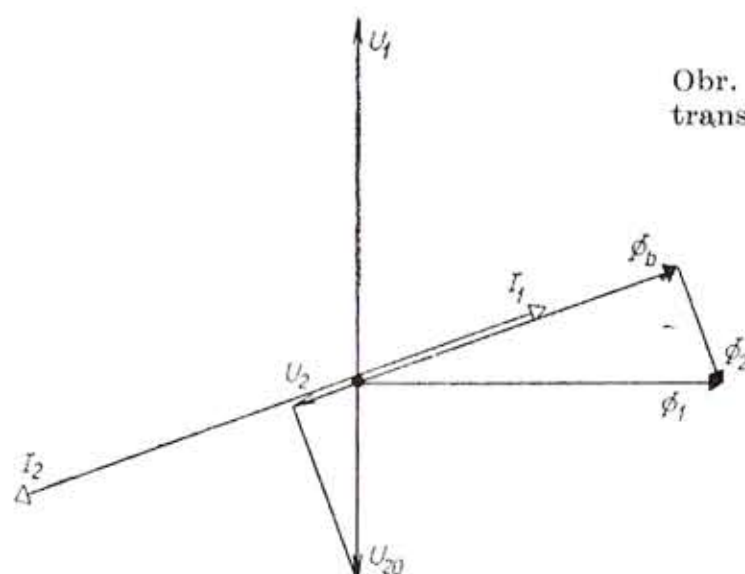
Obr. 111. Transformátor s magnetickým bočníkem
1 vstupní vinutí, 2 výstupní vinutí,
3 jádro transformátoru, 4 magnetický bočník

Tok Φ_1 je tok procházející jádrem transformátoru při chodu naprázdno. Amplitudu toku bočníku v zatíženém transformátoru lze určit ze vztahu

$$\Phi_b = \frac{1}{4,44fN_2} \sqrt{U_{20}^2 - U_2^2} \quad (128)$$

Je vidět, že v zatíženém transformátoru je rozdělení toku příznivé. Jen polovina jádra a magnetický bočník jsou plně magneticky zatíženy. V druhé polovině jádra, nesoucí výstupní vinutí, je magnetický tok to-

likrát menší než tok při chodu naprázdno, kolikrát je napětí naprázdno větší než napětí pracovní. Vektorový diagram byl sestaven po zanedbání ztrát a rozptylového toku uzavírajícího se jinou cestou než magnetickým bočníkem; to je přijatelné vzhledem k velké magnetické vodivosti bočníku.



Obr. 112. Fázorový diagram transformátoru podle obr. 111

Transformátor se vstupním a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra lze zhotovit jen pro menší výkony. Pro větší svařovací proudy je nutné zmenšit rozptylovou reaktanci rozdělením vinutí podle obr. 110. Tento zásah má nepříjemný následek ve zvětšení magnetického toku bočníku Φ_b v nepřímém poměru k činiteli rozdělení vinutí k_{rv}

$$\Phi_{b1} = \frac{\Phi_b}{k_{rv}} \quad (129)$$

kde Φ_b je magnetický tok bočníku při vstupním a výstupním vinutí na různých sloupcích jádra,

Φ_{b1} magnetický tok bočníku při rozdělení vinutí odpovídajícím dané velikosti činitele k_{rv} — obr. 110 a rovnice (125).

Při návrhu transformátoru je tedy nutné volit činitel rozdělení vinutí jen tak velký, jak to vyžaduje rozsah nastavení svařovacího proudu. Zmenšování činitele k_{rv} vede k nutnosti volby většího průřezu magnetického bočníku. Bočník je pak těžší a síly působící na něj při provozu transformátoru jsou větší.

Největší rozptylovou reaktanci má transformátor při zasunutém magnetickém bočníku. Reaktance vztažená na výstupní vinutí je obecně

$$X_r = \frac{\omega N_2^2}{R_m} k_{rv} \quad (130)$$

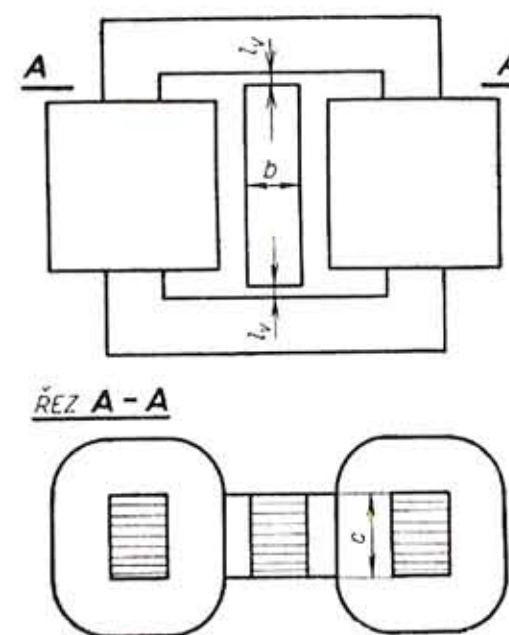
Velikost magnetického odporu R_m závisí na ploše průřezu magnetického bočníku a na velikosti mezer mezi jádrem transformátoru a bočníkem.

Pro transformátor na obr. 113 je

$$R_m = \frac{2l_v}{\mu_0 b c} \quad (131)$$

Rovnice (131) neuvažuje rozptyl mimo magnetický bočník, dosazením do vztahu (130) se tedy vypočítá reaktance menší než skutečná. Toto zjednodušení není na závadu ze dvou důvodů: skutečná reaktance není o mnoho větší než tato jednoduše vypočítaná a výpočet dává rezervu minimální hodnoty svařovacího proudu (skutečný minimální proud je menší než vypočítaný).

Nejmenší rozptylová reaktance vznikne při vyjmutí magnetického bočníku. Reaktance se vypočítá z rovnic (117) až (126). Ve skutečném transformátoru je pohyb bočníku omezen, a proto nejmenší rozptylová reaktance je větší než reaktance při zcela vyjmutém bočníku. Přesný výpočet se obvykle nedělá; využívá se poznatku, že v běžných konstrukcích přesahuje nejmenší rozptylová reaktance vypočítanou reaktanci bez uvažování vlivu magnetického bočníku asi o 20 až 30 %.



Obr. 113. Transformátor s magnetickým bočníkem — označení rozměrů pro výpočet

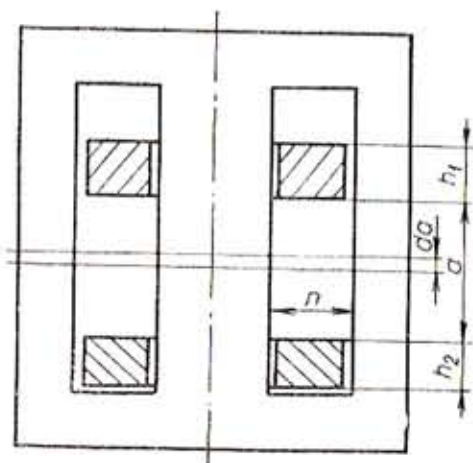
Stačí tedy vypočítat minimální reaktanci ze vztahů (117) až (126) a vypočítanou hodnotu násobit činitelem 1,3.

Rozptylová reaktance transformátoru podle obr. 68a se počítá stejně jako reaktance tlumivky se vzduchovou mezerou v jádru (pro část vinutí obklopující magnetický bočník) a jako rozptylová reaktance transformátoru se souosým válcovým vinutím (pro ty části vstupního a výstupního vinutí, které leží na sobě).

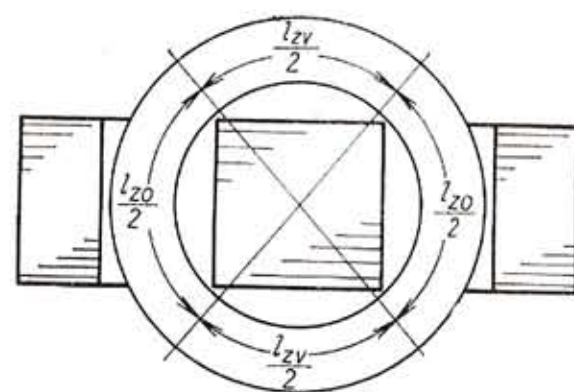
Transformátor podle obr. 68b je v mnohém podobný transformátoru na obr. 111. Při magnetickém bočníku zasunutém do okna jádra transformátoru je stejné rozdělení magnetických toků a stejný výpočet

reaktance i činitele rozdělení vinutí. Rozdílný je výpočet minimální rozptylové reaktance při vyjmutém magnetickém bočníku. V tom případě je možné použít způsob výpočtu pro transformátor s posuvnými cívkami (čl. 5.8d). Prostorové rozdělení rozptylového magnetického toku je při vyjmutém bočníku stejné jako u transformátoru s posuvnými cívkami, neexistuje tedy magnetický tok vně spojek jádra transformátoru. Tím se v podstatě liší tento transformátor od transformátoru prvního typu.

d) *Transformátor s posuvnými cívkami.* Pro výpočet rozptylových reaktancí plášťového i jádrového typu transformátoru je v dalším výkladu popsána upravená metoda podle [21].



Obr. 114. Plášťový transformátor s posuvnou cívkou — náčrtek pro výpočet



Obr. 115. K výpočtu reaktance X_{\min}

Plášťový transformátor je na obr. 114. Reaktanci odpovídající toku v prostoru mezi cívkami je možné určit z této úvahy: Z prostoru mezi cívkami vybereme diferenciál objemu ohraničený rovinami kolnými k ose transformátoru a vzdálenými od sebe da . Budou-li cívky vstupního a výstupního vinutí od sebe dostatečně vzdáleny, lze předpokládat, že silové čáry magnetického pole ve vybraném objemu leží v rovinách kolných na osu transformátoru. Magnetická vodivost železného jádra se uvažuje nekonečně velká.

Zavedeme pojem jednotková magnetická vodivost λ , což je magnetická vodivost mezi jedním krajním sloupkem a polovinou středního sloupku jádra (např. polovina transformátoru od osy transformátoru vpravo na obr. 114) při $\mu_r = 1$, vztažená na jednotku délky sloupku. Jednotková vodivost mezi středním sloupkem a oběma krajními sloupky je 2λ .

Magnetický tok ve vybraném diferenciálním objemu lze pomocí Hopkinsonova zákona vyjádřit např. s použitím výstupních veličin

$$d\Phi = 2N_2 I_2 \mu_0 \lambda da \quad (132)$$

Za předpokladu, že tok $d\Phi$ prochází všemi závity výstupního vinutí, můžeme použít statickou definici vlastní indukčnosti ve tvaru

$$N\Phi = LI$$

a vztah (132) můžeme upravit takto:

$$\frac{dL}{da} = 2N_2^2 \mu_0 \lambda \quad (133)$$

Integrací a násobením úhlovým kmitočtem ω dostaneme

$$X_r = 2\omega \mu_0 N_2^2 \lambda (a - a_{\min}) + X_{\min} \quad (134)$$

Na základě měření regulačních charakteristik několika různých transformátorů byl učiněn závěr, že minimální vzdálenost a_{\min} lze s dostatečnou přesností uvažovat velmi malou. Potom je

$$X_r = 2\omega \mu_0 N_2^2 \lambda a + X_{\min} \quad (135)$$

Pro výpočet X_{\min} (rozptylová reaktance v případě, že cívky jsou těsně na sobě) se rozdělí cívka na čtyři části (obr. 115).

Reaktance části l_{zo} vinutí v oknech transformátoru (označení podle obr. 114 a 115) je

$$X_{o\min} = \frac{\omega \mu_0 N_2^2 l_{zo}}{n} \cdot \frac{h_1 + h_2}{3}$$

Velikost l_{zo} se určí z podmínky zachování jednotkové vodivosti mezi středním a krajním sloupkem jádra

$$\lambda = \frac{l_{zo}}{2n}$$

Odtud

$$l_{zo} = 2n\lambda$$

a potom

$$X_{o\min} = \frac{2}{3} \omega \mu_0 N_2^2 \lambda (h_1 + h_2) \quad (136)$$

Reaktance odpovídající části l_{zv} vinutí mimo okno transformátoru je

$$X_{v\min} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \omega N_2^2 l_{zv} \ln \frac{\lambda_{12}^2}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (137)$$

kde je

$$l_{zv} = l_z - l_{zo}$$

$$\lambda_1 = 0,223(2c_1 + h_1)$$

$$\lambda_2 = 0,223(2c_2 + h_2)$$

$$\lambda_{12} = 2c \left(0,22 + 0,75 \frac{h}{2c} \right) \text{ pro } 1 < \frac{2c}{h} < \infty$$

$$\lambda_{12} = 0,95h \text{ pro } \frac{2c}{h} \leq 1$$

$$c = \frac{c_1 + c_2}{2}$$

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

Označení je podle obr. 115 a 116, l_z je střední délka závitu.

Rozptylová reaktance při cívkách těsně u sebe je

$$X_{\min} = X_{\text{omin}} + X_{\text{vmin}} \quad (138)$$

Rozptylová reaktance při určité vzdálenosti cívek od sebe se určí z rovnic (135) a (138), přičemž jednotková vodivost λ se přečte z diagramu na obr. 118. Diagram byl sestaven pro jádrový typ transformátoru, lze ho však použít i pro plášťový typ. Rozměr m je tloušťka stahu plechů jádra, n je šířka okna mezi středním a krajním sloupkem. Vodivost λ lze přesněji určit pomocí měření elektrické vodivosti modelu v elektrolytické lázni.

Jádrový typ transformátoru s posuvnými cívkami je na obr. 117a. Rozptylová reaktance se určí na základě stejné úvahy jako u plášťového typu. Transformátor je souměrný podle roviny α a totéž platí i o jeho rozptylovém magnetickém poli. Magnetické pole má stejný tvar, nahradí-li se jedna polovina transformátoru feromagnetickým materiálem nekonečných rozměrů ohraničeným rovinou α . Po této myšlené úpravě (znázorněné na obr. 117b) je možné počítat jen s polovinou transformátoru.

Určíme-li, že jednotková vodivost λ je vodivost mezi sloupky jádra, pak je vodivost mezi jedním sloupkem a rovinou α rovna 2λ .

Rozptylová reaktance poloviny transformátoru vztažená na výstupní vinutí pak je

$$X'_r = 2\omega\mu_0 N_{2c}^2 \lambda a + X'_{\min} \quad (139)$$

kde N_{2c} je počet závitů ve výstupním vinutí na jednom sloupku (v jedné výstupní cívce),

X'_{\min} rozptylová reaktance při cívkách u sebe

$$X'_{\min} = X'_{\text{omin}} + X'_{\text{vmin}} \quad (140)$$

Protože jednotková magnetická vodivost poloviny transformátoru je 2λ a při označení podle obr. 117 platí

$$l_{zo} = n\lambda$$

lze napsat

$$X'_{\text{omin}} = \frac{2}{3} \omega\mu_0 N_{2c}^2 \lambda (h_1 + h_2) \quad (141)$$

Reaktance X'_{vmin} se vypočítá z rovnice (137), kde se za N_2 dosadí počet závitů v jedné výstupní cívce N_{2c} .

Po zjištění rozptylové reaktance X'_r poloviny transformátoru z rovnic (139) až (141) a (137) se vypočítá rozptylová reaktance X_r celého transformátoru takto:

při paralelním spojení cívek

$$X_r = \frac{X'_r}{2} \quad (142)$$

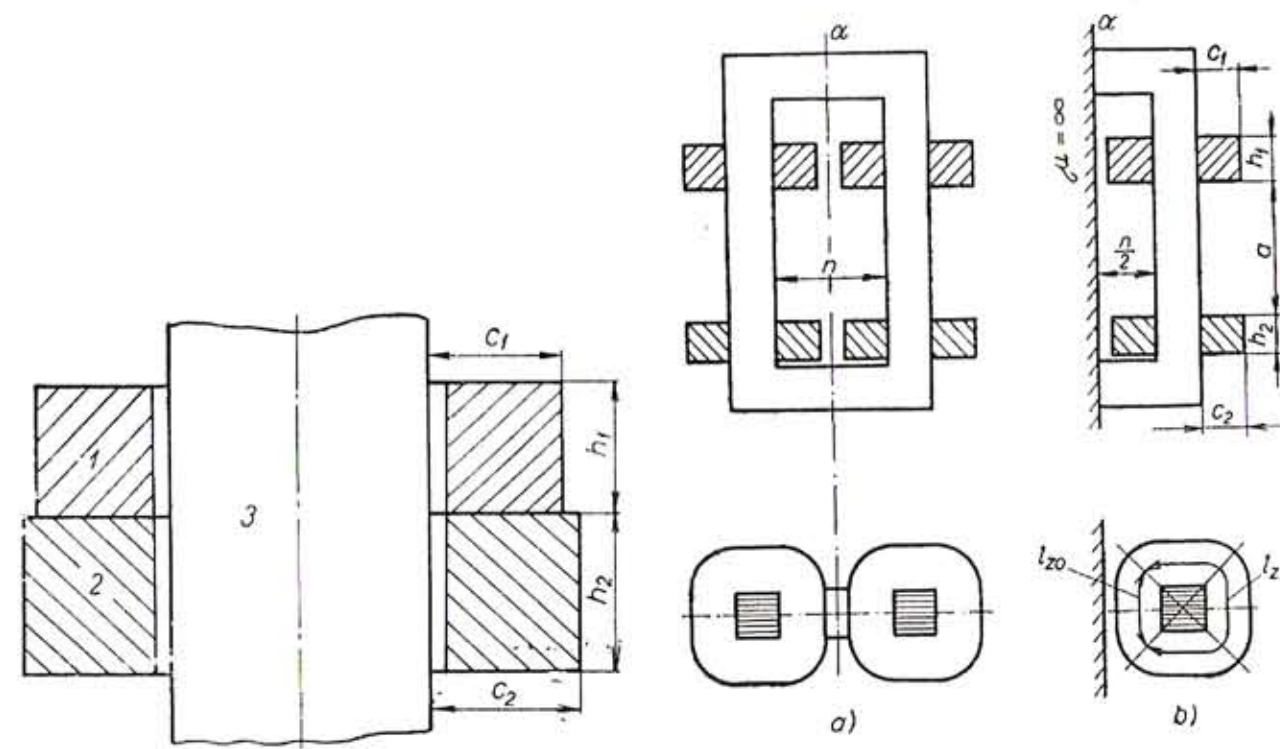
při sériovém spojení cívek

$$X_r = 2X'_r \quad (143)$$

Velikost poměrné magnetické vodivosti λ lze přečíst z grafu na obr. 118, sestaveného na základě měření vzorků. Bylo zjištěno, že vodivost nezávisí na poměru stran příčného řezu sloupkem. Je tedy znázorněna jako funkce poměru m/n , tzn. poměru tloušťky stahu plechů sloupku jádra k šířce okna transformátoru.

Poznámka: Pro výpočet činitele přídavných ztrát ve vinutí z rovnic (100) a (101) se délka střední magnetické rozptylové silové čáry l_r určí z těchto vztahů: pro plášťový typ transformátoru

$$l_r = \frac{\omega\mu_0 N_{2c}^2}{X_{\min}} l_z \frac{h_1 + h_2}{3} \quad (144)$$



Obr. 116. K výpočtu reaktance X'_{vmin}

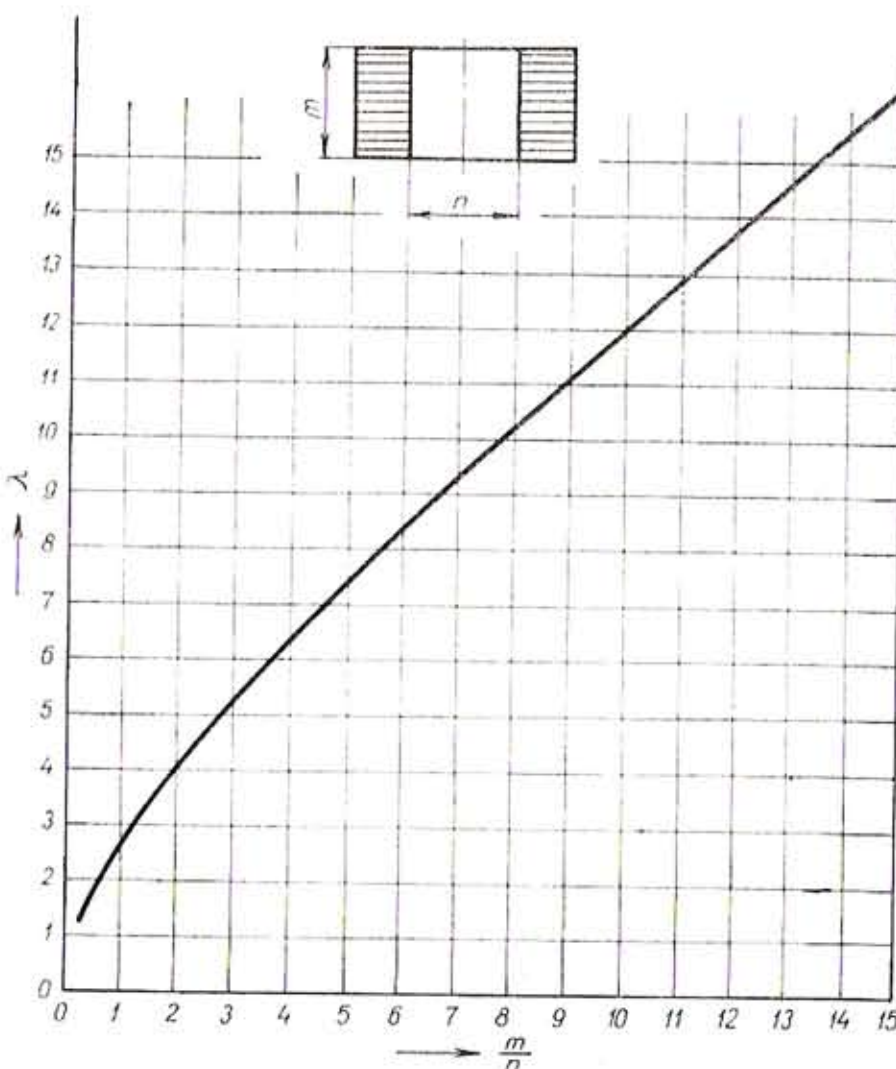
Obr. 117. Uspořádání s označením rozměrů pro výpočet rozptylové reaktance jádrového typu transformátoru s posuvnými cívkami

pro jádrový typ transformátoru

$$l_r = \frac{\omega \mu_0 N_{2c}^2}{X_{\min}} l_z \frac{h_1 + h_2}{3} \quad (145)$$

Význam symbolů v rovnicích (144) a (145) je stejný jako v rovnicích (135) a (141).

K určení polohy vodičů cívek vzhledem ke směru rozptylového magnetického pole: pro výpočet přídatných ztrát se předpokládá, že rozptylové magnetické silové čáry ve vinutí leží v rovinách kolmých k ose transformátoru.



Obr. 118. Závislost jednotkové magnetické vodivosti na rozměrech jádra transformátoru s posuvnými cívkami

e) Příklady výpočtu rozptylových reaktancí

Příklad 1: Určete výstupní proud nakrátko transformátoru z obr. 119 při zasunutém a při zcela vyjmutém magnetickém bočníku. Přibližně určete proud nakrátko při bočníku na kraji okna. Vstupní vinutí a výstupní vinutí jsou každé na samostatném sloupku. Počty závitů jsou $N_1 = 140$, $N_2 = 26$, napětí $U_1 = 380$ V, $U_{20} = 70$ V.

Rozptylová reaktance při zasunutém magnetickém bočníku se vypočítá z rovnic (130) a (131)

$$X_r = \frac{314 \cdot 26^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,08 \cdot 0,13}{2 \cdot 10^{-3}} \doteq 1,39 \, \Omega$$

Výstupní proud nakrátko je

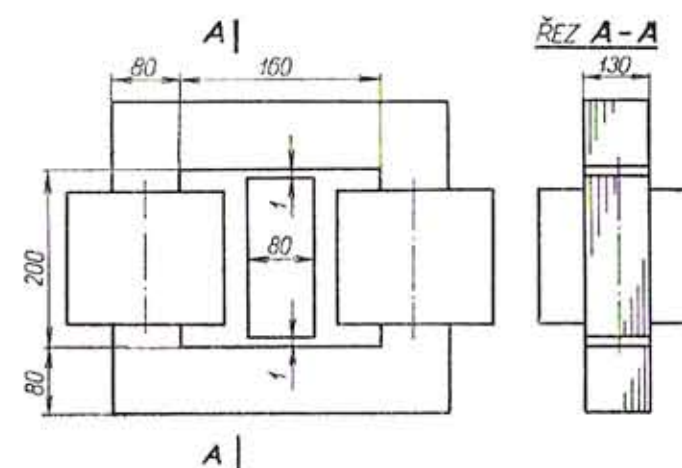
$$I_{2k} \doteq \frac{U_{20}}{X_r} = \frac{70}{1,39} \doteq 50 \, \text{A}$$

Uspořádání bez magnetického bočníku: výpočet podle čl. 5.8b. Podle obr. 119 a 105 je

$$\frac{c}{b} = \frac{130}{80} = 1,63; \quad \frac{e}{b} = \frac{200}{80} = 2,5$$

Pro tyto poměry se na obr. 106 až 108 vyhledá

$$\lambda_1 = 0,9; \quad \lambda_2 = 0,85; \quad \lambda_3 = 0,35; \quad \frac{m}{b} = 0,87; \quad \frac{n}{b} = 0,24$$



Obr. 119. Náčrtek transformátoru pro výpočet

Z rovnic (117) až (121) se vypočítá

$$A_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,16 \cdot 0,9 = 1,81 \cdot 10^{-7} \, \text{H}$$

$$A_2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,85[0,16 + 0,08(2 + 0,87\pi) + 0,13] \doteq 7,13 \cdot 10^{-7} \, \text{H}$$

$$A_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,35[0,16 + 0,08(1 + 0,42\pi) + 0,13] \doteq 2,1 \cdot 10^{-7} \, \text{H}$$

$$A_r = (1,81 + 7,13 + 2,1) \cdot 10^{-7} \doteq 1,1 \cdot 10^{-6} \, \text{H}$$

$$X_r = 314 \cdot 26^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \doteq 0,234 \, \Omega$$

Výstupní proud nakrátko bez magnetického bočníku je

$$I_{2k} = \frac{70}{0,234} \doteq 300 \, \text{A}$$

Při bočniku na kraji okna je rozptylová reaktance přibližně 1,25krát větší než při vyjmutém magnetickém bočniku. Rozptylová reaktance je tedy

$$X_r = 1,25 \cdot 0,234 \doteq 0,292 \, \Omega$$

Výstupní proud nakrátko je

$$I_{2k} = \frac{70}{0,292} \doteq 240 \, \text{A}$$

Poměr maximálního a minimálního proudu nakrátko tohoto transformátoru je tedy při nastavování proudu zasouváním magnetického bočniku téměř 5 : 1.

Příklad 2: Určete maximální a minimální výstupní proud nakrátko a činitel přídavných ztrát transformátoru s posuvnými cívkami plášťového typu. Základní rozměry označené podle obr. 114 až 116 a 118 jsou: $m = 125 \, \text{mm}$, $n = 50 \, \text{mm}$, $a_{\min} = 10 \, \text{mm}$, $a_{\max} = 250 \, \text{mm}$, střední délka závitu vinutí $l_z = 0,6 \, \text{m}$, $c_1 = 36 \, \text{mm}$, $c_2 = 44 \, \text{mm}$, $h_1 = 54 \, \text{mm}$, $h_2 = 50 \, \text{mm}$. Vstupní vinutí je vinuto měděným pásem $1,2 \times 7 \, (\text{mm})$ naplocho ve 21 vrstvách po 7 závitěch. Výstupní vinutí má 32 závitů z měděného pásu $0,7 \times 50 \, (\text{mm})$ a je vinuto jako kotoučové. Napětí transformátoru naprázdno je 80 V.

Poměr

$$\frac{m}{n} = \frac{125}{50} = 2,5$$

Z obr. 118 najdeme $\lambda \doteq 4,6$.

Část střední délky závitu

$$l_{zo} = 2n\lambda = 2 \cdot 0,05 \cdot 4,6 = 0,46 \, \text{m}$$

Z rovnice (137)

$$l_{zv} = 0,6 - 0,46 = 0,14 \, \text{m}$$

$$\lambda_1 = 0,223(2 \cdot 36 + 55) = 28,3$$

$$\lambda_2 = 0,223(2 \cdot 44 + 50) = 30,8$$

$$c = 40 \, \text{mm}$$

$$h = 52 \, \text{mm}$$

$$\lambda_{12} = 80 \left(0,22 + 0,75 \frac{52}{80} \right) \doteq 57$$

$$X_{v\min} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 314 \cdot 32^2 \cdot 0,14 \cdot \ln \frac{57^2}{28,3 \cdot 30,8} \doteq 0,0236 \, \Omega$$

Z rovnice (136)

$$X_{o\min} = \frac{2}{3} \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 32^2 \cdot 4,6(0,054 + 0,05) \doteq 0,1284 \, \Omega$$

Podle (138)

$$X_{\min} = 0,1284 + 0,0236 = 0,152 \, \Omega$$

Z rovnice (135)

$$X_r = (2 \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 32^2 \cdot 4,6a + 0,152) \, \Omega$$

$$X_r = (3,7a + 0,152) \, \Omega$$

Při $a_{\min} = 10 \, \text{mm}$ (cívky u sebe)

$$X_r = 3,7 \cdot 0,01 + 0,152 = 0,189 \, \Omega$$

a proud nakrátko

$$I_{2k} = \frac{80}{0,189} \doteq 423 \, \text{A}$$

Při $a_{\max} = 250 \, \text{mm}$ (nastavení na nejmenší proud)

$$X_r = 3,7 \cdot 0,25 + 0,152 = 1,077 \, \Omega$$

a proud nakrátko

$$I_{2k} = \frac{80}{1,077} \doteq 75 \, \text{A}$$

Výpočet činitelů přídavných ztrát pro jednotlivá vinutí:

Ze vztahu (144)

$$l_r = \frac{314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 32^2}{0,152} \cdot 0,6 \frac{0,054 + 0,05}{3} \doteq 0,055 \, \text{m}$$

Činitel ztrát vstupního vinutí:

V souladu s označením na obr. 98 je $m = 21$, $n = 7$, $b = 1,2 \, \text{mm}$, $h = 7 \, \text{mm}$.

Ze vztahu (102)

$$\xi = 100 \cdot 0,007 \sqrt{\frac{21 \cdot 0,0012}{0,055}} \doteq 0,47$$

Podle (104)

$$k_p = 1 + \frac{7^2 - 0,2}{9} 0,049 \doteq 1,266$$

Činitel ztrát výstupního vinutí:

$m = 32$, $n = 1$, $b = 0,7 \, \text{mm}$, $h = 50 \, \text{mm}$

$$\xi = 100 \cdot 0,05 \sqrt{\frac{32 \cdot 0,0007}{0,055}} \doteq 3,2$$

Ze vztahů pro $\varphi(\xi)$ a $\psi(\xi)$ v čl. 5.5

$$\varphi(\xi) \doteq 3,2$$

$$\psi(\xi) \doteq 7$$

Z rovnice (100)

$$k_p = 3,2 + \frac{1-1}{3} \cdot 7 = 3,2$$

Způsob provedení výstupního vinutí je nevhodný, protože vzniknou velké přídavné ztráty ve vinutí. Vhodnější je použít obdélníkový pás např. 9×4 (mm). Při vinutí tohoto pásu v 8 vrstvách po 4 závitěch je $m = 8$, $n = 4$, $b = 4$ mm, $h = 9$ mm. Potom

$$\xi_d = 100 \cdot 0,009 \sqrt{\frac{8 \cdot 0,004}{0,055}} \doteq 0,69$$

$$k_p = 1 + \frac{4^2 - 0,2}{9} \cdot 0,69^4 \doteq 1,4$$

Změnou pásu pro výstupní vinutí se tedy zmenší přídavné ztráty ve výstupním vinutí z 220 % na 40 %.

5.9. VÝPOČET TLUMIVKY

Jednou z možností konstrukce svařovacího transformátoru je zapojení tlumivky do série se vstupním nebo výstupním vinutím transformátoru s malou rozptylovou reaktancí. Tlumivka musí mít možnost změny indukčnosti (a tím i reaktance) v rozsahu daném požadovaným rozsahem nastavení svařovacího proudu. Reaktanci lze měnit přepínáním počtu závitů při konstantní vzduchové mezeře nebo změnou velikosti vzduchové mezery při neměnném počtu závitů.

Pro výpočet jsou výchozí tyto hodnoty:

reaktance X_L (rozsah, popř. reaktance při jednotlivých stupních), jmenovitý proud I_n , napětí naprázdno transformátoru U_{20} , popř. vstupní napětí transformátoru U_1 při zapojení tlumivky do série se vstupním vinutím, rozptylová reaktance transformátoru X_r .

Dále se předpokládá zapojení tlumivky do série se vstupním vinutím transformátoru. Při potřebě zapojit tlumivku do vstupního obvodu transformátoru je způsob výpočtu obdobný, pouze je nutné počítat se vstupními veličinami, popř. použít vztahy pro přepočty uvedené v čl. 5.2.

Celková reaktance X_c transformátoru a tlumivky se zjistí z rovnice (69) nebo (72) pro požadovaný rozsah nastavení svařovacího proudu I_2 . Potřebná reaktance tlumivky potom je

$$X_L = X_c - X_r$$

(146)

Jmenovitý proud I_{2n} je určen v zadání transformátoru a úměrně k jeho velikosti se volí průřez vodiče (hustota proudu pro měděné vodiče bývá 2 až 4 A/mm² podle způsobu zatížení při chlazení vzduchem).

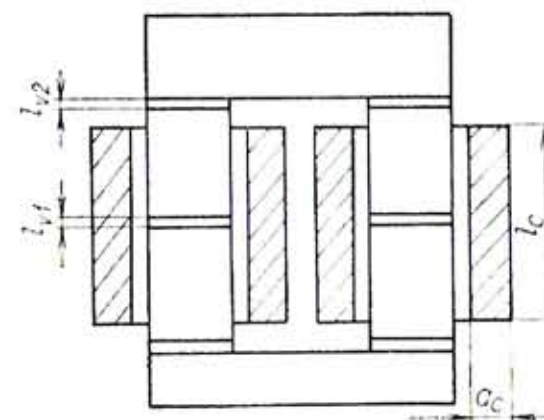
Napětí na tlumivce U_L je dáno napětím naprázdno U_{20} a rozptylovou reaktancí X_r transformátoru, velikostí svařovacího proudu I_2 a pracovního napětí U_2 . Zanedbáme-li odpory vinutí transformátoru a tlumivky, je

$$U_L = \sqrt{U_{20}^2 - U_2^2} - X_r I_2 \quad (147)$$

Za U_2 se dosazuje normalizované pracovní napětí U_p , pro které platí

$$U_p = 20 + 0,04 I_2 \quad \text{při} \quad I_2 < 600 \text{ A}$$

$$U_p = 44 \text{ V} \quad \text{při} \quad I_2 \geq 600 \text{ A}$$



Obr. 120. K výpočtu reaktance tlumivky

Je zřejmé, že nejvyšší napětí na tlumivce je při minimálním svařovacím proudu, kdy je nejmenší pracovní napětí a nejmenší úbytek vlivem rozptylové reaktance transformátoru (napětí naprázdno transformátoru je konstantní).

Podle výkonu tlumivky $P_L = U_L I_{2n}$ se obvykle volí průřez železa tlumivky, a to přibližně podle transformátoru stejného výkonu jako má tlumivka nebo nejbližší menšího výkonu. Reaktance tlumivky je obecně

$$X_L = \omega \frac{N^2}{R_m}$$

Celkový magnetický odpor je při zanedbání vlivu železa součtem paralelně řazených magnetických odporů vzduchové mezery v jádře, prostoru mezi jádrem a vinutím a prostoru, který zaujímá vinutí. Reaktance jednoho jádra tlumivky je potom (při označení podle obr. 120)

$$X_L = \frac{8\pi^2 f N^2}{10^7} \left[\frac{1}{\sum (l_v / S_v)} + \frac{S'}{l_c} + \frac{S_c}{3l_c} \right] \quad (148)$$

kde f je kmitočet,

N počet závitů na jednom jádru,

l_v délka dílčí mezery v jádru,

S_v plocha, kterou prochází magnetický tok v mezeře l_v ,

S' průřez kanálu mezi vinutím a jádrem,

l_c výška vinutí,

S_c plocha příčného průřezu vinutím.

První dílčí člen reaktance

$$X_1 = \frac{8\pi^2 f N^2}{10^7 \Sigma (l_v/S_v)}$$

vyvolává tok v magnetických mezerách jádra. Jeho velikost závisí na rozdělení a velikosti dílčích mezer l_v . Podle [48] činí 80 až 90 % hodnoty celkové reaktance. Vyklenutí magnetického toku ve vzduchové mezeře se respektuje dosazením většího průřezu S_v , než je průřez jádra S_j , a to v závislosti na velikosti dílčí mezery l_v

$$S_v = S_j + 1,3 l_v \sqrt{S_j} \quad (149)$$

Druhý dílčí člen je reaktance vyvolaná tokem mezi vinutím a jádrem.

Třetí člen udává reaktanci vyvolanou magnetickým tokem jdoucím prostorem vinutí a spřaženým se všemi závity. Příslušná plocha

$$S_c = l_z a_c \quad (150)$$

kde l_z je střední délka závitu,

a_c šířka vinutí.

Pro návrh tlumivky se může přijmout zjednodušující předpoklad

$$X_L = 1,25 \frac{\omega \mu_0 S_z N^2}{\Sigma l_v}$$

tj. přibližně

$$X_L = \frac{f N^2 S_z}{\Sigma l_v} \cdot 10^{-5} \quad (151)$$

Postup návrhu tlumivky zapojené do svařovacího obvodu

1. Volba průřezu železa jádra S_z podle transformátoru stejného nebo nejbližšího výkonu, přičemž výkon $P = U_L I_{2n}$. Napětí U_L se zjistí z rovnice (147), kde se za I_2 dosadí velikost jmenovitého proudu I_{2n} .

2. Počet závitů jednoho jádra

$$N = \frac{U_{1L}}{4,44 f B_m S_z} \quad (152)$$

kde U_{1L} je napětí na vinutí jednoho jádra,

B_m maximální hodnota (amplituda) magnetické indukce v železe jádra.

Při návrhu tlumivky se změnou vzduchové mezery se dosazuje napětí na tlumivce při minimálním svařovacím proudu, u tlumivky s přepínáním počtu závitů se dosadí napětí na tlumivce při maximálním proudu, přičemž vypočítaný počet závitů platí pro tento maximální proud, tj. pro zmenšování svařovacího proudu je nutné připojovat další závity.

3. Na základě zjednodušení vyjádřeného rovnicí (151) se vypočítá přibližná délka všech vzduchových mezer v jednom jádru

$$\Sigma l_v = \frac{f N^2 S_z}{X_L} \cdot 10^{-5} \quad (153)$$

Význam písmen ve vzorci je stejný jako v (148). Vypočítaná vzduchová mezera se podle možností rozdělí na několik dílčích mezer.

