



FEDERÁLNÍ ÚŘAD
PRO VYNÁLEZY

POPIS VYNÁLEZU K AUTORSKÉMU OSVĚDČENÍ

265931

(11) (B1)

(13)

(51) Int. Cl.⁴

G 01 R 17/00 /
G 01 R 17/10
G 01 R 27/00

(22) Přihlášeno 08 05 87

(21) PV 3305-87.U

(40) Zveřejněno 14 03 89

(45) Vydáno 13 04 90

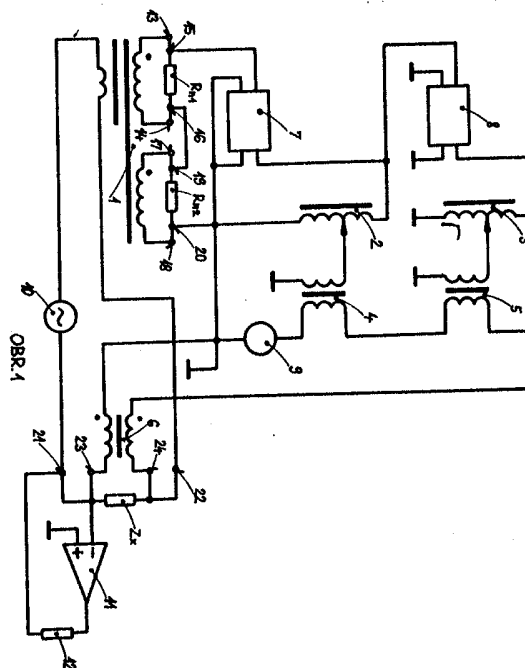
(75)

Autor vynálezu

BOHÁČEK JAROSLAV doc. ing. CSc., PRAHA

(54) Transformátorový můstek pro měření impedancí malých hodnot

(57) Můstek je tvořen dvoujádrovým proudovým transformátorem, majícím v sérii s primárním vinutím zdroj napájecího napětí a svorky pro připojení proudových svorek měřeného objektu. K jeho sekundárnímu vinutí je připojen první odporový etalon a k jeho pomocnému vinutí druhý, oba proudovými svorkami. Napěťová svorka prvního na konci sekundárního vinutí je spojena s napěťovou svorkou druhého OE na začátku pomocného vinutí. Na druhé napěťové svorky je připojen oddělovací stupeň s jednotkovým zesílením, k němuž je paralelně připojen obvod fázového posunu. Paralelně k výstupu oddělovacího stupně a obvodu fázového posunu jsou připojeny indukční děliče, s výstupy spojenými s primárními vinutími napěťových transformátorů. Konec a začátek sekundárních vinutí jsou spojeni. Konec sekundárního vinutí je spojen s jednou svorkou indikátoru vyvážení, jehož druhá svorka je uzemněna a zároveň připojena k začátku primárního vinutí pomocného transformátoru s převodem 1:1, jehož začátek sekundárního vinutí je spojen se začátkem sekundárního vinutí druhého a jehož konce obou vinutí jsou spojeni s napěťovými svorkami měřeného objektu, kde svorka je spojena s invertujícím vstupem operačního zesilovače jehož neinvertující vstup je uzemněn a výstup je připojen přes ochranný odpor k proudové svorce měřeného objektu na jejímž přívodu je umístěna napěťová svorka.



Vynález se týká transformátorového můstku pro měření impedancí malých hodnot se zabezpečením vysoké přesnosti a citlivosti měření.

Při konstrukci transformátorových můstků pro přesné měření impedancí malých hodnot se v současné době kromě jiných indukčních poměrových prvků používá též proudových transformátorů a pomocným buzením. U těchto transformátorů lze dosáhnout přesnosti převodu srovnatelné s přesností převodu střídavého proudového komparátoru, ovšem pouze za předpokladu, že transformátor pracuje prakticky ve stavu dokrátka. Tohoto stavu lze i pro nenulovou zatěžovací impedanci dosáhnout pomocí vhodného operačního zesilovače, který se svými vstupy připojí paralelně k sekundárnímu vinutí transformátoru, přičemž zatěžovací impedance se připojí mezi výstup zesilovače a jeho invertující vstup.

