

Мерење подужне електричне отпорности цеви нафтовода

Јован Рајчевић
Катедра за електрична мерења,
Департман за енергетику, електронику
и телекомуникације
Факултет техничких наука,
Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Република Србија
rajcevic@uns.ac.rs

Драган Пејић
Катедра за електрична мерења,
Департман за енергетику, електронику
и телекомуникације
Факултет техничких наука,
Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Република Србија
rejicdra@uns.ac.rs

Ђорђе Новаковић
Катедра за електрична мерења,
Департман за енергетику, електронику
и телекомуникације
Факултет техничких наука,
Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Република Србија
djordjenovakovic@uns.ac.rs

Новица Марковић
Катедра за енергетску електронику и
претварање, Департман за енергетику,
електронику и телекомуникације
Факултет техничких наука,
Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Република Србија
markovic.e1126.2024@uns.ac.rs

Немања Газивода
Катедра за електрична мерења,
Департман за енергетику, електронику
и телекомуникације
Факултет техничких наука,
Универзитет у Новом Саду
Нови Сад, Република Србија
nemanjagazivoda@uns.ac.rs

Апстракт — У овом раду дат је приказ мерења електричне отпорности цеви намењене за транспорт нафте. Мерење је иницирано из потребе стварања електромагнетске и термичке слике приликом експлоатације нафте у чврстом агрегатном стању, ради мењања агрегатног стања и чишћења од феромагнетских честица. Сprovedено је четворожично мерење, како би се елиминисао утицај отпорности контаката. Дати су анализа резултата, математички модел резултата мерења и буџет мерне несигурности.

Кључне речи—*електрична отпорност, четворожични спој, мерна несигурност*

I. Увод

Током експлоатације сирове нафте, која је у чврстом агрегатном стању, из бушотина у пољима Баната, јавља се потреба за индукционим грејачем. Улога грејача је да загревањем нафте, током проласка кроз нафтовод, промени њено агрегатно стање, тј. да нафта пређе у течно агрегатно стање. Такође, смеша сирове нафте која излази из бушотине задржана је многим металима, које је потребно филтрирати. Ова два проблема решавају се намотавањем проводника на цев нафтовода, када се проводници споје на извор напајања цео склоп постаје у исто време индукциони грејач и електромагнет. Струја која тече кроз намотаје ствара електромагнетно поље, које индукује вртложне струје у цеви нафтовода и самим тим доводи до загревања. Електромагнетно поље које прожима сирову нафту и нафтовод привлачи метале са феромагнетским својствима, они се скупљају по унутрашњем ободу цеви и тако склоп врши своју улогу филтера. Загревање сирове нафте се врши до тачно одређене температуре, на којој долази до промене агрегатног стања, па је стога неопходно познавање параметара и особина цеви нафтовода. Према Џул-Ленцовом закону, количина топлоте која се ослободи у

проводнику сразмерна је квадрату јачине електричне струје која кроз њега протиче, вредности електричне отпорности и времену протицања те струје. Познавање вредности електричне отпорности постаје кључно за процес промене агрегатног стања сирове нафте.

II. ОПИС МЕРНЕ МЕТОДЕ И МЕРНЕ ОПРЕМЕ

Приликом мерења електричне отпорности неког материјала најчешће се користи омметарска метода. Проблем настаје када је вредност отпорности објекта истог реда величине са отпорношћу жица и контаката, јер се омметарском методом мери укупна електрична отпорност у колу, а не само отпорност објекта. Ради стварања реалне слике о вредности отпорности објекта, вршено је четворожично мерење на исечку цеви нафтовода. На исечку цеви нафтовода (слика 2) обележено је шест тачака (A-F) на које се прикључују крајеви волтметра.

Четворожично мерење је метода мерења малих вредности електричне отпорности, код које се користе четири жице (две за довод струје, две за мерење напона). Ова техника мерења елиминиса утицај отпора жица и контаката на резултат мерења. Струја се доводи преко првог пара жица, док други пар, повезан директно на тачке између којих се мери отпор, служи волтметру да измери пад напона на том сегменту цеви, без доприноса отпора доводних проводника.