4. Kontroluje se reaktance jednoho jádra tlumivky podle rovnic (148) až (150) a popř. se upraví délka vzduchových mezer.

U tlumivek se změnou velikosti vzduchové mezery nelze obvykle z konstrukčních důvodů rozdělit celkovou mezeru na více než dvě dílčí mezery, které jsou při nastavení na nejvyšší svařovací proud velké (např. u transformátoru TS 1000 . 4 může být mezera v jádru tlumivky až 55 mm). Mezery se umísťují tak, aby byly obklopeny vinutím. Při větší mezeře nastane značné vyklenutí magnetického toku, tok prochází vinutím v okolí mezery a způsobuje přídavné ztráty indukovanými vířivými proudy. Zvláště u vodičů větších průřezů může oteplení vinutí u mezery několikanásobně překročit oteplení ostatních částí vinutí. Přídavné ztráty lze zmenšit rozdělením vodiče do několika paralelních vodičů a jejich vystřídáním v cívce. Pokud to není možné a nevedí zmenšení účinnosti následkem přídavných ztrát, je nutné volit izolaci, která snese velké teploty. Výpočet přídavných ztrát i výpočet reaktance tlumivky metodou fiktivního vinutí lze najít ve [21].

Tlumivky s přepínáním počtu závitů mají proti předcházejícím výhody v možnosti rozdělit mezeru v jádře na několik menších dílčích mezer, ve zmenšení přídavných ztrát (s tím souvisejícím) a dále v pevné konstrukci bez pohyblivých částí. Nevýhodou kromě stupňového nastavení svařovacího proudu je špatné využití železa jádra. Průřez železa jádra musí být navržen tak, aby jmenovité sycení bylo při nejmenším počtu zapojených závitů, tj. při největším svařovacím proudu. Nastavování menšího svařovacího proudu se děje zvětšováním počtu zapojených závitů, přičemž napětí na tlumivce stoupá poměrně málo (147) a magnetická indukce v železe se tedy zmenšuje. Využití železa je tím menší, čím větší je rozsah nastavení svařovacího proudu. Potřebné množství materiálu na vinutí lze odstupňováním průřezu vodiče pro jednotlivé odbočky zmenšit.

5.10. VÝPOČET TRANSFORMÁTORU SE STEJNOSMĚRNOU MAGNETIZACÍ MAGNETICKÉHO BOČNÍKU

Uspořádání transformátoru je na obr. 72. Magnetický obvod se skládá ze dvou železných jader, jádra J transformátoru a magnetického bočnicku B. Na magnetickém bočnicku jsou umístěny cívky řídicího vinutí N_f , kterými prochází řídicí stejnosměrný proud. Změnou řídicího proudu se mění stejnosměrný magnetický tok v magnetickém bočnicku, a tím i magnetický odpor bočnicku. Cívky vstupního a výstupního vinutí jsou symetricky umístěny na obou sloupcích jádra J transformátoru. Pro maximální využití železa transformátoru je vhodné výstupní vinutí na každém sloupku jádra rozdělit do dvou částí: hlavní výstupní vinutí N_{20} a doplňkové výstupní vinutí N_{21} . Mezi jádrem transformátoru a magnetickým bočnickem je vzduchová mezera, která zlepšuje průběh křivky výstupního proudu při stejnosměrném sycení magnetického bočnicku. Vzduchová mezera neleží v cestě řídicímu magnetickému toku, a nepředstavuje tedy pro něj magnetický odpor. Magnetický bočník se umísťuje souměrně mezi sloupky jádra transformátoru, takže celková vzduchová mezera je součtem dvou stejných vzduchových mezer l_v (celá vzduchová mezera má tedy délku $2l_v$).

Pro výpočet se přijmou tyto zjednodušující předpoklady:

zanedbává se činný odpor vstupního a výstupního vinutí,

zanedbávají se ztráty v železe,

zanedbává se rozptyl mezi vstupním vinutím N_1 a doplňkovým výstupním vinutím N_{21} .

Za těchto předpokladů je celkový rozptylový tok Φ_r v transformátoru (maximální hodnota)

$$\Phi_r = \frac{\sqrt{2}}{\omega N_{20}} \sqrt{U_{20}^2 - U_2^2} \quad (154)$$

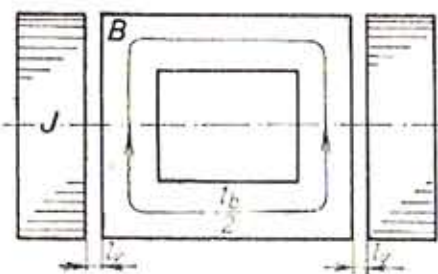
kde $\omega = 2\pi f$ je úhlový kmitočet sítě,

N_{20} počet závitů hlavní části výstupního vinutí,

U_{20} výstupní napětí transformátoru naprázdno,

U_2 pracovní napětí transformátoru.

Celkový rozptylový tok se skládá z toku vzduchového rozptylu pracovních vinutí Φ_{vz} a ze střídavého magnetického toku Φ_b procházejícího bočnickem.



Obr. 121. Příčný řez transformátorem se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočnicku. Vinutí není kresleno
J jádro transformátoru,
B jádro magnetického bočnicku

$$\Phi_r = \Phi_{vz} + \Phi_b \quad (155)$$

Tok vzduchového rozptylu (maximální hodnota) je

$$\Phi_{vz} = \frac{\sqrt{2}}{\omega N_{20}} I_2 X_{vz} \quad (156)$$

kde I_2 je výstupní proud transformátoru,

X_{vz} indukční reaktance vzduchového rozptylu pracovních vinutí transformátoru.

Reaktance X_{vz} se vypočítá metodou uvedenou v čl. 5.8d pro transformátor s posuvnými cívkami. Je možné dosadit reaktanci X_{min} podle rovnic (138), (142) a (143), přičemž se její jednotlivé složky vypočítají z rovnic (137) a (141).

Střídavý tok Φ_b magnetického bočnicku prochází vzduchovými mezerami a při nulovém řídicím proudu prochází celý magnetickým bočnickem. Spojením rovnic (154) až (156) dostaneme

$$\Phi_b = \frac{\sqrt{2}}{\omega N_{20}} (\sqrt{U_{20}^2 - U_2^2} - I_2 X_{vz}) \quad (157)$$

Pro zjednodušení vztahů při dalších výpočtech je výhodné zavést pojem fiktivní vnitřní napětí transformátoru U_1

$$U_1 = \Phi_b \frac{\omega N_{20}}{\sqrt{2}} \quad (158)$$

neboli

$$U_1 = \sqrt{U_{20}^2 - U_2^2} - I_2 X_{vz} \quad (159)$$

kde U_1 je napětí, které by po přiložení na svorky vinutí N_{20} vyvolalo celkový magnetický tok velikosti Φ_b .

Ze vztahu pro magnetomotorické napětí v magnetickém obvodu obklopujícím hlavní část výstupního vinutí vyplývá

$$N_{20} I_2 = \frac{2l_v B_v}{\sqrt{2} \mu_0} + H_{bst} l_{bst} \quad (160)$$

kde B_v je maximální hodnota (amplituda) magnetické indukce v mezeře mezi jádrem transformátoru a magnetickým bočnickem,

l_v délka jedné (dílčí) mezery,

H_{bst} intenzita střídavého magnetického pole v bočnicku, která je funkcí indukce střídavého pole v bočnicku B_b a intenzity stejnosměrného magnetického pole H_{bss} ,

l_{bst} délka střední silové čáry střídavého magnetického pole v bočnicku, kterou je možné nahradit polovinou střední délky celého magnetického bočnicku $l_b/2$ (viz obr. 121 — příčný řez transformátorem bez vinutí).

Neprochází-li řídicím vinutím stejnosměrný proud ($H_{bss} = 0$), je možné druhý sčítanec pravé části rovnice (160) zanedbat. Protože tento stav odpovídá nejmenšímu výstupnímu proudu transformátoru, lze psát

$$N_{20}I_{2\min} = \frac{\sqrt{2} l_v B_v}{\mu_0} \quad (161)$$

Z teorie transduktorů je známo, že magnetomotorická napětí řídicího a pracovního vinutí se sobě přibližně rovnají. Pro druhý sčítanec pravé části rovnice (160) lze tedy napsat

$$H_{bst} l_{bst} = N_{\bar{r}} I_{\bar{r}} \quad (162)$$

kde $N_{\bar{r}}$ je počet závitů jedné cívky řídicího vinutí,
 $I_{\bar{r}}$ stejnosměrný řídicí proud.

Sloučením rovnic (160) až (162) dostaneme vztah pro teoretický průběh regulační charakteristiky transformátoru

$$N_{\bar{r}} I_{\bar{r}} = N_{20}(I_2 - I_{2\min}) \quad (163)$$

Bereme-li v úvahu značný rozptyl mezi pracovními vinutími a řídicím vinutím a dále magnetizační křivku materiálu (železa bočnicku), lze dosáhnout přesnějšího výsledku použitím sítě magnetizačních křivek získaných měření při současné střídavé a stejnosměrné magnetizaci vzorku železného jádra. Praxe ukázala, že největší řídicí magnetomotorické napětí $(N_{\bar{r}} I_{\bar{r}})_{\max}$ je omezeno největší intenzitou stejnosměrného magnetického pole v bočnicku, která je u orientovaných elektrotechnických plechů 12 000 A/m až 15 000 A/m, tj.

$$(N_{\bar{r}} I_{\bar{r}})_{\max} \leq 15\,000 \frac{l_b}{2}$$

Další zvyšování řídicího magnetomotorického napětí už je málo účinné, má za následek jen malé zvětšení pracovního proudu I_2 .

Z rovnice (161) lze po úpravě vypočítat potřebnou velikost dílčí vzduchové mezery l_v . Platí

$$B_v = \frac{\Phi_v}{S_v} \quad (164)$$

kde Φ_v je maximální hodnota střídavého magnetického toku vzduchovou mezerou,

S_v plocha příčného průřezu vzduchovou mezerou.

Při nulové hodnotě řídicího proudu prochází výstupním vinutím proud $I_{2\min}$ a téměř celý magnetický tok procházející vzduchovou mezerou prochází také magnetickým bočnickem; tedy

$$\Phi_v = \Phi_b \quad (165)$$

Rovnici (161) lze upravit pomocí rovnic (158), (164) a (165), a získat tak vztah pro výpočet velikosti dílčí vzduchové mezery

$$l_v = \frac{\mu_0 \omega N_{20}^2 S_v I_{2\min}}{2U_i} \quad (166)$$

Amplituda magnetické indukce v jádru transformátoru při zatížení je

$$B_{jzat} = \frac{\sqrt{2} U_i}{\omega S_{zj} N_{20}} \quad (167)$$

kde S_{zj} je průřez železa jádra transformátoru.

Amplituda magnetické indukce v bočnicku při zatížení a při nulovém řídicím proudu je

$$B_{bzo} = \frac{U_i}{\sqrt{2} \omega S_{zb} N_{20}} \quad (168)$$

kde S_{zb} je průřez železa jádra magnetického bočnicku (jednoho sloupku).

Zmenšení hmotnosti železa jádra transformátoru lze dosáhnout rozdělením rozsahu nastavení svařovacího proudu do několika stupňů (v jednoduchém případě do dvou) změnou počtu závitů hlavní části výstupního vinutí. Složka výstupního proudu odpovídající magnetické vodivosti vzduchové mezery se pak mění přibližně nepřímo úměrně druhé mocnině počtu závitů hlavní části výstupního vinutí, složka proudu odpovídající velikosti řídicího proudu se mění přibližně nepřímo úměrně počtu závitů.

Za předpokladu stejného maximálního řídicího magnetomotorického napětí $(N_{\bar{r}} I_{\bar{r}})_{\max}$ pro oba stupně lze napsat

$$(I'_{2\max} - I'_{2\min}) N'_{20} = (I''_{2\max} - I''_{2\min}) N''_{20} \quad (169)$$

Označíme-li čárkou veličiny prvního stupně (menší svařovací proud) a dvěma čárkami veličiny druhého stupně (větší proud), platí přibližně

$$I''_{2\min} = I'_{2\min} \left(\frac{N'_{20}}{N''_{20}} \right)^2 \quad (170)$$

U této konstrukce se zavádí pojem hloubka regulace k_r , což je poměr maximálního svařovacího proudu a minimálního svařovacího proudu pro celý rozsah nastavení svařovacího proudu.

$$k_r = \frac{I''_{2\max}}{I'_{2\min}} \quad (171)$$

Za předpokladu, že oba stupně na sebe navazují, platí

$$I'_{2\max} = I''_{2\min} \quad (172)$$

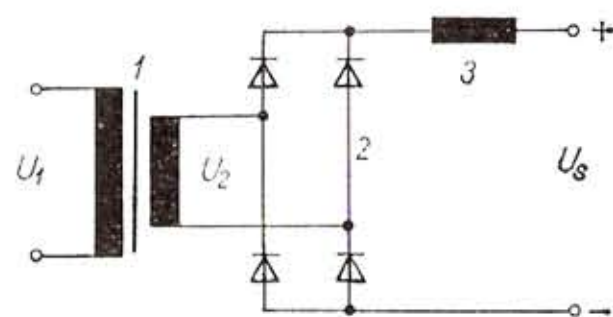
Dosazením z (170) až (172) do (169) a úpravou dostaneme

$$k_r = \left(\frac{N'_{20}}{N''_{20}} \right)^3 + \left(\frac{N'_{20}}{N''_{20}} \right)^2 - \frac{N'_{20}}{N''_{20}} \quad (173)$$

Rovnice (173) umožňuje určit poměr závitů hlavních částí výstupních vinutí pro rozsah nastavení rozdělený do dvou stupňů při dané hloubce regulace k_r . Při známém počtu závitů N'_{20} a N''_{20} a při známé velikosti proudu v jednom stupni nastavení lze z rovnic (169) a (172) zjistit minimální a maximální proud v druhém stupni.

5.11. PŘIPOJENÍ USMĚRŇOVAČE K TRANSFORMÁTORU A VÝPOČET VYHLAZOVACÍ TLUMIVKY

Oblast použití svařovacího transformátoru i na elektrody určené pro svařování stejnosměrným proudem lze rozšířit připojením usměrňovače za transformátor. Schéma zapojení je na obr. 122, kde je na výstupní svorky transformátoru 1 připojen můstkově zapojený usměrňovač 2.



Obr. 122. Schéma připojení usměrňovače ke svařovacímu transformátoru
1 transformátor, 2 usměrňovač, 3 vyhlazovací tlumivka

Usměrňovač sestavený ze selenových desek nebo křemíkových diod musí být napěťově a proudově dimenzován podle svařovacího transformátoru. Střední hodnota U_{ss} usměrněného napětí při chodu naprázdno je

$$U_{ss} = \frac{U_{20}}{1,11}$$

kde U_{20} je efektivní hodnota výstupního napětí transformátoru naprázdno.

Připojení samotného usměrňovače ještě nepřináší žádné zlepšení stability svařovacího oblouku v porovnání se střídavým proudem; zlepšení se dosáhne teprve zapojením vyhlazovací tlumivky 3 do stejnosměrného obvodu. Tlumivka zmenšuje zvlnění svařovacího proudu natolik, že v každém okamžiku prochází svařovacím obvodem proud, který bezpečně stačí k hoření svařovacího oblouku. Nezapojí-li se tlumivka, klesá usměrněný proud na konci každé půlperiody napájecího napětí k nule, oblouk zhasíná a musí se na začátku každé půlperiody znovu zapalovat podobně jako při svařování střídavým proudem.

Kromě uvedené funkce může vyhlazovací tlumivka příznivě působit na rozstřík, a tím i na ztrátu kovu elektrody při svařování. Obecně je možné říci, že čím větší je indukčnost vyhlazovací tlumivky, tím menší je rozstřík kovu při svařování. V praxi se volí indukčnost 1 až 4 mH.

Indukčnost L tlumivky lze vypočítat pomocí vzorce (148), jehož tvar po dosazení $X_L = 2\pi fL$ je

$$L = \frac{4\pi N^2}{10^7} \left[\frac{1}{\Sigma (l_v/S_v)} + \frac{S'}{l_c} + \frac{S_c}{3l_c} \right] \quad (174)$$

Označení je stejné jako u vztahů (148) až (150).

Přijme-li se stejný zjednodušující předpoklad jako v čl. 5.9, tj.

$$L \doteq 1,25 \frac{\mu_0 S_z N^2}{\Sigma l_v} \quad (175)$$

je magnetický odpor R_m tlumivky

$$R_m = \frac{\Sigma l_v}{1,25 \mu_0 S_z}$$

kde S_z je průřez železa jádra tlumivky.

Dosazením za R_m do (23) při $\Phi = BS_z$ dostaneme vztah

$$NI = \frac{B \Sigma l_v}{1,25 \mu_0} \quad (176)$$

Úpravou dostaneme vztah mezi počtem závitů N a celkovou délkou Σl_v všech vzduchových mezer v jádru tlumivky

$$\frac{N}{\Sigma l_v} = 6,37 \frac{B}{I} \cdot 10^5 \quad (177)$$

Velikost magnetické indukce B v jádru tlumivky při jmenovitém proudu I ve vinutí se volí podle použitého železa jádra a podle požadavků na linearitu indukčnosti. Většinou nebývá vhodné volit větší indukci než 1 T.

Spojením rovnic (175) a (176) se získá závislost mezi počtem závitů N a průřezem železa jádra S_z

$$NS_z = \frac{LI}{B} \quad (178)$$

Vztahy (177) a (178) jsou dvě rovnice se třemi neznámými, N a S_z a Σl_v . Jednu z těchto neznámých je tedy nutné zvolit. Volí se buď průřez železa, nebo počet závitů, přičemž tlumivka s větším počtem závitů a menším průřezem železa bývá lehčí, ale dražší než tlumivka s malým počtem závitů a velkým průřezem železa.

Volíme-li průřez železa, postupujeme při výpočtu takto:

1. Volba průřezu železa S_z .
2. Určení počtu závitů N z rovnice (178).
3. Výpočet celkové délky vzduchové mezery Σl_v z rovnice (177).
4. Návrh uspořádání tlumivky a rozdělení celkové vzduchové mezery na dílčí vzduchové mezery.
5. Porovnání hmotnosti, ceny, popř. jiných parametrů s požadavky zadání.
6. Kontrola indukčnosti tlumivky podle rovnice (174).

Pokud některý parametr podle bodů 5 a 6 nevyhovuje, provedou se potřebné úpravy návrhu.

Poznámka: U tlumivek s úzkým a vysokým oknem jádra a se vzduchovými mezerami soustředěnými u jedné spojky jádra mimo vinutí bývají skutečná indukčnost a magnetická indukce v jádře větší než vypočítané. Je to tím, že určitá část magnetického toku se uzavírá oknem jádra a neprochází vzduchovými mezerami.

Příklad: Navrhněte vyhlazovací tlumivku s hliníkovými vinutím pro svařovací transformátor s připojeným usměrňovačem. Proud při trvalém zatížení je 60 A, největší svařovací proud je 120 A, indukčnost je 2 mH, chlazení je vzduchové, přirozené.

Vzhledem k tomu, že jde o stejnosměrnou tlumivku, volíme pro složení jádra elektrotechnický plech tloušťky 1 mm. Velikost magnetické indukce v jádru při největším svařovacím proudu volíme 1,2 T.

Volíme jádro s průřezem 50×60 (mm). Průřez železa při plnění 0,92 je

$$S_z = 50 \cdot 60 \cdot 0,92 \cdot 10^{-6} \doteq 27,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Z rovnice (178) je

$$N = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 120}{1,2 \cdot 27,6 \cdot 10^{-4}} \doteq 72,5 \text{ závitu}$$

Volíme $N = 72$ závitů.

Z rovnice (177) je

$$\Sigma l_v = \frac{72 \cdot 120}{1,2 \cdot 6,37 \cdot 10^5} \doteq 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

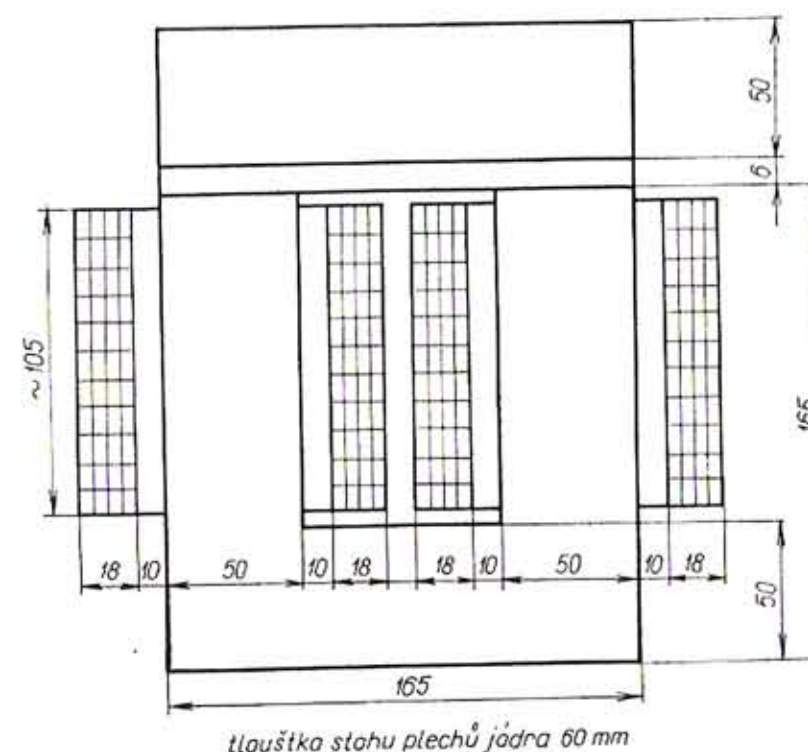
Volíme $\Sigma l_v = 12$ mm.

Pro hliníkové vinutí je hustota proudu $1,5 \text{ A/mm}^2$. Průřez vinutí je

$$S_{A1} = \frac{60}{1.5} = 40 \text{ mm}^2$$

Volíme hliníkový pás dvakrát opředený skleněnou přízí a lakovaný tereftalátovým lakem (označení Al 2KT), s průřezem 4×10 (mm).

Magnetický obvod má jádrový tvar, na každém sloupku jádra je 36 závitů vinuto ve 4 vrstvách po 9 závitech. Obě cívky jsou spojeny do série. Mezera v jádru je rozdělena na dvě dílčí mezery, umístěné u jedné spojky železného jádra.



Obr. 123. Rozměrový náčrtek vyhlazovací tlumivky pro příklad

Délka vinutí je

$$l_c = (9 + 1) \cdot 10,5 = 105 \text{ mm}$$

Výška jádra je 115 mm.

Šířka vinutí je

$$a_c = 4 \cdot 4,5 = 18 \text{ mm}$$

Mezi jádrem a vinutím je mezera 10 mm, mezi cívkami je vzdálenost alespoň 6 mm.

Šířka okna jádra je

$$2 \cdot 18 + 2 \cdot 10 + 6 = 62 \text{ mm}$$

Šířka okna jádra se volí 65 mm.

Rozměrový náčrtek tlumivky je na obr. 123. Vzduchová mezera může být vytvořena např. deskou z tvrzené tkaniny. Pro složení jádra stačí dva rozměry plechů; 50×165 (mm) a 50×115 (mm).

Kontrola indukčnosti podle rovnice (174)

Z rovnice (149) dostaneme

$$S_v = 30 \cdot 10^{-4} + 1,3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \sqrt{30 \cdot 10^{-4}} \doteq 34,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Střední délka závitu (obr. 123) je

$$l_z = 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,06 + 2\pi \cdot 0,019 \doteq 0,34 \text{ m}$$

Šířka vinutí $a_c = 0,018 \text{ m}$.

Přibližná plocha průřezu kanálu mezi cívkou a jádrem je

$$S' = 0,01 (2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,06) + \pi \cdot 0,01^2 \doteq 25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Plocha příčného průřezu vinutí z rovnice (150) je

$$S_c = 0,34 \cdot 0,018 = 61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Indukčnost tlumivky je

$$L = \frac{4\pi \cdot 72^2}{10^7} \left(\frac{1}{2 \cdot \frac{0,006}{0,00343}} + \frac{25 \cdot 10^{-4}}{0,105} + \frac{61 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 0,105} \right) \doteq \\ \doteq 2,14 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Vypočítaná indukčnost 2,14 mH dobře vyhovuje zadání.

Hmotnost tlumivky

Hustota železa je $7,8 \text{ kg/dm}^3$, průřez jádra je $0,276 \text{ dm}^2$. Podle obr. 123 (všechny rozměry se dosadí v decimetrech)

$$G_z = 7,8 \cdot 0,276 (2 \cdot 1,65 + 2 \cdot 1,15) \doteq 12 \text{ kg}$$

Hustota hliníku je $2,7 \text{ kg/dm}^3$, střední délka závitu 3,4 dm.

$$G_{Al} = 2,7 \cdot 72 \cdot 3,4 \cdot 40 \cdot 10^{-4} \doteq 2,65 \text{ kg}$$

Celková hmotnost tlumivky včetně stahovací konstrukce asi 17 kg.

6. Příklady návrhu svařovacích transformátorů

Návrh nového svařovacího transformátoru lze rozdělit do několika na sebe navazujících etap. Sled etap návrhu může být např. tento:

a) Studium. Etapa zahrnuje studium literatury odborné (knihy a časopisy) a firemní. Jeho cílem je zjistit vývojové směry a dosažené parametry transformátorů vyráběných ve světě. Součástí etapy je průzkum patentů.

b) Projekt. Zahrnuje volbu principu (na základě výsledků studia), výpočet transformátoru, obstarání potřebného materiálu a zpracování nezbytných konstrukčních podkladů (náčrtků), podle kterých je možné za případné asistence návrháře vyrobit vzorek transformátoru. Patří sem i předběžný návrh skříně a chlazení.

c) Výroba, měření a úpravy vzorku transformátoru. Na základě měření na vzorku transformátoru se provedou úpravy korigující rozdíly mezi požadovanými a skutečnými hodnotami. Je vhodné, aby součástí měření byla i předběžná zkouška oteplení za přibližně stejných podmínek, jaké se předpokládají u prototypu.

d) Konstrukce prototypu. Zpracování podrobné dokumentace pro výrobu.

e) Výroba, měření a úpravy prototypu. Vyrobený prototyp se podrobí typové zkoušce podle ČSN 05 2210. Pokud některé výsledky typové zkoušky nevyhovují, je nutné provést potřebné úpravy.

f) Konečné úpravy a kontrola výrobní dokumentace, zpracování technických podmínek a návodu k použití.

Je zřejmé, že návrh nového transformátoru vyžaduje práce více lidí a jeho celý rozsah nelze do knihy pojmout. Dále proto částečně probereme pouze projekt některých typů transformátorů. Zkoušky transformátorů jsou předmětem další kapitoly.

Před příklady návrhu svařovacích transformátorů je vhodné zařadit rámcové pokyny pro konstrukci, doplněné některými potřebnými údaji o používaných elektrotechnických materiálech.

6.1. VŠEOBECNÉ ÚDAJE PRO KONSTRUKCI

Úvodem je nutné zdůraznit jedno z nejdůležitějších hledisek ovlivňujících konstrukci, a to ochranu před nebezpečným dotykovým napětím. Náročné požadavky na bezpečnost transformátorů vyžadují věnovat velkou pozornost zejména izolaci a impregnaci vinutí, krytí

a dodržení bezpečných izolačních vzdáleností. Bezpečnost se u průmyslově vyráběných transformátorů ověřuje řadou zkoušek podle ČSN 05 2210 nebo ČSN 05 2211 (viz čl. 7.2).

a) *Jádro transformátoru.* Skládá se z elektrotechnických plechů legovaných křemíkem a válcovaných zatepla nebo zastudena. Obsah křemíku je u plechů válcovaných zatepla až 4,5 %, u plechů válcovaných zastudena asi 3 %.

Plechý válcované zatepla se označují písmeny Et a za nimi následujícím číslem udávajícím měrné ztráty (ztrátové číslo) $\Delta p_{1,0}$ (W/kg) při indukci 1 T a kmitočtu 50 Hz (např. Et 1,3 má $\Delta p_{1,0} = 1,3$ W/kg). Zaručené hodnoty plechů válcovaných zatepla podle ČSN 42 0230 jsou v tab. 11. Plechy se dodávají neizolované, v tabulích s rozměry 750 × 2000 (mm).

Plechý válcované zastudena (orientované plechy) mají při magnetickém toku ve směru válcování podstatně menší ztráty a větší permeabilitu než plechy válcované zatepla. Rovněž měrný jalový výkon je menší. Nevýhodou proti plechům válcovaným zatepla je značně vyšší cena, větší citlivost orientovaného plechu na mechanické namáhání (stříhání, děrování, otřesy, ohyby, velké tlaky) a horší magnetické vlastnosti při směru magnetického toku odlišném od směru válcování (projeví se zejména v rozích, kde se stýkají plechy sloupku a spojky jádra). Zvětšení měrných ztrát lze odstranit nákladným regeneračním žíháním plechů nastříhaných a upravených pro skládání jádra. Plechy se žíhají v ochranné atmosféře tvořené 95 % dusíku a 5 % vodíku při teplotě 800 °C ± 15 °C

Tab. 11. Zaručené hodnoty plechů válcovaných zatepla

Jakost	Tloušťka (mm)	Největší dovolené měrné ztráty (W/kg)		Nejmenší dovolená indukce B_m (T) pro H_m (A/cm)				Činitel plnění
		$\Delta p_{1,0}$	$\Delta p_{1,5}$	25	50	100	300	
Et 1,6	0,35	1,6	3,8	1,45	1,57	1,69	1,94	0,90 až 0,92 0,92 až 0,94
	0,50	1,6	4,0					
Et 1,4	0,35	1,4	3,4	1,45	1,57	1,69	1,94	0,90 až 0,92 0,92 až 0,94
	0,50	1,4	3,5					
Et 1,3	0,35	1,3	3,2	1,45	1,57	1,69	1,94	0,90 až 0,92 0,92 až 0,94
	0,50	1,3	3,3					
Et 1,2	0,35	1,2	2,9	1,44	1,55	1,67	1,87	0,90 až 0,92
Et 1,1	0,35	1,1	2,6	1,44	1,55	1,67	1,87	0,90 až 0,92
Et 1,0	0,35	1,0	2,4	1,44	1,55	1,67	1,87	0,90 až 0,92
Et 0,9	0,35	0,9	2,2	1,44	1,55	1,67	1,87	0,90 až 0,92

Tab. 12. Barevné označení orientovaných plechů z n. p. Válcovny plechů Frýdek-Místek

Jakost plechu	Barevné pásy	Jakost plechu	Barevné pásy
Eo 10	3 × modrý	Eo 13	3 × zelený
Eo 11	2 × modrý	Eo 15	2 × zelený
Eo 12	1 × modrý	Eo 17	1 × zelený

po dobu alespoň 15 min, s následujícím pomalým chladnutím. Je tedy zřejmé, že regenerační žíhání vyžaduje speciální zařízení, a u výrobců svařovacích transformátorů není proto běžné.

Odchytky směru magnetického toku od směru válcování orientovaných plechů lze zmenšit vyloučením děrování plechů a šikmými stříhy plechů v místech styku sloupku a spojky. Šikmý stříh znamená zvětšení nákladů, a proto není zaveden všeobecně.

Orientovaný elektrotechnický plech se dodává buď v tabulích s rozměry 750 × 2000 (mm), nebo jako pás široký 100 mm až 750 mm, navinutý ve svitcích. Na přání odběratele může být opatřen oboustranným tenkým anorganickým izolačním povlakem. Tloušťka plechu je 0,35 mm s odchylkou ± 10 %. Značí se písmeny Eo a číslem udávajícím měrné ztráty $\Delta p_{1,5}$ při $B_m = 1,5$ T a $f = 50$ Hz. Jakost se označuje také barevně podle tab. 12. Zaručené vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů uvádí tab. 13, typické vlastnosti jsou v tab. 14. Z hodnot v tab. 14 lze sestavit přibližný průběh křivky závislosti měrných ztrát na amplitudě magnetické indukce B_m a přibližný průběh magnetizační křivky $B_m = f(H_m)$.

Jádra svařovacích transformátorů mají obvykle obdélníkový průřez. Jen v málo případech je použit odstupňovaný průřez jádra. Několik způsobů skládání plechů ukazuje obr. 124. Na obrázku je pro každý příklad znázorněn způsob kladení plechů ve dvou sousedních vrstvách,

Tab. 13. Zaručené hodnoty orientovaných elektrotechnických plechů

Jakost	Největší dovolené měrné ztráty $\Delta p_{1,5}$ (W/kg)	Nejmenší dovolená indukce B_m (T) pro H_m (A/cm)	
		25	100
Eo 11	1,12	1,84	1,96
Eo 12	1,23	1,80	1,94
Eo 13	1,36	1,76	1,92
Eo 15	1,55	1,72	1,90
Eo 17	1,75	1,68	1,86

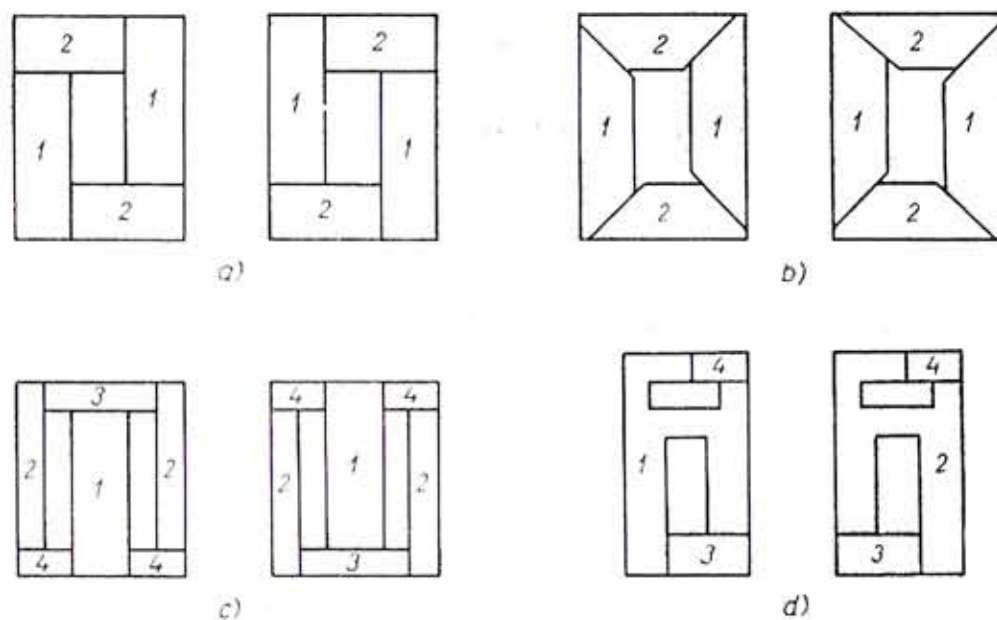
Tab. 14. Typické hodnoty orientovaných elektrotechnických plechů

Jakost	Měrné ztráty (W/kg) při 50 Hz pro indukci B_m (T)				Indukce B_m (T) pro H_m (A/cm)						Maxi- mální permeabi- lita μ_{rmax}
	0,5	1,0	1,5	1,7	0,3	1	5	10	25	100	
Eo 12	0,16	0,54	1,21	1,76	1,14	1,55	1,72	1,79	1,87	1,99	30 300
Eo 13	0,17	0,59	1,33	1,93	0,97	1,49	1,70	1,78	1,85	1,98	26 000
Eo 15	0,18	0,64	1,48	2,19	0,84	1,41	1,65	1,72	1,82	1,96	22 700
Eo 17	0,20	0,70	1,62	2,36	0,74	1,35	1,60	1,67	1,77	1,94	20 000

kteřé se stále střídají. Nejběžnější způsob skládání jádra jádrového a plášťového typu transformátoru je na obr. 124a a 124c. Možný způsob skládání orientovaných plechů je na obr. 124b. Na obr. 124d je nakreslen způsob skládání jádra transformátoru s tlumivkou magneticky spřaženou s transformátorem a s regulací změnou vzduchové mezery tlumivky (pohyblivé jádro je složeno z plechů 4). Je zřejmý složitý a výrobně náročný tvar plechů 1 a 2.

Plech, které výrobce dodává neizolované, je možné izolovat polepením tenkým papírem nebo častěji lakováním. U velkých transformátorů (např. pro svařování pod tavidlem) je vhodné vkládat po každých asi 40 mm vrstvy plechů lepenkové izolační vložky přesahující okraje jádra.

U malých montážních svařovacích transformátorů s přepínáním počtu závitů lze magnetický obvod složit s tzv. jader C. Jsou to jádra vinutá z orientovaného pásu a slepená. Po navinutí se jádro s obdélní-



Obr. 124. Některé způsoby skládání jader transformátorů

kovým oknem příčně rozřízne, a tím vzniknou dvě části tvaru písmene C. Řezné plochy jsou pečlivě zabroušeny. Po nasunutí cívek se obě části jádra přiloží k sobě a upevní se.

b) *Vinutí a izolace.* Materiál používaný pro vinutí je elektrovodná měď podle ČSN 42 3001 nebo elektrovodný hliník podle ČSN 42 4002. Dovolené namáhání v tahu a v tlaku je u mědi asi 100 MPa, u hliníku asi 25 MPa. Rezistivita podle ČSN je při teplotě 20 °C u mědi nejvíce 0,01786 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, u hliníku nejvíce 0,02941 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Materiály pro izolaci vinutí se dělí do tříd podle teploty, kterou trvale snášejí bez rychlého zkrácení života. Pro svařovací transformátory zatím platí dovolená oteplení izolačních materiálů daná ČSN 35 1000 (Elektromagnetické stroje netočivé). Oteplení měřené metodou přírůstku odporu vinutí nesmí překročit hodnoty uvedené v tab. 15.

Tab. 15. Dovolené oteplení vinutí svařovacích transformátorů

Třída izolace	Y	A	E	B	F	H	C
Dovolené oteplení (K)	45	60	75	80	100	125	nad 125

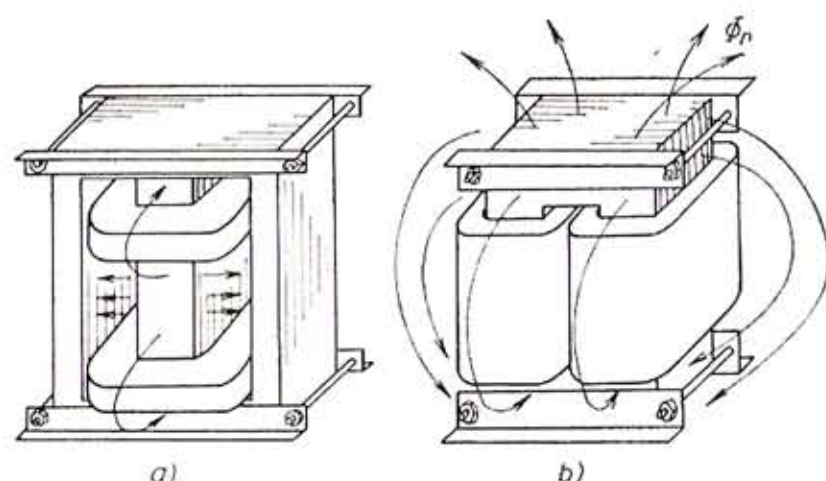
Rozdělení elektroizolačních materiálů podle jejich tepelné odolnosti je v ČSN 34 0270.