Vzhledem k tomu, že při můstkových měřeních malých impedancí se většinou pracuje s malými napětími na měřených objektech, bývá nezbytné věnovat zvláštní pozornost eliminaci vlivu rušivých napětí v obvodu indikátoru vyvážení. Mezi tato napětí patří rušivá napětí vytvořená průchodem parazitních kapacitních a svobodných proudů zemnicími vodiči, jejichž vliv lze eliminovat druhým měřením, při kterém se zkomutují přívoody k napěťovým, případně proudovým svorkám měřeného objektu. Z výsledků měření před komutací a po ní se vezme aritmetický průměr.

Nevýhodou těchto transformátorových můstků tedy je jednak nutnost použití operačního zesilovače k zabezpečení správného pracovního režimu proudového transformátoru, tj. stavu, blízkého stavu nakrátko, a jednak nutnost dvojího vyvažování k odstranění vlivu parazitního napětí, vytvořeného průchodem parazitních kapacitních a svodových proudů spojkou mezi uzemňovací svorkou indikátoru vyvážení a jednou z napěťových svorek měřeného objektu.

Nutnost používat operačního zesilovače k dosažení potřebného pracovního režimu a nutnost dvojího měření odpadá u transformátorového můstku pro měření impedancí malých hodnot podle vynálezu. Tento transformátorový můstek je tvořen dvoujádrovým proudovým transformátorem, k jehož primárnímu vinutí je sériově připojen zdroj napájecího napětí a svorky, ke kterým je svými proudovými svorkami připojen měřený objekt. K sekundárnímu vinutí dvoujádrového proudového transformátoru je paralelně připojen proudovými svorkami první odporový etalon. Dále je můstek tvořen několikadekadovými indukčními děliči. Paralelně k prvnímu z nich je připojen výstup oddělovacího stupně s jednotkovým zesílením. Paralelně k druhému z nich je připojen výstup obvodu fázového posunu, jehož vstup je paralelně spojen s výstupem oddělovacího stupně. K výstupům indukčních děličů jsou připojena primární vinutí prvního a druhého napěťového transformátoru. Konec sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru je spojen se začátkem sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru. Konec sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru je spojen s jednou svorkou indikátoru vyvážení, jehož druhá svorka je uzemněna. Podstatou transformátorového můstku podle vynálezu je, že proudový transformátor má ještě pomocné vinutí se stejným počtem závitů jako sekundární vinutí, kde k pomocnému vinutí je svými proudovými svorkami připojen druhý odporový etalon. Napěťová svorka prvního odporového etalonu, umístěná na přívodu ke konci sekundárního vinutí proudového transformátoru, je propojena s napěťovou svorkou druhého odporového etalonu, umístěnou na přívodu k začátku pomocného vinutí proudového transformátoru. Ke zbývajícím dvěma napěťovým svorkám odporových etalonů je připojen vstup oddělovacího stupně s jednotkovým zesílením. Napěťová svorka druhého odporového etalonu, umístěná na přívodu ke konci pomocného vinutí proudového transformátoru, je uzemněna a je současně spojena s jedním koncem prvního indukčního děliče, jehož druhý konec je připojen ke vstupu obvodu fázového posunu. Uzemněná druhá svorka indikátoru vyvážení je připojena zároveň k začátku primárního vinutí pomocného transformátoru s převodem 1:1, jehož sekundární vinutí je svým začátkem připojeno na začátek sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru a jehož obě vinutí mají své konce spojeny s napěťovými svorkami měřeného objektu. K napěťové svorce spojené s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru je připojen též invertující vstup operačního zesilovače. Jeho neinvertující vstup je uzemněn a jeho výstup je připojen přes ochranný odpor k proudové svorce měřeného objektu, na jejímž přívodu je umístěna napěťová svorka, která je spojena s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru. Oba odporové etalony mají stejné hodnoty.

Širokého měřicího rozsahu transformátorového můstku se dosahuje použitím proudového transformátoru s několika přepínatelnými primárními vinutími a dvou několikadekadových indukčních děličů. Použité odporové etalony jsou sice shodné co do jmenovité hodnoty, avšak nároky na přesnost druhého odporového etalonu jsou minimální vzhledem k tomu, že napěťový úbytek na něm vytvořený je podstatně menší než napěťový úbytek na prvním odporovém etalonu. Oproti známým transformátorovým můstkům je můstek podle vynálezu levnější a docílí se jím vyšší přesnosti měření.