A. Мерна опрема

У колу, као напајање, је коришћен је вишефункцијски калибратор *Time Electronics 5025* као извор наизменичне струје, који даје константну задату струју у колу. Као волтметар коришћен је дигитални мултиметар *Fluke 8846A*. За мерење димензија цеви, раздаљине између тачака и

квантификовање понвљивости постављања проводника у отворима у цеви где се мери напон коришћено је дигитално кљунасто помично мерило *POWERFIX IAN315106*. Карактеристике инструмената су дате у табели 1.

Табела 1 Карактеристике коришћених мерних инструмената

Величина	Инструмент (произвођач и тип)	Опсег	Резолуција	Границе грешке ($\pm$)
Наизменични напон	Fluke 8846A	100 mV	100 nV	$0,06\% U_m^a + 0,04\% U_o^b$
Наизменична струја	Time Electronics 5025	20 A	100 μ A	$0,2\% I_z + 5 \text{ mA}$
Дужина	POWERFIX IAN315106	100 mm	0,01 mm	0,02 mm
		150 mm	0,01 mm	0,03 mm

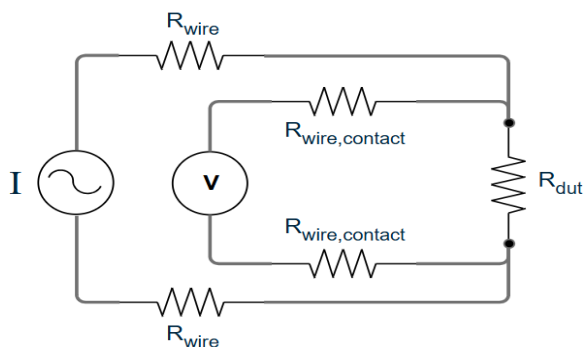
^a. Измерена вредност напона

^b. Мерни опсег волтметра

^c. Задата вредност струје

В. Метода мерења

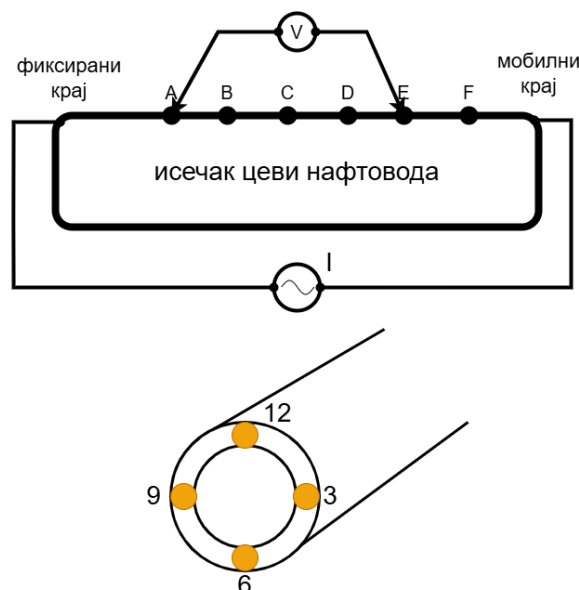
Извршена је модификована четворожична метода мерења електричне отпорности (слика 1), где се уместо једносмерне струје користи наизменична струја ефективне вредности 10 А и фреквенције 50 Hz. Употреба наизменичне струје ове фреквенције омогућава бољу симулацију реалних услова када је цев део индукционог грејања, будући да се при наизменичној струји јављају феномени попут скин ефекта. У поређењу са стандардном методом, модификована метода захтева додатну пажњу приликом интерпретације резултата, јер мерена импеданса укључује и реактивне компоненте (индуктивност и капацитивност), али при ниским фреквенцијама, као што је 50 Hz, и даље је веома доминантна реална компонента импедансе. Овако добијена вредност електричне отпорности пружа реалистичнији увид у понашање цеви у условима експлоатације сирове нафте и електромагнетног грејања.