Izolované vodiče vyrábí k. p. Kablo Kladno ve tvaru drátů s kruhovým průřezem a pásů se zaoblenými hranami. Jmenovitý průměr jader měděných izolovaných drátů je 0,05 až 3,15 mm, hliníkové dráty mají jmenovité průměry 0,5 až 3,15 mm. Dráty se izolují lakem nebo kombinovanou izolací (lakem a opředěním) nebo jen vláknitou izolací (opředěním). Vyrábějí se v izolačních třídách Y až H. Hliníkové dráty jsou pouze s izolací tereftalátovým lakem v izolační třídě B. Měděné a hliníkové pásy mají tloušťku od 0,8 do 6 mm a šířku od 1,4 do 20 mm. Vyrábějí se s různými druhy izolace, v třídách Y až F; rozsah tloušťky a šířky pásu je u různých druhů izolace různý. Hliníkové pásy se dodávají také eloxované, s izolační třídou F. Podrobné údaje jsou ve výrobním programu k. p. Kablo Kladno.

Pásy jiných rozměrů než uvedených se vyrábějí pouze holé, v rozměrech podle ČSN 42 7308 (hliník), ČSN 42 8308 (měď) a ČSN 42 8306 (plechy, pásy, pruhy a kotouče z mědi a slitin mědi, válcované zastudena).

Vinutí svařovacích transformátorů se nejčastěji zhotovuje jako polohové, a to i u transformátorů s posuvnými cívkami, kde se vinou cívky s větším počtem poloh a s malým počtem závitů v jedné poloze. Desková vinutí se téměř nepoužívají (pro větší pracnost při spojování jednotlivých deskových cívek). Výstupní vinutí transformátorů s posuvnými

cívkami pro větší svařovací proudy je výhodné navinout z holého pásu na výšku v jedné vrstvě a závity izolovat proklady, u hliníku eloxováním. Vždy je vhodné předem výpočtem zjistit činitel přídavných ztrát a volbu vinutí popřípadě upravit. Hustota proudu se volí podle intenzity chlazení, izolační třídy, tvaru a způsobu provedení cívek. U měděných vinutí bývá 2 A/mm^2 až 4 A/mm^2 při trvalém zatížení. Pokud nejsou značné zkušenosti s transformátory podobných typů, jako je navrhovaný transformátor, je třeba při projektu vypočítat přibližné oteplení podle zásad uvedených v čl. 5.5 a 5.6 a v případě potřeby změnit návrh průřezu vodičů.



Obr. 125. Průběh rozptylového toku při zatížení rozptylových svařovacích transformátorů

Je-li třeba pro zmenšení přídavných ztrát rozdělit vinutí na několik paralelních vodičů, musí se paralelní vodiče transponovat tak, aby každý vodič měl pokud možno stejný odpor i reaktanci jako ostatní paralelní vodiče. Způsoby transpozice jsou např. v [47].

Na proklady jednotlivých poloh (vrstev) vinutí lze použít např. lesklou lepenku (izolační třída A), lakovanou skelnou tkaninu (izolační třída E nebo B), drážkovou izolaci AE nebo EAE (izolační třída B), popř. jiné materiály. Pro klínování cívek, proklady holých pásů, pomocné stahovací díly apod. se může použít impregnované tvrdé dřevo a textit (texgumoid) pro izolační třídu A a E, sklotextit ARV (izolační třída F) a sklotextit Si (izolační třída H).

Navinuté cívky je nutné impregnovat elektroizolačním lakem a vysušit. Impregnuje se ve vakuu lakem takové izolační třídy, jakou má izolace vodiče cívky. Po odkapání laku se impregnovaná cívka po předepsanou dobu vysouší při teplotě předepsané pro použitý lak. Pro izolační třídy A, E a B se používá syntetický lak S 1901, pro vyšší izolační třídy lze použít např. silikonové laky (Lukosil 200 apod.).

c) *Stahovací konstrukce a kryt.* Po složení transformátoru je nutné magnetický obvod a cívky zpevnit tak, aby celý transformátor tvořil konstrukční celek. Cívky se na jádro upevní zaklínováním a popř. se ještě na čelech stáhnou šrouby přes izolační podložky.

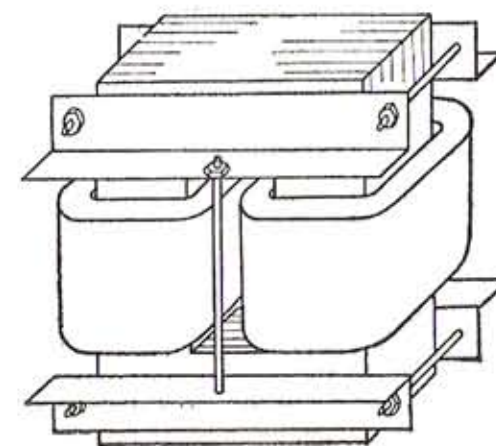
Složené jádro se stahuje pomocí svorníků a kovových úhelníků. V některých případech jsou u rozptylových transformátorů místo úhelníků použity hranolky z impregnovaného tvrdého dřeva nebo z jiného izolačního materiálu. Stahovací konstrukce se dimenzuje tak, aby mohla v ploše plechů jádra vyvinout tlak $0,5 \text{ MPa}$ až 1 MPa . Stahovací svorníky mohou procházet jádrem nebo mohou být umístěny mimo jádro. U menších transformátorů a u jader z orientovaných plechů je vždy snaha umístit svorníky mimo jádro, neboť děrování plechů zdražuje výrobu a zhoršuje magnetické vlastnosti orientovaných plechů. Jsou-li nutné průchozí svorníky, izolují se od plechů jádra po celé délce izolačními trubkami a v místech stahu izolačními podložkami. Průchozí svorníky se pokud možno umísťují mimo cívky, v opačném případě je nutné zvětšit průměr vinutí, aby se dodržely potřebné izolační vzdálenosti.

U rozptylových transformátorů je třeba dát pozor na to, aby kolmo k směru rozptylového toku nebyly umístěny větší kovové plochy (krycí plechy, úhelníky), ve kterých by se vířivými proudy vyvíjelo značné množství tepla. Zvláště velký ohřev může nastat u částí z konstrukční oceli (feromagnetický materiál).

Při stahování jádra svorníky umístěnými mimo jádro se svorníky od stahovacích úhelníků nemusí izolovat ani u rozptylových transformátorů v těch případech, kdy uzavřeným elektrickým obvodem vzniklým z úhelníků a svorníků neprochází v žádném provozním stavu transformátoru střídavý magnetický tok. Tak je tomu např. u transformátoru s posuvnými cívkami (obr. 125a). Avšak bezpodmínečně nutné je izolovat od sebe stahovací svorníky a stahovací úhelníky u transformátoru s vstupním a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra (obr. 125b). To je např. u jádrových transformátorů s přepínáním počtu závitů a u transformátorů s magnetickým bočником prvního typu (čl. 4.8).

Jádra přerušená mezerou (např. u tlumivek) se stahují např. podle obr. 126. Svorníky rovnoběžné s osami cívek jsou z nemagnetického materiálu (mosaz, bronz apod.).

ČSN 05 2210 předepisuje stupeň krytí alespoň IP 22 u transformátorů pro ruční svařování a IP 21 u transformátorů pro mechanizované



Obr. 126. Příklad stahovací konstrukce tlumivky s mezerou v jádře

svařování pod tavidlem a u ostatních transformátorů pro obloukové svařování (např. metodou WIG). Pro obloukové transformátorky (transformátory s maximálním zdánlivým příkonem do 6,3 kV . A a jmenovitým zatěživatel 20 % — viz čl. 1.4) je v ČSN 05 2211 předepsán minimální stupeň krytí IP 30. Význam číslic označujících stupeň krytí je v ČSN 33 0330.

První číslice určuje stupeň ochrany před dotykem a před vniknutím cizích předmětů takto:

- 2 — ochrana před dotykem živých nebo pohybujících se částí prstem,
- 3 — ochrana před dotykem nástrojem s průměrem 2,5 mm nebo větším,
- zábrana před vniknutím drobných předmětů (nad 2,5 mm).

Druhá číslice určuje stupeň ochrany před vniknutím vody:

- 0 — žádná ochrana před vniknutím vody,
- 1 — ochrana před škodlivým vniknutím svisle skapávající vody,
- 2 — ochrana před škodlivým vniknutím svisle kapající vody do zařízení nakloněného až 15° od svislice.

Kryt transformátoru musí především zabránit náhodnému dotyku obsluhy s částmi, na kterých je životu nebezpečné síťové napětí, a dále musí chránit transformátor před mechanickým poškozením.

Kryt malých jádrových rozptylových transformátorů se dělá z izolačních materiálů (skelný laminát, novodur apod.), aby se vyloučila možnost ztrát vířivými proudy v krytu při svařování.

Větší svařovací transformátory se umísťují do skříní s pevnou svařovanou kostrou a s kryty z ocelového plechu. Vzdálenost krytů od rozptylového transformátoru je třeba volit tak velkou, aby ztráty vířivými proudy v krytech byly zanedbatelné. Pokud by vycházela skříně příliš rozměrná, je nutné některý kryt zhotovit z izolačního materiálu.

Kryty transformátorů mají otvory pro vstup a výstup chladicího vzduchu. Pro zajištění potřebného stupně krytí jsou ventilační otvory opatřeny pletivem, mřížkou, popř. žaluzií. Chlazení je buď přirozené (zejména u menších transformátorů), nebo nucené, pomocí ventilátoru.

d) *Pomocné funkce.* Schémata zapojení svařovacích transformátorů se svou složitostí značně liší podle toho, k jakému způsobu svařování je daný transformátor určen.

Transformátor pro ruční svařování musí obsahovat:

- spínač vstupního napětí,
- zařízení k ovládání výstupního proudu.

Dále může obsahovat:

- světelnou signalizaci stavu,
- signalizaci přetížení nebo automatický vypínač při přetížení,
- dálkový ovládač výstupního proudu.

Transformátory pro mechanizované svařování pod tavidlem moderními automaty jsou dnes v ČSSR vybaveny:

- stykačem ve vstupním obvodu transformátoru,

dálkovým ovládačem výstupního proudu, proudovým relé a měničem pro měření proudu (bočník, měřicí transformátor proudu),

zásuvkou pro spojení se svařovacím automatem, umožňující dálkové spínání transformátoru, nastavování proudu, měření, automatické vypnutí při přerušení proudu atd.

Dále mohou obsahovat:

- automatický vypínač při přetížení,
- zařízení pro indikaci dotyku mezi svařovacím drátem a svařovacím materiálem před začátkem svařování.

Transformátor pro svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře argonu (WIG) obsahuje:

stykač ve vstupním nebo výstupním obvodu, ovládaný spínačem na držáku wolframové elektrody,

zařízení k ovládání výstupního proudu,

zařízení k bezdotykovému zapálení svařovacího oblouku (ionizátor),

baterii kondenzátorů sériově zapojenou ve svařovacím obvodu pro odstranění stejnosměrné složky proudu vznikající při svařování lehkých kovů.

čerpadlo a chladič pro vodní chlazení držáku wolframové elektrody,

magnetický ventil a časovací zařízení pro argon,

měření proudu a napětí.

Je vhodné, obsahuje-li ještě:

dálkový ovládač výstupního proudu,

zařízení k programové regulaci výstupního proudu.

Další transformátory (pro elektrostruskové svařování, odporové svařování apod.) už nepatří do oblasti obloukového svařování, a proto nebudou probírány.

e) *Druh ochrany před nebezpečným dotykem.* Transformátory pro obloukové svařování podle ČSN 05 2210 musí být konstruovány jako elektrické předměty třídy I, to znamená, že musí mít zařízení pro připojení ochranného vodiče a všude alespoň pracovní izolaci.

Transformátorky (malé transformátory do 6,3 kV . A, zejména pro amatérské potřeby) pro obloukové svařování podle ČSN 05 2211 musí být třídy II, tj. musí mít všude dvojitou nebo zesílenou izolaci, a jsou bez zařízení pro připojení ochranného vodiče.

Poznámka: ČSN 05 2211 platí od 1. 3. 1976; některé typy transformátorků, vyvinuté dříve, jsou konstruovány jako elektrické předměty třídy I.

f) *Omezení rušení rozhlasového příjmu.* Při provozu svařovacího transformátoru vzniká nežádoucí vysokofrekvenční energie, která může rušit rozhlasový příjem. U každého transformátoru musí být proto učiněna opatření, kterými se jeho rušivý účinek sníží pod určitou úroveň. Základní předpisy pro ochranu rozhlasového příjmu před

rušením jsou v ČSN 33 4200; předpisy pro odrušení elektrických strojů (tedy i transformátorů pro obloukové svařování) jsou v ČSN 34 2860, která uvádí i meze rušivých napětí a polí. Norma klade vyšší požadavky na odrušení transformátorů určených k provozu na obytném území, tzn. hlavně transformátorků pro amatérské použití. Za dodržení požadavku na omezení rušení odpovídá výrobce, zhotovitel nebo dovozce zařízení. Po uplynutí záruční lhůty přechází odpovědnost na provozovatele.

U průmyslově vyráběných transformátorů pro obloukové svařování musí být součástí protokolu o typové zkoušce osvědčení o stupni odrušení, které vydává Inspektorát radiokomunikací na základě svého měření.

Jako odrušovací prostředky se používají kondenzátory nebo filtry složené z kondenzátorů a tlumivek. Kondenzátory se zapojují na vstupní svorkovnici buď jen mezi krajní vodiče, nebo i mezi krajní vodiče a ochranný vodič a dále paralelně k výstupnímu vinutí (obr. 152 a 158). Filtry LC zapojené jako dolní propusti se zapojují do vstupního obvodu transformátoru tam, kde nelze dosáhnout potřebného stupně odrušení jen kondenzátory, např. u souprav pro svařování metodou WIG, kde jsou hlavními zdroji rušení ionizátory.

Při návrhu zapojení odrušovacích prostředků je nutné respektovat bezpečnostní ustanovení norem pro svařovací transformátory a ČSN 34 1010. Kondenzátory a tlumivky musí odpovídat ČSN 35 8280. Tam, kde při selhání kondenzátoru může dojít ke zvětšení unikajícího proudu (viz ČSN 34 5611) nebo k jinému ohrožení bezpečnosti osob, musí se použít kondenzátory třídy Y (bezpečnostní).

K odrušení lze ve vstupním obvodu transformátoru použít při jmenovitém napětí 220 V odrušovací kondenzátory (TC 250 až 253), při napětí 380 V kondenzátory pro střídavý proud (TC 684a), popř. kondenzátory s papírovým dielektrikem, typu TC 175. Na výstupní vinutí lze připojit kromě dosud uvedených typů i další typy pro nižší napětí (TC 172, TC 173, krabicové kondenzátory TC 481). Potřebná kapacita kondenzátorů se určí zkusmo podle výsledků měření rušení při respektování bezpečnostních předpisů (včetně předpisu o unikajícím proudu). U malých transformátorků obvykle stačí kapacita do 0,1 μ F.

Návrh odrušení sériově vyráběných svařovacích transformátorů lze objednat např. u odrušovací služby při k. p. TESLA Lanškroun.

6.2. PŘÍKLAD NÁVRHU TRANSFORMÁTORU SE VSTUPNÍM VINUTÍM A VÝSTUPNÍM VINUTÍM NA RÚZNÝCH SLOUPCÍCH JÁDRA

Zadání: Máme navrhout svařovací transformátor se vstupním vinutím a výstupním vinutím na různých sloupcích jádra a se stupňovitým nastavováním svařovacího proudu přepínáním odboček. Chlazení je vzdu-

chové přirozené, trvalý svařovací proud je 80 A, rozsah nastavení výstupního proudu je 60 A až 140 A.

Nastavení je v 8 stupních: (60, 70, 80, 90, 100, 110, 125 a 140) A svařovacího proudu. Výstupní napětí naprázdno je 60 V až 65 V.

Řešení

Převod transformátoru při $U_{20} = 65$ V

$$p = \frac{380}{65} \doteq 5,85$$

Vstupní proud pro trvalé zatížení (při zanedbání proudu naprázdno)

$$I_{11} = \frac{80}{5,85} \doteq 13,7 \text{ A}$$

Zdánlivý příkon při trvalém zatížení

$$S_1 = 380 \cdot 13,7 \doteq 5200 \text{ V} \cdot \text{A}$$

Vstupní proud maximální

$$I_{1\max} = \frac{140}{5,85} \doteq 24 \text{ A}$$

Vodič vstupního vinutí je měděný, hustota proudu je 2,8 A/mm².

Průřez vodiče

$$s_1 = \frac{13,7}{2,8} \doteq 4,9 \text{ mm}^2$$

Volí se drát s průměrem 2,5 mm Cu 2T (dvakrát lakovaný tereftalátovým lakem, izolační třída B).

Vodič výstupního vinutí je hliníkový, hustota proudu je 2,2 A/mm².

Průřez vodiče

$$s_2 = \frac{80}{2,2} \doteq 36,4 \text{ mm}^2$$

Volí se pás Al 2KT 4×9 (mm).

Volba průřezu železa jádra

Z rovnice (109b)

$$S_z = 20 \sqrt{5,2} \doteq 45,6 \text{ cm}^2$$

Volíme $S_z = 40 \text{ cm}^2$.

Průřez jádra s ohledem na plnění

$$S_j = \frac{40}{0,92} \doteq 43,5 \text{ cm}^2$$

Průřez jádra volíme obdélníkový, 60×72 (mm).

Počet závitů výstupního vinutí (magnetická indukce v jádře $B_m = 1,3 \text{ T}$) je z rovnice (41)

$$N_2 = \frac{65}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 40 \cdot 10^{-4}} \doteq 56$$

Počet závitů vstupního vinutí

$$N_1 = 56 \cdot 5,85 = 328$$

Nastavování svařovacího proudu je přepínáním odboček na vstupním vinutím. Při označení podle obr. 110 je $N_{2L} = 0$; $N_{1L} = N_1$ pro minimální proud, $N_1 L = k_{rv} N_1$ pro maximální proud. Potřebná rozptylová reaktance pro minimální a maximální výstupní proud se vypočítá takto:

Proudu 60 A odpovídá normalizované pracovní napětí 22,4 V.

Proudu 140 A odpovídá normalizované pracovní napětí 25,6 V.

Z rovnice (72) jsou rozptylové reaktance

$$X_{\max} = \frac{\sqrt{65^2 - 22,4^2}}{60} \doteq 1,02 \Omega$$

$$X_{\min} = \frac{\sqrt{65^2 - 25,6^2}}{140} \doteq 0,427 \Omega$$

Z rovnic (121) a (126) je činitel rozdělení vinutí

$$k_{rv} = \sqrt{\frac{0,427}{1,02}} \doteq 0,645$$

Při maximálním výstupním proudu jsou počty závitů

$$N_{1L} = 0,645 \cdot 328 = 212$$

$$N_{1P} = 328 - 212 = 116$$

Celkový počet závitů vstupního vinutí na obou cívkách je $328 + 116 = 444$. Průřez vstupního vinutí při předpokládaném plnění 0,4 je

$$S_1 = \frac{444 \cdot 4,9}{0,4} = 5640 \text{ mm}^2$$

Průřez výstupního vinutí při $k_p = 0,7$ je

$$S_2 = \frac{56 \cdot 36}{0,7} \doteq 2000 \text{ mm}^2$$

Vzhledem k potřebným mezerám mezi vinutími a mezi jádrem a vinutími volíme rozměr okna jádra $80 \times 160 \text{ (mm)}$. Potom jsou rozměry jádra při označení podle obr. 105

$$a = 0,08 \text{ m}, \quad b = 0,06 \text{ m}, \quad c = 0,072 \text{ m}, \quad e = 0,16 \text{ m}$$

Z rovnic (122) až (124) určíme magnetické vodivosti

$$l_s = 2(0,08 + 0,12 + 0,072) + 1,1(0,16 + 0,12) = 0,852 \text{ m}$$

$$A_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,072}{0,16} 0,08 \doteq 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$A_2 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,852 \left[1,1 + \ln \left(1 + \frac{0,12}{0,16} \right) \right] = 56,6 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$\frac{a + 2b}{c} = 2,78$$

Z obr. 109 a podle (120), (121) a (124) je

$$\lambda'_3 = 0,77$$

$$A_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,77(0,08 + 0,12) = 19,3 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$A = 80,4 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$X_{\max} = 314 \cdot 56^2 \cdot 80,4 \cdot 10^{-8} = 0,792 \Omega$$

Potřebná hodnota reaktance je $1,02 \Omega$. Je proto nutné zvětšit počet závitů.

Nová volba

$$N_2 = 64; \quad B_m = 1,32 \text{ T}; \quad S_z = 36 \text{ cm}^2; \quad S_1 = 39 \text{ cm}^2;$$

$$N_1 = 360; \quad U_{20} = 67,5 \text{ V}; \quad I_{1t} = 14,2 \text{ A}; \quad J_1 = 2,9 \text{ A/mm}^2$$

Průřez jádra volíme $60 \times 65 \text{ (mm)}$.

Při maximálním výstupním proudu jsou počty závitů

$$N_{1L} = 0,645 \cdot 360 = 230$$

$$N_{1P} = 360 - 230 = 130$$

Cívka výstupního vinutí je vinuta ve 4 polohách po 16 závitech. Délka cívky

$$l_c = (16 + 1) \cdot 9,5 \doteq 162 \text{ mm}$$

Výška okna jádra je 170 mm.

Levá cívka vstupního vinutí: 7 poloh, šířka vinutí asi 20 mm.

Pravá cívka vstupního vinutí: 3 polohy, šířka vinutí asi 10 mm (cívka je navinuta na výstupním vinutí).

Cívka výstupního vinutí: 4 polohy, šířka vinutí asi 20 mm.

Vzhledem k potřebným mezerám mezi cívkami volíme šířku okna jádra 80 mm.

Rozměry jádra transformátoru při označení podle obr. 105 jsou

$$a = 0,08 \text{ m}; \quad b = 0,06 \text{ m}; \quad c = 0,065 \text{ m}; \quad e = 0,17 \text{ m}$$

$$\frac{a + 2b}{c} = 3,08; \quad \lambda'_3 = 0,73$$

Z rovnic (122) až (124) určíme nové hodnoty magnetických vodivostí

$$l_s = 2(0,08 + 0,12 + 0,065) + 1,1(0,17 + 0,12) = 0,849 \text{ m}$$

$$A_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,065}{0,17} \cdot 0,08 = 3,84 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$A_2 = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,849 \left[1,1 + \ln \left(1 + \frac{0,12}{0,17} \right) \right] = 55,5 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$A_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,73(0,08 + 0,12) = 18,3 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$A = 77,6 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$X_{\max} = 314 \cdot 64^2 \cdot 77,6 \cdot 10^{-8} = 1,0 \Omega$$

$$I_{2\min} = \frac{\sqrt{67,5^2 - 22,4^2}}{1,0} = 63,5 \text{ A}$$

Výsledek dobře vyhovuje zadání.

Dále je třeba určit počty závitů jednotlivých odboček vstupního vinutí. Určíme potřebné činitele rozdělení vinutí bez ohledu na malou nepřesnost v předcházejícím výsledku.

1. stupeň (60 A, 22,4 V)

$$X_1 = \frac{\sqrt{67,5^2 - 22,4^2}}{60} = 1,06 \Omega$$

$$k_{rv} = 1, \quad N_{1L} = 360, \quad N_{1P} = 0$$

2. stupeň (70 A, 22,8 V)

$$X_2 = \frac{\sqrt{67,5^2 - 22,8^2}}{70} = 0,908 \Omega$$

$$k_{rv} = \sqrt{\frac{0,908}{1,06}} = 0,925; \quad N_{1L} = 360 \cdot 0,925 = 333; \quad N_{1P} = 27$$

3. stupeň (80 A, 23,2 V)

$$X_3 = 0,791 \Omega$$

$$k_{rv} = 0,864; \quad N_{1L} = 311; \quad N_{1P} = 49$$

4. stupeň (90 A, 23,6 V)

$$X_4 = 0,703 \Omega$$

$$k_{rv} = 0,814; \quad N_{1L} = 293; \quad N_{1P} = 67$$

5. stupeň (100 A, 24 V)

$$X_5 = 0,63 \Omega$$

$$k_{rv} = 0,77; \quad N_{1L} = 277; \quad N_{1P} = 83$$

6. stupeň (110 A, 24,4 V)

$$X_6 = 0,572 \Omega$$

$$k_{rv} = 0,735; \quad N_{1L} = 264; \quad N_{1P} = 96$$

7. stupeň (125 A, 25 V)

$$X_7 = 0,501 \Omega$$

$$k_{rv} = 0,687; \quad N_{1L} = 247; \quad N_{1P} = 113$$

8. stupeň (140 A, 25,6 V)

$$X_8 = 0,445 \Omega$$

$$k_{rv} = 0,648; \quad N_{1L} = 233; \quad N_{1P} = 127$$

Počty závitů se zaokrouhlí

$$60 \text{ A: } N_{1L} = 360, \quad N_{1P} = 0$$

$$70 \text{ A: } N_{1L} = 335, \quad N_{1P} = 25$$

$$80 \text{ A: } N_{1L} = 310, \quad N_{1P} = 50$$

$$90 \text{ A: } N_{1L} = 290, \quad N_{1P} = 70$$

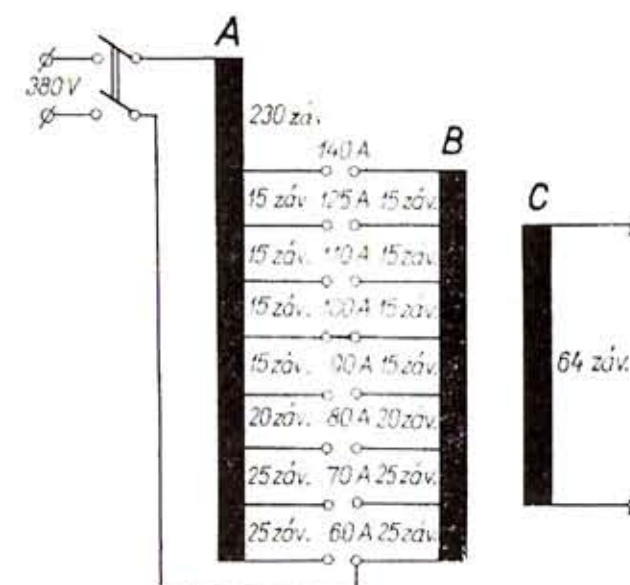
$$100 \text{ A: } N_{1L} = 275, \quad N_{1P} = 85$$

$$110 \text{ A: } N_{1L} = 260, \quad N_{1P} = 100$$

$$125 \text{ A: } N_{1L} = 245, \quad N_{1P} = 115$$

$$140 \text{ A: } N_{1L} = 230, \quad N_{1P} = 130$$

Schéma zapojení transformátoru je na obr. 127. Cívka A je umístěna na levém sloupku, cívky B a C jsou na pravém sloupku jádra. Cívky vstupního vinutí je nutné zapojit tak, aby magnetovaly jádro ve stejném směru.



Obr. 127. Schéma zapojení rozptylového transformátoru s přepínáním počtu závitů. Přepínač odboček je v poloze „100 A“

Hmotnost aktivních materiálů

Železo

$$G_z = 7,8 \cdot 0,6 \cdot 0,65 \cdot 2(2 + 1,7) = 22,5 \text{ kg}$$

Hliník (cívka C): délka závitu $l_z \approx 0,35 \text{ m}$

$$G_{Al} = 2,7 \cdot 36 \cdot 10^{-4} \cdot 64 \cdot 3,5 = 2,2 \text{ kg}$$

Měď (cívka A) na levém sloupku: $l_z \approx 0,35 \text{ m}$

$$G_{CuL} = 8,9 \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot 360 \cdot 3,5 \approx 5,5 \text{ kg}$$

Měď (cívka B) na pravém sloupku: $l_z \approx 0,45 \text{ m}$

$$G_{CuP} = 8,9 \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot 130 \cdot 4,5 \approx 2,6 \text{ kg}$$

Celková hmotnost aktivních materiálů transformátoru je asi 33 kg. Hmotnost mědi lze poněkud zmenšit odstupňovaným zmenšením průřezu vodiče vstupního vinutí v sekcích vinutí zapojených při stupních 60 A a 70 A.

Shrnutí údajů o transformátoru

Vstupní napětí 380 V.

Výstupní napětí naprázdno asi 65 V (napětí naprázdno se při přepínání odboček poněkud mění a vždy je nižší než teoretická hodnota 67,5 V, protože část magnetického toku vstupního vinutí se uzavírá mimo výstupní vinutí i při chodu naprázdno). Rozsah nastavení výstupního proudu 60 A až 140 A. Vodič vstupního vinutí: drát Cu 2T \varnothing 2,5 mm (cívky A a B). Vodič výstupního vinutí: pás Al 2KT 4 \times 9 (mm) (cívka C). Zapojení podle obr. 127.

Jakost plechů: Et 1,3; tloušťka 0,5 mm.

Rozměr plechů: 60 \times 140 (mm), 260 ks, 60 \times 230 (mm), 260 ks.

Způsob skládání plechů podle obr. 124a.

Tloušťka stahu jádra 65 mm.

Výška jádra 290 mm.

Šířka jádra 200 mm.

Okno jádra 170 \times 80 (mm).

Vnitřní rozměr cívek 65 \times 70 (mm).

Cívka A: 6 poloh po 52 závitů + 1 poloha se 48 závitů.

Cívka B: 2 polohy po 52 závitů + 1 poloha s 26 závitů.

Cívka B vinuta na cívku C, od cívky C izolována prokladem tří vrstev drážkové izolace EA 0,3 mm.

Každá poloha cívek A a B je proložena lakovanou skelnou tkaninou v tloušťce 0,2 mm, odbočky vyvedeny vlastním vodičem.

Cívka C: 4 polohy po 16 závitů, polohy neprokládané.

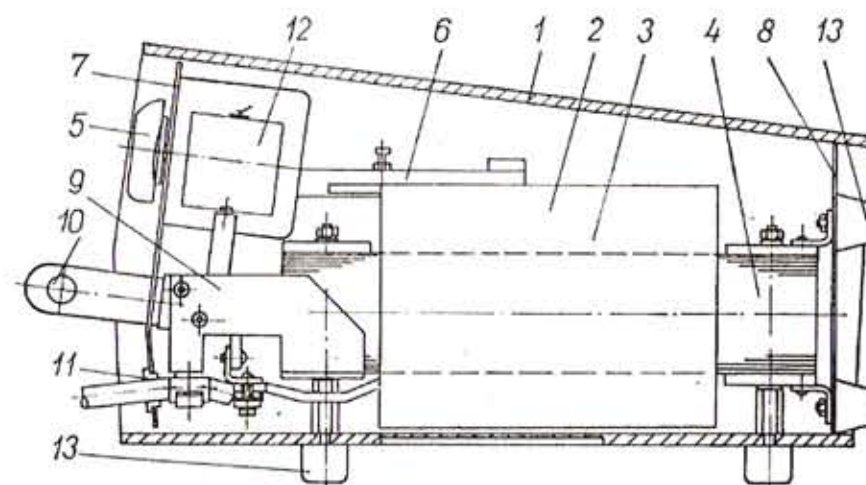
Impregnace lakem S 1901 ve vakuu.

Kryt se zhotoví z izolačního materiálu. Při navrhování krytu a stahovací konstrukce je nutné dbát zásad uvedených v čl. 6.1c.

Vypínač a přepínač odboček 16 A/380 V.

Příklad možného uspořádání transformátoru a umístění v krytu je na obr. 128.

Zvětšení výkonu transformátoru při trvalém zatížení lze dosáhnout nuceným chlazením pomocí malého ventilátoru.



Obr. 128. Ukázka umístění transformátoru v krytu
1 kryt (skelný laminát), 2 a 3 vinutí, 4 jádro, 5 přepínač, 6 tepelná ochrana, 7 přední stěna, 8 zadní stěna, 9 konzola, 10 rukojeť, 11 průchodky kabelů, 12 odrušovací kondenzátor, 13 izolační nožky

6.3. PŘÍKLAD NÁVRHU TRANSFORMÁTORU S POSUVNÝMI CÍVKAMI

Zadání: Máme navrhnout svařovací transformátor s posuvnými cívkami. Výstupní napětí naprázdno 80 V, výstupní proud 200 A při zatěžovateli 60 % a 160 A při zatěžovateli 100 %, rozsah nastavení výstupního proudu 60 až 240 A, vstupní napětí 380 V. Třída izolace B.

Řešení: Vzhledem k jednoduššímu řešení pohybového mechanismu se volí plášťový typ transformátoru s magnetickým obvodem složeným ze dvou rámových jader, mezi nimiž je umístěn pohybový šroub.

Rozsah nastavení výstupního proudu 1 : 4 je pro transformátor s posuvnou cívkou příliš velký, je proto rozdělen do dvou stupňů s použitím přídatné sériové tlumivky.

Určení potřebné reaktance tlumivky

Rozptylová reaktance X_{rmin} pro maximální výstupní proud (240 A) a celková reaktance $X_{rmax} + X_L$ pro minimální proud (60 A) se určí z rovnice (72). Pro jednoduchost se předpokládá, že poměr maximálního a minimálního výstupního proudu je stejný jako poměr příslušných proudů nakrátko. Potom je hloubka regulace

$$k_r = \frac{I_{kmax}}{I_{kmin}} = \frac{X_{rmax} + X_L}{X_{rmin}} \quad (179)$$

kde X_L je reaktance tlumivky,

X_{rmin} rozptylová reaktance transformátoru při minimální vzdálenosti cívek,

X_{rmax} rozptylová reaktance transformátoru při cívkách oddálených na největší vzdálenost.

Předpokládáme-li, že největší proud prvního rozsahu nastavení je stejný jako nejmenší proud druhého rozsahu, je

$$X_{rmin} + X_L = X_{rmax} \quad (180)$$

Spojením (179) a (180) dostaneme

$$X_L = \frac{X_{rmin}}{2} (k_r - 1) \quad (181)$$

Pro zajištění překrytí obou rozsahů nastavení se volí X_L menší a X_{rmax} větší než vypočítané hodnoty.

Výpočet potřebných reaktancí

Pro 60 A; 22,4 V

$$X_{rmax} + X_L = \frac{\sqrt{80^2 - 22,4^2}}{60} \doteq 1,28 \, \Omega$$

Pro 240 A; 29,6 V

$$X_{rmin} = \frac{\sqrt{80^2 - 29,6^2}}{240} \doteq 0,31 \, \Omega$$

Z rovnice (181)

$$X_L = \frac{0,31}{2} (4 - 1) = 0,465 \, \Omega$$

$$X_{rmax} = 1,28 - 0,465 = 0,815 \, \Omega$$

Volíme

$$X_{rmax} = 0,95 \, \Omega$$

$$X_{rmin} = 0,30 \, \Omega$$

$$X_L = 0,45 \, \Omega$$

Potom je rozsah proudu v 1. stupni

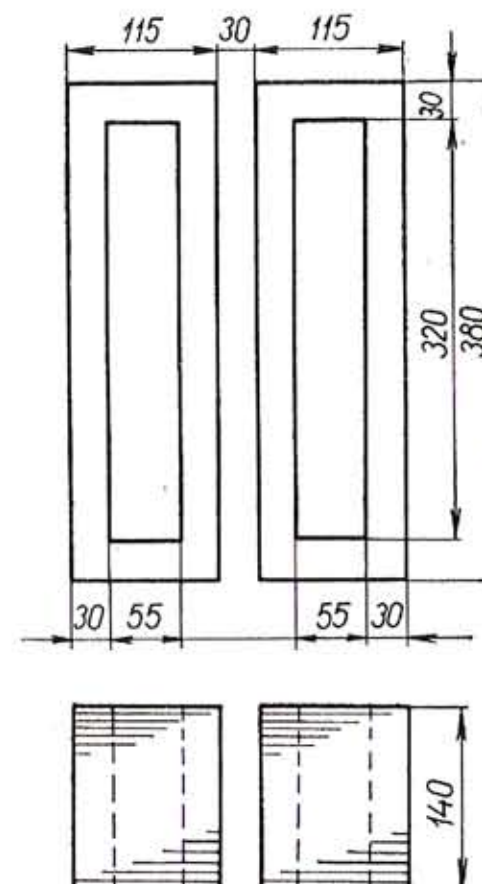
$$I'_{2min} = \frac{\sqrt{80^2 - 22^2}}{1,4} = 55 \, A$$

$$I'_{2max} = \frac{\sqrt{80^2 - 24^2}}{0,75} = 102 \, A$$

Ve 2. stupni

$$I''_{2min} = \frac{\sqrt{80^2 - 23^2}}{0,95} = 81 \, A$$

$$I''_{2max} = \frac{\sqrt{80^2 - 30^2}}{0,3} = 247 \, A$$



plech Et 1,3/0,5 mm : 1100 ks 30 x 350 (mm)
1100 ks 30 x 85 (mm)

Obr. 129. Rozměrový náčrtek jádra transformátoru s posuvnou cívkou

Volba průřezu železa

Zdánlivý výkon transformátoru při trvalém zatížení

$$S = 160 \cdot 80 = 12\,800 \, V \cdot A$$

Z rovnice (109c)

$$S_z = 25 \sqrt{12,8} \doteq 89 \, \text{cm}^2$$

Volíme 80 cm².

Magnetický obvod je sestaven ze dvou jader 30 x 140 (mm) (obr. 129), průřez jádra je 84 cm².

Průřez jádra při plnění 0,92 je

$$S_z = 84 \cdot 0,92 = 78 \, \text{cm}^2$$

Počet závitů vstupního vinutí (magnetická indukce 1,3 T)

$$N_1 = \frac{380}{222 \cdot 1,3 \cdot 78 \cdot 10^{-4}} \doteq 168$$

Počet závitů výstupního vinutí

$$N_2 = 168 \frac{80}{380} \doteq 36$$

Vstupní proud při trvalém zatížení

$$I_{1t} = 160 \frac{36}{168} = 34,3 \text{ A}$$

Průřez vodiče vstupního vinutí při hustotě proudu 3 A/mm²

$$s_1 = \frac{34,3}{3} = 11,4 \text{ mm}^2$$

Volíme pás Cu 2KT 2,8×4 (mm), (3,12×4,32 (mm) s izolací), průřez 10,65 mm². Průřez vodiče výstupního vinutí při hustotě proudu 3 A/mm²

$$s_2 = \frac{160}{3} = 53,3 \text{ mm}^2$$

Volíme pás Cu 2KT 3×9 (mm), (3,37×9,37 (mm) s izolací), 2× paralelně, průřez 2×26,14 mm².