Příklady zapojení transformátorového můstku pro měření impedancí malých hodnot podle vynálezu jsou schematicky uvedeny na přiložených výkresech. Na obr. 1 je všeobecné schéma zapojení, na obr. 2 je konkretizace tohoto zapojení pro měření obecné impedance.

V sérii s primárním vinutím proudového transformátoru 1 je zdroj 10 napájecího napětí a svorky 21, 22, ke kterým je svými proudovými svorkami připojen měřený objekt Z_x . Proudový transformátor 1 má dvě vinutí, která jsou navinuta současně na obou jeho jádrech, a to vinutí primární a sekundární a sekundární a dále má pomocné vinutí, které je navinuto pouze na jednom z jader. Počet závitů sekundárního vinutí je stejný jako počet závitů pomocného vinutí. K sekundárnímu vinutí proudového transformátoru 1 je proudovými svorkami 13, 14 připojen první odporový etalon R_{n1} a k pomocnému vinutí proudového transformátoru 1 je proudovými svorkami 17, 18 připojen druhý odporový etalon R_{n2} , přičemž etalony R_{n1} a R_{n2} mají stejné hodnoty. Napěťová svorka 16 prvního odporového etalonu R_{n1} , umístěná na přívodu ke konci sekundárního vinutí proudového transformátoru 1 je propojena s napěťovou svorkou 19 druhého odporového etalonu R_{n2} , umístěnou na přívodu k začátku pomocného vinutí proudového transformátoru 1. Ke zbývajícím dvěma napěťovým svorkám 15, 20 odporových etalonů R_{n1} , R_{n2} je připojen vstup oddělovacího stupně 7, který má jednotkové zesílení. Paralelně k výstupu oddělovacího stupně 7 je připojen vstup obvodu 8 fázového posunu. K výstupu oddělovacího stupně 7 je připojen vstup prvního indukčního děliče 2, k jehož výstupu je připojeno primární vinutí prvního napěťového transformátoru 4. K výstupu obvodu 8 fázového posunu je připojen vstup druhého indukčního děliče 3, k jehož výstupu je připojeno primární vinutí druhého napěťového transformátoru 5. Konec sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru 5 je spojen se začátkem sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru 4 a konec sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru 4 je spojen s jednou svorkou indikátoru 9 vyvážení, jehož druhá svorka je uzemněna a současně připojena k začátku primárního vinutí pomocného transformátoru 6 s převodem 1:1, přičemž začátek sekundárního vinutí pomocného transformátoru 6 je připojen na začátek sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru 5, zatímco konce obou vinutí pomocného transformátoru 6 jsou spojeny s napěťovými svorkami 23, 24 měřeného objektu Z_x . K napěťové svorce 23 měřeného objektu Z_x spojené s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru 6, je připojen invertující vstup operačního zesilovače 11, jehož neinvertující vstup je uzemněn a jehož výstup je připojen přes ochranný odpor 12 k proudové svorce 21 měřeného objektu Z_x , na jejímž přívodu je umístěna napěťová svorka 23, spojená s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru 6.

V případě, že se napětí pro vstup oddělovacího stupně 7 odebíralo pouze z prvního odporového etalonu R_{n1} , přesnost měření by byla nepříznivě ovlivněna chybou převodu proudového transformátoru 1, způsobenou nenulovým zatěžovacím odporem sekundárního vinutí. Pokud se však na vstup oddělovacího stupně 7 přivede součet napětí na prvním a druhém odporovém etalonu R_{n1} a R_{n2} , chyba měření způsobená zatížením prvním odporovým etalonem R_{n1} se do značné míry eliminuje.

Pomocný transformátor 6 s převodem 1:1 a operační zesilovač 11 slouží k eliminaci vlivu parazitního napětí, vytvořeného průchodem parazitních kapacitních a svodových proudů spojkou mezi uzemněnou svorkou indikátoru 9 vyvážení a napěťovou svorkou indikátoru 9 vyvážení a napěťovou svorkou 23 měřeného objektu Z_x .

