

Laidaus kanalo atmosferoje formavimo ir tyrimo galimybės

E. Guseinoviėnė, V. Cirtautas, A. Senulis

Elektrotechnikos katedra, Klaipėdos universitetas,

Bijūnų g. 17, LT-91225 Klaipėda, Lietuva, tel. +370 46 398686, el. p.: leonora.guseinoviene@ku.lt, elektra@jtf.ku.lt

S. Malkevičius

J. Biliūno g. 7-26, LT-91001 Klaipėda, Lietuva, tel. +370 699 05052, el. p. malka@klaipeda.balt.net

Įvadas

Eksperimentuojant su elektromagnetinėmis bangomis jau 19 a. pabaigoje buvo svarstoma, ar negalima šių bangų panaudoti belaidžiam elektros energijos perdavimui. Tie tyrimai buvo atliekami ne atmosferoje, bet dujose (helyje, argone, neone, gyvsidabrio garuose). Klausimai apie netrūkius išlydžius atmosferoje, apie laidžių kanalų tyrimą ir formavimą mažiau nagrinėti.

Literatūros šaltiniuose [1,2] aprašomi eksperimentai formuojant elektros iškvos kibirkšties trajektoriją, pažymėta, kad plazmai uždegti reikia žymiai didesnės galios, nei palaikyti jos degimui. Uždegtą plazmą sklinda tam tikru greičiu į abi puses nuo židinio išilgai spindulio, kol (tolstant nuo židinio) šviesos tankis tampa per mažas plazmos degimui palaikyti. Todėl, formuojant ilgą lazerinę kibirkštį, reikia naudoti optiką su dideliu židinio atstumu. [3] šaltinyje teigiama, kad pakankamai galingas lazerinis impulsas gali sukurti ir ilgą (dešimčių metrų) lazerinį išlydį – kibirkštį, kurią galima panaudoti formuojant lygiagrečius aukštosios įtampos išlydžius. Šviesos lauko intensyvumas, vykstant atmosferos pramušimui, apytiksliai lygus 10^{10} W/cm². Tokiame lauke bet kokia medžiaga virsta plazma, o ši savo ruožtu gali būti panaudota kaip kanalas energijai perduoti. [4] pastebėta, kad šviesos intensyvumas, kuriam esant prasideda optinis pramušimas nevalytame ore, sudaro apytiksliai 10^8 W/cm². Kuo švaresnis oras, tuo šis skaičius didesnis, nes reikia didesnės energijos išlydžiui pasiekti. Visais atvejais gauta lazerinė kibirkštis yra diskretinės struktūros.

[5-7] aprašoma lazerinio trumpalaikio išlydžio struktūra ir charakteristikos. Išnagrinėta lazerinės kibirkšties dinamika, taip pat įvairių dujų įtaka kibirkšties charakteristikoms, parodoma, kad lazerinė kibirkštis laidų elektros srovei. Elektros išlydžio įtampa per lazerio sukurtą plazmą sumažėja 100–1000 kartų, palyginti su išlydžiu per atmosferos orą. Mažinant slėgį iki tam tikrų ribų, sąlygos išlydžiui palengvėja.

Laidaus kanalo tyrimo prielaidos ir tikslai

Pagrindiniai laidaus kanalo atmosferoje (LKA) formavimo ir tyrimo tikslai:

- panaudojant aukštosios įtampos šaltinį suformuoti LKA;

- nustatyti sąlygas LKA perduoti nenaudojant maitinimo linijų;
- nustatyti laidaus kanalo elektrotechninių savybių priklausomybę nuo kanalo ilgio, šviesos intensyvumo, kanalą formuojančio elektros išlydžio, kanalu perduodamos maitinimo srovės parametrų ir nuo priemaišų atmosferoje kiekio;
- nustatyti geriausias LKA formavimo sąlygas;
- suformuluoti reikalavimus laidaus kanalo projektavimui ir praktiniam LKA taikymui;
- nustatyti radijo trikdžių spektrą bei lygį, keičiantis LKA parametrams, vertinant ekologinius LKA panaudojimo praktikoje aspektus.

Norint atidžiau išnagrinėti elektros išlydžio, kaip laidaus kanalo, savybes ir išorės įtaką laidaus kanalo parametrams, KU JTF Elektrotechnikos katedroje buvo pradėti LKA tyrimo darbai. Laidžiam kanalui suformuoti buvo sukurti du laboratoriniai aukštosios įtampos šaltiniai, paruošta įranga kanalo aplinkos savybėms tirti ir keisti. Buvo atlikti išsamūs tyrimai aukštosios įtampos šaltinių parametrų nustatyti.