Слика 1 Модификована четворожична метода мерења електричне отпорности

Мерења се врше у четири сета, где мобилни струјни прикључак мења четири позиције на ободу исечка цеви нафтовода. Мобилни струјни крај се поставља се, у односу на фиксирани струјни крај, на: 0° , 90° , 180° и 270° . Углови су у табели 2 представљени као часови на часовнику, нпр. 90° је 3 часа. Фиксиран струјни крај поставља се само у положај „12“. Шема мерења, са означеним тачкама где се

мери напон, и попречни пресек цеви са обележеним прикључцима дати су на слици II-2.



Слика 2 Шема мерења и попречни пресек цеви са изначеним местима прикључења струјних крајева (наранџасто)

III. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

А. Резултати мерења

У табели 2 приказани су резултати мерења у лабораторијским условима, а на слици 2 је приказан изглед поставке. Постоје четири мерена напона између истих тачака, у зависности од положаја мобилног струјног краја. Струјни извор је подешен тако да даје наизменичну струју од 10 А и 50 Hz у свим мерењима.

Табела 2 Резултати мерења на исечку цеви нафтовода

ТАЧКЕ	l (mm)	I (A)	U_1 (μ V) (12-12)	U_2 (μ V) (12-3)	U_3 (μ V) (12-6)	U_4 (μ V) (12-9)
A-B	20,16	10	155	166,1	205	160,6
A-C	41,63	10	319	331,6	361,7	327,3
A-D	79,86	10	607	597,8	614,8	585,3
A-E	98,72	10	753,4	713,3	717,4	684,6
A-F	109,22	10	853,1	779,1	776,6	749,1
B-C	21,47	10	172,6	189,4	181,6	151,2
B-D	59,70	10	481,1	453,4	447,4	434
B-E	78,56	10	625,3	575,2	548,7	534,4
B-F	89,06	10	723	640,7	606	594,2
C-D	38,23	10	296,8	306,8	298	269,7
C-E	57,09	10	444,6	427,6	411,2	394,5
C-F	67,59	10	541,4	496,3	462,1	461
D-E	18,86	10	153	154,4	117,5	108,7
D-F	29,36	10	265,9	230,4	182,5	180,7
E-F	10,50	10	110,2	107,3	52,8	56,7

В. Анализа резултата мерења

Након извршених мерења, из добијених вредности напона и струја, израчунава се вредност електричне отпорности, али тај податак није довољан сам по себи за практичну употребу. Као коначни резултат узима се подужна отпорност, јер је практично примењива у свим будућим инсталацијама нафтовода. Израз (1) представља једначину за израчунавање подужне отпорности.

$$R' = \frac{U}{I \cdot l} \quad (1)$$

Табела 3 Резултати подужних отпорности

ТАЧКЕ	$R_1' (\mu\Omega/m)$	$R_2' (\mu\Omega/m)$	$R_3' (\mu\Omega/m)$	$R_4' (\mu\Omega/m)$
A-B	768,85	823,91	1016,87	796,63
A-C	766,27	796,54	868,84	786,21
A-D	760,08	748,56	769,85	732,91
A-E	763,17	722,55	726,7	693,48
A-F	781,08	713,33	711,04	685,86
B-C	803,91	882,16	845,83	704,24
B-D	805,86	759,46	749,41	726,97
B-E	795,95	732,18	698,45	680,24
B-F	811,81	719,4	680,44	667,19
C-D	776,35	802,51	779,49	705,47
C-E	778,77	748,99	720,27	691,01
C-F	801,01	734,28	683,68	682,05
D-E	811,24	818,66	623,01	576,35
D-F	905,65	784,74	621,59	615,46
E-F	1049,52	1021,9	502,86	540

IV. МЕРНА НЕСИГУРНОСТ

Математички модел резултата мерења, који ће се користити приликом вредновања мерне несигурности, дат је изразом (2).