Při měření se nastavením dělicích poměrů prvního indukčního děliče 2 a druhého indukčního děliče 3 můstek vyváží. Potom se odečtou dělicí poměry n_1 a n_2 , nastavené na prvním indukč-

ním děliči 2 a druhém indukčním děliči 3. V případě, že použitý obvod 8 fázového posunu otáčí přivedené napětí o 90° a nemění přitom jeho amplitudu, ve vyváženém stavu platí

$$\operatorname{Re}[Z_x] = \frac{n_1}{p} R$$

$$\operatorname{Im}[Z_x] = \frac{n_2}{p} R$$

kde $\operatorname{Re}[Z_x]$, případně $\operatorname{Im}[Z_x]$ je reálná, případně imaginární část měřené impedance Z_x ,

n_1 , případně n_2 je dělicí poměr nastavený v rovnováze na prvním resp. druhém indukčním děliči 2, příp. 3,

p je převod proudového transformátoru 1

R je odpor prvního resp. druhého odporového etalonu R_{n1} , příp. R_{n2} .

V konkrétním provedení je v sérii s primárním vinutím proudového transformátoru 1 zdroj 10 napájecího napětí a svorky 21, 22, ke kterým je svými proudovými svorkami připojen měřený objekt Z_x . K sekundárnímu vinutí proudového transformátoru 1 je proudovými svorkami 13, 14 připojen první odporový etalon R_{n1} a k pomocnému vinutí proudového transformátoru 1 je proudovými svorkami 17, 18 připojen odporový etalon R_{n2} , přičemž odporové etalony R_{n1} a R_{n2} mají stejné hodnoty. Napěťová svorka 16 prvního etalonu R_{n1} , umístěná na přívodu ke konci sekundárního vinutí proudového transformátoru 1, je propojena s napěťovou svorkou 19 druhého odporového etalonu R_{n2} , umístěnou na přívodu k začátku pomocného vinutí proudového transformátoru 1. Ke zbývajícím dvěma napěťovým svorkám 15, 20 odporových etalonů R_{n1} , R_{n2} je připojen vstup napěťového sledovače, realizovaného pomocí prvního operačního zesilovače 25, který je zde ve funkci oddělovacího stupně 7. Mezi výstup tohoto prvního operačního zesilovače 25 a zem je svým vstupem připojen jednak integrátor, který je zde ve funkci obvodu 8 fázového posunu a který je tvořen druhým operačním zesilovačem 26, prvním a druhým rezistorem R_1 , R_2 a kondenzátorem C , jednak první několikadekádový indukční dělič 2, paralelně k jehož výstupu je připojen vstup prvního napěťového transformátoru 4 s pomocným buzením a s převodem 1:1, tvořeného třetím operačním zesilovačem 41 ve funkci napěťového sledovače a třemi vinutími se stejnými počty závitů na dvou jádrech. Mezi výstup druhého operačního zesilovače 26 a zem je připojen vstup druhého několikadekádového indukčního děliče 3, jehož výstup je připojen ke vstupu druhého napěťového transformátoru 5 s pomocným buzením a s převodem 1:1, tvořeného čtvrtým operačním zesilovačem 51 ve funkci napěťového sledovače a třemi vinutími se stejnými počty závitů na dvou jádrech. Konec sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru 5 je spojen se začátkem sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru 4 a konec sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru 4 je spojen s jednou svorkou indikátoru 9 vyvážení, jehož druhá svorka je uzemněna a současně připojena k začátku primárního vinutí pomocného transformátoru 6 s převodem 1:1, přičemž začátek sekundárního vinutí pomocného transformátoru 6 je připojen na začátek sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru 5, zatímco konce obou vinutí pomocného transformátoru 6 jsou spojeny s napěťovými svorkami 23, 24 měřeného objektu Z_x . K napěťové svorce 23 měřeného objektu Z_x spojené s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru 6 je připojen invertující vstup operačního zesilovače 11, jehož neinvertující vstup je uzemněn a jehož výstup je připojen přes ochranný odpor 12 k proudové svorce 21 měřeného objektu Z_x , na jejímž přívodu je umístěn napěťová svorka 23 spojená s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru 6.

Transformátorový můstek se opět vyvažuje nastavením dělicích poměrů indukčních děličů 2, 3. V rovnováze platí

$$\operatorname{Re}[Z_x] = \frac{n_1}{p} R - \frac{\operatorname{Im}[Z_x]}{\omega \tau_2}$$

$$\operatorname{Im}[Z_x] = \frac{n_2}{p} R \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \left(\frac{p}{n_2} \frac{\operatorname{Re} Z_x}{R} - \frac{n_1}{n_2} \right) \right]$$

kde označení $\operatorname{Re}[Z_x]$, $\operatorname{Im}[Z_x]$, n_1 , n_2 , p a R mají stejný význam jako v dříve uvedených vztazích.