Cívka vstupního vinutí: 14 poloh po 12 závitech (obr. 130).

Délka cívky $l_c = (12 + 1) \cdot 4,32 \doteq 57 \text{ mm}$.

Tloušťka cívky $a_c = 14 \cdot 3,12 \doteq 45 \text{ mm}$.

Odbočka na 156. závitě pro snížené vstupní napětí 350 V. Cívka výstupního vinutí: 6 poloh po 6 závitech (obr. 131).

$$l_c = (6 + 1) \cdot 9,37 \doteq 66 \text{ mm}$$

$$a_c = 6 \cdot 2 \cdot 3,37 \doteq 41 \text{ mm}$$

Obě cívky jsou vinuty bez prokladů.

Potřebná šířka oken jádra je 55 mm, mezera mezi jádrem a cívkou je 5 mm.

Rozměry pro výpočet rozptylové reaktance označené podle obr. 114 až 116 a 118 jsou

$$m = 140 \text{ mm}, n = 55 \text{ mm}, h_1 = 57 \text{ mm}, h_2 = 66 \text{ mm}$$

$$c_1 = 45 + 5 = 50 \text{ mm}, c_2 = 41 + 5 = 46 \text{ mm}$$

Střední délka závitu

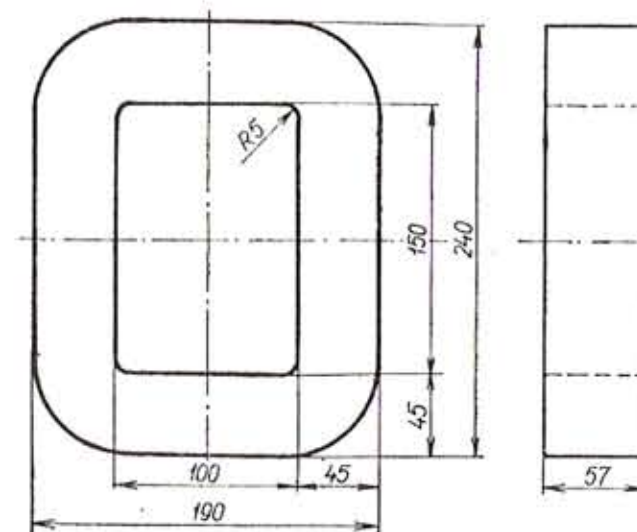
$$l_z = 2(0,09 + 0,14) + 2\pi \cdot 0,025 \doteq 0,62 \text{ m}$$

Poměr

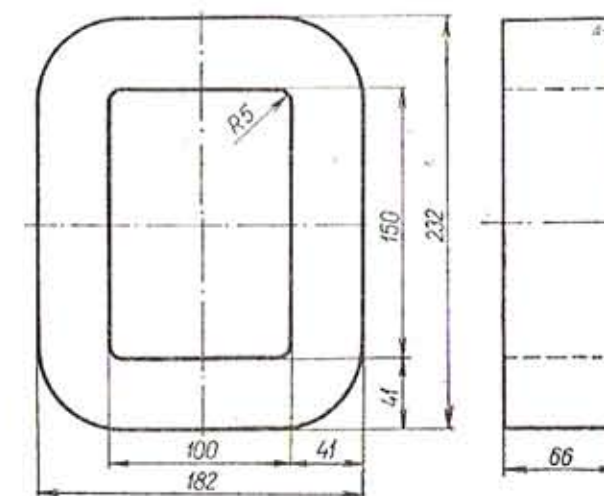
$$\frac{m}{n} = \frac{140}{55} = 2,55$$

Z obrázku 118 je $\lambda = 4,7$, část střední délky závitu

$$l_{zo} = 2 \cdot 0,05 \cdot 4,7 = 0,52 \text{ m}$$



Obr. 130. Rozměrový náčrtek cívky vstupního vinutí. Vývody nejsou zakresleny



Obr. 131. Rozměrový náčrtek cívky výstupního vinutí. Vývody nejsou zakresleny

Z rovnic (137) určíme

$$l_{zv} = 0,62 - 0,52 = 0,1 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 0,223 (2 \cdot 0,05 + 0,057) \doteq 0,035$$

$$\lambda_2 = 0,223 (2 \cdot 0,046 + 0,066) \doteq 0,035$$

$$c = \frac{50 + 46}{2} \cdot 10^{-3} = 0,048 \text{ m}$$

$$h = \frac{57 + 66}{2} \cdot 10^{-3} \doteq 0,062 \text{ m}$$

$$\lambda_{12} = 2 \cdot 0,048 \left(0,22 + 0,75 \frac{62}{96} \right) \doteq 0,0675$$

$$X_{vmin} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot 314 \cdot 36^2 \cdot 0,1 \cdot \ln \frac{0,0675^2}{0,035^2} \doteq 0,0214 \Omega$$

$$X_{omin} = \frac{2}{3} \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 36^2 \cdot 4,7 (0,057 + 0,066) \doteq 0,197 \Omega$$

$$X_{min} = 0,197 + 0,0214 \doteq 0,218 \Omega$$

Z rovnice (135) určíme rozptylovou reaktanci

$$X_r = 2 \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 36^2 \cdot 4,7 \cdot a + 0,218 = \\ = 4,8a + 0,218 \quad (\Omega; \text{m})$$

Při požadavku $X_{r\min} = 0,3 \Omega$ je

$$a_{\min} = \frac{0,3 - 0,218}{4,8} \doteq 0,017 \text{ m}$$

Výsledek vyhovuje, neboť lze předpokládat $a_{\min} \doteq 10 \text{ mm}$. Při požadavku $X_{r\max} = 0,95 \Omega$

$$a_{\max} = \frac{0,95 - 0,218}{4,8} \doteq 0,152 \text{ m}$$

Výška okna jádra

$$h_j = 0,152 + 0,057 + 0,066 \doteq 0,275 \text{ m}$$

Výšku okna jádra volíme 320 mm.

Kontrola oteplení

Dovolená nejvyšší teplota pro izolační třídu B je 120 °C. Poměr odporů měděného vodiče při 120 °C a při 20 °C je

$$\frac{R_{120}}{R_{20}} = 1,39$$

Odpor vstupního vinutí při 120 °C

$$R_1 = 0,018 \cdot 1,39 \frac{168 \cdot 0,62}{10,65} \doteq 0,243 \Omega$$

Odpor výstupního vinutí při 120 °C

$$R_2 = 0,018 \cdot 1,39 \frac{36 \cdot 0,62}{2 \cdot 35,14} \doteq 0,0106 \Omega$$

Výpočet činitelů přídavných ztrát

Z rovnice (144) je délka střední rozptylové silové čáry

$$l_r = \frac{314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 36^2}{0,218} \cdot 0,62 \frac{0,057 + 0,066}{2} \doteq 0,06 \text{ m}$$

Vstupní vinutí

Při označení podle obr. 98 je $m = 14$, $n = 12$, $b = 2,8 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$. Z rovnice (102) je redukována výška vodiče

$$\xi_1 = 100 \cdot 0,004 \sqrt{\frac{14 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}}{0,06}} \doteq 0,194$$

Podle (104) je činitel přídavných ztrát

$$k_{p1} = 1 + \frac{12^2 - 0,2}{9} 0,194^4 \doteq 1,228$$

Výstupní vinutí

Podle obrázku 98

$$m = 6, n = 6, b = 3 \text{ mm}, h = 9 \text{ mm}$$

$$\xi_2 = 100 \cdot 0,009 \sqrt{\frac{6 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0,06}} \doteq 0,493$$

$$k_{p2} = 1 + \frac{6^2 - 0,2}{9} 0,493^4 \doteq 1,235$$

Ztráty ve vstupním vinutí

$$P_{z1} = 0,243 \cdot 1,228 \cdot 34,3^2 = 350 \text{ W}$$

Ztráty ve výstupním vinutí

$$P_{z2} = 0,0106 \cdot 1,235 \cdot 160^2 = 335 \text{ W}$$

Rychlost chladicího vzduchu se předpokládá 4 m/s; podle obr. 100 je

$$\alpha = 41 \text{ W/K} \cdot \text{m}^2$$

Chladicí plochy vinutí

Vstupní vinutí

$$S_{c1} = 2 \cdot 0,62 \cdot 0,045 + [2(0,09 + 0,14) + 2\pi \cdot 0,05] \cdot 0,057 \doteq 0,1 \text{ m}^2$$

Výstupní vinutí

$$S_{c2} = 2 \cdot 0,62 \cdot 0,041 + [2(0,09 + 0,14) + 2\pi \cdot 0,046] \cdot 0,066 \doteq 0,1 \text{ m}^2$$

Oteplení vstupního vinutí

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{350}{41 \cdot 0,1} = 85 \text{ K}$$

Oteplení výstupního vinutí

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{335}{41 \cdot 0,1} = 82 \text{ K}$$

Předběžné zjištěné hodnoty oteplení jsou blízké dovolenému oteplení 80 °C pro třídu izolace B; návrh vinutí se nemění.

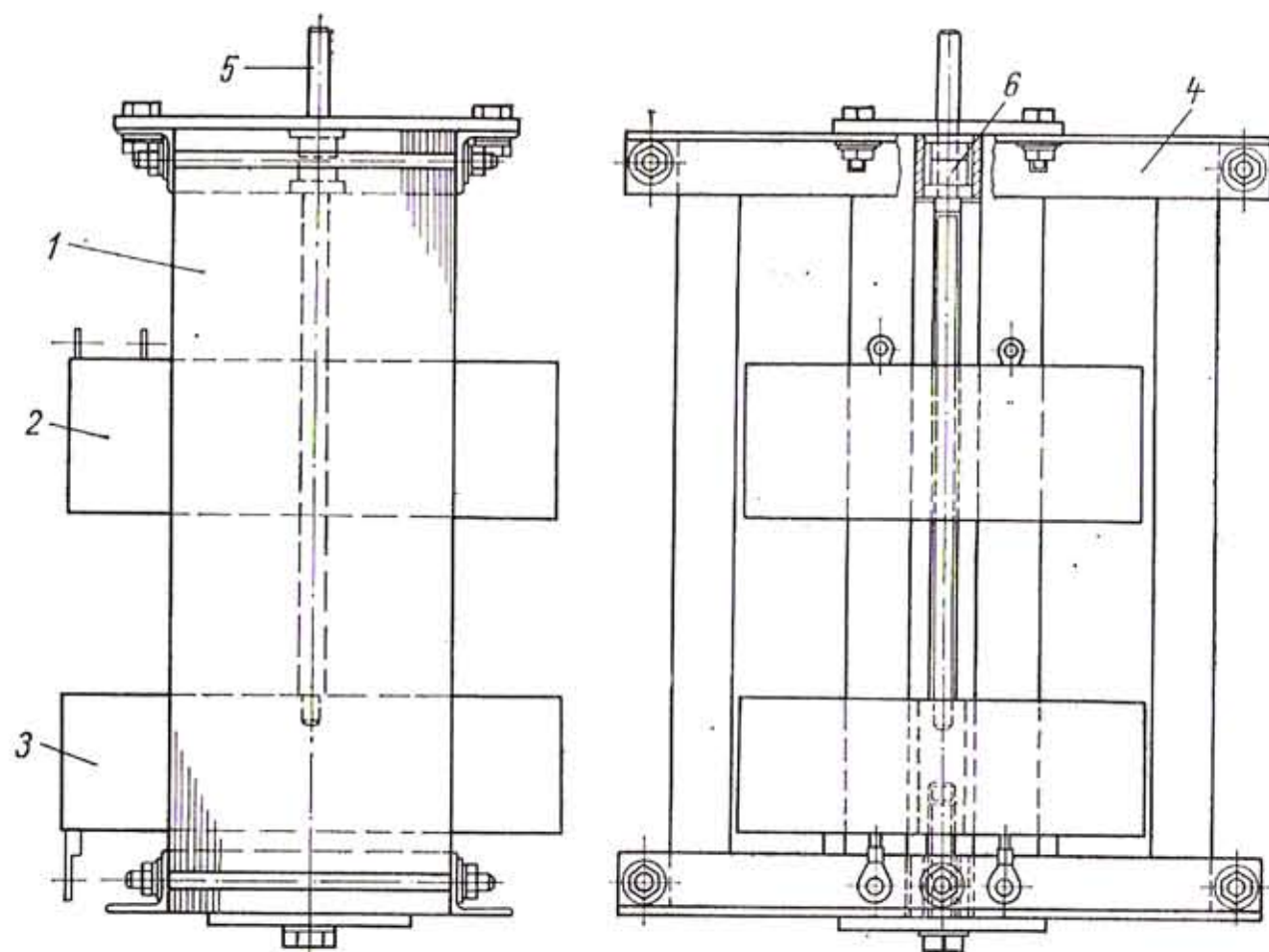
Hmotnosti aktivních materiálů transformátoru (rozměry v dm) jsou

$$G_z = 7,8 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot 1,4 (1,15 + 3,2) \cdot 2 \approx 57 \text{ kg}$$

$$G_{Cu1} = 8,9 \cdot 10,65 \cdot 10^{-4} \cdot 168 \cdot 6,2 \approx 10,5 \text{ kg}$$

$$G_{Cu2} = 8,9 \cdot 2 \cdot 26,14 \cdot 10^{-4} \cdot 36 \cdot 6,2 \approx 11 \text{ kg}$$

Náčrt sestavení transformátoru je na obr. 132.



Obr. 132. Náčrt sestavení transformátoru s posuvnou cívkou
1 jádro, 2 vstupní vinutí, 3 výstupní vinutí, 4 stahovací úhelník,
5 pohybový šroub, 6 axiální ložisko

Návrh tlumivky

Požadovaná reaktance $0,45 \Omega$; proud 100 A při trvalém zatížení. Z rovnice (147) je napětí na tlumivce

při 55 A , 22 V

$$U_L = \sqrt{80^2 - 22^2} - 0,95 \cdot 55 \approx 25 \text{ V}$$

při 100 A , 24 V

$$U_L = \sqrt{80^2 - 24^2} - 0,3 \cdot 100 \approx 46 \text{ V}$$

Pro návrh je nutné uvažovat $U_L = 46 \text{ V}$.

Magnetický obvod tvoří jádro C typu 40 003, průřez $50 \times 50 \text{ (mm)}$, čistý průřez železa $22,5 \text{ cm}^2$, rozměr okna $40 \times 140 \text{ (mm)}$, hmotnost $9,5 \text{ kg}$.

Volí se magnetická indukce $1,2 \text{ T}$. Počet závitů

$$N = \frac{46}{222 \cdot 1,2 \cdot 22,5 \cdot 10^{-4}} \approx 78$$

Volíme pás Cu 2KT $3 \times 9 \text{ (mm)}$ ($3,37 \times 9,37 \text{ (mm)}$).

Na každém sloupku je jedna cívka vinutá ve 3 vrstvách po 13 závitěch bez prokladů, obě cívky jsou spojeny do série. Délka cívky

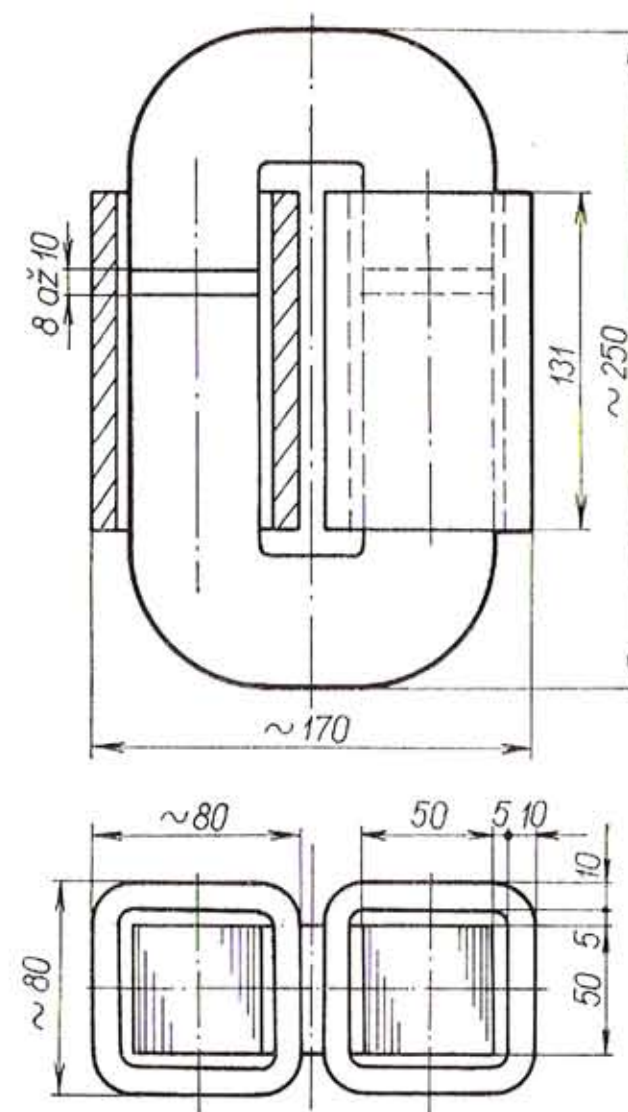
$$l_c = (13 + 1) \cdot 9,37 = 131 \text{ mm}$$

Tloušťka cívky

$$a_c = 3 \cdot 3,37 \approx 10 \text{ mm}$$

Mezera mezi jádrem a vinutím je 5 mm .

Náčrtek tlumivky je na obr. 133.



Obr. 133. Rozměrový náčrtek tlumivky

Střední délka závitu

$$l_z = 4 \cdot 0,05 + 2\pi \cdot 0,01 \doteq 0,263 \text{ m}$$

Délka povrchu vrchního závitu

$$l_{zp} = 4 \cdot 0,05 + 2\pi \cdot 0,015 \doteq 0,295 \text{ m}$$

Odpor vinutí při 120 °C

$$R_{120} = 0,018 \cdot 1,39 \frac{78 \cdot 0,263}{26,14} \doteq 0,0196 \Omega$$

Ztrátový výkon při 20 % přídatných ztrát (odhad)

$$P_z = 0,0196 \cdot 1,2 \cdot 100^2 = 235 \text{ W}$$

Chladicí plocha

$$S_c = 0,131 \cdot 0,295 \cdot 2 + 0,01 \cdot 0,263 \cdot 4 \doteq 0,087 \text{ m}^2$$

Oteplení při rychlosti chladicího vzduchu 4 m/s

$$\Delta\vartheta = \frac{235}{41 \cdot 0,087} = 66 \text{ K}$$

Hmotnost vinutí

$$G_{Cu} = 8,9 \cdot 78 \cdot 2,63 \cdot 26,14 \cdot 10^{-4} \doteq 5 \text{ kg}$$

Z rovnice (153) se vypočítá vzduchová mezera

$$\Sigma l_v = \frac{50 \cdot 78^2 \cdot 22,5}{0,45} \cdot 10^{-9} \doteq 15,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Volíme 2 mezery po 8 mm, celková mezera 16 mm.

Kontrola reaktance

Z rovnice (149)

$$S_v = 25 \cdot 10^{-4} + 1,3 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \sqrt{25 \cdot 10^{-4}} \doteq 30 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S' = 4 \cdot 0,05 \cdot 0,005 + \pi \cdot 0,005^2 \doteq 11 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_c = 0,263 \cdot 0,01 \doteq 26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Reaktance vinutí na jednom sloupku jádra je

$$X_{L1} = \frac{8\pi^2 \cdot 50 \cdot 39^2}{10^7} \left[\frac{30 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-3}} + \frac{11 \cdot 10^{-4}}{0,131} + \frac{26 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 0,131} \right] \doteq 0,235 \Omega$$

Reaktance tlumivky je

$$X_L = 2 \cdot 0,235 = 0,47 \Omega$$

Reaktance se v případě potřeby doladí změnou velikosti vzduchové mezery.

Souhrn údajů o navrženém svařovacím transformátoru

Transformátor

Vstupní napětí 380 V

Vstupní proud: asi 35 A při zatěžení 100 %

asi 42 A při zatěžení 60 %

Výstupní napětí naprázdno 80 V

Výstupní proud: 160 A při zatěžení 100 %

200 A při zatěžení 60 %

Rozsah nastavení výstupního proudu 60 až 240 A ve dvou stupních

1. stupeň 60 až 100 A

2. stupeň 80 až 240 A

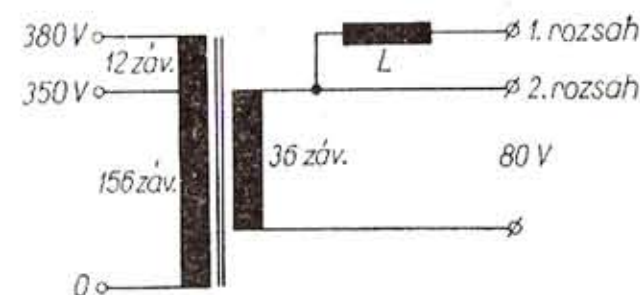
Chlazení vzduchové, nucené (pomocí ventilátoru), izolační třída B. Rozměr jádra podle obr. 129, složení jádra z plechů Et 1,3 tloušťky 0,5 mm, rozměry plechů: 30×250 (mm), 1100 ks, 30×85 (mm), 1100 ks. Obě poloviny jádra se skládají způsobem podle obr. 124a. Vstupní vinutí: 168 závitů s odbočkou na 156. závit, pás Cu 2KT 2,8×4 (mm) bez prokladů, 14 vrstev po 12 závitěch (obr. 130). Výstupní vinutí: 36 závitů, pás Cu 2KT 3×9 (mm), 2× paralelně bez prokladů, 6 vrstev po 6 závitěch (obr. 131). Pohyblivá je cívka vstupního vinutí (tenčí a poddajnější vodiče přívodu). Pohybovou matrici lze s cívkou spojit např. zalitím epoxidovou pryskyřicí s křemičitou moučkou jako plnidlem (1 díl pryskyřice, 2 díly plnidla). Směs má dobrou tepelnou vodivost, chladicí plocha se zvětší. Výstupní vinutí lze také zalít do pryskyřice nebo impregnovat lakem S 1901 ve vakuu. Sestavení transformátoru je na obr. 132.

Tlumivka

Reaktance 0,45 Ω, proud 100 A při trvalém zatížení.

Jádro C typu 40 003, průřez 50×50 (mm), okno 40×140 (mm), hmotnost 9,5 kg, mezera v jádře 2×8 mm až 2×10 mm — nastaví se podle požadované velikosti reaktance.

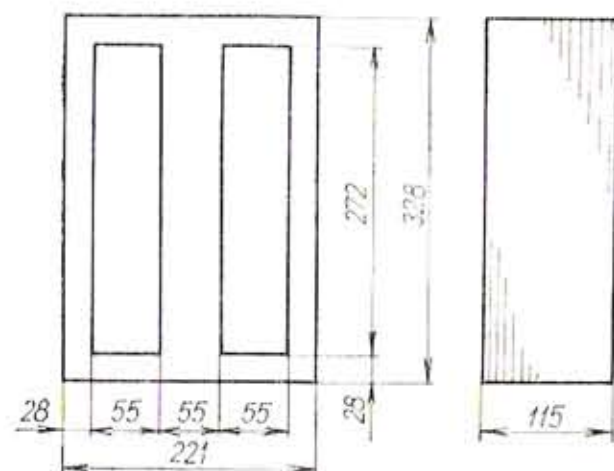
Vinutí: Na každém sloupku jádra 39 závitů, pás Cu 2KT 3×9 (mm), 3 vrstvy po 13 závitěch, bez prokladů. Obě cívky jsou spojeny do série tak, aby jejich magnetické toky procházely jádrem ve stejném směru. Náčrtek tlumivky je na obr. 133. Schéma zapojení transformátoru včetně tlumivky je na obr. 134.



Obr. 134. Schéma zapojení transformátoru s posuvnou cívkou L tlumivka

6.4. TRANSFORMÁTOR PLÁŠTOVÉHO TYPU S PŘEPÍNÁNÍM POČTU ZÁVITŮ

Základní údaje postačující pro zhotovení transformátoru jsou uvedeny bez výpočtu. Transformátor je podobně jako transformátor navržený v čl. 6.2 vhodný pro opravářské a jiné menší práce. Nevýhodou v porovnání s typem podle čl. 6.2 je větší hmotnost, výhodou je menší rozptylový tok vně jádra transformátoru.



Obr. 135. Rozměry plášťového transformátoru s přepínáním odboček vinutí

Souhrn údajů

Vstupní napětí 380 V.

Výstupní napětí naprázdno 65 až 80 V podle počtu závitů výstupního vinutí a v závislosti na poloze přepínače odboček.

Výstupní proud 50 až 120 A, proud při trvalém zatížení asi 70 A. Jádro transformátoru podle obr. 135. Plech Et 1,3 nebo Et 1,6/0,5 mm.

Plech: 300×55 (mm), 230 ks

300×28 (mm), 460 ks

165×28 (mm), 230 ks

83×28 (mm), 460 ks

Způsob skládání jádra podle obr. 124c.

Vinutí:

Cívka A — celkem 230 závitů, délka cívky maximálně 70 mm, odbočky a průřezy drátu podle obr. 136.

Cívka B — celkem 238 závitů, délka cívky maximálně 70 mm, drát \varnothing 2,5 mm, odbočky podle obr. 136.

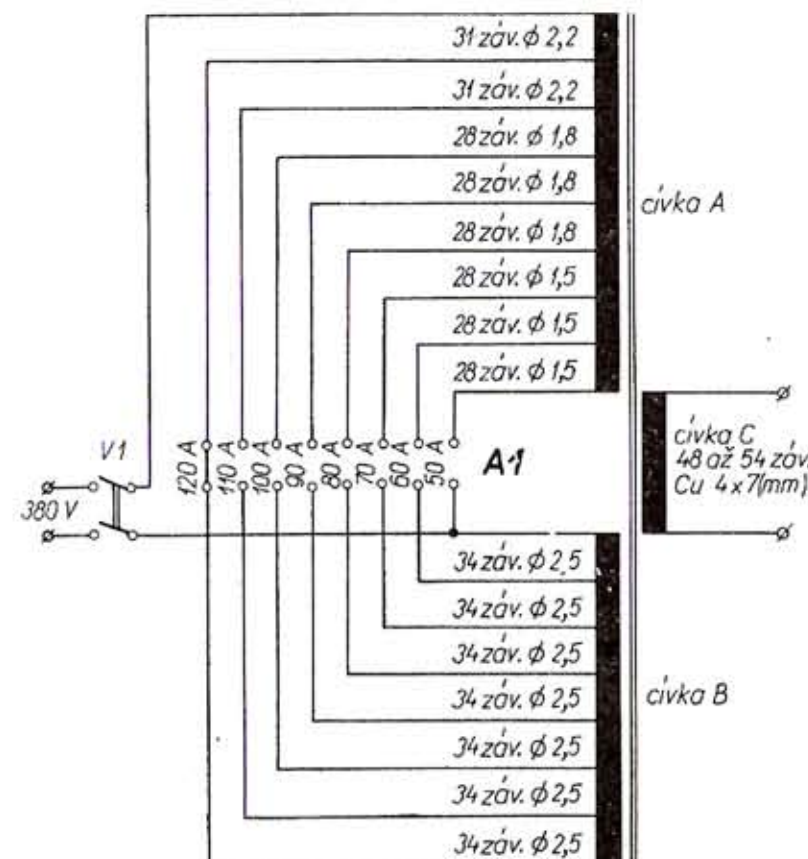
Cívka C — výstupní vinutí — 48 až 54 závitů pásem Cu 2KT 4×7 (mm), délka cívky maximálně 75 mm (6 vrstev po 8 nebo 9 závitěch).

Zapojení transformátoru podle obr. 136.

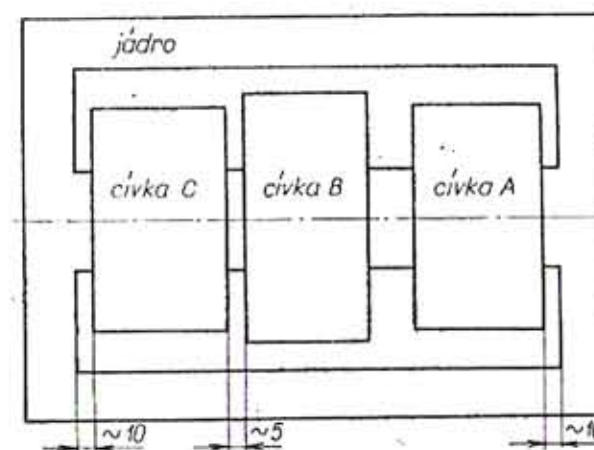
Umístění cívek na jádře podle obr. 137.

Transformátor se dobře osvědčil. Má-li výstupní vinutí 54 závitů, lze s úspěchem svařovat s bazickými elektrodami E-B 121 (E 44.83).

Rozsah nastavení svařovacího proudu lze rozšířit směrem k menším proudům umístěním dvou magnetických bočníků do oken jádra mezi cívky A a B (obr. 137). Průřez každého bočnicku bude přibližně stejný jako průřez krajního sloupku jádra transformátoru, celková mezera mezi bočníkem a jádrem bude 5 až 10 mm (se zmenšováním mezery se zmenšuje velikost minimálního výstupního proudu a zhoršují se svařovací vlastnosti v oblasti menších proudů). Na velikost maximálního výstupního proudu má instalace bočníků jen malý vliv. Jednotlivé bočníky lze realizovat např. složením 40 transformátorových plechů 160×50×0,5 (mm).



Obr. 136. Schéma zapojení plášťového transformátoru s přepínáním odboček vinutí



Obr. 137. Umístění cívek na jádře

7. Zkoušení svařovacích transformátorů a transformátorků

Zkouškami se zabývá IV. část norem ČSN 05 2205, ČSN 05 2210 a ČSN 05 2211. Účelem zkoušek je zjistit, zda svařovací transformátor vyhovuje předepsaným podmínkám konstrukce, rozměrů, jakosti materiálu, funkčního seřízení a bezpečnosti a vlastnostem vhodným pro žádané použití. Zkoušky se dělají z různých hledisek, avšak nejrozsáhlejší a nejdůležitější je zkouška typová. Její podmínky, postup, rozsah a pořadí jednotlivých dílčích zkoušek jsou přesně předepsány uvedenými normami a s nimi souvisejícími normami (např. ČSN 34 5608 a ČSN 35 1080, kde jsou uvedeny metodické pokyny pro zkoušky), popř. doplňky norem.

Podle zákona č. 30/68 Sb. o státním zkušebnictví byla Úřadem pro normalizaci a měření Praha a VÚZ Bratislava zřízena Státní zkušebna č. 225, která má hodnotit všechny typy vyráběných svařovacích zařízení v ČSSR.

Při hodnocení Státní zkušebna srovnává vlastnosti typu hodnoceného výrobku s požadavky, které sama stanovila a oznámila výrobcí před hodnocením. O výsledku hodnocení vydá Státní zkušebna rozhodnutí, jímž zařadí výrobek do jednoho ze tří stupňů jakosti.

Výrobek, který splňuje stanovené požadavky, zařadí do druhého stupně jakosti. Výrobek, který se navíc svými vlastnostmi plně vyrovná srovnatelným výrobkům světové úrovně nebo je předčí, zařadí do prvního stupně. Výrobek, který stanovené požadavky nesplňuje, zařadí do třetího stupně jakosti. Výrobky zařazené do prvního stupně jakosti se cenově zvýhodňují a naopak u výrobků zařazených do třetího stupně jakosti je cenové znevýhodnění formou slevy nebo dodatkového odvodu.

V ČSN 05 2210 má typová zkouška podle tab. 4 dvacet dílčích měření a kontrol, v ČSN 05 2211 podle tab. 4 má devatenáct dílčích měření a kontrol. Všechny jsou dostatečně určeny, pouze náplně bodu 19 v první normě a bodu 14 ve druhé normě, které se týkají kontroly nebo zkoušky svařovacích vlastností, nebyly dosud uspokojivě specifikovány, jsou příliš všeobecné a závislé na subjektivním posudku svářeče. Podobným způsobem se zkoušejí svářečky podle [112].

V následujícím výkladu proto vysvětlíme pojem „svařovací vlastnosti“ svařovacího transformátoru a ukážeme, jak se získají podklady pro hodnocení. Co má svařovací transformátor z tohoto hlediska splňovat, bylo řečeno i v čl. 2.5, 2.6 a 3.3.

7.1. SVAŘOVACÍ VLASTNOSTI SVAŘOVACÍHO TRANSFORMÁTORU

Svařovací vlastnosti obloukových svářeček (tedy i svařovacích transformátorů) se zkoumají ve světě jednak v rámci speciální komise Mezinárodního svářečského institutu (IIW; [64]; [67]), jednak pod vedením zvláštní komise pro technickou spolupráci v RVHP. Zástupci ČSSR pracují v obou komisích. Problematika není jednoduchá a ke konečným výsledkům se dospěje až za několik let [112].

Protože svařovací vlastnosti svařovacích transformátorů podstatně ovlivňují jejich použitelnost, věnovala se nezávisle na uvedených institucích jejich výzkumu a návrhu metod pro hodnocení řada autorů, jejichž veškeré poznatky jsou zachyceny např. v [4], [8], [21], [29], [31], [60] až [63], [65], [66], [68], [69], [95].

Dobrymi svařovacími vlastnostmi svářečky všeobecně se míní vzájemná vazba mezi tvarem dynamických a statických charakteristik v celém svařovacím rozsahu, která zaručuje jednak spolehlivé zapálení oblouku a jeho stabilní hoření během svařovacího procesu, jednak přenos kovu s malou ztrátou. Dále se žádá, aby byl oblouk dostatečně pružný, pokud jde o náhlé změny jeho délky, tj. aby bylo možné přiměřené oddálení konce elektrody od základního materiálu, aniž by se oblouk přetrhl, nebo přiblížení, aniž by oblouk zhasl.

Některá tato hlediska je nutné nejprve objektivně posoudit pouze s ohledem na svařovací transformátor, nikoliv tedy na svařovací vlastnosti přídavného materiálu (např. ruční elektrody ČSN 05 5010) a na ostatní složky, jako jsou druh základního materiálu, polohy svaru, osoba svářeče apod. Děje se tak získáním dynamických charakteristik pomocí osciloskopu, jak bylo popsáno v čl. 3.3 (obr. 24 a 25), a statických charakteristik změřených podle ČSN 05 2210, čl. 95.

V druhé fázi kontroly se určí, zda je svářečka vhodná pro určitý druh přídavného materiálu, který na ni klade velké nároky a který se ve velkém množství používá v praxi. Při kontrole je třeba zpočátku vyloučit subjektivní vliv svářeče, jde-li např. o elektrody pro ruční svařování. Řešením je svařování pomocí pevné svařovací hlavy s regulací podle napětí na oblouku (obr. 141 vlevo). Rovněž držák wolframové elektrody pro metodu WIG lze upevnit na hlavu automatu. V obou případech se pod obloukem pohybuje konstantní rychlostí v_s vozík s přichycenou deskou základního materiálu. Podklady pro hodnocení stability a pružnosti oblouku a ztráty kovu se získají registrací napětí na oblouku u_0 a svařovacího proudu i_2 nebo oscilografickým u_0 , i_2 a výkonu oblouku p_2 nebo i vážením ztráty kovu a stanovením výtěžku η_j podle ČSN 05 5010. Pružnost oblouku je dána i průběhem statických charakteristik svařovacího transformátoru. Je-li statická charakteristika strmá, je oblouk pružnější. Pružnost oblouku se stanoví na svařovacím automatu délkou uhoření elektrody po zastavení jejího posuvu.

Pro kontrolu transformátoru ke svařování pod tavidlem se použije svařovací traktor pojezdějící po kolejnicích. Spolehlivost zapálení oblouku a stabilita procesu se sledují registrací a oscilografickým záznamem u_0, i_2 . Dále se na oscilogramu zaznamenává např. řídicí proud u transformátorů se stejnosměrnou magnetizací magnetického bočníku nebo napětí na kondenzátorové baterii pro kompenzaci usměrňovacího jevu u transformátorů pro metodu WIG apod.

Dynamické charakteristiky se vyhodnocují takto:

A. Z oscilografických záznamů podle obr. 24 lze zjistit největší poměrnou špičku zkratového proudu při chodu $u_{20} - i_{2k} - u_{20}$, tj. poměr

$$\kappa_0 = \frac{|I_{2d0}|}{I_{2kt}}$$

kde I_{2d0} je nárazový zkratový proud (1. amplituda po začátku zkratu) z chodu $u_{20} - i_{2k} - u_{20}$,

I_{2kt} trvalý zkratový proud (efektivní hodnota).

U dobrých svařovacích transformátorů stačí κ_0 asi 2,2. Z této hodnoty a z velikosti napětí naprázdno U_{20} na statické charakteristice se usuzuje na spolehlivost startu. Je-li U_{20} vyšší, je start spolehlivější.

B. Z oscilogramů podle obr. 25 se vypočítají největší poměrné proudové špičky zkratového proudu při chodu $u_2; i_2 - i_{2k} - u_2; i_2$, tj. poměr

$$\kappa_z = \frac{|I_{2dz}|}{I_{2kt}}$$

kde I_{2dz} je nárazový zkratový proud z chodu $u_2; i_2 - i_{2k} - u_2; i_2$. U dobrých svařovacích transformátorů bývá κ_z menší než 1,75; z této hodnoty se usuzuje na ztrátu kovu; čím je κ_z menší, tím menší je ztráta kovu.

Poznámka: Pro případy A a B je nutné vybrat z většího množství oscilogramů takové, kde $|I_{2d0}|$ a $|I_{2dz}|$ jsou největší; k tomu se osvědčil osciloskop s doznívající stopou.

C. Dále u průběhů $u_{20}, u_0, i_2, i_{2k} = f(t)$, na obr. 24 a 25 lze určit stupeň stability svařovacího procesu. Jestliže jsou průběhy těchto veličin téměř sinusové, oblouk dobře zapaluje a hoří i při svařování čs. bazickými elektrodami na stejnosměrný proud. Musí mít napětí naprázdno 75 až 80 V. Průběh se sinusoidou zkreslenou třetí harmonickou nevyhovuje pro bazické elektrody (oblouk není stabilní, zháší po delší dobu než trvá komutace při $i_2 = 0$), je pouze dostačující pro kyselé a rutilové elektrody; zapálení oblouku je obtížné.

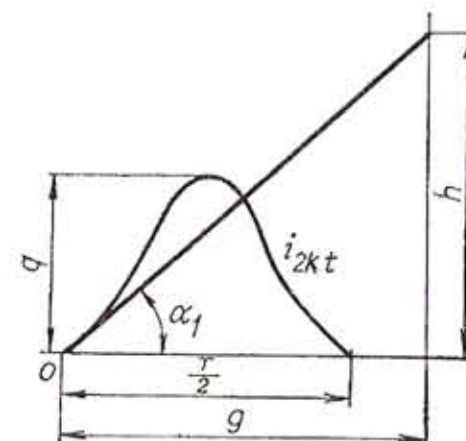
Tímto problémem se zabýval Carrer v několika studiích a se svými spolupracovníky [64] v r. 1967 navrhl kritéria „vhodnosti pro svařování“ pro svařovací transformátory takto: Ke křivce trvalého zkratového

proudu $i_{2kt} = f(t)$ (obr. 138) se v bodě 0 narysuje tečna pod úhlem α_1 .