$$R' = \frac{U + \Delta U_{rez} + \Delta U_{spec}}{(I + \Delta I_{rez} + \Delta I_{spec}) \cdot (l + \Delta l_{rez} + \Delta l_{spec} + \Delta l_m)} \quad (2)$$

Где су:

U – измерена вредност напона;

ΔU_{rez} – корекција због коначне резолуције мерења напона;

ΔU_{spec} – корекција због нетачности мерења напона (из спецификације);

I – задата вредност струје;

ΔI_{rez} – корекција због коначне резолуције задавања струје;

ΔI_{spec} – корекција због нетачности задавања струје (из спецификације);

l – измерена вредност дужине;

Δl_{rez} – корекција због коначне резолуције мерења дужине;

ΔI_{spec} – корекција због нетачности мерења дужине (из спецификације);

Δl_m – корекција због репродукције мерења дужина.

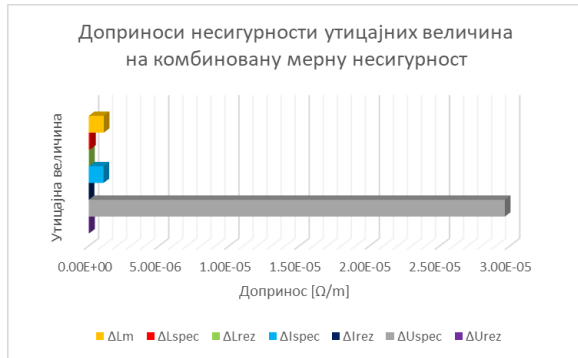
У табели 4 дат је буџет мерне несигурности за мерну тачку В-Е, при положају струјних крајева 12–3. Приказана је идентификација свих уважених утицајних величина на резултат мерења, као и њихови доприноси.

Табела 4 Буџет мерне несигурности за мерну тачку В-Е (12-3)

Симбол	Оцена	Несигурност	Тип	Расподела	Осетљивост	Допринос
U (V)	58E-5					
ΔU_{rez} (V)	0	29E-9	B	Uni	1,3	37E-9
ΔU_{spec} (V)	0	23E-6	B	Uni	1,3	30E-6
I (A)	10					
ΔI_{rez} (A)	0	28E-6	B	Uni	73E-6	21E-10
ΔI_{spec} (A)	0	14E-3	B	Uni	73E-6	11E-7
l (m)	78E-3					
Δl_{rez} (m)	0	28E-7	B	Uni	93E-4	27E-9
Δl_{spec} (m)	0	12E-6	B	Uni	93E-4	11E-8
Δl_m (m)	0	12E-5	B	Uni	93E-4	11E-7
Комбинована мерна несигурност						30E-6 $\frac{\Omega}{m}$
Проширена мерна несигурност ($k=2$)						59E-6 $\frac{\Omega}{m}$

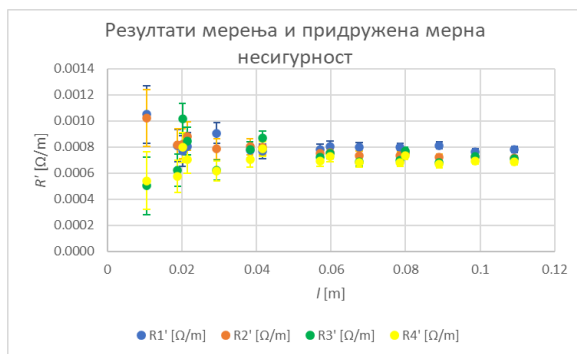
На слици 3 приказан је график појединачних доприноса утицајних величина на комбиновану мерну несигурност. Са графика се јасно може учити да најдоминантнији утицај на комбиновану мерну несигурност потиче од дигиталног мултиметра *Fluke 8846A*, у овом случају коришћеног као волтметар. Овако велик допринос мерној несигурности потиче од немогућности бирања мањег опсега мерења

напона. Други доприноси комбинованој мерној несигурности су за минимално ред величине мањи.