Dále je ω úhlový kmitočet napájecího napětí můstku a $\tau_1 = R_1 C$, $\tau_2 = R_2 C$ jsou časové konstanty.

Takto vytvořený můstek je určen zejména pro měření elektrického odporu v rozsahu 0,001 Ω až 1 Ω a indukčnosti vlastní i vzájemné v rozsahu 1 μH až 100 μH . Lze jej však použít k měření velkých kapacit - impedance kapacitního charakteru hodnot pod 1 Ω . Měří se při kmitočtech 400 Hz až 1 600 Hz. Přesnost takto realizovaného můstku při měření elektrického odporu byla ověřena měřením na odporových etalonech Tinsley 660, 3 111 a 1 682 známých hodnot a na páskových odporových etalonech s vypočitatelnými kmitočtovými závislostmi s tím, že v rozsahu 0,001 až 1 Ω umožňuje můstek měření elektrického odporu s přesností řádově 0,01 %.

K ověření přesnosti při měření vlastní a vzájemné indukčnosti v rozsahu 1 μH až 100 μH bylo použito etalonů indukčnosti Sullivan R 1 900/1, R 1 901, R 1 910, R 1 960 a R 1 961. Při měření na etalonech R 1 901/1 (1 μH) a R 1 902/1 (10 μH) se hodnota naměřená můstkem neliší od jmenovité hodnoty etalonu o více než o maximálně možnou chybu adjustace etalonu udávanou výrobcem, tj. 1 % pro etalon 1 901/1 a 0,1 % pro etalon R 1 901. U ostatních etalonů se naměřená hodnota nelišila od jmenovité hodnoty o více než o 0,03 %.

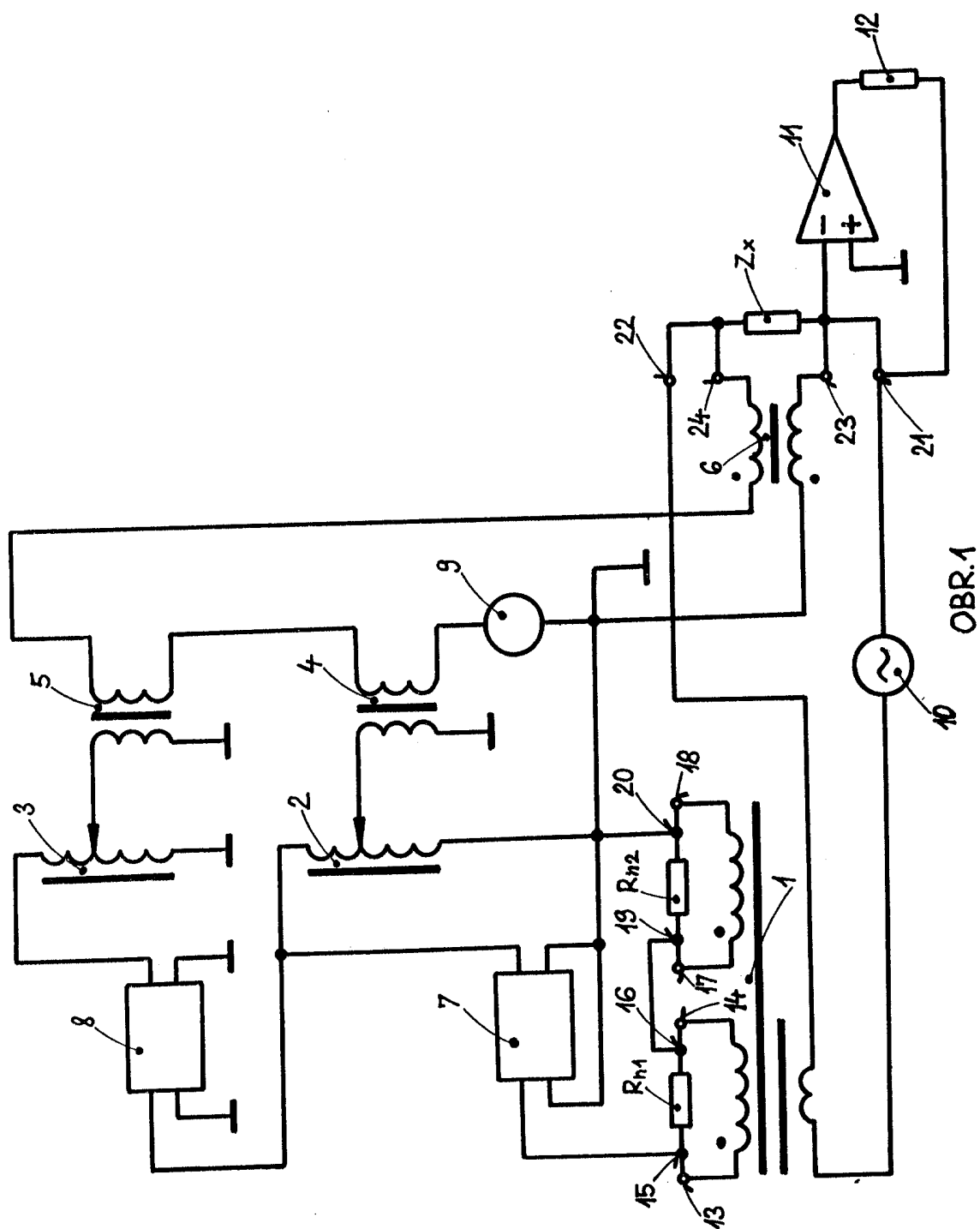
Zapojení podle vynálezu je tedy určeno k přesnému měření odporů, kapacit a indukčností. Vzhledem k tomu, že v zapojení jsou pouze dva vyvažovací prvky, vyvažovací proces můstku lze poměrně snadno automatizovat. V jednotce použité k řízení vyvažovacího procesu se s výhodou provede i vyhodnocení výsledků měření, případně jejich statistické zpracování.