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{h}{g}$$

Tečna k sinusovce se stejnou amplitudou q a kmitočtem f má směrnici

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \omega q \quad \left(\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \text{ viz (95)} \right)$$



Obr. 138. Průběh trvalého zkratového proudu pro hodnocení podle Carrera

Z toho Carrerův součinitel je

$$p = U_{20} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = U_{20} \frac{h \frac{T}{2}}{\pi g q} \quad (\text{V})$$

Carrer empiricky zjistil, že pro trvalý zkratový proud

$$\begin{aligned} I_{2kt} = 50 \text{ A} & \quad \text{je} \quad p_1 \leq 25 + \frac{(I_{2kt} - 50) \cdot 37,5}{125} \\ I_{2kt} = 180 \text{ A} & \quad \text{je} \quad p_2 = p_1 \\ I_{2kt} \leq 250 \text{ A} & \quad \text{je} \quad p_3 = 62,5 \text{ V} \end{aligned}$$

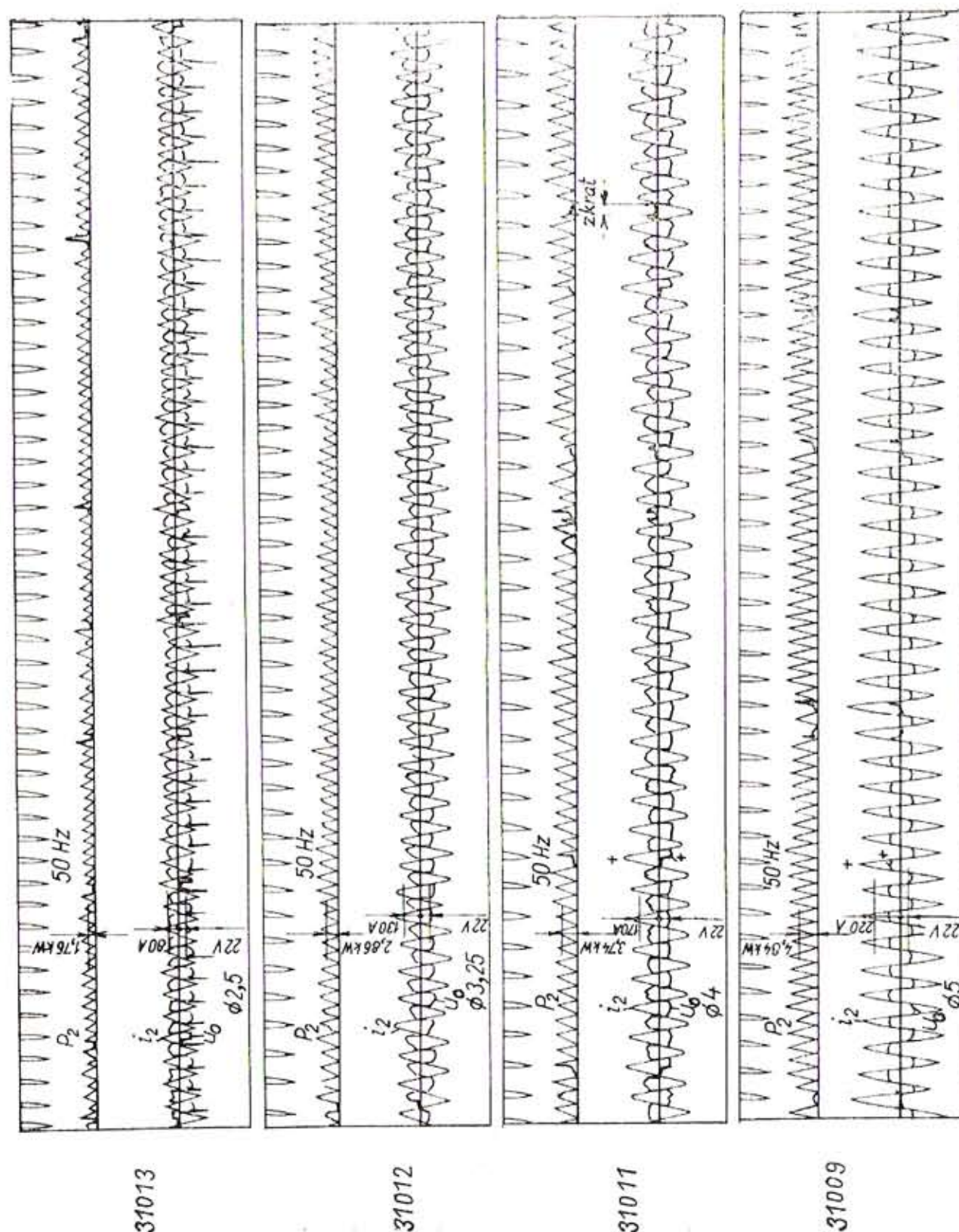
Jsou-li tyto vztahy splněny, je transformátor vhodný pro svařování.

V bývalé VZS Chotěboř byla navržena metoda používající porovnání zkoušeného svařovacího transformátoru se standardním, jehož svařovací vlastnosti jsou známy při navařování bazickými elektrodami vhodnými pro střídavý proud. Porovnává se výtěžek η_1 , zjištěný přesným vážením (což je zdlouhavé a nákladné) nebo z oscilogramů matematické naděje poměru proudových špiček $M(i_d)$ na konci zkratu kapkou (na obr. 12 je I_{2d} špička zkratového proudu).

$$M(i_d) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |I_{2di}|}{n I_2} \quad (-; \text{A}) \quad (182)$$

kde I_{2d} je špička zkratového proudu na konci zkratu kapkou,

n počet zkratů kapkou (je nutné sečíst několik set zkratů).



Obr. 139. Oscilogramy svařovacích veličin při použití transformátoru RT 200

Výhodnější se zdá být podle [26], [27], [28] matematická naděje poměrné výkonové špičky

$$M(p_a) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_{2di}}{nP_2} \quad (-; \text{ kW}) \quad (183)$$

kde P_{2d} je výkonová špička na konci zkratu kapkou,
 P_2 výkon oblouku zjištěný měřením I_2 a U_o .

Na obr. 139 jsou zachyceny oscilogramy časových průběhů svařovacích veličin pro vyznačené průměry elektrod pro střídavý proud firmy Böhler (Rakousko), typu FOX EV-50 A, při navařování vodorovně shora transformátorem RT 200 s posuvnými cívkami (čl. 3.3). Výsledky vyhodnocení včetně $M(i_a)$, $M(p_a)$ a porovnání s transformátorem RST 350 uvádí tab. 16. RST 350 vyvinul VÚSSTS Praha, měl rovněž posuvné cívky. Výtěžek elektrod η_j se podstatně neliší od výtěžku u transformátoru RST 350, zvoleného za standardní. Uvedenými transformátory lze uspokojivě ručně svařovat i s čs. bazickými elektrodami E-B 121 určenými pro stejnosměrný proud (kromě prvního rozsahu na RT 200, kde je proces nestabilní).

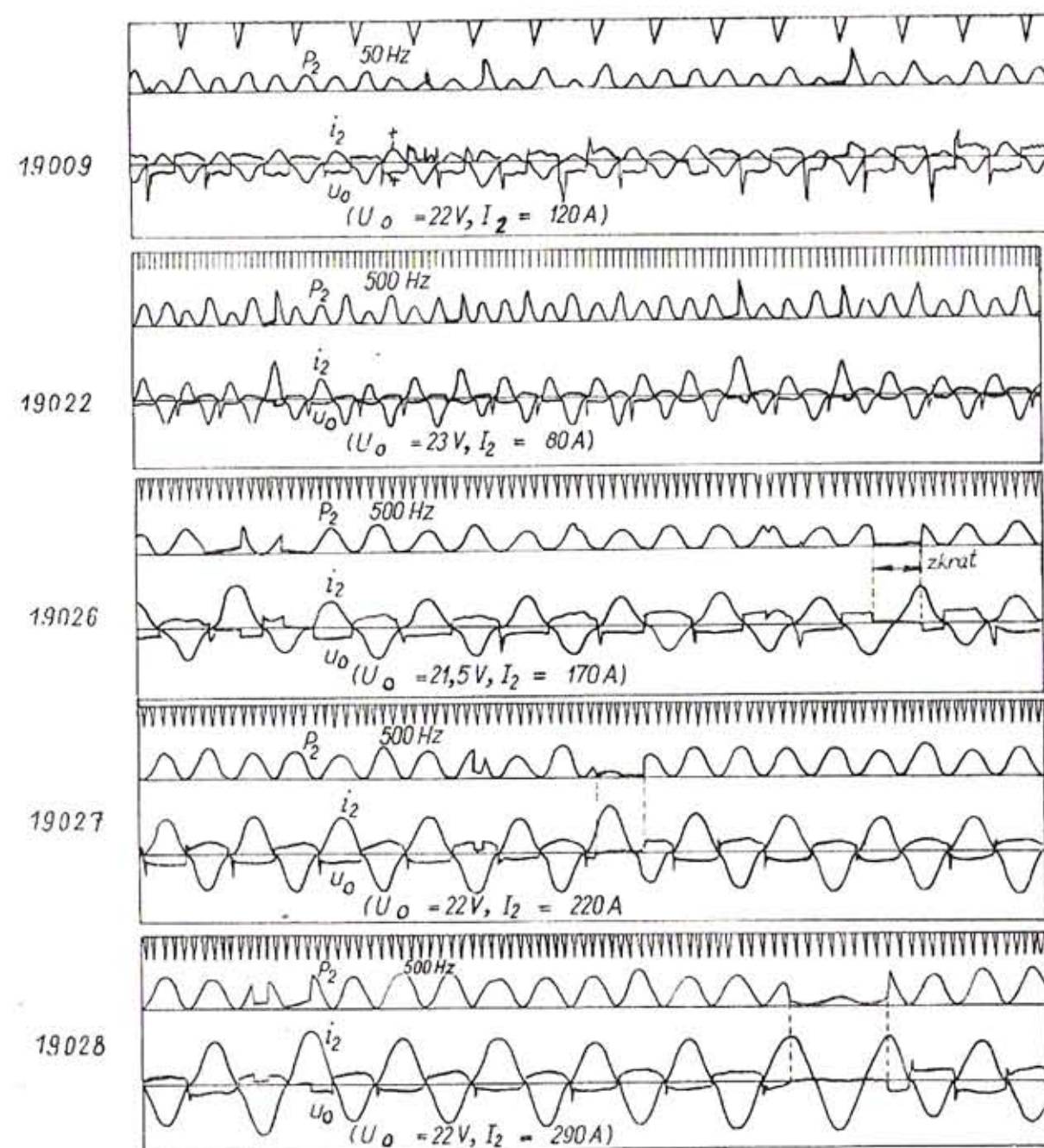
Opakem těchto dobrých transformátorů je svařovací transformátor RT 260 (vývoj MEZ Brumov, měl posuvný magnetický bočník), jehož oscilogramy jsou na obr. 140 a údaje o měření jsou v tab. 17. Výtěžek bylo možné zjistit u kyselých elektrod E-K 103, zatímco u bazických FOX EV-50 A to nebylo možné zjistit. Elektroda bazická VÚZ BS-52, určená pro střídavý proud, hořela velmi nestabilně (osci-

Tab. 16. Měření na svařovacím transformátoru RT 200 (elektrody FOX EV — 50 A). Navařováno automaticky

Měření číslo	Průměr elektrody mm	U_2 V	$I_2/\text{roz-sah}$ A	κ_z	κ_o	$M(i_a)$	$M(p_a)$	η_j	RST 350 η_j %
31013 31017b 31017c	2,5	22	80/I	1,35	2,0	2,08	1,73	119,2	119,2
31012 31014b 31014c						1,97	1,71	117,5	117,0
31011 31015b 31015c						1,77	1,29	117,6	116,0
31009 31016b 31016c	5,0	22	220/II	1,22	1,93	2,04	1,29	119,7	119,8

logram 19.009a). Bazickými elektrodami E-B 121 se nedalo vůbec navařovat. Zapalování oblouku je velmi nesnadné. Nestabilita je dána nevhodným průběhem svařování proudu i_2 (obr. 16).

Svařovací vlastnosti transformátorů pro ruční svařování se zkoušely v bývalé VZS Chotěboř na zařízení zobrazeném na obr. 141 a 142. Na prvním obrázku je vlevo automatická svařovací hlava, kterou se navařovalo shora dolů i nad hlavou, vedle je regulační skříň. Na druhém obrázku jsou zleva analyzátor proudových špiček s dekatronovými počítači, smyčkový oscilograf, čítač délky doby zkratů pro matematické naděje střední doby zkratů $M(t_z)$, popř. délky doby hoření oblouku $M(t_o)$, katodový osciloskop s doznívající stopou a registrační přístroje



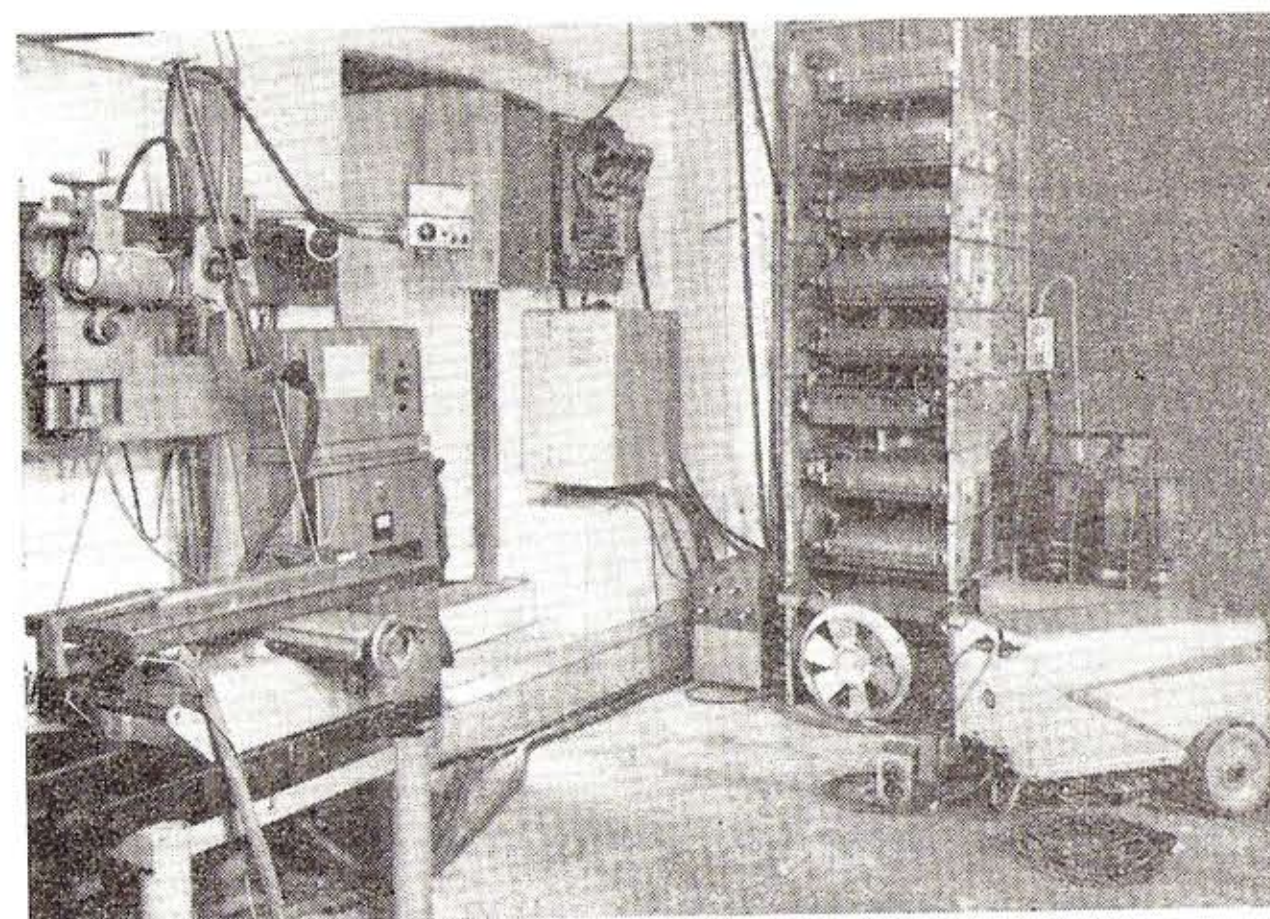
Obr. 140. Oscilogramy svařovacích veličin TR 260

Tab. 17. Měření na svařovacím transformátoru TR 260

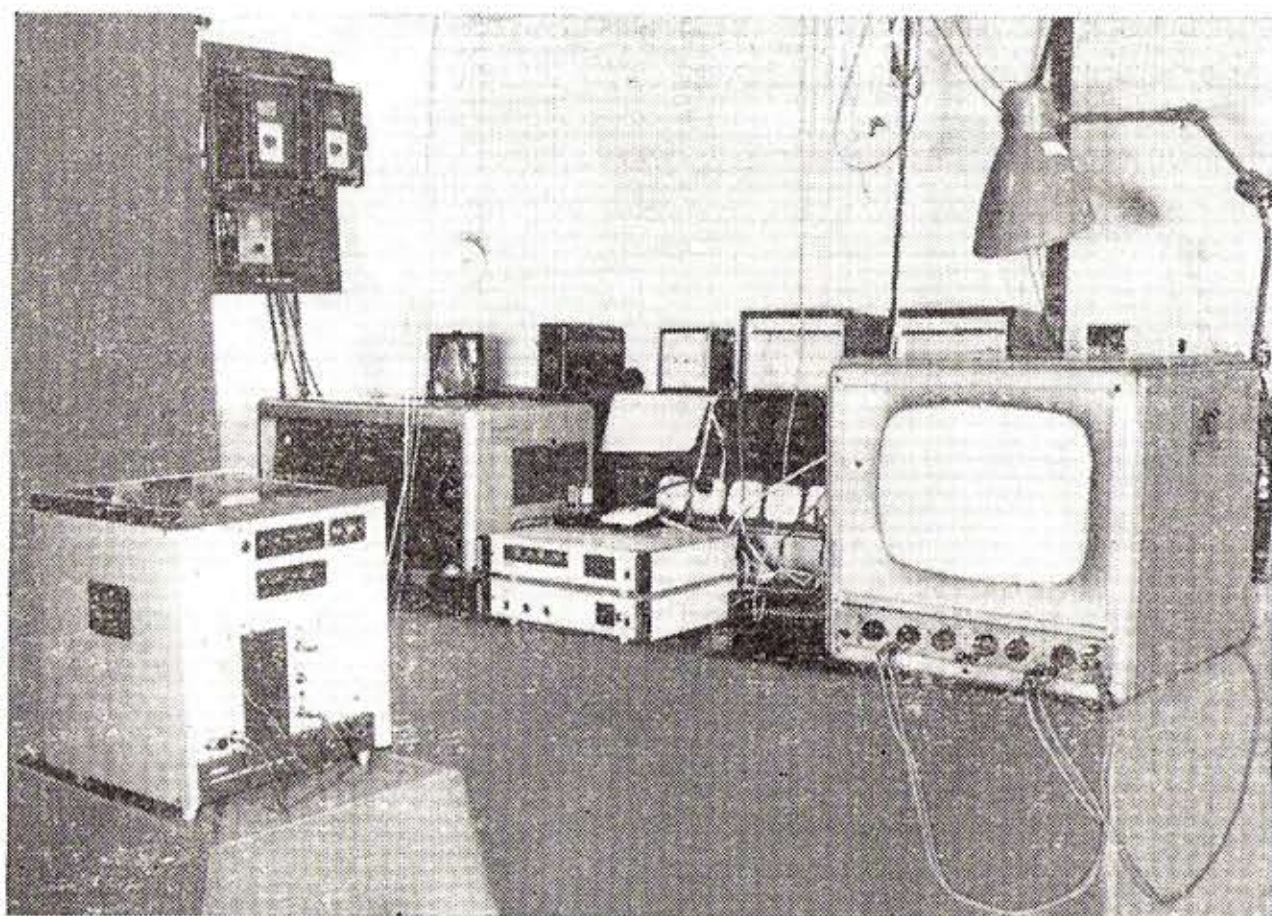
Měření číslo	Průměr elektrody mm	U_2 V	I_2 A	η_1 %	Elektroda
19006	3,15	25	145	89	E-K 103 automatem
19007	4,00	26	190	92	
19008	5,00	26	240	91	
19009a	3,15	22	120	—	VÚZ BS-52 ručně
19022a	2,5	23	80	—	FOX-EV-50 A ručně
19026a	4,0	21,5	170	—	
19027a	5,0	22	220	—	
19028a	5,0	22	290	—	

Analyzátorem proudových špiček lze bez vyhodnocování oscilogramů sečíst přímo určitý počet proudových špiček za zvolenou dobu a z toho posoudit nastavení dynamických charakteristik při svařovacím procesu a kvalitu svářečky z hlediska přenosu kovu.

Hodnoty $M(t_z)$ a $M(t_o)$ mohou sloužit při tomto hodnocení svářečky bez svařování, které lze uskutečnit pomocí náhrady zkratů kapkami



Obr. 141. Automatická hlava pro zkoušení transformátorů ke svařování ručními elektrodami



Obr. 142. Měřicí pult pro záznamy svařovacích veličin

zkraty na výkonových tyristorech se středním jmenovitým proudem 1000 až 2000 A. Trvání zkratů a fiktivního hoření oblouku se nastaví na multivibrátorech podle velikostí $M(t_z)$ a $M(t_o)$, zjištěných předem pro určité zvolené podmínky při svařování.

Výsledky z analyzátoru proudových špiček lze zapisovat elektricky spojeným psacím strojem bez odečítání a třídění do skupin. Aplikací statických metod pomocí elektronických přístrojů se zkoušení svařovacích vlastností usnadní a urychlí.

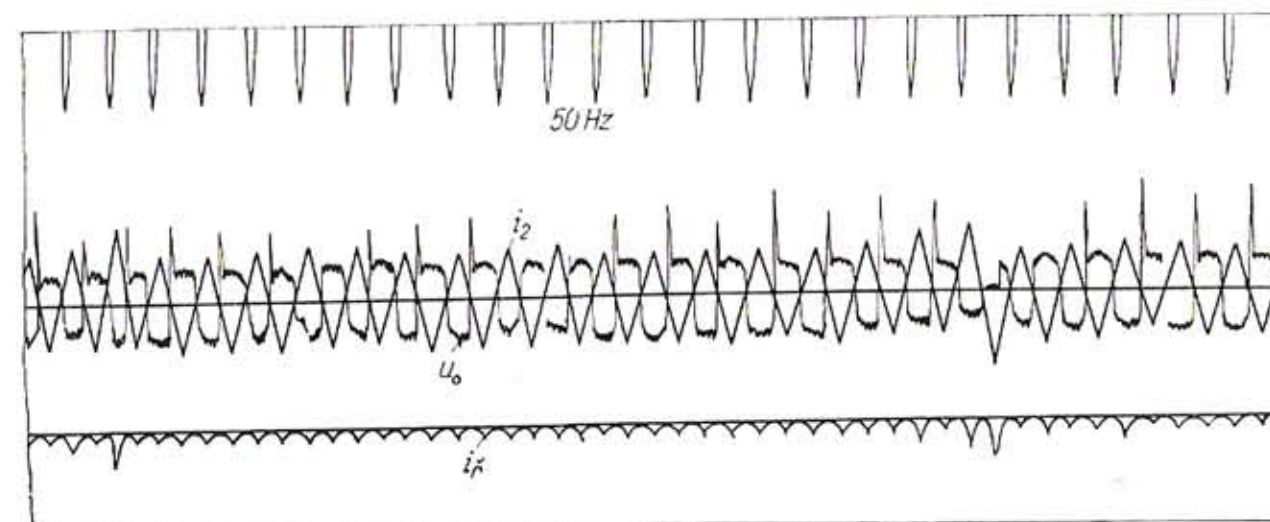
V dalším výkladu jsou uvedeny příklady oscilogramů svařovacích a jiných veličin transformátoru TSM 1000 při svařování pod tavidlem a svařovacích transformátorů pro metodu WIG.

Na obr. 143 je oscilogram svařovacích veličin i_2 , u_o a řídicího proudu i_r transformátoru TSM 1000 při svařování pod tavidlem Z-41 (průměr drátu 4 mm, $v_s = 25$ m/h, $U_o = 36$ V, $I_2 = 400$ A). Při těchto podmínkách vznikají také zkraty kapkami, nezpůsobí však ztrátu kovu. Kladné zapalovací špičky směřují nahoru; některé jsou dosti široké vlivem nehomogenního bazického tavidla.

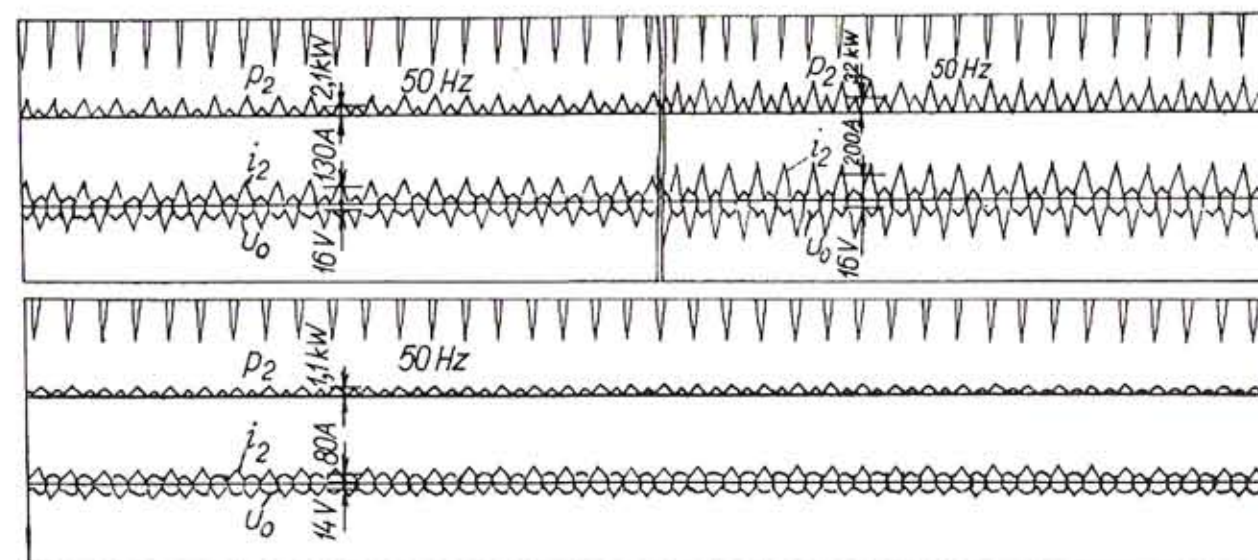
Starty při svařování pod tavidlem jsou u svařovacích transformátorů dány průběhem statických a dynamických charakteristik. Výhodnější je větší trvalý zkratový proud a především dynamický zkratový proud,

aby start byl spolehlivější. Existuje řada činitelů mimo svařovací transformátor, které mohou spolehlivost startů ovlivnit, např. druh tavidla, čistota konce drátu, kvalita dotyku konce drátu se základním materiálem před startem apod.

Další ukázky oscilogramů časových průběhů svařovacích veličin transformátoru s transduktorem a stejnosměrnou tlumivkou v řídicím obvodu transduktoru (obr. 17) při navařování hliníku pod ochranou argonu (WIG) jsou na obr. 144. Svařovací proud i_2 má při průchodu nulou průběhy kolmé na osu času. Proces je stabilní, zapalovací špičky nejsou patrné. Na průběhu u_o a p_2 je zřejmý usměrňovací jev; jedna půlplna je nižší, druhá vyšší (u napětí na oblouku u_o je vyšší půlplna kladná).

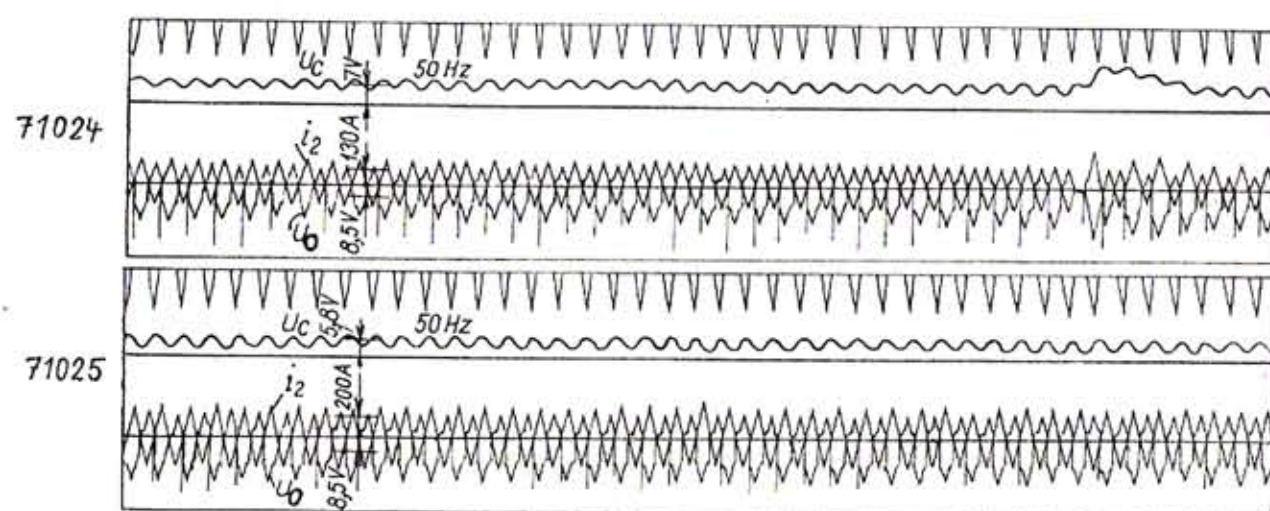


Obr. 143. Oscilogram veličin i_2 , u_o , i_r transformátoru TSM 1000



Obr. 144. Oscilogramy svařovacích veličin při svařování v argonu transformátorem s dobrým transduktorem

Oscilogramy podobného zdroje pro stejné využití, který vykazuje špatné svařovací vlastnosti v oblasti od 130 A níže, jsou na obr. 145. Průběh svařovacího proudu i_2 na oscilogramu 71024 představuje při 130 A známý nevhodný tvar se superpozicí třetí harmonické (obr. 138). V pravé části oscilogramu je patrná nestabilita procesu, při níž se objeví i překmit napětí u_c na kondenzátorové baterii určené pro filtraci stejnosměrného proudu usměrňovacího jevu. Ten je zřejmý z průběhu napětí na oblouku u_o , na jehož kladné půlvlně se objevují i značné vysoké zapalovací špičky. Při větším svařovacím proudu i_2 jsou poměry příznivější (viz oscilogram 71025).



Obr. 145. Oscilogramy veličin i_2 , u_o , u_c při svařování v argonu transformátorem a nekvalitním transduktorem (údaj $U_o = 8,5$ V je měřítko pro napětí na oblouku)

V tomto článku je uvedena metodika zkoušení svařovacích vlastností obloukových svářeček včetně transformátorů v bývalé VZS Chotěbč, s poměrně skromným vybavením. I když metodika nebyla ještě zcela dokonale, stačila na to, aby dávala objektivní posudky a návrhy na úpravy svařovacích vlastností všech těchto strojů vyráběných a vyvíjených v ČSSR, (tj. celkem pro šest pracovišť), i na mnohé stroje zahraniční produkce.

7.2. KONTROLY, MĚŘENÍ A ZKOUŠKY Z HLEDISKA BEZPEČNOSTI

Vzhledem k většímu nebezpečí úrazu svářeče a pomocníka při používání svařovacích transformátorů a transformátorků je třeba zdůraznit body tabulek 4 z ČSN 05 2210 a ČSN 05 2211:

Při prohlídce je nutné dbát především na správné zapojení ochranného vodiče a na dotažení ochranné svorky; rovněž všechny silové svorky je třeba dobře dotáhnout. Přechodový odpor mezi kostrou

transformátoru a odnímatelnými kryty musí být menší než $0,1 \Omega$. Vzduchové vzdálenosti mezi částmi pod napětím a kostrou nebo krytem musí odpovídat ČSN 34 0130.

Izolační odpory $2,5 \text{ M}\Omega$ zastudena a $0,5 \text{ M}\Omega$ zatepla jsou hodnoty minimální, nové svařovací transformátory je mívají daleko vyšší.

Nejvyšší efektivní hodnoty napětí naprázdno, jež jsou ke svařovacím transformátorům a pro uvedené metody stanoveny normami, se nesmějí překročit, není-li normou povolena výjimka. Některá metoda svařování však připouští napětí naprázdno nižší, čímž se zmenší velikost i hmotnost transformátoru a nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Časový průběh napětí naprázdno má však ve všech případech být sinusový.

Zkoušce oteplení je nutné věnovat náležitou péči, neboť na ní závisí životnost stroje, nebezpečí požáru a úrazu. Metodické pokyny pro tuto zkoušku jsou obsaženy v ČSN 35 1080.

Pro zkoušku elektrické odolnosti platí norma ČSN 35 1080 pouze metodicky.

Norma ČSN 05 2210 má pro tuto zkoušku při vstupním napětí do 380 V, 50 Hz tento požadavek: mezi vstupním vinutím a kostrou a mezi výstupním vinutím a kostrou je zkušební napětí 2000 V, mezi vstupním vinutím a výstupním vinutím je zkušební napětí 4000 V.

Norma ČSN 05 2211 v čl. 42 stanoví, že svařovací transformátorky musí být vyhotoveny v izolační třídě II. Musí mít tedy všude dvojitou nebo zesílenou izolaci a nemají zařízení pro připojení ochranného vodiče. Zkušební napětí mezi vstupním vinutím a kostrou je 4500 V, mezi výstupním vinutím a kostrou 2000 V a mezi vstupním vinutím a výstupním vinutím 4000 V.

8. Pokyny pro použití

Aby bylo používání svařovacího transformátoru bezpečné a úspěšné, musí mít pracovník, který jej připojuje k síti, k dispozici návod pro obsluhu a údržbu. Údaje v něm musí souhlasit se štítkem pevně umístěným na transformátoru. Podle jmenovitého vstupního proudu nebo jmenovitého zdánlivého příkonu se dimenzuje přípojka [70], vypínač, pojistky nebo jistič a zásuvka. Pojistky musí být vždy pomalé (jistič motorový), neboť i při zapnutí na síť nezatíženého transformátoru se nahodile objeví nárazový vstupní proud několikanásobně větší než jmenovitý (čl. 5.3).

V malých dílnách nebo u domovních rozvodů se musí překontrolovat průřez vodičů a zvláště jmenovitý proud na štítku elektroměru. Překontroluje se funkce ochranného kolíku nebo zdířky v zásuvce. Povolení k připojení svařovacího transformátoru dá energetický podnik. Pokud jsou připojovací, popř. i svařovací vodiče hliníkové, je nutné kabelová oka přivařit, nejlépe zařízením WIG nebo tlakově; při svorkování se musí použít dvě pérové podložky. Stykové plochy musí být rovné a kovově čisté, popř. se natřou kontaktní vazelinou a po několika opakovaných dotaženích po zahřátí se mohou natřít lakem. S měděnými vodiči a okny jsou menší potíže.

Po příjmu do závodu projde svařovací transformátor vstupní kontrolou, která zjistí jeho nezávadnost (především zda není vstupní nebo výstupní vinutí spojeno s kostrou a zda je ochranný vodič řádně připojen na ochrannou svorku; podle ČSN 05 2211 nemají svařovací transformátorky ochrannou svorku a ochranný vodič se nepřipojuje). Tato kontrola by se měla opakovat bezprostředně před připojením na síť. Většinou jsou svařovací transformátory připojovány poddajnými nebo pohyblivými vodiči, které vyžadují určitou péči, např. odlehčení vodičů od tahu třmenem a ochranu před poškozením¹⁾.

Svařovací vodiče typu CGZ a AGZ (dříve SH a ASH) se dimenzují podle velikosti trvalého svařovacího proudu transformátoru podle ČSN 34 7552 nebo podle katalogu výrobce (Kablo Kladno) a podle jejich délky. Pro jejich dimenzování slouží i tab. 1 v ČSN 05 0630. Celkový úbytek napětí na svařovacích vodičích nemá být větší než 2 V a vodiče nemají být zbytečně dlouhé. Zvláště u střídavého proudu může na sva-

¹⁾ Některé zahraniční firmy dodávají ke svařovacím transformátorkům pohyblivé přívody ze střední šňůry s průřezem $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ nebo $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$ (Cu), přestože by stačil menší průřez.

řovacích vodičích vzniknout velký úbytek napětí při jejich smyčce s velkým průměrem, mají se proto klást (pokud to jde) po celé délce vedle sebe. Lépe je použít několik tenších vodičů paralelně než jeden tlustý; přívod ke svařovacímu automatu je poddajnější a vodiče se méně ohřívají.

8.1. VYBAVENÍ PRACOVIŠTĚ

Na použité svařovací technologii záleží, zda se pro ruční svařování vystačí pouze se svařovacím transformátorem a jeho připojením vidlicí na síť, se svařovacími vodiči, z nichž jeden je opatřen držákem elektrod a druhý svařovací svorkou, nebo zda se vybuduje linka pro kontinuální svařování pod tavidlem (např. spirálových rour), vybavená několika svařovacími hlavami a transformátory pracujícími současně s dalším složitým a nákladným zařízením.

Ve strojírenských závodech mohou být uspořádána individuální pracoviště zapadající do výrobního cyklu. Jejich vybavení může být jednoduché, potřebuje kromě svařovacího zdroje nanejvýše přípravky nebo polohovadla a sušárnu elektrod [71], při větším použití technologie svařování se používají svařovací automaty nebo poloautomaty [1], [72]. Je-li v závodě použita technologie svařování jako hlavní technologie, zavádějí se svařovací linky [73] nebo jednoúčelové svařovací stroje [74], [92] a v poslední době i svařovací roboty.

Aby byly nastavené svařovací veličiny po celou dobu činnosti zařízení stálé, musí i svařovací zdroj (v daném případě transformátor) mít potřebnou úroveň — viz např. vybavení svařovacího transformátoru TSM 1000 [102] nebo soupravy MA 315 [91], čl. 3.6 a kap. 10.

8.2. PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY PRO OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Přídavnými materiály se zabývají práce [5] a [96]; o materiálech vyráběných v k. p. ŽAZ Vamberk pojednává [76]. Pro svařování střídavým proudem jsou vhodné obalované elektrody, uložené v krabicích s označením ~. Jsou to elektrody s kyselým, rutilovým a rutilo-organickým obalem; je jich celá řada a informace o nich jsou v [14], [76], [93]. K. p. ŽAZ Vamberk zavedl od r. 1970 nové podnikové označení [75] pro všechny přídavné materiály; označení podle ČSN však zůstává v platnosti také.