Слика 3 График доприноса несигурности утицајних величина на комбиновану мерну несигурност за мерну тачку В-Е (12-3)

На слици 4 су приказани резултати све четири серије мерења са придруженим мерним несигурностима за фактор обухвата $k = 1$. За фактор обухвата $k = 1$ илустрован је опсег у којем са 68% вероватноће налази тачна вредност. Приметно је да за мала растојања напонских прикључака се добија врло велика мерна несигурност, док за растојања већа од 50 mm мерна несигурност постаје прихватљива.



Слика 4 График резултата мерења и придружена комбинована мерна несигурност ($k=1$)

V. ЗАКЉУЧАК

Анализирањем слике 3 види се да највећи допринос комбинованој мерној несигурности потиче из сепцификације волтметра. Доминантано на допринос утиче коришћени опсег волтметра, који је минимално два реда величине већи од мерене вредности. Такође, увидом у слику 4, закључује се да што се повећава растојање између тачака где се мери напон, то се смањује комбинована мерна несигурност. Ова два закључка су повезана, јер са повећањем дистанце повећава се отпорност између тачака, а самим тим при константној струји расте и напон. Побољшање перформанси мерења се може остварити коришћењем веће вредности струје, а са њом би и сразмерно растао напон, па би се смањило допринос опсега волтметра. Такође, уколико постоји приступ дужем узорку цеви могу се користити веће дистанце између тачака за мерење напона. Специјализовани инструменти са веома малим напонским опсезима (електрометри) исто су једна од опција за побољшање. У даљем истраживању аутори ће се бавити даљим развојем математичког модела мерења, имајући у

виду да у описаном истраживању ниједна димензија испитиваног објекта није доминантна у односу на друге две.

ЗАХВАЛНИЦА

Ово истраживање је подржано од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација (бр. уговора: 451-03-137/2025-03/200156) и Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду кроз пројекат „Научноистраживачки и уметничкоистраживачки рад истраживача у наставним и сарадничким звањима Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду 2025“ (бр: 01-50/295).

РЕФЕРЕНЦЕ/ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. . -H. J. Lee and R. J. Collier, "Sheet resistance measurement of thin metallic films and stripes at both 130 GHz and DC," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 6, pp. 2412-2415, Dec. 2005, doi: 10.1109/TIM.2005.858536.
- [2] G. Cafaro et al., "Ground Resistance of Buried Metallic Parts in Urban Areas: An Extensive Measurement Campaign," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 6, pp. 5209-5216, Nov.-Dec. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2748502.
- [3] E. H. Salter, "Measuring conductor resistance and reactance," in Electrical Engineering, vol. 68, no. 2, pp. 144-144, Feb. 1949, doi: 10.1109/EE.1949.6444608.
- [4] Chandra, H.; Allen, S.W.; Oberloier, S.W.; Bihari, N.; Gwamuri, J.; Pearce, J.M. Open-Source Automated Mapping Four-Point Probe. Materials 2017, 10, 110. <https://doi.org/10.3390/ma10020110>.
- [5] Martin, J. P. "Measuring resistance/impedance with the four-wire Kelvin method." Watts Curr. Tech. Bull 1 (2014): 1-11.
- [6] Shoenberg D. An A.C. Method of Measuring Resistance. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1937;33(4):577-582. doi:10.1017/S0305004100077707.

ABSTRACT

This paper presents a method for measuring the electrical resistance of a pipeline intended for oil transport. The measurement was initiated due to the need to create an electromagnetic and thermal profile during the exploitation of oil in its solid state, with the aim of changing its aggregate state and cleaning the pipeline of ferromagnetic particles. A four-wire measurement technique was employed to eliminate the influence of contact resistance. The paper includes an analysis of the results, a mathematical model of the measurement data, and a measurement uncertainty budget.

Measurement of the longitudinal electrical resistance of oil pipeline

Jovan Rajčević, Dragan Pejić, Đorđe Novaković, Novica Marković, Nemanja Gazivoda