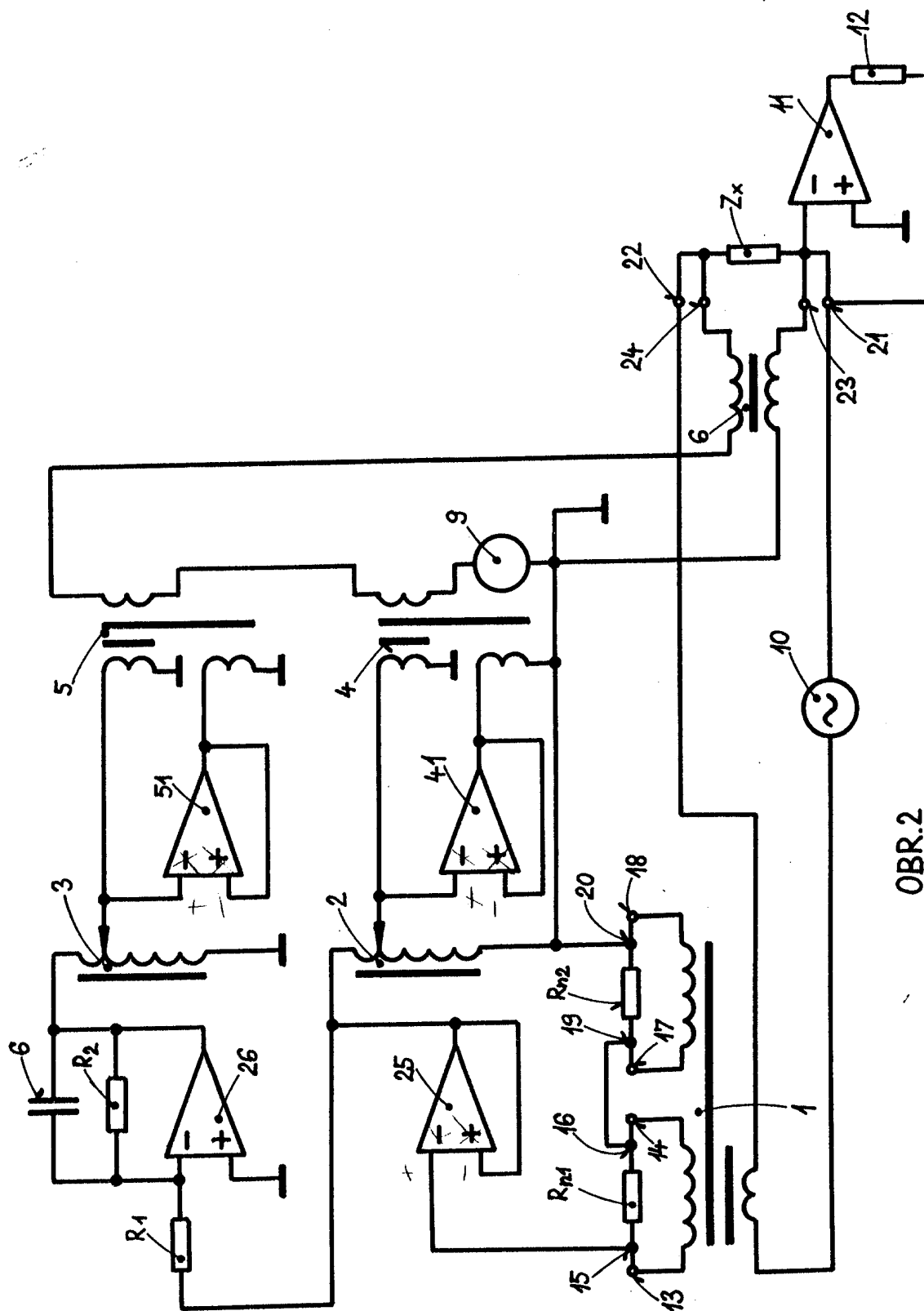
P R E D M Ě T V Y N Á L E Z U

Transformátorový můstek pro měření impedací malých hodnot, tvořený dvoujádrovým proudovým transformátorem, k jehož primárnímu vinutí je sériově připojen zdroj napájecího napětí a svorky, ke kterým je svými proudovými svorkami připojen měřený objekt a k jehož sekundárnímu vinutí je paralelně připojen proudovými svorkami první odporový etalon, dále dvěma několika-dekádovými indukčními děliči, kde paralelně k prvnímu z nich je připojen výstup oddělovacího stupně s jednotkovým zesílením a paralelně ke druhému z nich je připojen obvod fázového posunu, jehož vstup je paralelně spojen s výstupem oddělovacího stupně, přičemž k výstupům indukčních děličů jsou připojena primární vinutí prvního a druhého napěťového transformátoru, kde konec sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru je spojen se začátkem sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru a konec sekundárního vinutí prvního napěťového transformátoru je spojen s jednou svorkou indikátoru vyvážení, jehož druhá svorka je uzemněna, vyznačující se tím, že proudový transformátor (1) má ještě pomocné vinutí se stejným počtem závitů jako sekundární vinutí, kde k pomocnému vinutí je svými proudovými svorkami připojen druhý odporový etalon (R_{n2}) stejné hodnoty jako první odporový etalon (R_{n1}), přičemž napěťová svorka (16) prvního odporového etalonu (R_{n1}), umístěná na přívodu ke