Pro představu uvádí tab. 18 proudové zatížitelnosti pro často používané elektrody na střídavý proud. Elektroda E-K 103 (ČSN 05 5026 Elektroda E 44.72) je kyselá a je vhodná pro všechny polohy na svařování konstrukcí z uhlíkatých ocelí pevnostních řad 36 a 41.

Elektroda E-R 113 (ČSN 05 5022 Elektroda E 42.11), rutiloorga-

Tab. 18. Rozsahy svařovacích proudů některých ručních elektrod

Označení elektrody	Průměr elektrody (mm) a rozsah svařovacího proudu (A)						
	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8
~, = — E-K 103	70 až 90	100 až 130	130 až 160	170 až 210	220 až 270	280 až 340	340 až 380
≈, = — E-R 113	60 až 80	80 až 110	110 až 150	160 až 200	210 až 260	—	—
≈, = — E-R 117	40 až 70	60 až 100	80 až 120	140 až 170	—	—	—
= + E-B 121	60 až 80	80 až 100	110 až 140	140 až 170	190 až 230	240 až 290	320 až 380
= + E-B 456	—	50 až 70	70 až 100	90 až 130	—	—	—
= + E-S 723	—	60 až 100	90 až 130	130 až 160	—	—	—

nická, je vhodná pro svařování konstrukcí z uhlíkatých ocelí pevnosti 420 MPa až 520 MPa. Vyhovuje zvláště pro polohu svislou shora dolů.

Elektroda E-R 117 (ČSN 05 5023 Elektroda E 42.16), rutilová, je vhodná pro ocelové tenké plechy, lemové a tupé spoje, pro svařování ocelových konstrukcí na stavebních s pevností oceli v tahu do 500 MPa.

Elektroda E-B 121 (ČSN 05 5027 Elektroda E 44.83) je určena především pro svařování stejnosměrným proudem ve všech polohách. Je nejpoužívanější elektrodou v ČSSR. Protože zde není k dispozici žádná elektroda bazického složení na střídavý proud, lze ji v nouzi s dobrými výsledky použít i na tento proud. Transformátor musí mít dobré svařovací vlastnosti (dynamické charakteristiky sinusové, $\alpha_z \approx \pm 1,75$, napětí naprázdno 75 (lépe 80) V).

V roce 1982 uvedl k. p. ŽAZ Vamberk na trh kvalitní elektrodu E-B 456 pro univerzální použití (tab. 18), s níž bylo možné s transformátorem WT 315, nastaveným na $U_{20} = 80$ V, dobře svařit ocel třídy 11 371. Pro dosažení stejné produktivity jako u stejnosměrného proudu bylo třeba zvětšit svařovací proud u průměru elektrody 2,5 mm asi o 10 A. Podobných výsledků bylo při svařování střídavým proudem dosaženo rovněž s kvalitní elektrodou E-S 723 pro svařování litiny zastudena. Elektrody uvedené v tab. 18 mají napětí na oblouku (podle druhu) 20 V až 30 V; pro elektrody E-B 456 a E-S 723 vyhověl i transformátorek JS — 90 F. O nové bazické elektrodě na střídavý proud se zmiňuje čl. 1.6.

Podle [23], [97] lze s výhodou svařovat oceli střídavým proudem při vodorovných koutových svarech pomocí vysokovýkonných kyselé

elektrod E-K 181 a E-K 182 a rutilových elektrod E-R 184. Mají napětí na oblouku 30 V až 50 V, což vyžaduje vhodný transformátor. Při střídavém proudu neobtěžuje foukání oblouku, a proto se lépe provaří kořen. Kromě toho se v porovnání s běžnými elektrodami ušetří elektrická energie a podstatně se zvýší produktivita.

Pro svařování a navařování barevných kovů je nutné použít pouze stejnosměrný proud.

Tavidla pro mechanizované svařování, vyráběná v k. p. ŽAZ Vamberk, jsou bazická (zásaditá), kyselé a neutrální, dále bezkyslíková a fluoridová (pro vysoce legované materiály) [5], [96]. Pro první tři druhy tavidel se používají svařovací transformátory; zvláště jsou nutné při hodnotách svařovacího proudu nad 800 A, kdy u stejnosměrného proudu vadí foukání oblouku. Svařovací transformátor je navržen tak, aby průběh svařovacího proudu byl blízký sinusovce.

Pro svařování lehkých kovů a jejich slitin metodou WIG je nutný střídavý proud. Jako ochranný plyn se podle ČSN 65 4305 používá argon čistoty 99,555 %, který vyrábí Kyslíkárna v Kyjích u Prahy a dodává jej Technoplyn Praha-Hostivař.

Jako netavicí se elektroda se používá wolframová tyčinka s průměrem 1 mm až 6 mm, s několika procenty lanthanu; výrobce TESLA Rožnov pod Radhoštěm (v zahraničí to bývá wolfram zirkoniovaný). Svařuje se buď bez přídavného drátu, nebo s přídavným drátem. Přídavný drát potřebného složení dodávají Kovchutě Děčín (např. typ AlMg 3, AlMg 5, AlSi) nebo Hliníkárna Žiar nad Hronom (Al 99,5 ČSN 42 4004).

Svařovací parametry pro různé svary nebo návary, různé tloušťky materiálu a polohy, pro ruční svařování, svařování pod tavidlem nebo metodou WIG jsou uvedeny v různých svařečských příručkách [1], [93], [97] až [101] nebo v návodech pro použití stroje.

8.3. ZAPALOVÁNÍ A UDRŽOVÁNÍ STABILNÍHO OBLOUKU

Aby se dalo svařovat, je nutné především zapálit oblouk. Fyzikálně je to proces náročný zvláště u střídavého proudu, kdy se svářeč v okamžiku dotyku základního materiálu s elektrodou nemusí dostat do maxima púlviný proudu (nebo jeho okolí) na dynamické charakteristice a zapálení oblouku se nemusí podařit. Místo startu na základním materiálu má být kovově čisté, elektroda má mít konec rovněž kovově čistý; kráter elektrody, vzniklý během předcházejícího svařování, je zapotřebí odstranit izolovaným předmětem. Jakmile se elektroda přivaří, je třeba ji ihned ulomit a očistit pro nový start. Technika startu ruční elektrodou je popsána v čl. 2.1 a v příručkách [77], [100], [101].

U svařování pod tavidlem se většinou startuje po předcházejícím lehkém dotknutí kence očištěného drátu a čistého základního materiálu.

Po zasypaní tavidlem se pomocí řídicího prvku zapne hlavní stykač svařovacího transformátoru a oblouk se většinou zapálí buď krátkým odtržením drátu z dotyku, nebo jeho upálením. Tenkými svařovacími dráty do průměru 2 mm lze startovat letmo.

U svařování metodou WIG střídavým proudem se pro starty zásadně používají ionizátory (čl. 2.1 a 3.4). Na držáku wolframové elektrody se před startem stiskne tlačítko, které zapne elektromagnetický ventil a ochranný plyn proudí do místa startu; dále samočinně zapne hlavní stykač svařovacího transformátoru, spustí se ionizátor a svářeč pomalu přibližuje hořák k základnímu materiálu, až přeskočí jiskra a vytvoří se oblouk. Dotyk wolframovou elektrodou při svařování lehkých kovů nelze použít, protože by se roztavením zničila a svar by se znehodnotil.

Po zapálení oblouku u ručních elektrod se má jeho délka udržovat přibližně stejná, jako je průměr kovového jádra elektrody (měřeno od základního materiálu k pevnému konci jádra, nikoli ke konci kráteru na obalu). Elektroda má být skloněna tak, aby roztavená struska nezatékala pod oblouk. Zde se projeví výhody střídavého proudu, protože nevzniká foukání oblouku na okrajích svařence a sklon elektrody se udržuje stále pod stejným úhlem. U stejnosměrného proudu se na začátku a na konci svaru na hranách desky vyfukuje oblouk směrem ke středu desky, natahuje se a způsobuje dlouhý kráter na svaru a velký rozstřík. Elektroda se proto musí sklánět ke středu desky.

Někdy může svářeč využít sklonu statických charakteristik zdroje k tomu, že při statických charakteristikách polostrmých (s konstantním výkonem) zmenšuje nepatrným prodloužením oblouku svařovací proud a zvyšuje napětí na oblouku nebo naopak, čímž ovlivňuje hloubku průvaru a šířku svaru. U statických charakteristik strmých (s konstantním proudem) je průvar stálý, šířku svaru lze malou změnou délky oblouku měnit. Aby oblouk hořel stabilně, je třeba udržovat rovnoměrnou a nastavenému svařovacímu proudu přiměřenou rychlost pohybu elektrody podél svaru.

Udržování stabilního oblouku u mechanizovaného svařování pod tavidlem je snadnější, neboť obsluha podle vyzkoušené technologie nastaví správný svařovací proud a napětí na oblouku podle ampérmetru a voltmetru, tyto hodnoty neustále sleduje, popř. je snadno ovládači opraví. Ručky měřicích přístrojů při stabilním procesu kmitají pouze s malou amplitudou kolem nastavené hodnoty. Velké rozkmity, popř. časté klesnutí svařovacího proudu I_2 na nulu a zvýšení napětí na oblouku U_0 na hodnotu U_{20} znamená nestabilní hoření oblouku, způsobené buď špatně nastavenými svařovacími veličinami I_2 , U_0 , v_s , nebo znehodnoceným tavidlem, vadou automatu nebo jinou závadou, kterou je nutné odstranit. Je-li na svařovacím transformátoru k dispozici přepínání napětí naprázdno U_{20} , nastaví se u automatu s regulací podle napětí na oblouku vyšší napětí U_{20} , u automatu s konstantní rychlostí podávání drátu nižší napětí U_{20} ; stabilita procesu se tím může zlepšit.

Udržování stabilního oblouku při svařování metodou WIG je opět (jako u svařování ručními elektrodami) závislé na znalostech a zručnosti svářeče a na předpokladu, že svařovací transformátor má v celém rozsahu nastavení svařovacího proudu I_2 příznivý průběh i_2 při přechodu nulou (např. podle obr. 54). Oblouk je dosti dlouhý, viditelný a snadněji ovladatelný než u ručních elektrod.

8.4. PARALELNÍ CHOD SVAŘOVACÍCH TRANSFORMÁTORŮ

Používá se především při automatickém svařování pod tavidlem, je-li třeba svařovat větším proudem, než je trvalý výstupní proud jednoho transformátoru, který je k dispozici. Dva transformátory stejného typu se stejným napětím naprázdno se spojí na vstupních svorkách paralelně, propojí se svařovacím vodičem první výstupní svorky obou transformátorů mezi sebou a na druhých (volných) se měří napětí po připojení vstupních vinutí na napětí sítě. Ukazuje-li voltmetr dvojnásobnou hodnotu, než je U_{20} , je po odpojení sítě nutné na jednom transformátoru propojovací svařovací vodič přepojit na volnou svorku. Zbývající dvě volné svorky obou transformátorů se definitivně propojí. Ukáže-li se v původním zapojení na volných výstupních svorkách nulová hodnota napětí, propojení transformátorů je správné a svorky se definitivně spojí svařovacími vodiči s průřezem odpovídajícím trvalému svařovacímu proudu jednoho transformátoru. Z jednoho z obou transformátorů se svařovací vodiče s dvojnásobným průřezem, než jaký je určen pro jeden transformátor, vedou na materiál a na svařovací hlavu.

Další podmínkou paralelního chodu svařovacích transformátorů je, aby každý transformátor dodával do oblouku polovinu celkového svařovacího proudu, zvláště u větších hodnot. Kdyby tomu tak nebylo, jeden z transformátorů by mohl být přetížen; ovládač musí být proto u obou nastaven na stejnou velikost proudu. Doporučuje se stupnice ovládacích zařízení u obou transformátorů přecejchovat pomocí přesného transformátoru proudu a ampérmetru třídy 0,5. Nastavení na obou transformátorech se občas podle kalibrovaných stupnic kontrolují a korigují, zvláště tam, kde je na svařovacím automatu zřízeno dálkové nastavování statických charakteristik a často se používá. Nejspolehlivější by bylo, kdyby měl každý transformátor vlastní přístroj pro měření svařovacího proudu.

8.5. BLUDNÉ PROUDY

A. Vznik bludných proudů

Bludné proudy vzniklé v závodě provozem svářečky svědčí většinou o špatné péči o svařovací zařízení ze strany svářečů a elektroúdržbářů. Vyskytují se však i náhodně. Jsou to svařovací proudy procházející nahodile zemí, po kovových potrubích (zvláště uložených v zemi), po ocelových konstrukcích apod., tedy nikoli z výstupních svorek svářečky přímo svařovacími vodiči, ale vedlejšími cestami. Bludné proudy mohou vzniknout např. z těchto příčin:

- a) výstupní vinutí svářečky se spojí s kotrrou;
- b) jedna z výstupních svorek se spojí s kotrrou;
- c) na svařovacích vodičích se mechanicky nebo přehřátím poškodí pryžová izolace a holý vodič se dotkne země nebo vodivé konstrukce haly; totéž se stane při vadné izolaci kabelových spojek;
- d) místo svařovacích vodičů jsou použity holé ocelové tyče, spojené mezi sebou svarem nebo propojené přes vodivou konstrukci haly;
- e) držák elektrody s poškozenou izolací se položí na svářečku nebo na zem bez izolační podložky;
- f) k těžkému kusu se přivařuje díl ležící rovněž na zemi, přičemž díl nemá připojen samostatný svařovací vodič;
- g) dvě svářečky napájí oblouky vzdálené od sebe; svařovací vodiče vedoucí od nich jsou krátké a jsou připojeny do jednoho místa, svařovací vodič k prvnímu oblouku od první svářečky je krátký, k druhému oblouku od druhé svářečky dlouhý; část svařovacího proudu druhé svářečky prochází první svářečkou;
- h) bludné proudy se zvětší, nastaví-li se větší svařovací proud, nebo jsou-li výstupní svorky a kabelová oka nečistá nebo opálená nebo málo přitažená;
- i) zvláštní případ bludných proudů nastane např. na jeřábu, pod nímž se svařuje kotel na polohovadle s kladkami opatřenými pryží; nastane-li porucha na stejném pólu svařovacího obvodu, na který je připojen držák elektrody v případech a) až e), projdou bludné proudy zemí, přes stožáry nebo uzemněním do jeřábové dráhy a dotknou-li se háky kotle, projde také proud závěsným lanem a hákem.

B. Bludné proudy mohou způsobit

- a) spálení a přerušení ochranného vodiče svářečky i jiných na svařovaném předmětu používaných pomocných strojů, jako vrtaček apod.,
- b) jiskření, přerušení svařovacího vodiče, požár, poranění popálením nebo elektrickým proudem apod.,
- c) elektrolytickou korozi, která ničí potrubí nebo kabely s kovovým povlakem, jdoucí zemí — střídavý proud je v tomto případě neškodný,

d) ztráty elektrické energie, proto se musí zvětšit nastavený proud na svářečce; bludné proudy však nejsou stálé, svařovací proud se tím mění a to činí další potíže,

e) v případě Ag) může nastat spálení výstupního vinutí první svářečky nebo při stejnosměrném svařovacím proudu také přepólování,

f) v případě Ai) se přehřeje nebo spálí (přepálí) závěsné lano, popálí se hák a svařenec.

C. Zamezení bludným proudům

Protože bludné proudy jsou škodlivé až nebezpečné, je nutné jim zabránit:

- a) provedením bezvadné instalace svařovacího zařízení,
- b) pravidelnou údržbou ze strany elektroúdržbářů,
- c) dodržováním všech příslušných ustanovení normy ČSN 05 0630 a pokynů v návodu svářečem.

8.6. ÚDRŽBA A OPRAVY SVAŘOVACÍCH TRANSFORMÁTORŮ

Údržbou obloukových svářeček včetně svařovacích transformátorů se zabývá publikace [18]. Transformátor se musí občas zbavit prachu (nejnebezpečnější je kovový, neměl by se v žádném případě dostat do vinutí), musí se změřit izolační odpor, přezkoušet funkce ochrany před nebezpečným dotykovým napětím, u velkých svařovacích transformátorů funkce dálkového nastavování proudu, koncových vypínačů a ventilátoru (jednou ročně namazat tukem ložiska). Dále se očistí dotykové plochy svorek a kabelových ok, kontakty proudového relé a stykačů a šroub posuvného jádra magnetického bočníku nebo tlumivky. Kluzné plochy se namažou teplovzdorným tukem. Je třeba ještě zdůraznit, že ve větších a velkých závodech by se elektroúdržbáři měli zaměřit také na preventivní údržbu, měly by včas opatřit náhradní díly, popř. rezervní svařovací transformátory.

Závady, jejich odstranění a seznam náhradních dílů jsou obsaženy v návodu pro obsluhu a údržbu svařovacího transformátoru.

Jsou-li moderní svařovací transformátory vybaveny elektronikou, měl by elektroúdržbář absolvovat příslušný údržbářský kurs, pořádaný výrobním závodem nebo Domy techniky při ČSVTS. Jinak je lépe při poruše objednat návštěvu servisní služby výrobce.

U svařovacího transformátoru WT 315 se na některých závodech vyskytly tyto poruchy:

— Výstupní bajonetové zásuvky a vidlice se přehrály nebo i zaplekly. Nelze je dobře dotáhnout a samovolně se uvolňují. Spálila se na nich izolace zásuvky i vidlice a rovněž izolace vinutí a svařovacích vodičů.

— Přehřály se kontakty přepínače rozsahů (na obr. 156 zn. V100RS 381) a přestaly vést proud.

Nejpravděpodobnější příčinou závad bylo přetěžování transformátoru nedodržením poměrné doby zatížení DZ , přestože je na panelu stroje uveden diagram $I_2 = f(DZ)^1$. Dalším nedostatkem je, že svářeči nedostávají k prostudování návod k obsluze svářeček. Uvedené závady byly odstraněny výměnou bajonetových zásuvek za svorky od svářečky Triodyn K 320 a výměnou přepínače za starší typ válcového přepínače 100 A.

Je známo, že posuvná tlumivka pro nastavování svařovacího proudu svařovacích transformátorů TS 1000.3, TS 1000.4 se časem (podle pečlivosti výroby) poškodí chvěním tak, že nastane zkrat mezi závity nebo mezi závity a kostrou. Kromě toho se holé vinutí tlumivky nad vzduchovou mezerou Foucaultovými proudy příliš zahřívá. Tyto závady téměř zcela odstranily úpravy, k nimž podklady poskytne k. p. ZEZ Hořice.

¹⁾ Známe-li pro zvolený svařovací proud I_2 zatěžovatel DZ , vypočítáme dobu zatížení t_z a dobu přestávky t_0 z rovnice (4a).

9. Bezpečnost při svařování

Pro bezpečnost při obloukovém svařování platí norma ČSN 05 0630 Bezpečnostní ustanovení pro svařování elektrickým obloukem, kterou musí znát všichni, kteří se svařováním zabývají, zvláště pak výkonný svářeč v závodě. Platí všude, kde se svařuje elektrickým obloukem.

Dále budou jen velmi stručně zdůrazněny některé části této normy:

V oddílu II se kromě jiného stanoví, že svařovat, řezat a drážkovat elektrickým obloukem smějí jen osoby starší 18 let, zdravotně způsobilé, které absolvovaly základní kurs podle platných předpisů a norem pro zkoušky svářečů a byly pověřeny organizací svařovat. Svářeč dostane svářečský průkaz a uvedenou normu, nejméně jednou za dva roky je školen a přezkoušen a je mu umožněno chodit k lékařským prohlídkám.

V oddíle III je předepsáno, jak má být svářečka umístěna, co má svářeč kontrolovat, než ji uvede do chodu, jak s ní a celým jejím rozvodem má zacházet, jak ji má udržovat. Svářeč se však musí občas přesvědčit, zda výstupní obvod obloukové svářečky není spojen s kostrou: pod libovolný svorník kostry se připevní vodivá destička z měděného plechu tloušťky asi 3 mm, rozměry asi 50×80 (mm). Ovládačem se nastaví minimální svařovací proud a o destičku se škrtně elektrodou a potom okrajem svařovací svorky. V případě zajiskření je nutné svářečku vyřadit z provozu.

Opouští-li svářeč pracoviště, musí svářečku vypnout, při přemístování ji musí vypnout a odpojit od sítě.

V oddílu IV jsou uvedena nebezpečí při svařování — úraz elektrickým proudem, účinky záření na zrak a pokožku, práce v prostředích se zvýšeným nebezpečím výbuchu a požáru. Je zakázáno svařovat pomocí svařovacích transformátorů v uzavřených nádobách, ve výškách a ve vlhkém prostředí. Svářeč musí znát první pomoc při úrazu elektrickým proudem.

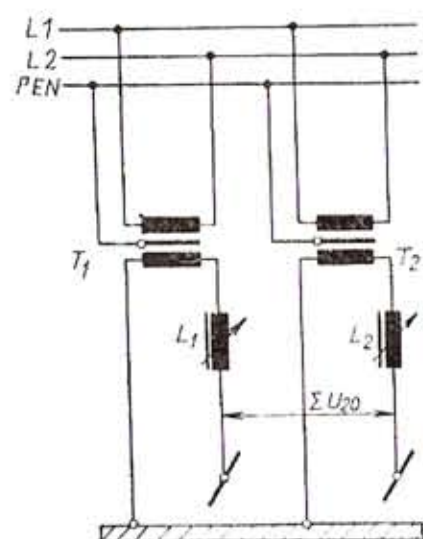
Svářeč nesmí ve svařovacím transformátoru nic opravovat, k tomu je v závodě pověřen elektroúdržbář, který rovněž podle čl. 37 a 38 normy jednou za půl roku dělá periodickou prohlídku včetně odstranění prachu.

V oddílu V se stanoví, jak má vypadat svářečské pracoviště. Oddíl VI hovoří o zplodinách při ručním svařování a při svařování pod tavidlem a v ochranných plynech. Jak se mají tyto zplodiny z pracoviště odstranit, řeší oddíl VII — Větrání svařoven.

Oddíl VIII popisuje osobní ochranné prostředky, které musí organizace svářeči zajistit.

K oddílu IV se vztahují tyto poznámky:

Nebezpečí, které při ručním svařování pro člověka představuje svařovací transformátor, je především v napětí naprázdno U_{20} (udává se jeho efektivní hodnota, maximální hodnota je $\sqrt{2}U_{20}$). Z přehledů v [82], [89] je patrné, že v různých zemích je dovolena nejvyšší hodnota napětí naprázdno U_{20} v rozmezí 70 až 120 V (120 V ve Švýcarsku a Francii). V [82] autor tvrdí, že 70 V je pro stabilní svařovací proces málo a doporučuje vyšší hodnotu. Naopak v [89] se doporučuje napětí naprázdno $U_{20} = 60$ až 70 V a v místech se zvýšenou teplotou a vlhkostí a se zvětšeným nebezpečím úrazu elektrickým proudem (uvnitř kotlů, na kovových konstrukcích apod.) pouze 35 až 45 V.



Obr. 146. Svařování dvěma transformátory na jednom svařenci — schéma

Vyskytne-li se v praxi případ, že na jednom svařenci pracují dva (nebo více) transformátory napájené ze stejných fázových vodičů (obr. 146), může se mezi držáky elektrod objevit napětí naprázdno buď $\Sigma U_{20} = 2U_{20}$, nebo $\Sigma U_{20} = 0$. V prvním případě je velmi nebezpečné, dotkne-li se jeden svářeč obou držáků současně. Tomu je nutné se vyhnout zapojením okamžitých hodnot napětí ve fázi (čl. 8.3). Podobné zvýšení U_{20} by nastalo při současné práci svařovacího dynama G a transformátoru T_1 , L_1 na jednom svařenci (obr. 147a). Zde se také svářeč nesmí dotknout najednou obou držáků při chodu svářeček naprázdno. Dynamo má napětí naprázdno U_{20} podle obr. 147b, transformátor podle obr. 147c; součet obou napětí naprázdno ukazuje obr. 147d.

V ČSSR je u transformátorů pro ruční svařování povoleno napětí naprázdno až $U_{20} = 80$ V. Je však nutné dodržovat přísně všechna ustanovení normy ČSN 05 0630, zejména používat osobní ochranné pomůcky a v uzavřených nádobách, ve výškách a ve vlhku střídavým proudem nesvařovat.

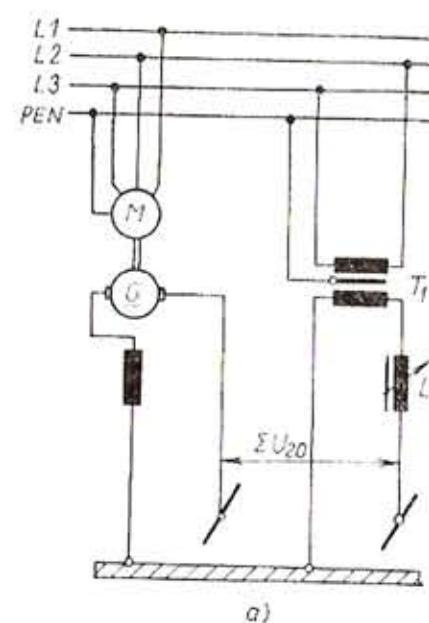
Při automatickém svařování pod tavidlem a při metodě WIG se všeobecně používá odpojení svařovacího transformátoru od napětí sítě pomocí proudového relé a stykače (zvyšuje to bezpečnost).

Stupeň nepříjemnosti pocitu a velikost nebezpečí při průchodu proudu lidským tělem je dán činným odporem těla (kolem 1000 Ω) a z toho velikostí proudu při určitém napětí. Při menším střídavém proudu se pocituje pouze slabší brnění. I to však může být nebezpečné. Např. při práci ve výškách by se mohl svářeč po úleku zřítit, kdyby nebyl připoután. Při větším střídavém proudu nastávají již křeče svalů, nelze se pustit kovových částí pod napětím. Tehdy při kritickém proudu dochází k fibrilaci srdce (rozkmitání srdce vyšším kmitočtem, než je běžný srdeční rytmus), která při delším trvání způsobí smrt. V práci [84] se uvádí, že rozhodující pro vznik fibrilace může být proud 0,1 A. Jako napětí vyvolávající tento proud má být uvažována hodnota $2U_{20}/\sqrt{2}$, tj. dvojnásobek rozkmitu efektivního napětí naprázdno. V práci [33] se naopak zjišťuje, že rozhodující pro úraz je doba t' trvání jedné poloviny maximální hodnoty napětí U'_{20m} (průběh u'_{20} na obr. 15). Je-li pro $f = 50$ Hz

$$t' = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} = 5 \text{ ms}$$

bylo by při $U'_{20m} = 120$ V napětí naprázdno transformátoru $U_{20} = 63$ V (efektivní hodnota), což je v mezích podle [89]. Při $U_{20} = 63$ V a zkresleném průběhu vstupního napětí hoří oblouk podle [33] stabilně i při svařování bazickými elektrodami. Z velikosti napětí naprázdno vyplývá menší nebezpečí pro svářeče. Lze usoudit, že zdroj se středním kmitočtem (např. $f = 400$ Hz) je méně nebezpečný než při síťovém kmitočtu 50 Hz.

V práci [89] jsou zachyceny výsledky měření kritických střídavých napětí, která ještě za určitých okolností u střídavého proudu nezpůsobí fibrilaci. Při průchodu tělem směrem suchá ruka—ruka bylo zjištěno napětí 105 až 120 V, při směru mokrá ruka—krk 35 až 45 V. U někoho to může být hodnota nižší (např. u žen). Proud, který ještě nezpůsobí



Obr. 147. Svařování transformátorem a dynamem na jednom svařenci — schéma a průběhy napětí naprázdno

fibrilace, je uvažován 50 mA po dobu 3 s v obvodu ruka—nohy. V [83] se uvádí, že fibrilaci srdce způsobí při 50 Hz proud 60 mA, ve směru levá ruka—srdce 55 mA. Naproti tomu nebezpečí rozkladu krve u stejnosměrného proudu je až při 300 mA.

Vážným nebezpečím, které používání elektrického svařování všeobecně způsobuje, jsou požáry. Příčinou je většinou neznalost nebo nedbalost. V letech 1966 až 1967 byla v ČSSR tímto způsobem zaviněna škoda 30 miliónů Kčs [87]. Jen za r. 1977 bylo požárem poškozeno 12 automobilů při domácích opravách.

Bezpečností při svařování elektrickým obloukem se pro její důležitost zabývají celostátní konference, krajské aktivity, Výzkumný ústav bezpečnosti práce Praha a průběžně komise VIII. — Hygiena a bezpečnost práce při ÚV Komitétu svařování ČVTS v Praze.

Na toto téma napsal pracovník Výzkumného ústavu bezpečnosti práce S. Halen populární knížku Bezpečná práce svářeče obloukem [113]. Její 13. kapitola je věnována domácímu svařování. Při něm svářeči — amatéři používají buď továrně vyrobené svařovací transformátorky, jejichž provedení odpovídá normě ČSN 05 2211, nebo transformátorky zhotovené soukromě. Ve druhém případě sebe a své okolí včetně dětí vystavují značnému nebezpečí, neboť transformátorek většinou není vyroben odborně a není přezkoušen podle uvedené normy. Nebezpečí se ještě zvyšuje, nezná-li svářeč — amatér normu ČSN 05 0630 a nebo neřídí-li se touto normou.

V ČSSR se za uplynulých 15 let vyrobilo více než 100 000 obloukových svařovacích transformátorků, z nichž velkou část vlastní právě svářeči — amatéři bez základního kursu svařování. Zabránit jim ve svařování zatím nelze. Záleží tedy na jejich dobré vůli, aby si důkladně osvojili především zásady bezpečnosti osob a okolí, než začnou svařovat. Měli by samozřejmě ovládat alespoň základy technologie ručního svařování elektrickým obloukem [77], [93], [98], [110].

10. Starší a nové svařovací transformátorky a transformátory vyrobené v ČSSR

V této kapitole jsou v tab. 19 a 20 uvedeny některé údaje o těchto svářečkách. K některým jsou uvedena schémata, statické charakteristiky a fotografie [114]. (Popis a technické údaje o starších a některých starších typech svařovacích transformátorů, které se dnes již v ČSSR nevyrábějí, jsou ve druhém vydání této publikace na str. 208 až 233).

Tabulka 19 zahrnuje transformátorky, z nichž poslední tři typy jsou již vyráběny podle ČSN 05 2211. Nastavení svařovacího proudu je stupňové. Jmenovité proudy platí pro jmenovitý zatěžovatel $DZ_m = 20\%$. Tyto transformátorky jsou opatřeny signalizací nebo samočinným vypínáním při nadměrném oteplení. U některých dosahuje účinnost až 80 % a účinník dosahuje hodnoty 0,55. Jejich napětí naprázdno nepřevyšuje 70 V. Jsou vhodné především pro čs. kyselé a rutilové elektrody menších průměrů.

V tabulce 20¹⁾ jsou údaje o transformátorech a univerzálních svářečkách střední velikosti pro ruční svařování a transformátorech na $I_{2n} = 1000$ A pro automatické svařování pod tavidlem. Tři poslední typy vyráběné v ČSSR mají již elektronické regulátory se stabilizací výstupního výkonu a dálkové ovládače svařovacího proudu. Typ BEZKA 160 je vybaven panelem pro svařování dlouhými impulsy. Koncernový podnik BEZ Bratislava dal do výroby transformátor ZZS 1250, určený pro automatické svařování pod tavidlem. Svařovací proud při $DZ_t = 100\%$ je 1250 A, rozsah plynule nastavitelného proudu je 300 A až 1500 A, s možností dálkového ovládání a s elektronickou automatickou regulací pro stabilizaci výstupního výkonu [115].

¹⁾ V této tabulce jsou uvedeny také údaje o finské univerzální svářečce nové koncepce MARC 500 firmy Kemppi. Popis svářečky je v kap. 11.

Tab. 19. Údaje svařovacích transformátorů

Typ	TR 121	RTB-2	RTB-3	JS-90 F Triumf	JS-90 FN Combi
1. Výrobce	ZEZ Hořice	MEZ Brumov		Elektrokov Znojmo	
2. Dodavatel	nedodává se	nedodává se	Technomat		
3. Jmenovitě vstupní napětí U_{1n} (V)	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
4. Jmenovitý kmitočet f_{1n} (Hz)	50	50	50	50 až 60	50 až 60
5. Jmenovitý zdánlivý příkon S_{1n} (kV · A)	6,5	4,65	8,3	8,55/3,19	8,55
6. Jmenovitý vstupní proud I_{1n} (A)	24/17	19/16,2	22	22,5/14,5	22,5
7. Jmenovitý svařovací proud I_{zn} (A) DZ (%) U_2 (V)	95 25 24	120/70 20/35	150 20 25	150 75 20 50 26 23	155 20 26
8. Rozsah I_2 (A); stupně	65 až 120 2 × 7	50 až 120 7	65 až 150/5 50 až 70/3	55 až 150/7 40 až 75/4	55 až 155/7 40 až 75/4
9. I_{2max} (A) DZ (%) U_2 (V)	120 15 25	120 20 25	150 20 25	150 75 20 50 26 23	155 20 26

10. Trvalý svařovací proud I_2 (A) DZ (%)	—	65 100	70 50 100 100	70 100
11. Napětí na- prázdko U_{20} (V)	až 69	61/52	50	50
12. Vodiče přívodu Cu (mm ²) CGSG	3/2,5 výměnné	2 × 1,5	3 × 1,5 2 × 1	3 × 1,5 2 × 1
13. Pojistka při- vodu (A)	20 pomalá	jistič 25/16	20/16	25
14. Svařovací vodiče Cu (mm ²) (CGZ)	16	16	16	16
15. Šířka × hloub- ka × výška (mm)	168 × 428 × 335	270 × 418 × 225	300 × 400 × 210	300 × 400 × 210
16. Hmotnost (kg)	26	30	31	31
17. Provedení	kryt z izolantu	plechový kryt Značka ESČ	kryt z izolantu izolace F	sklolaminát izolace F
18. Chlazení	přírozené vzduchem	přírozené vzduchem	přírozené vzduchem	přírozené vzduchem
19. Schéma na obr.	148	150	—	—
20. Statická cha- rakteristika na obr.	—	151; 152	—	—
21. Fotografie na obr.	149	153	154	155

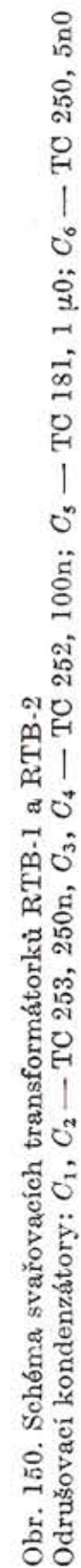
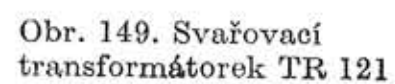
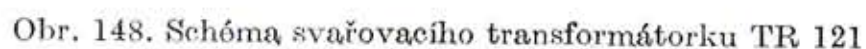
Tab. 20. Údaje svařovacích transformátorů a univerzálních svářeček

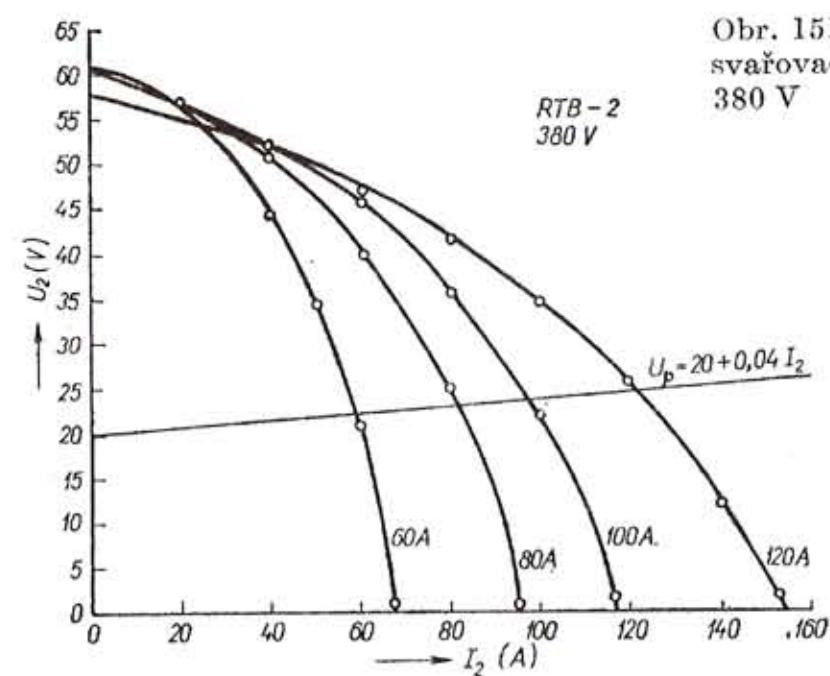
Typ	WT 315	TS 1000.4	TSM 1000	MA 315 ¹⁾	BEZKA 160	MARC 500 HF ²⁾
1. Výrobce	MEZ Brumov	ZEZ Hořice	ZEZ Hořice	MA 315 ¹⁾	BEZ Brati-slava	Kamppi Finsko
2. Dodavatel	Technomat	nedodává se	ZEZ Hořice	ZEZ Hořice	BEZ Brati-slava	Strojexport Praha
3. Jmenovité vstupní napětí U_{1n} (V)/ /kmitočet f_{1n} (Hz)	380/50	380, 440, 500, 415/50	380, 440, 500/380/50/50		380/50	220, 380, 440, 500/50
4. Jmenovitý vstupní výkon S_{1n} (kV · A)	19,8	70	85	27,4	—	30 při DZ = 100 %
5. Jmenovitý účinník $\cos \varphi_n$	0,61	0,7	0,59	0,4	—	—
6. Jmenovitá účinnost η_n (%)	85,5	83	87	66	—	—
7. Jmenovitý svařovací proud I_{2n} (A); DZ (%)	315 60	1000 67	1000 100	315 60	160 60	500 60
8. Rozsah nastavení I_2 (A)	60 až 150 1 stupeň 145 až 380 2 stupně	250 až 1250	400 až 800 700 až 1200	20 až 155 60 až 320	60 až 240	40 až 500 stří- davé 10 až 500 stej- nosměrné
9. I_2 max. při DZ DZ (%) U_p (V)	380 50 35	1250 42 45	1200 70 44	320 56 23	240 35 30	500 60 40

10. Trvalý svařovací proud I_{2t} (A) U_p	285 32	820 45	1000 44	240 20	—	387 —
11. Napětí naprázdno U_{20} (V)	80; 1. stupeň 57; 2. stupeň	70	80	79	65	68 střídavé 85 stejnosměrné
12. Vodiče přívodu (mm ²)	3 × 6	2 × S50 + 35 2 × S35 + 25	2 × S70 + 50 2 × S50 + 35	CGSG 4 × 10	—	—
13. Jištění přívodu (A)	50 pomalé	200 pomalé 160	250 pomalé 200	63 pomalé	—	160/80/80/63 pomalé
14. Svařovací vodiče CGZ (mm ²)	70	2 × 120	3 × 95	70	—	70
15. Šířka × hloubka × výška (mm)	555 × 910 × 840	775 × 860 × 1200	750 × 920 × 1200	700 × 1250 × 1450	315 × 530 × 237	510 × 780 × 675
16. Hmotnost (kg)	145	450	700	580	40	330
17. Provedení; třída izolace	plechový kryt F	plechový kryt B	plechový kryt B	plechový kryt B	plechový kryt	plechový kryt
18. Chlazení	přirozené vzduchem	nucené ventilátorem	nucené ventilátorem	nucené ventilátorem	nucené ventilátorem	nucené ventilátorem
19. Schéma na obr.	156	160	163	—	—	—
20. Statistické charakteristiky na obr.	157; 158	161	164	166; 167	—	—
21. Fotografie na obr.	159	162	165	168	—	169

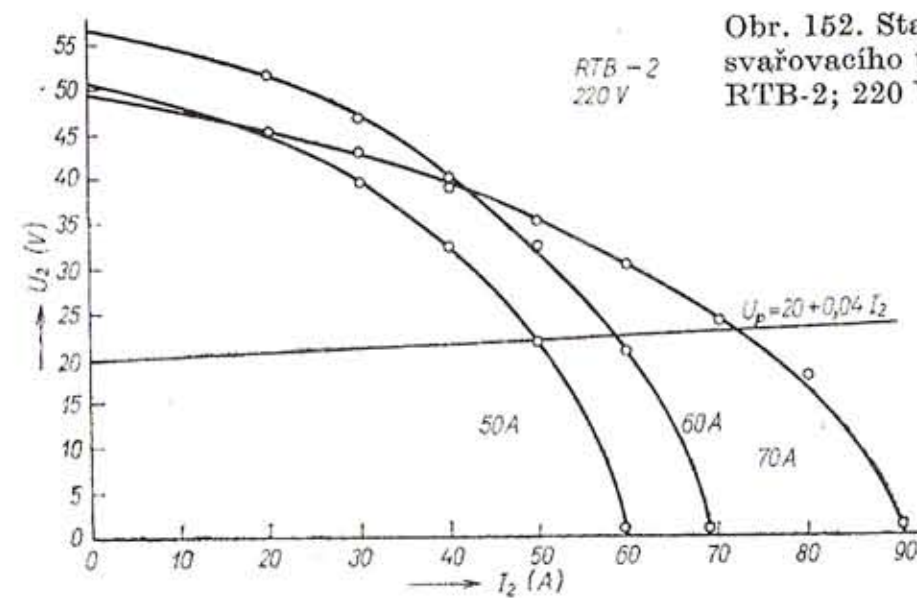
1) Po inovaci má MA 315 dálkový panel pro svařování dlouhými impulsy.

2) Popis svářečky v kap. 11.





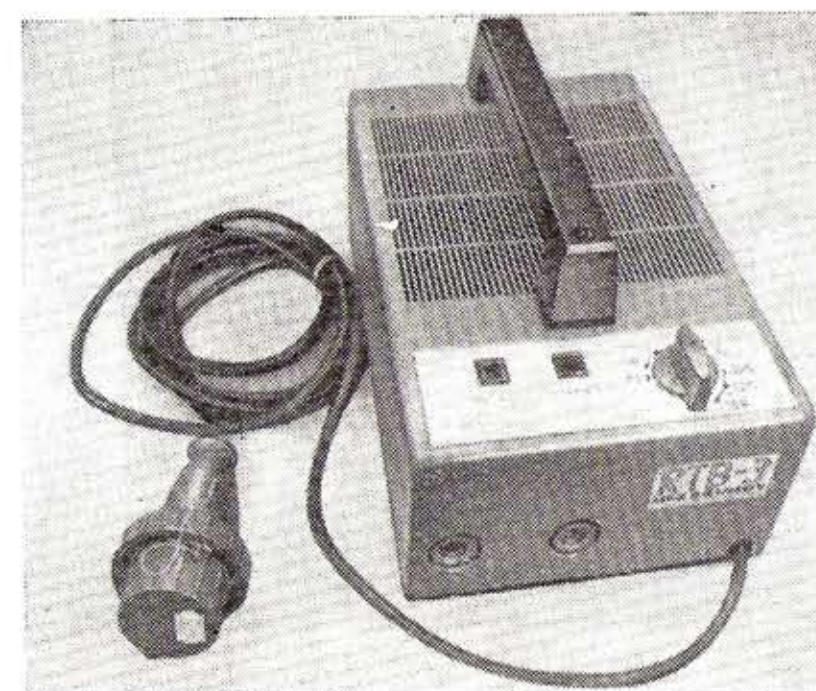
Obr. 151. Statické charakteristiky
svarořovacího transformátorku RTB-2;
380 V



Obr. 152. Statické charakteristiky
svarořovacího transformátorku
RTB-2; 220 V



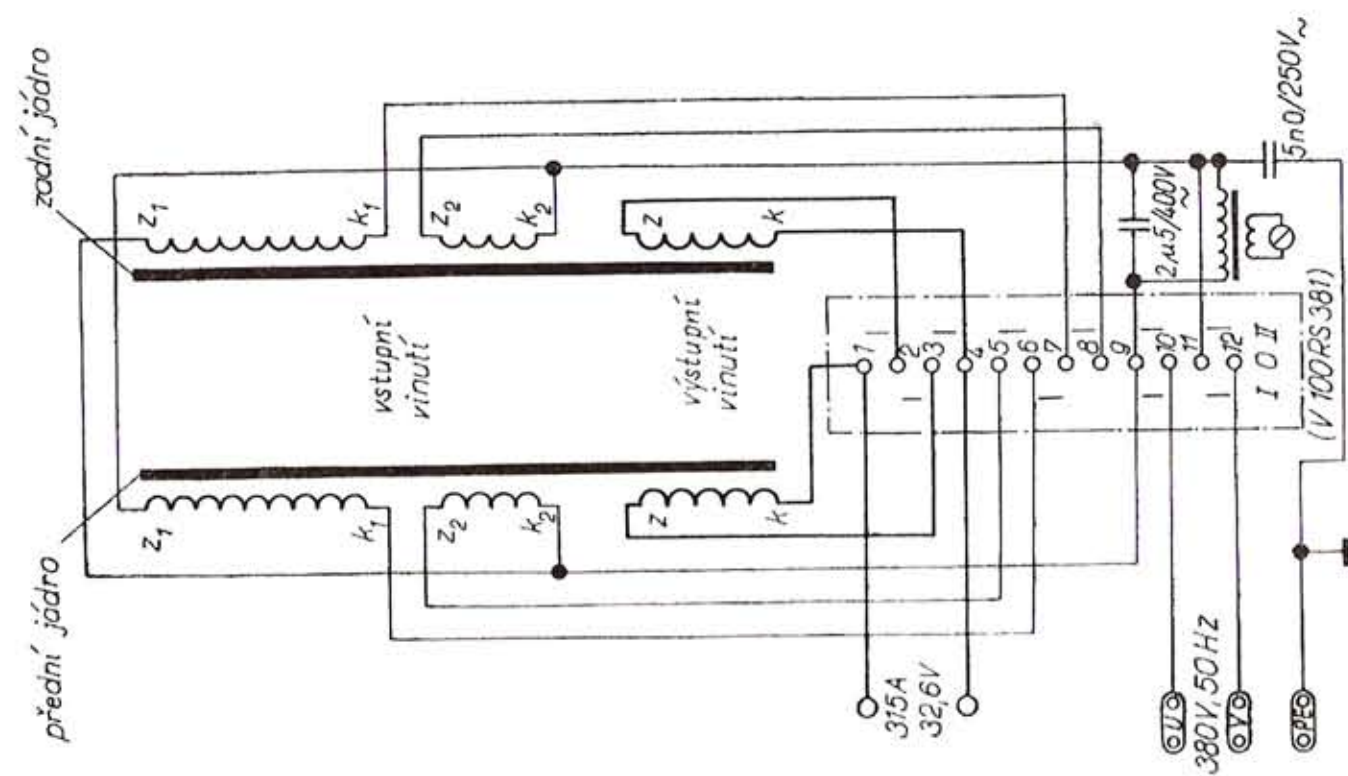
Obr. 153. Svarořovací
transformátorek RTB-2



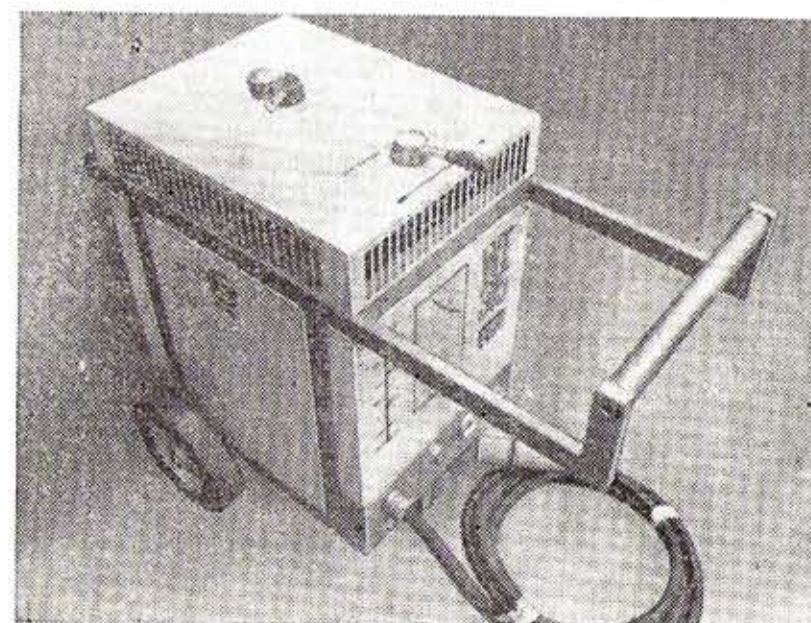
Obr. 154. Svarořovací
transformátorek RTB-3



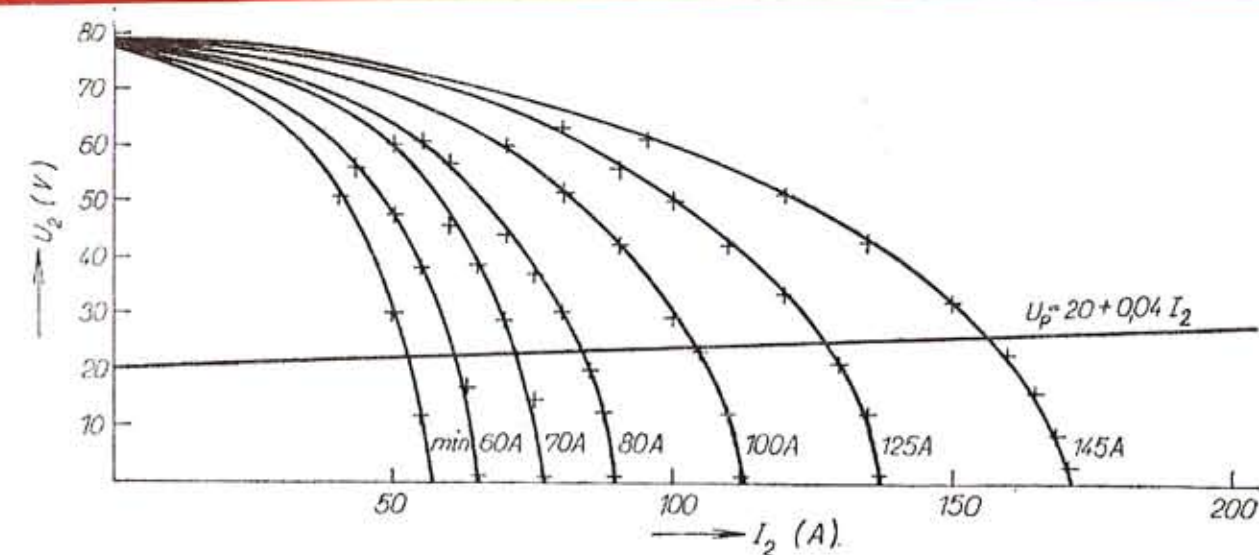
Obr. 155. Svařovací transformátorek JS 90-F



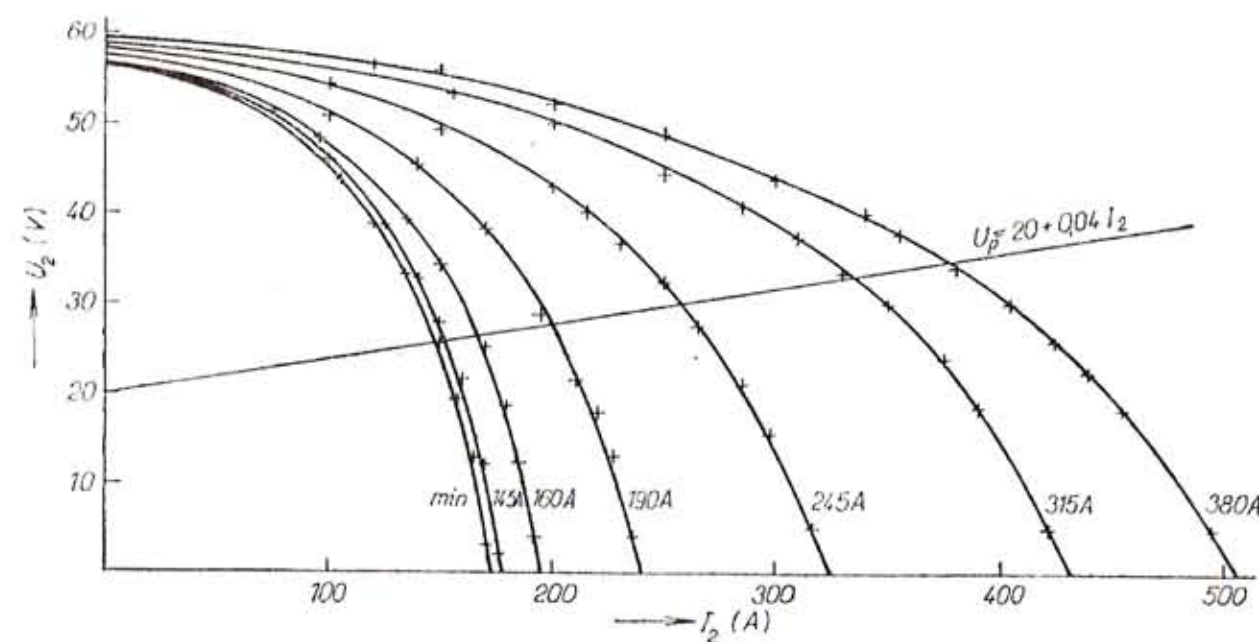
Obr. 156. Schéma svařovacího transformátoru WT 315



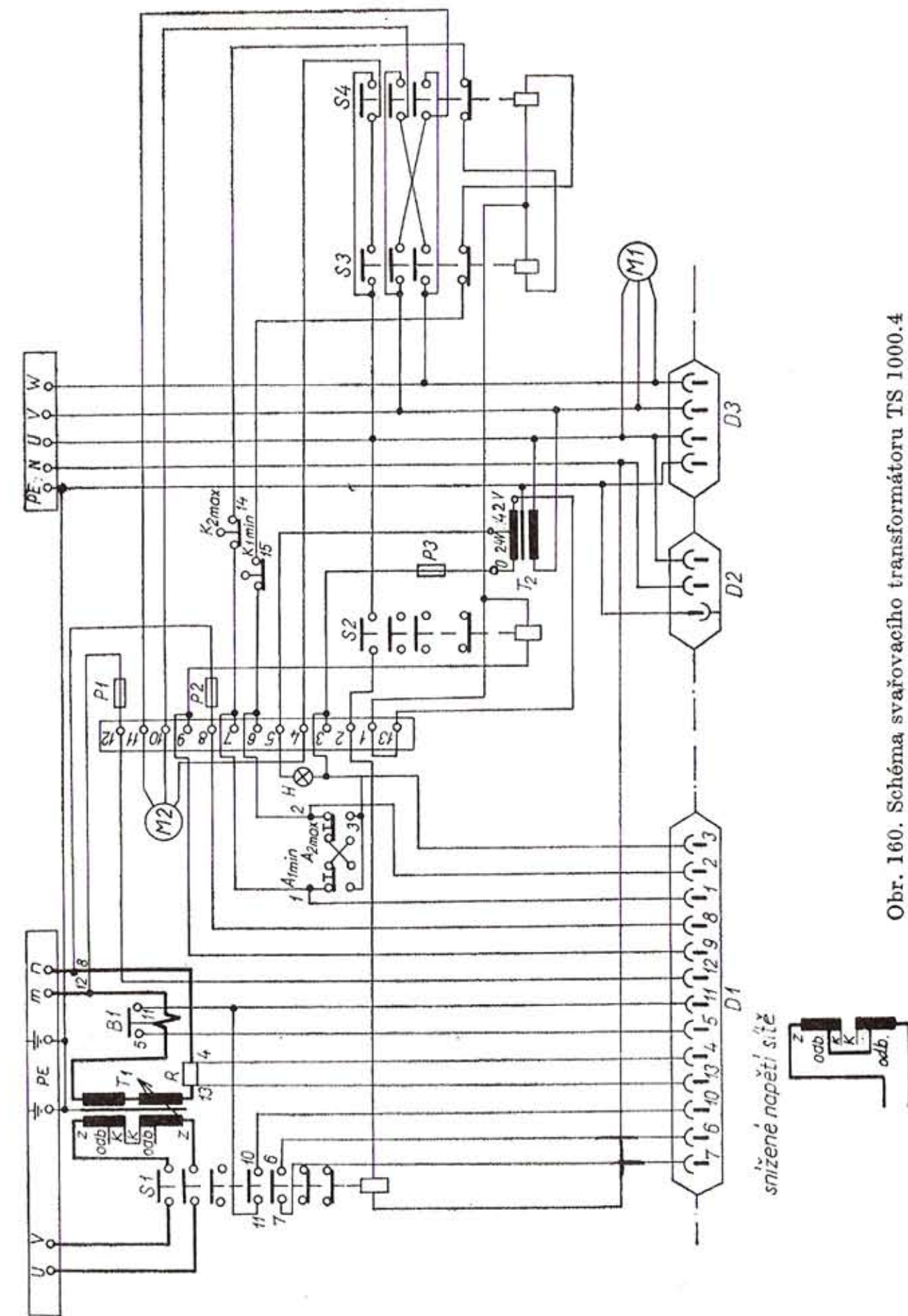
Obr. 159. Svařovací transformátor WT 315



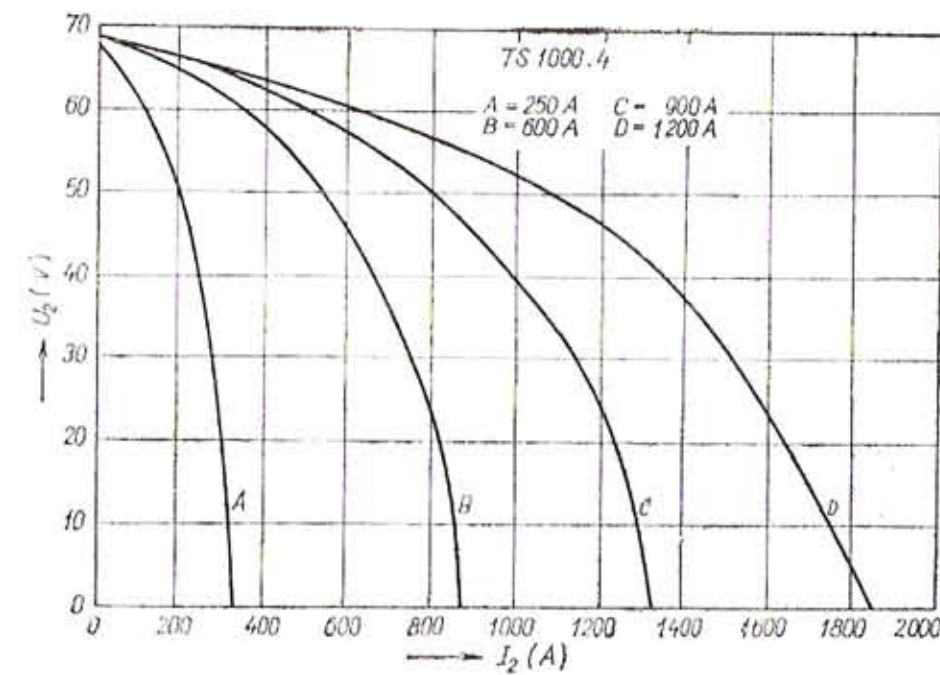
Obr. 157. Statické charakteristiky svařovacího transformátoru WT 315, 1. rozsah



Obr. 158. Statické charakteristiky svařovacího transformátoru WT 315, 2. rozsah



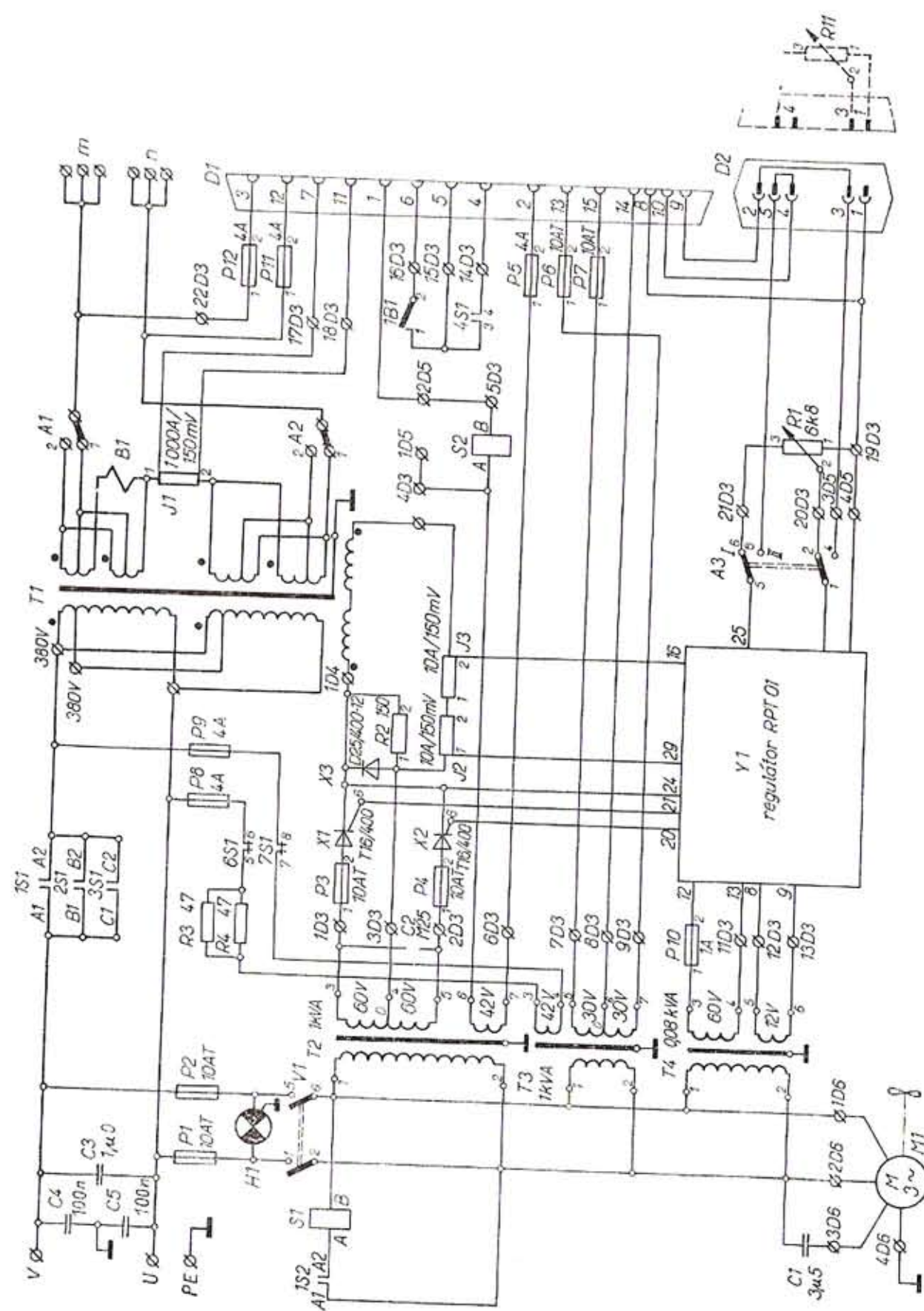
Obr. 160. Schéma svařovacího transformátoru TS 1000.4



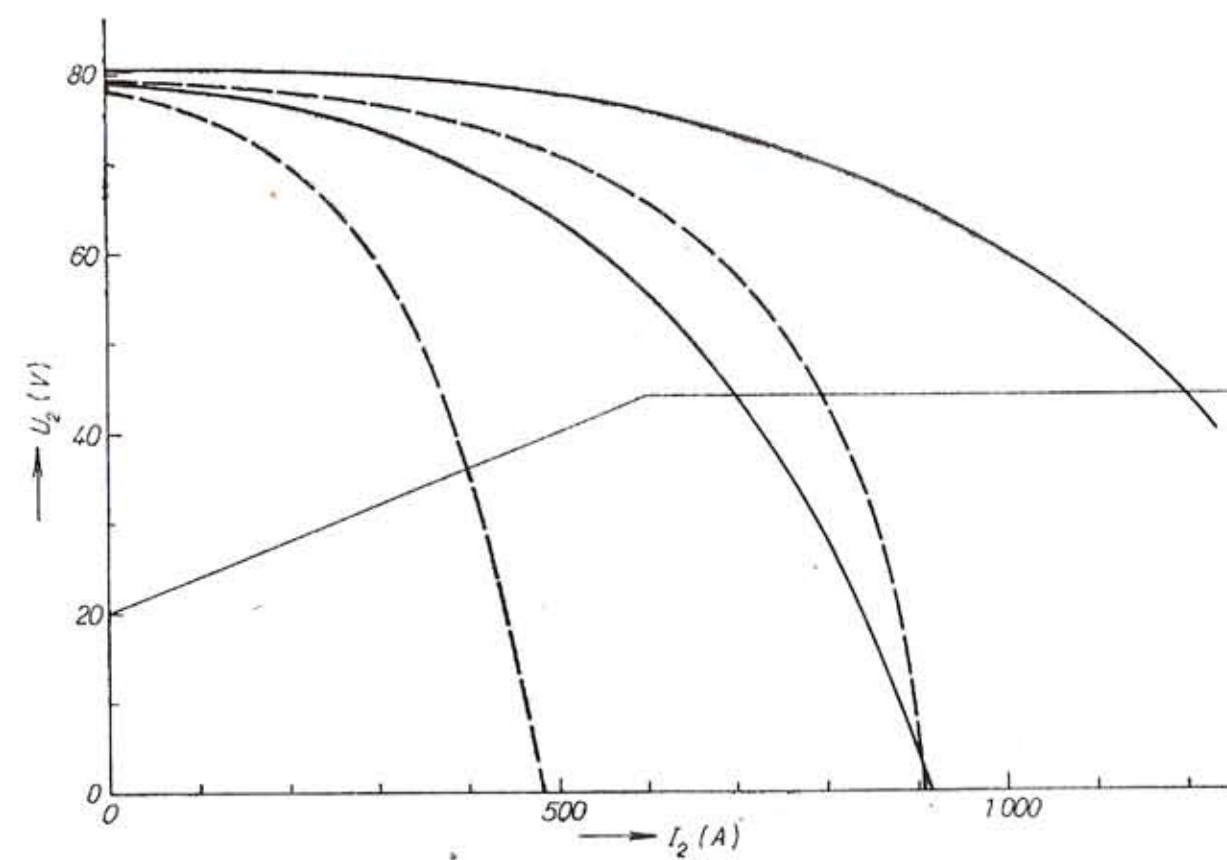
Obr. 161. Statické charakteristiky svařovacího transformátoru TS 1000.4



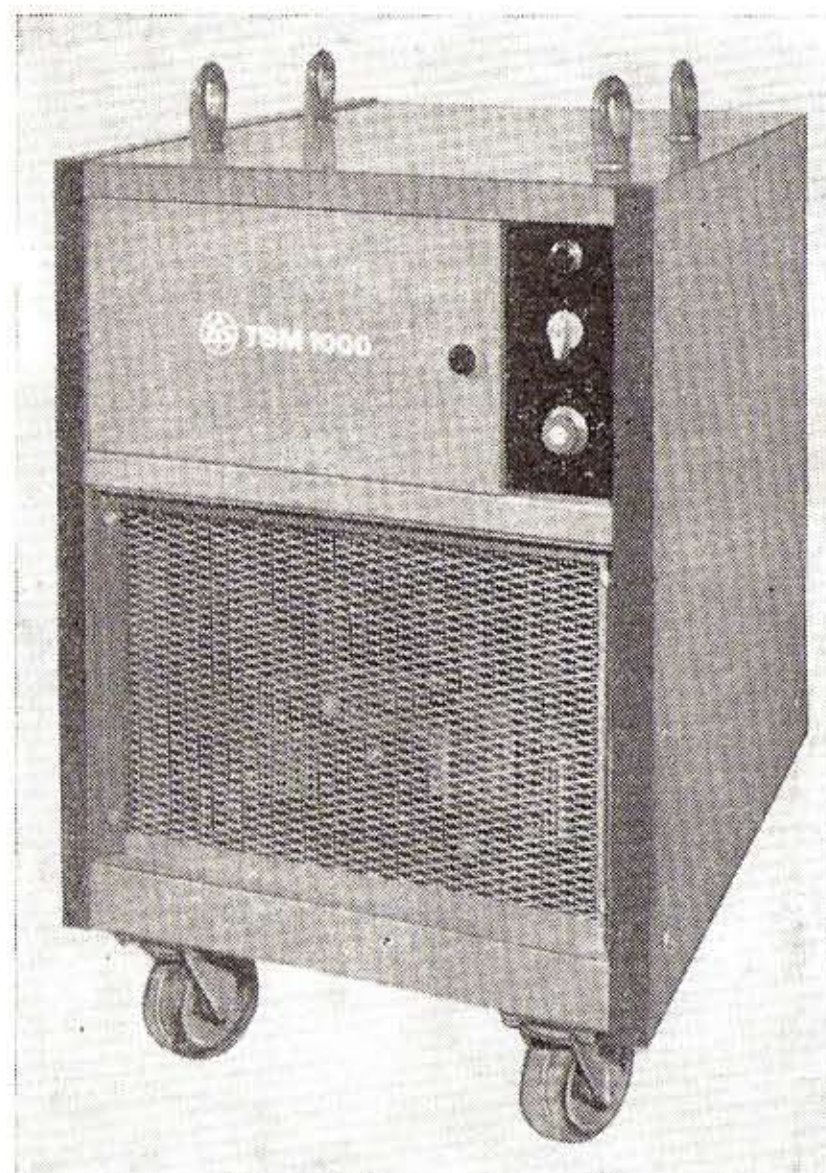
Obr. 162. Svařovací transformátor TS 1000.4



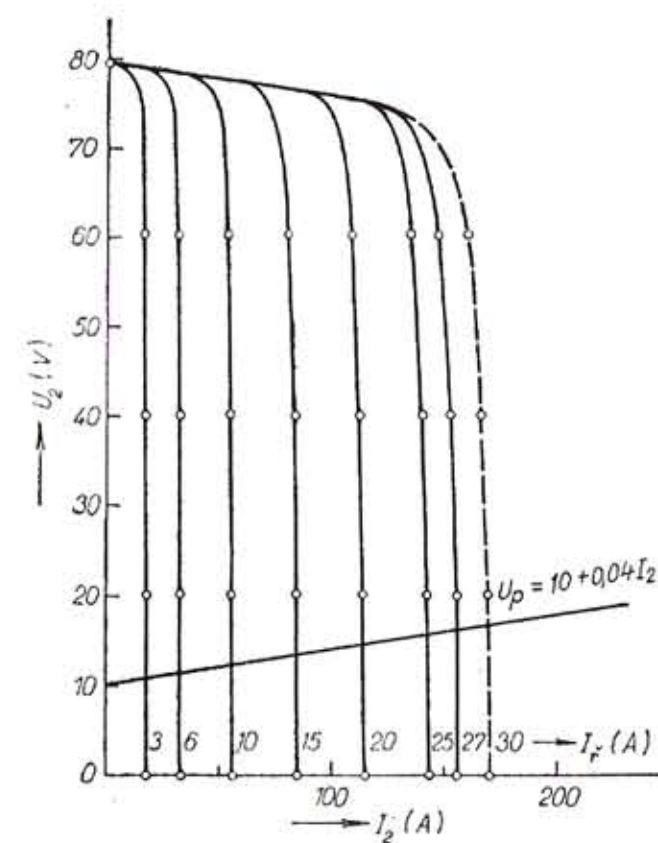
Obr. 163. Schéma transformátoru TSM 1000



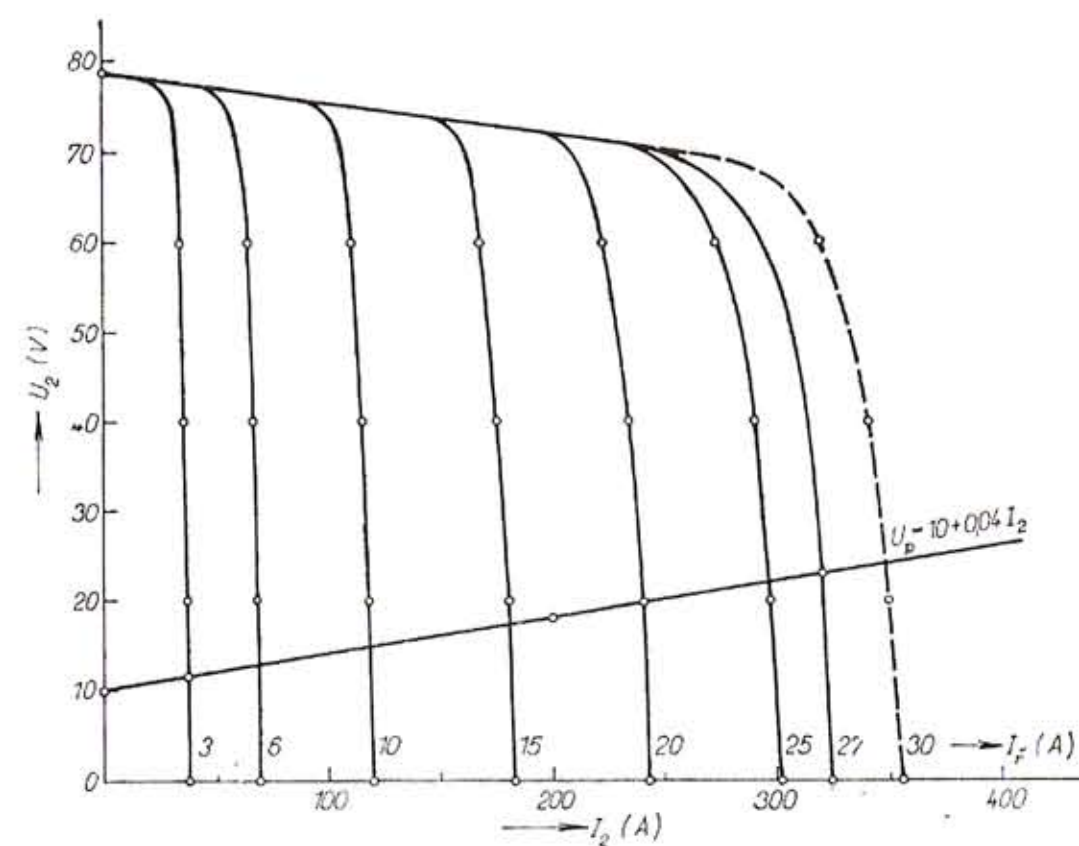
Obr. 164. Statické charakteristiky svařovacího transformátoru TSM 1000
čárkovaně 1. rozsah, plně 2. rozsah



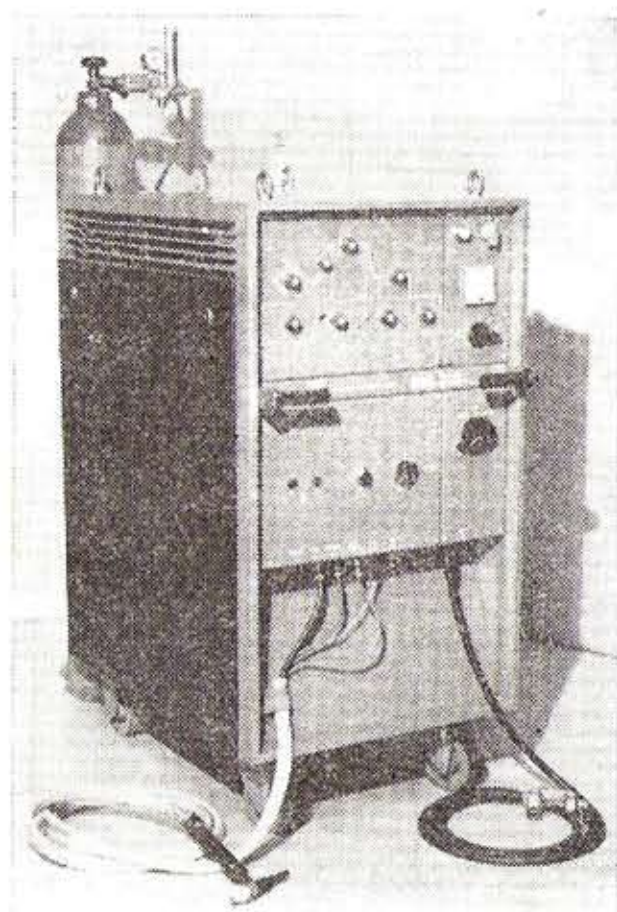
Obr. 165. Svařovací transformátor TSM 1000



Obr. 166. Statické charakteristiky univerzální soupravy MA 315 pro metodu WIG. 1. rozsah — střídavý proud



Obr. 167. Statické charakteristiky univerzální soupravy MA 315 pro metodu WIG. 2. rozsah — střídavý proud



Obr. 168. Univerzální souprava MA 315

11. Nové směry ve vývoji obloukových svařovacích transformátorů

Rozmach elektroniky ve světě zasáhl i do vývoje obloukových svářeček, včetně transformátorů. Využívá se u nich polovodičová technika silnoproudá (výkonové tyristory) i slaboproudá [116]. Zjednodušuje se např. obsluha, elektronika usnadňuje nastavování programu, uplatňuje se v řídicích, regulačních, snímacích nebo kontrolních obvodech, zmenšuje se množství použitého materiálu a elektrické energie a zlepšují se svařovací vlastnosti. Může být zavedeno i elektronické řízení statických a dynamických charakteristik. V neposlední řadě elektronika zajišťuje snadné použití ve spojení s roboty nebo s jiným automatickým zařízením.

Příkladem této aplikace [106], [107] je transformátor s rozsahem nastavení 250 až 1000 A s plochými statickými charakteristikami (ČSN 05 2205, obr. 3, s konstantním napětím), pro svařování tlustých plechů (63,5 mm) 36 vrstvami v úzké spáře (19 mm). Tyristorová regulace upraví pravoúhlé časové průběhy půlvln svařovacího proudu (jako na obr. 18) a zkrátí zhasnutí oblouku při komutaci pouze na 80 až 150 μ s (porovnej s průběhem na obr. 13).