konci sekundárního vinutí proudového transformátoru (1) je propojena s napěťovou svorkou (19) druhého odporového etalonu (R_{n2}), umístěnou na přívodu k začátku pomocného vinutí proudového transformátoru (1), zatímco ke zbývajícím dvěma napěťovým svorkám (15, 20) odporových etalonů (R_{n1} , R_{n2}) je připojen vstup oddělovacího stupně (7) s jednotkovým zesílením a napěťová svorka (20) druhého odporového etalonu (R_{n2}), umístěná na přívodu ke konci pomocného vinutí proudového transformátoru (1) je uzemněna a je současně spojena s jedním koncem prvního indukčního děliče (2), jehož druhý konec je připojen ke vstupu obvodu (8) fázového posunu a dále uzemněná druhá svorka indikátoru (9) vyvážení je připojena zároveň k začátku primárního vinutí pomocného transformátoru (6) s převodem 1:1, jehož sekundární vinutí je svým začátkem připojeno na začátek sekundárního vinutí druhého napěťového transformátoru (5) a jehož obě vinutí mají své konce spojeny s napěťovými svorkami (23, 24) měřeného objektu (Z_x), kde k napěťové svorce (23) spojené s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru (6) je připojen

též invertující vstup operačního zesilovače (11), jehož neinvertující vstup je uzemněn a jehož výstup je připojen přes ochranný odpor (12) k proudové svorce (21) měřeného objektu (Z_x), na jejímž přívodu je umístěna napěťová svorka (23) spojená s koncem primárního vinutí pomocného transformátoru (6).

2 výkresy





OBR.2