Bezvadné zapálení oblouku při startu se uskuteční v intervalu asi 50 ms a lze také nastavit optimální dynamické charakteristiky pro druh a geometrii svařovacího drátu a pro druh tavidla.

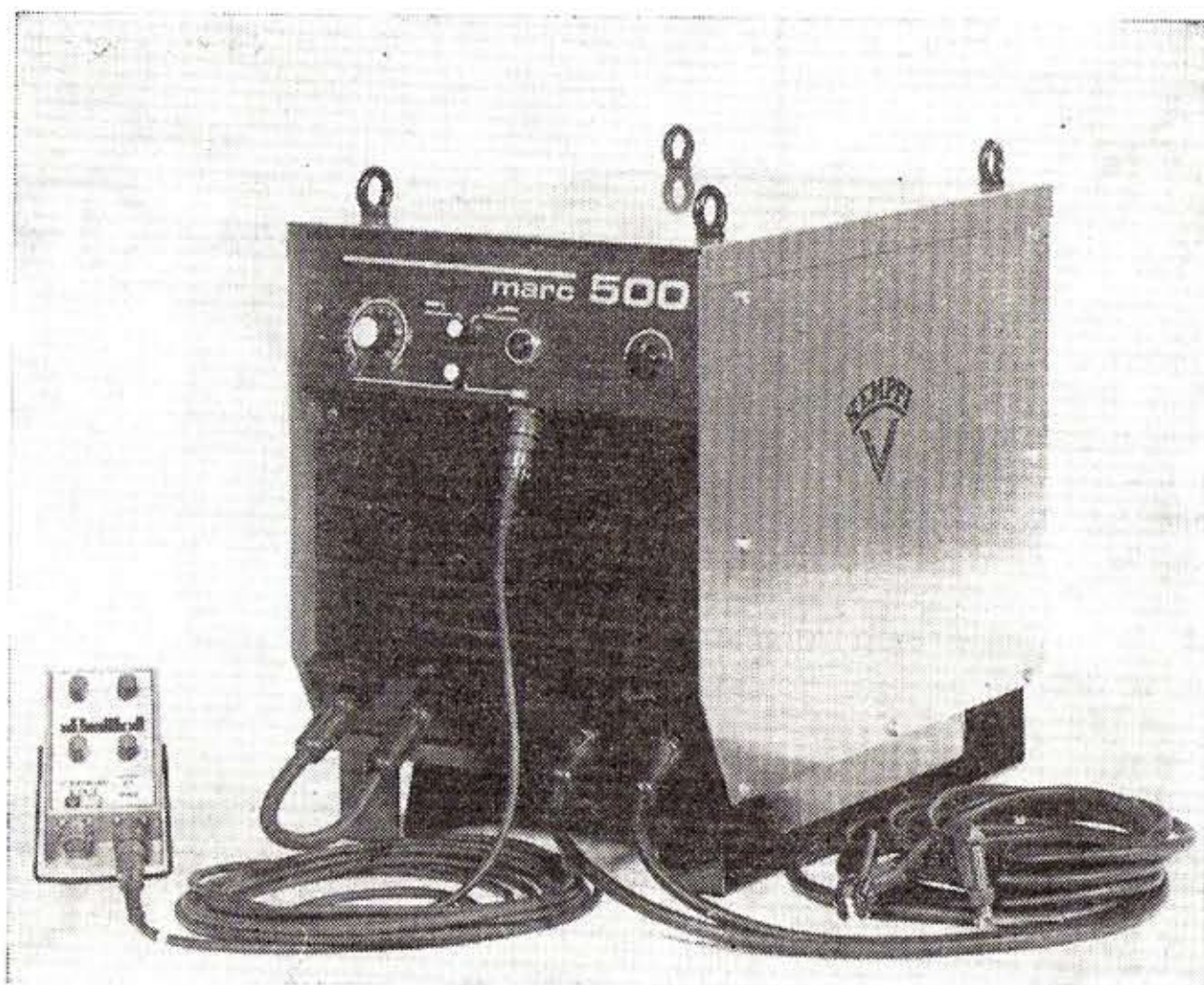
Pravoúhlý časový průběh svařovacího proudu se uplatňuje v univerzální svářečce MARC 500 HF [108]; její funkce je popsána v čl. 4.8, silnoproudé schéma je na obr. 74c. Technické údaje uvádí tabulka 20. (Tento typ vychází z typu MARC 500, jehož fotografie je na obr. 169 při zapojení na svařování střídavým proudem. Současně je připojeno zařízení pro dálkové nastavování dlouhodobých impulsů.)

Ke svářečce MARC 500 HF jsou dodávána různá příslušenství, jako vodní chlazení, odsavač kouře, dálkové ovládání svařovacího proudu, rovněž zařízení pro nastavování dlouhodobých impulsů (jeho přednosti popíšeme dále), zařízení pro snadnější startování (tzv. hot start), zařízení na vysoký kmitočet pro metodu WIG a běžné příslušenství.

Tato svářečka má mnohostranné použití. Je vhodná pro:

- svařování ručními elektrodami na stejnosměrný a střídavý proud,
- svařování WIG stejnosměrným a střídavým proudem,
- drážkování pomocí uhlíkové elektrody,
- se zvláštním přídatným zařízením i pro svařování MIG.

Tento univerzální zdroj se používá v dílnách, kde se často mění svařovací technologie, nebo v loděnicích.



Obr. 169. Univerzální svářečka MARC 500 s panelem pro svařování dlouhými impulsy

Vzhledem k pravoúhlému časovému průběhu svařovacího proudu a elektronickému řízení má svářečka dobré dynamické vlastnosti při všech svařovacích procesech v celém rozsahu. Nastavený proud je při změnách síťového napětí stabilizován. Zapalovací impuls zajišťuje dobrý start i při střídavém proudu, kde oblouk klidně hoří a nezhasíná ani při použití bazických elektrod, které mají velmi malý rozstřík a lze je více zatížit.

Při svařování střídavým proudem metodou WIG oblouk rovněž nezhasíná, přestože je napětí naprázdno poměrně nízké, $U_{20} = 68 \text{ V}$. Elektronická regulace odstraňuje usměrňovací jev bez použití filtračních kondenzátorů sériově zapojených ve svařovacím obvodu. Průvar se zvětšuje, špičkové hodnoty proudu jsou menší, kvalita svaru je lepší. Wolframovou elektrodu lze více zatížit a její opotřebení je menší.

V dalším výkladu uvedeme ještě některé výhody svařování dlouhými impulsy, které lze využít i u střídavého proudu (obr. 169 — dálkové provedení ovládacího panelu). Impulsy mívají trvání od 0,1 až do 2 s.

Trvání impulsů lze v tomto intervalu plynule nastavovat pro plynule nastavitelný základní proud a proud impulsů.

Podstatné výhody svařování dlouhými impulsy jsou např. tyto:

— Řízený přívod tepla zabrání přehřátí a zmenší pnutí a deformace materiálu při složitějších dílech nebo tenkých plechách.

— Vytvoří se dobrá a plochá kořenová housenka ve všech pozicích, protože lázeň je malá. Ani u řídce tekoucí lázně (při přehřátém materiálu) se kořen neprotaví.

— Mezera mezi deskami je dobře přemostěna. I na obtížně přístupných dílech vznikne málo chyb; i když oblouk působí na jednom místě déle, nevytvoří se tak velká lázeň, že by se propadla.

— Netvoří se póry a vruby ani nekape wolframová elektroda.

— Při ukončení svaru se snadno vyplní kráter, póry ve svaru se nevyskytují, svar nepraská; lze totiž využít řízeného poklesu proudu.

— Ušetří se přídavný materiál tím, že se tvoří plochá housenka — kořenová i vrchní (závěrná).

— Zvětší se trvanlivost wolframové elektrody a hořáku menším proudovým zatížením.

— Výhodou je také jednodušší a kratší výcvik svářeče i pro obtížnější úkoly.

— Základní materiál se s přídavnou elektrodou méně promíchá, zamezí se vzniku trhlin zatepla, svar nepraská.

Za hlavní nevýhodu tohoto způsobu lze považovat větší složitost zařízení a tím častější možnost vzniku poruchy.

Literatura

Časopisy a knihy

- [1] *Faltus, F. a kol.*: Příručka svařování. I. díl: Přehled technologie svařování. Praha, SNTL 1955.
- [2] *Leskov, G. J.*: Električeskaja svaročnaja duga. Moskva, Mašinostrojenije 1970.
- [3] *Hannappel, G.*: Das Wesen des elektrischen Lichtbogens. Schweißen und Schneiden, 1967, č. 3.
- [4] *Samek, E.*: Zváracie zdroje. Bratislava, SVTL 1967.
- [5] *Kleander, A.*: Přídavné materiály pro svařování. Praha, SNTL 1966.
- [6] *Němec, J.*: Ruční obloukové svařování střídavým proudem — historie, stav současný a vyhlídky. Přednáška v Poděbradech na DNT, 1967.
- [7] *Hromádka, V.*: Efektivnost ručního svařování el. obloukem stejnosměrným a střídavým proudem běžných strojírenských konstrukcí s ohledem na ekonomii jejich výroby. Závěrečná zpráva ZEZ Praha, č. zpr. Z 68—759, 1968.
- [8] *Kruml, V.—Štefl, M.*: Výzkum svařovacích vlastností zdrojů pro ruční obloukové svařování. Závěrečná zpráva. — VZS Chotěboř, Z 67—661, 1967.
- [9] *Kocour, J.—Kruml, V.*: Zpráva ze studijní cesty do SSSR. N. p. ZEZ Praha, 1966.
- [10] *Matoušek, A.*: Některé informace o svařování v Japonsku. Strojírenská výroba, příl. Svař. technika 1970, č. 10, str. VI.
- [11] *Bada, T.*: Servey of the non-shielded arc welding process with a flux-corred wire. Brožura firmy Fuji Iron Steel Corp. Ltd., 1968.
- [12] Application of the non-shielded arc welding process with a flux-corred wire to civil and architectural structure. Doc. IIW, com. XII—473—69, 1969.
- [13] *Nomura, H.—Nakado, H.*: Welding technology in Japanese modern shipyards. Brožura firmy Nichimen Co., Osaka, 1970.
- [14] *Hromádka, V.*: Efektivnost svařování elektrickým obloukem stejnosměrným a střídavým proudem. Závěrečná zpráva n. p. ZEZ Praha, č. Z 69—853, 1969.
- [15] *List, V.—Cenek, J.*: Elektrotechnika V — Elektrické teplo. Techn. průvodce 1950, Praha, Vědecko-technické nakladatelství 1950.
- [16] *Sequens, J.*: Obloukové svářečky. Praha, SNTL 1958.
- [17] *Zade, H. P.*: Welding transformers and rectifiers. London, Mac Millan 1967.
- [18] *Slavík, V.*: Údržba obloukových svářeček. Praha, SNTL 1979.
- [19] *Rabinovič, J. Ja.*: Oborudovanija dlja dugovoj električeskoj svarki. Moskva, Mašgiz 1958.
- [20] *Sarafanov, S. G. a kol.*: Elektrosvaročnoje oborudovanije i avtomatizacija svaročnych rabot v strojitelstve. Leningrad—Moskva, GSI 1962.
- [21] *Paton, B. E.—Lebedev, V. K.*: Elektrooborudovanije dlja ručnoj i šlakovoj svarki. Moskva, Mašinostrojenije 1966.
- [22] *Duben, Z.*: Technologie svařování pod tavidlem. MEZ Brno — Vývoj, n. p. Chotěboř, 1953.
- [23] *Hromádka, V.*: Svařování vysokovýkonnými elektrodami. Strojírenská výroba, příl. Svař. technika, 1969, č. 5, str. I—IV.
- [24] *Němec, J.*: Obloukové svařování. Praha, ESČ 1949.
- [25] *Tichodejev, G. M.*: Električeskije svojstva električeskoj svaročnoj dugi. Moskva, Izd. AN SSSR 1961.
- [26] *Zaruba, I. I.*: Električeskij vzryv kak pričina razbryzgivanija metalla. Avtomatičeskaja svarka, 1970, č. 3, s. 14—18.
- [27] *Zaruba, I. I.*: Mechanizm razbryzgivanija metalla při dugovoj svarkě. Avtomatičeskaja svarka, 1970, č. 11, s. 12—16.
- [28] *Zaruba, I. I.—Dymenko, V. V.*: Regulirovanije parametrov processa svarki s korotkimi замыkanijami. Avtomatičeskaja svarka 1971, č. 8, s. 43—45.
- [29] *Bertung, M.*: Influence of D. C. generators and welding transformers on arc stability and electrode burn-off rate. Brit. Welding Journal, 1964, č. 4, s. 172—182.
- [30] Svařování wolframovou elektrodou s ohřevem přídavného drátu. Iron Age, 1966, č. 15, s. 61—64 (fa. Linde Division Union Co.).
- [31] *Clements, H. W.*: Power sources for gas shielded welding of aluminium. Welding & Metal Fabr., 1968, č. 12, s. 440—446.
- [32] *Weinschenk, H. E.*: Die Stabilisierung des Wechselstromlichtbogens durch einen hochfrequenten Hilfsstrom. Schweißtechnik 1956, č. 2, s. 37—40.
- [33] *Reinhard, H. J.*: Querschnittsverengte Schweißtransformatoren mit nichtsinusförmiger Leerlaufspannung. Schweißen u. Schneiden 1967, č. 12, s. 578—580.
- [34] *Flemming, D.—Sossenheimer, H.*: Schweißen heute und morgen. Deutscher Verband f. Schw. Düsseldorf, 1972.
- [35] *Zaruba, M.—Kruml, V.*: Základní podmínky optimální stability procesu při svařování v CO₂ z hlediska teorie a praxe. Zváranie, 1965, č. 5, s. 138—144.
- [36] *Lenkei, A.*: Zařízení pro snížení napětí transformátorů pro svařování obloukem při chodu naprázdno. Patent MLR č. 146.582, vyd. 24. 7. 1953.
- [37] *Rožanskij, Z. J.—Buki, J. M.*: Avtomatičeskij organičitel naprjaženija cholestogo choda svaročnogo transformatora. Svar. proizvodstvo, 1964, č. 1, s. 34 až 35.
- [38] *Golovko, I. M.*: Ustrojstvo dlja organičeniija cholestogo choda svaročnogo transformatora. Patent SSSR č. 117.928 vyd. 21. 2. 1958.
- [39] *Seidenschneider, A. a kol.*: Energie-Einsparung bei Schweißtransformatoren. Deutsche Elektrotechnik, příl. Elektrofertigung, 1955, č. 9.
- [40] *List, V.*: Souměrné složky. Praha, ESČ 1944.
- [41] *Brabenec, A.*: Trojfázové svařování pod tavidlem. Záv. zpráva VÚSST Chotěboř, č. Z 58—205, 1958.
- [42] *Fridman, L. N. a kol.*: Analiz uslovij regulirovanija trechfaznoj dugi pri svarko plavjaščimsja elektrodom. Avtomat. svarka, č. 5, str. 15—17.
- [43] *Gabler, M., Haškovec, J., Tománek, E.*: Magnetické zesilovače. Praha, SNTL 1961.
- [44] *Bamdas, L. M.*: Transformatory i stabilizatory regulirujemyje podmagničivaniem šuntov. Moskva, Gosenergoizdat 1959.
- [45] *Cigánek, L.*: Stavba elektrických strojů. Praha, SNTL 1958.
- [46] *Kučera, J.—Hapl, J.*: Transformátory. (Skriptum) Praha, SPN 1953.
- [47] *List, V. a kol.*: Elektrotechnika III. Elektr. stroje, 2. část, Techn. průvodce 15, Praha, SNTL 1963.
- [48] *Pešák, F.*: Výpočty transformátorů. Praha, SNTL 1955.
- [49] *Cigánek, F.*: Rozptyl transformátoru pro napájení svařovacího oblouku. Elektrotechnický obzor, 1936, č. 8, 9, 11, 12.
- [50] *Nikitin, V. P.*: Osnovy teorii transformatorov i generatorov dlja dugovoj svarki. Moskva, Izd. AN SSSR 1956.
- [51] *Troickij, V. A.*: Podmagničivajemyje transformatory dlja svaročnych istočnikov pitaniija. Avtomat. svarka, 1968, č. 12.
- [52] *Lebedev, V. K.*: Transformator s jarmovym rassejanijem regulirujemym svaročnym kablem. Avtomat. svarka, 1968, č. 6.
- [53] *Bispinghoff, R.*: Ein elektrisch geregelter Schweißtransformator. Conti-Elektro-Berichten 1969, č. 2.
- [54] *Lebedev, V. K.*: Novyje transformatory dlja ručnoj dugovoj svarki. Avtomat. svarka, 1962, č. 11.
- [55] *Zwanzger, P.*: Transduktorgesteuerter Lichtbogen-Schweißtransformator für maximal 1200 A Schweißstrom. Siemens-Zeitschrift, 1961, č. 2.

- [56] Zwanger, P.: Durch Gleichstromvormagnetisierung steuerbare Lichtbogen-Schweißtransformatoren. Siemens-Zeitschrift, 1958, č. 10.
- [57] Bučev, Jovčev: Nové bulharské zdroje střídavého a stejnosměrného proudu pro ruční obloukové svařování. Dom techniky SVTS, 1969, Symposium o zdrojích, s. 31—42.
- [58] Zaks, M. I.: Konstrukce i elementy račeta podmagničivajemogo transformatora dlja elektrodugovoj svarki. Avtomat. svarka, 1965, č. 9.
- [59] Glebov, J. A.: Teplový račet svaročnych transformatorov zalitych epoksidnym kumpaundom. Avtomat. svarka, 1970, č. 4.
- [60] Paton, B. E., Lebedev, V. K.: Elementy račetov cepej i apparatov peremennogo toka dlja dugovoj svarki. Kijev, Izd. AN USSR 1953.
- [61] Carrer, A.: Comportamento dinamico di trasformatori per saldatura ad arco. Riv. Italiana della saldatura, 1963, č. 1/2, s. 3—20.
- [62] Aadahl, J.: Metal transfer in the welding arc dependent on the quality of the current source. The Technical University of Norway, 1963.
- [63] Hirschfeld, G.: Untersuchungen zur Einschätzung von Schweißseigenschaften von Schweißtransformatoren. ZIS-Mitteilungen, 1965, č. 11, s. 1510—1551.
- [64] Carrer, A.—Girardi a kol.: Comportement dynamique des transformateurs pour le soudage à l'arc. Doc. IIW 1967, 268—67.
- [65] Kas, J.: Appreciation of the quality of welding transformers. Welding in the world, 1968, č. 3, s. 162—181.
- [66] Kruml, V.: Metody zkoušení vlastností zdrojů pro obloukové svařování. Dom techniky SVTS Bratislava 1969, Symposium o zdrojích, s. 5—30.
- [67] Salagean, T. a kol.: Recherches sur les comportements dynamiques des transformateurs de soudage. Doc. IIW 1970, 352—370.
- [68] Röll, W.: Betrachtungen über die Kennzeichnung des dynamischen Verhaltens von Schweißtransformatoren. Schweißen u. Schneiden, 1971, s. 72—74.
- [69] Kovačev, Bažanova, Tenev: Opredelenie prigodnosti transformatorov dlja ručnoj svarki. Avtomat. svarka, 1971, č. 11, s. 21—23.
- [70] Roškota, S. a kol.: Navrhování elektrických zařízení dle předpisů ČSN. Praha, SNTL 1970.
- [71] Přenosná sušárna elektrod PKS 1. Stroj. výroba, příl. Svař. technika 1970, č. 5, s. XI.
- [72] Hora, V.: Svařování pod tavidlem. Praha, Práce 1956.
- [73] Plíva, L.: Projektování svařovacích linek. Praha, SNTL 1963.
- [74] Lukášek, J.: Studium progresivních směrů svař. technologií. Záv. zpráva VZS Chotěboř, č. 72-1004 1972.
- [75] Blažek, J.: Výrobní program a označování přídavných materiálů pro svařování n. p. ŽAZ Vamberk. Stroj. výroba, příl. Svař. technika, 1970, č. 9, s. I—VI.
- [76] Přídavné materiály pro svařování kovů. Katalog n. p. ŽAZ Vamberk, 1972.
- [77] Pecháček, J.: Metodika a technologie ručního svařování el. obloukem. Dům techniky ČVTS Pardubice, 1973.
- [78] Kottenhahn, W.: Die Energieverluste und die Unfallgefahren der Schweißstromleitungen. Elektrofertigung, 1955, č. 9, s. 65—67.
- [79] Thoma, R.: Die zulässige Höhe der Leerlaufspannung beim Lichtbogen-Schweißtransformator. Schweißen u. Schneiden, 1962, č. 4, s. 153.
- [80] Plešinger, a kol.: Bezpečnost při svařování elektrickým obloukem. Praha, Práce 1964.
- [81] Rameš, J.: Bezpečnostní předpisy při svařování. Zváranie, 1965, č. 6, s. 190 až 191.
- [82] Witting, E.: Höhe der Leerlaufspannung beim Lichtbogen-Schweißtransformator. Schweißen u. Schneiden, 1966, č. 6, s. 217—220.
- [83] Sam, U.: Untersuchungen über elektrische Gefährdung des Menschen bei Teildurchströmungen. Schweißen u. Schneiden, 1967, č. 3, s. 125—126.
- [84] Frič, H.: Požiare a úrazy pri elektr. zváraní. Bratislava, VÚZ 1968.

- [85] Kleander, A.: Aktiv o bezpečnosti při svařování pro ředitele Východočeského kraje. Zváranie, 1968, č. 2, s. 61—63.
- [86] Frič, H.: Úrazy pri elektrickom zváraní. Zváranie, 1968, č. 5, s. 156—158.
- [87] Vrána, B.: Projektování svařoven z hlediska péče o člověka. Stroj. výroba, příl. Svařovací technika, 1970, č. 2 a 3.
- [88] Frič, H.: Ochranné opatrenie na ochranu očí, dýchacích ciest a tela pri jednotlivých druhoch zvaracej techniky. Zváranie, 1972, č. 1, str. 28—32.
- [89] Chlebnikov, E. B.: Elektrobezpečnosť i naprjaženie cholestogo choda svaročnych transformatorov. Svaročnoje proizvodstvo, 1972, č. 5, str. 51—53.
- [90] Grönbeck, Ingvar: Submerged-arc welding with a multi-electrod system. Svet-saren, 1973, č. 2, str. 8—12.
- [91] Kruml, V.—Štefl, M.: Univerzální zdroj na 315 A pro svařování WIG. Závěrečná zpráva. VZS Chotěboř, Z 74—1069, 1974.
- [92] Firma Sciaky: Elektrisches Schmelzschweißen. Propagační brožura, 1971.
- [93] Hromádka, V.: Ruční svařování střídavým proudem. Praha, SNTL 1974.
- [94] Matoušek, K.: Základní technologické informace pro svařování s použitím svařovacích trubiček. Strojírenská výroba, příl. Svařovací technika 1976, č. 9, str. I.
- [95] Štefl, M.: Příspěvek k hodnocení zdrojů pro ruční obloukové svařování. Zváranie, 1975, č. 3, str. 88—93.
- [96] Kleandr, A.—Blažek, J.: Přídavné materiály pro svařování. Praha, SNTL 1973.
- [97] Hromádka, V.: Svařování vysokovýkonnými elektrodami. Praha, SNTL 1973.
- [98] Krňák, R. a kol.: Kapesní příručka svařování, řezání, pájení. Praha, SNTL 1973.
- [99] Krňák, R.: Kvalifikační příručka svářeče elektrickým obloukem. Praha, Práce 1974.
- [100] Jedlička, J.—Hauner, M.: Svařování v otázkách a odpovědích. Praha, SNTL 1973.
- [101] Nováček, K. a kol.: Svařování. Praha, Státní zemědělské nakladatelství 1976.
- [102] Štefl, M.: Svařovací transformátor 1000 A trvale pro svařování pod tavidlem. Závěrečná zpráva. VZS Chotěboř, Z 73—938/III, 1973.
- [103] Schweißen und Schneiden, 1975, č. 9, str. 334.
- [104] Dvořák, K.: Vývoj počtu svařovacích strojů a jejich struktura v USA v letech 1968—1978. Strojírenská výroba, 1981, č. 6, str. I—II.
- [105] Samek, E.: Využitie zvaracích transformátorov pre krátkodobé zatiaženie. Strojírenská výroba, 1982, č. 6, str. XIV—XVI.
- [106] Kollektiv autorů ZIS Halle, NDR: Neues in der Schweißtechnik, 1980, Schweißtechnik, 1981, č. 5, s. 218—239.
- [107] Grist, F. J.—Armstrong, F. W.: Eine neue Wechselstrom—Konstantspannungsquelle für das Engspaltschweißen dicker Bleche. Welding Journal, 1980, č. 6, s. 30—35.
- [108] Firma Kemppi (Finsko): Prospekt univerzální svářečky typu MARC 500 HF, r. 1981.
- [109] Horák, Z.—Krupka, F.: Fyzika. 2. díl. Praha, SNTL 1976.
- [110] Vidrna, J.: Několik poznámek k ručnímu obloukovému svařování střídavým proudem. Zváranie, 1980, č. 10, s. 291—294.
- [111] Welding technologie data — sheet 27. Tungsten inert gas welding — Part 4. Welding and Metal Fabrication, 1972, č. 4, s. 127—128.
- [112] Norma RVHP: Zdroje proudu pro obloukové svařování. Metody zkoušek svařovacích vlastností. 2. návrh, 1980.
- [113] Halen, S.: Bezpečná práce svářeče obloukem. Praha, Práce 1980.
- [114] Plíva, L.: Čs. stroje a pomocná zařízení pro obloukové elektrostruskové a odporové svařování. Praha, SNTL 1980.
- [115] Rychtera, J.: Československá elektronika pro svařovací stroje. Sborník přednášek na Welding 1982. Dom techniky ČSVTS Bratislava, 1982.

- [116] *Kolektiv autorů ZIS Halle, NDR: Neues in der Schweißtechnik 1981. Schweißtechnik, 1982, č. 5, s. 217—239.*
- [117] *Hromádka, V.: Možnosti energetických úspor při obloukovém svařování. Sborník XIV. DST 1980, ŽAZ Vamberk.*
- [118] *Hromádka, V.: Úspory elektrické energie ve svařování. Strojírenská výroba, 1979, č. 6, s. I—III.*
- [119] *Hromádka, V.: Snížení spotřeby elektrické energie při svařování. Sborník mechanizace a automatizace svařování, Welding 1980. Dom techniky ČSVTS Bratislava, 1980.*

Československé státní normy

- ČSN 01 0170 Názvosloví oboru automatizace a regulační techniky. ÚNM Praha, 1962.
- ČSN 05 0002 Zváranie a naváranie elektrickým oblúkom a elektrotroskove. Základné pojmy. ÚNM Praha, 1973.
- ČSN 05 0630 Bezpečnostní ustanovení pro svařování elektrickým obloukem. ÚNM Praha, 1979.
- ČSN 05 0705 Predpisy pre základné skúšky zvaračov. ÚNM Praha, 1978.
- ČSN 05 0710 Predpisy pre úradné skúšky zvaračov. ÚNM Praha, 1977.
- ČSN 05 2205 Obloukové svářečky. ÚNM Praha, 1977.
- ČSN 05 2210 Obloukové svařovací transformátory. Technické požadavky a zkoušení. ÚNM Praha, 1978, změna a 1981.
- ČSN 05 2211 Zváracie transformátorčeky na oblúkové zvaranie. ÚNM Praha, 1976.
- ČSN 05 2220 Oblúkové zvaracie usmerňovače so strmými statickými charakteristikami. ÚNM Praha, 1981.
- ČSN 05 2240 Oblouková svařovací soustrojí. ÚNM Praha, 1977.
- ČSN 05 5010 Obalené elektródy na zvaranie a naváranie elektrickým oblúkom. Základné ustanovenia. ÚNM Praha, 1976.
- ČSN 05 5022 Elektroda E 42.11. ÚNM Praha, 1976.
- ČSN 05 5023 Elektroda E 42.16. ÚNM Praha, 1976.
- ČSN 05 5026 Elektroda E 44.72. ÚNM Praha, 1976.
- ČSN 05 5027 Elektroda E 44.83. ÚNM Praha, 1976, změna a 1980.
- ČSN 33 0160 Značení vodičích svorek elektrických předmětů a zařízení. ÚNM Praha, 1981, změna a 1982.
- ČSN 33 0330 Krytie elektrických zariadení. Predpisy a metódy skúšania. ÚNM Praha, 1980, změna a 1983.
- ČSN 33 2320 Předpisy pro elektrická zařízení v místech s nebezpečím výbuchu hořlavých plynů a par. ÚNM Praha, 1981.
- ČSN 33 4200 Ochrana radiového příjmu před rušením. Základní ustanovení. ÚNM Praha, 1983.
- ČSN 34 0130 Předpisy pro povrchové cesty a vzdušné vzdálenosti. ÚNM Praha, 1975.
- ČSN 34 0270 Predpisy pre triedenie materiálov na izoláciu elektrických strojov a prístrojov podľa ich tepelnej stálosti v prevádzke. ÚNM Praha, 1959.
- ČSN 34 1010 Všeobecné předpisy pro ochranu před nebezpečným dotykovým napětím. ÚNM Praha, 1978.
- ČSN 34 1630 Elektrická zařízení pracovních strojů. ÚNM Praha, 1973.
- ČSN 34 2860 Předpisy pro odrušení elektrických strojů, přístrojů a zařízení. ÚNM Praha, 1979.
- ČSN 34 3500 První pomoc při úrazech elektrinou. ÚNM Praha, 1965.
- ČSN 34 5608 Typové, kontrolní a informační zkoušky elektrotechnických výrobků. ÚNM Praha, 1955.
- ČSN 34 7552 Vodiče typov CGZ, AGZ. ÚNM Praha, 1979.

- ČSN 35 1000 Elektromagnetické stroje netočivé. Základní norma. ÚNM Praha, 1981.
- ČSN 35 1080 Základní zkoušky elektromagnetických strojů netočivých. ÚNM Praha, 1976, změna c 1982.
- ČSN 37 5053 Používání pohyblivých přívodů a šňůrových vedení v silových zařízeních. ÚNM Praha, 1966.
- ČSN 42 0230 Plechy ocelové tenké pro elektrotechniku válcované za tepla. Techn. dodací předpisy. ÚNM Praha, 1977.
- ČSN 42 0231 Pásky ocelové tenké pro elektrotechniku válcované za studena s orientovanou strukturou. Technické dodací předpisy. ÚNM Praha, 1976.
- ČSN 42 3001 Měď 99,9 — Měď E Cu (elektrovodná). ÚNM Praha, 1981.
- ČSN 42 4004 Hliník tvářený pro elektrotechniku 42 4004 Al 99,5. ÚNM Praha, 1979.
- ČSN 42 7308 Pásky z hliníku a slitin hliníku pro elektrotechniku (dynamopásky). Rozměrová norma. ÚNM Praha, 1967.
- ČSN 42 8306 Plechy, pásky, pruhy a kotouče z mědi a slitin mědi válcované za studena. Rozměry. ÚNM Praha, 1972.
- ČSN 42 8308 Pásky z mědi a slitin mědi pro elektrotechniku (dynamopásky). Rozměrová norma. ÚNM Praha, 1967.
- ČSN 65 4305 Argon plyný stlačený. ÚNM Praha, 1980.

Rejstřík

anoda 35
anodová oblast 35
automat svařovací 59
automatická regulace 59
Ayertonová 37

bezpečnost při svařování 200, 211
bludné proudy 208

Carer 192

časová konstanta samoregulace 52
činitel přídavných ztrát 124
— rozdělení vinutí 130
— rozptylu 104
— roztavení 51
— tvaru 41
— vazby 104
— výkyvu 121

dálkové nastavení statických charakteristik 62
definice indukčnosti 102, 103
dynamická charakteristika 18, 116
dynamické vlastnosti svářeček 53

elektrický oblouk 32
elektrody bazické 19, 203
— kyselé 30, 203
— rutilové 30, 204
— trubičkové 13
— vysokovýkonné 204
elektromagnetická síla 39

fázorový diagram 68, 109
feromagnetický obvod 105
filtrační kondenzátory 47, 58, 234
foukání oblouku 10, 27

gravitační svařovací zařízení 13

hloubka regulace 155

charakteristiky dynamické 18
— oblouku 37
— statické 17

indukčnost vlastní 101
— vzájemná 101
indukované napětí 100
— elektrické pole 33
intenzita magnetického pole 97
ionizace 33
ionizátor impulzní 58
— — bez jiskřiště 59
— vysokofrekvenční 57
izolační materiály 165
— odpor 201

jádro transformátoru 157
jednotková magnetická vodivost 134, 140
jiskřiště 58

katoda 35
katodová oblast 35
— skvrna 35
kompenzace účinku 65
kompenzační kondenzátor 65
komutace st napětí na oblouku 45
konstrukce 161
— stahovací 166
kryt 166

magnetická indukce 98
— vodivost 99
magnetické účinky el. proudu 97
magnetický bočník 89
— — pohyblivý 90
— — se stejnosměrnou magnetizací 91
— odpor 98
— tok 98
— — rozptylový 106
magnetizační křivka 105
magnetomotorické napětí 97

náhradní schéma transformátoru 108, 109
napětí naprázdno 16
— na oblouku 16
napětíové zapalovací špičky 43
návrh svařovacího transformátoru 161
— — — s posuvnými cívkami 177
— — — s přepínáním odboček 170, 188
návrh tlumivky vyhlazovací 158
— — střídavé 184

nerovnoměrné zatížení sítě 68
normalizované pracovní napětí 16
normalizovaný cyklus 17

oblouk svařovací 32
obloukový sloupec 34
odrušovací kondenzátor 170
ochranný plyn 26, 45
opravy transformátoru 209
oseilogram svařovacích veličin 42, 194
oteplení 126
ovládač 15
ovládací skříňka 60
— zařízení 15

paralelní chod 207
permeance 99
permeabilita poměrná 98
— vakua 98
pinch-efekt 40
plazma 36
plyn ochranný 26, 45
podávací motor 60
pomocné funkce 169
porovnání svářeček 19
princip transformátoru 106
principy ovládání svařovacího proudu 73
prostorový náboj 35
proud nakrátko 17
proud naprázdno činný 123
— — jalový 121
přenos kovu 36
— — bezzkratový 40
— — zkratový 40
přesytka 76
přídavné materiály 203

reaktance 105
— rozptylová 110, 130, 132
reaktivní síla 40
redukováná výška vodiče 124
reluktance 98
rozsah nastavení 16

samočinné odpínání napětí naprázdno 63
samoregulace 51
Scottovo zapojení 71
součinitel Carrerův 193
— navaření 30
— přestupu tepla 126
stabilita oblouku 48, 57
statická charakteristika 17
— stabilita oblouku 35
stupeň krytí 169
svařovací automat 59
— proud 15

— trubička 13
— vlastnosti 191
— vodiče 202
svařování dlouhými impulsy 233

štítek výkonnostní 18

tavidlo 26
TIG 10
termoionizace 33
tlumivka 148, 156
— se změnou velikosti vzduchové mezery 74, 84
— s přepínáním počtu závitů 74, 84
— v řídicím obvodu trasduktoru 79
transduktor 76
— paralelní 76
— s vnucenou magnetizací 79
— se vzduchovou mezerou 78
— sériový 76
transformátor rozptylový s otočnou cívkou 93
— — s přepínáním počtu závitů 86
— s deskovým vinutím 132
— s magnetickým bočníkem 89, 137
— s posuvnými cívkami 87, 140
— s tlumivkou 74
— — magneticky spojenou s transformátorem 81
— s válcovým vinutím 130
tyristor 93

účinník 64
účinnost transformátoru 64, 126
údržba 209
univerzální svářečka 233
usměrňovač 156
úsporný transformátor — transduktor 81

vícefázové svařování 70
vícemístné svařování 69
vinutí 165
výkonnostní štítek 18
výpočet průřezu jádra 128
— rozptylových reaktací 130, 144
— svařovacího transformátoru 96
— — — se stejnosměrnou magnetizací 152
výpočet tlumivky střídavé 148
— — vyhlazovací 156
vysokofrekvenční zapalování 34, 57
výtěžek elektrody 191, 195

WIG 10, 50

zákon Hopkinsonův 98

— indukční Faradayův 100	zkouška oteplení 201
zapalování oblouku 33, 205	— transformátoru 190
zapnutí nezátíženého transformátoru 119	znovuzapálení oblouku 49
zatěžovatel 17	ztráty přídavné naprázdno 119
— jmenovitý 17	— — transformátoru 118
zatížení sítě 68	— — ve vinutí 119
zkratový proud transformátoru 116, 117	— — v železe 118, 119
zkouška elektrické odolnosti 201	

**PRAKTICKÉ
ELEKTROTECHNICKÉ
PŘÍRUČKY**

Svazek 75

ING. VINCENC KRUML,
ING. MILAN ŠTEFL

**TRANSFORMÁTORY
PRO OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ**

DT 621.314.2 : 621.971.75

Vydalo SNTL — Nakladatelství technické literatury,
n. p., Spálená 51, 113 02 Praha 1 v roce 1985 jako
svou 9919. publikaci. Redakce elektrotechnické litera-
tury. Odpovědný redaktor Ing. Rostislav Zeman.
Potah navrhl Miroslav Houska. Technická redakce
Eva Endlová. Vytiskl Tisk, knižní výroba, n. p. Brno,
závod 1, 244 stran, 169 obrázků, 20 tabulek. Typové
číslo L25-EI-III-31/52 651. Vydání třetí, upravené.
Náklad 12 200 výtisků. 16,47 AA, 16,94 VA

05/34

Cena vázaného výtisku Kčs 26,—

505/21,856

Publikace je určena konstruktérům, technikům, mon-
térům, svářečům, údržbářům a širokému okruhu zá-
jemců o svařovací transformátory.

04-534-85

Kčs 26,—



**PRAKTICKÉ
ELEKTROTECHNICKÉ
PŘÍRUČKY**

ELEKTROTECHNIK

Odborný měsíčník pro pracovníky v silnoproudě
elektrotechnice. Věnuje pozornost otázkám
elektrotechnické praxe v oboru výroby, technologie,
údržby, provozu, konstrukce a projektování
elektrických vedení, přístrojů a zařízení, přináší
články o montáži elektrických zařízení, o elektrických
pohonech, o průmyslové elektronice, o automatizaci,
o využití elektrické energie ve strojírenství,
v zemědělství a jiných oborech, sleduje otázky
úrazové zábrany a normalizace a informuje
o nových elektrotechnických výrobcích.
Měsíčně 40 stran, jednotlivá čísla 3 Kčs, roční
předplatné 36 Kčs. Rozšiřuje PNS - objednávky
přijímá každá pošta i každý doručovatel.

04-534-85
05/34 Kčs 26, —