Atliekant eksperimentus, buvo pastebėta, kad kanalo laidumas yra proporcingas kanalą formuojančiai srovei, todėl tikslinga kanalą jungti į rezonansinio kontūro grandinę, nes tada kanalu cirkuliuos ir reaktyvioji rezonansinio kontūro srovė, palaikanti kanalo egzistavimą.

Buvo pasirinkimas iš kelių sprendimų:

- sudaryti specialią puslaidininkinę schemą, t. y. atskirą aukštosios įtampos ir aukštojo dažnio generatorių; tačiau toks sprendimas turi esminį trūkumą – ribotą aukštosios įtampos dydį kanalui sukurti (kelis kilovoltus);
- panaudoti rezonansinį transformatorių (Teslos transformatorių);
- rezonansinį kontūrą su transformatorinėmis savybėmis galima panaudoti kaip ilgąją liniją, parenkant tokį režimą, kad įtampa linijos gale būtų maksimali.

Pirmasis šaltinis buvo pagamintas pagal klasikinį Teslos transformatoriaus modelį [8]. Savitarpio induktyvumui tarp ričių padidinti panaudota feromagnetinė aukštadažnė šerdis.

Skaičiuojant ir konstruojant bandymo modelį pagrindinis tikslas buvo sukurti tokį laboratorinį aukštosios

įtampos šaltinį, kuriuo būtų galima iširti pagrindines priklausomybes, o po to optimizuoti parametrus ir patikslinti modelio konstrukciją. Todėl aukštosios įtampos modeliui pagaminti parinktas tiristorinis komutatorius. Iškraunant kondensatorių per pirminę rezonansinio transformatoriaus apviją pirminės apvijos kontūre sužadinami aukštojo dažnio silpstantys virpesiai, kurių dažnis f_1 ir periodas T_1 , t. y. $f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_{1\Sigma}}}$ ($C_{1\Sigma}$ – pirminio kontūro suminė talpa, L_1 – pirminio kontūro induktyvumas).

Gaminant bandymo modelį, antrinei įtampai nebuvo keliami griežti reikalavimai, dėl to pirminio $L_1 C_{1\Sigma}$ ir antrinio $L_2 C_{2\Sigma}$ kontūrų rezonansinių dažnių ribos buvo: $f_1 = f_2 = (50 \div 150) \text{ kHz}$.

Dažniams perduoti galima keisti kontūro induktyvumą arba talpą. Kad antrinė aukštojo dažnio įtampa būtų ne mažesnė kaip 100 kV ir kad ją galima būtų keisti plačiose ribose, buvo parinktas aukštosios įtampos įėjimo transformatorius (iki 2 kV , per $0,6 \text{ KVA}$ galios), kurio įėjime tinklo įtampa buvo keičiama transformatoriumi $0 \div 220 \text{ V}$ ribose. Parinkus vidutinį dažnį $f = 100 \text{ kHz}$, rastas reikiamas kontūro $L_1 C_{1\Sigma}$ ritės L_1 induktyvumas: $L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{1\Sigma}}$ ($C_{1\Sigma}$ – kondensatorių

bloko talpa su 20 % perdavimo atsarga).

Pirminio aukštosios įtampos maitinimo transformatoriaus antrinė įtampa apskaičiuota taip:

$$U_{2T} \leq k_a \frac{U_{C1}}{\sqrt{2}}; \quad (1)$$

čia k_a – atsargos koeficientas.

Transformatoriaus parametrai rasti iš lygties:

$$Q_p \cdot Q_0 = \frac{P_{gab} \cdot 10^2}{2.22 f \cdot B_m \cdot \delta \cdot \eta_{Tr} \cdot s \cdot k_p \cdot k_{Cu}}; \quad (2)$$

čia Q_p – aktyviosios šerdies skerspjūvio plotas, cm^2 ; Q_0 – lango skerspjūvio plotas; $P_{gab} = S_{Tr}$ – transformatoriaus gabaritinė galia, VA ; f – tinklo įtampos dažnis; B_m – maksimali magnetinė indukcija šerdyje; δ – srovės tankis apvijoje; η_{Tr} – transformatoriaus naudingumo koeficientas; s – šerdžių skaičius; k_{Cu} – transformatoriaus lango užpildymo variu koeficientas; k_p – transformatoriaus lango užpildymo plienu koeficientas.

Eksperimentų duomenims registruoti į pirmines ir antrines apvijas, srovei matuoti buvo įjungti šuntai, o įtampai U_1 netiesiogiai matuoti buvo suvyniota papildoma pirminio transformatoriaus kontrolinė apvija, antrinei įtampai U_2 – didelės varžos daliklis. Kontrolinė apvija atskirta įžemintu ekranu ir išvesta į kontrolinius gnybtus.

Kondensatoriaus C_1 įkrovimo ir iškrovimo valdymo problemos

Sudarant pirminio kontūro su kondensatorių C_1 grupe komutavimo schemas, išskyla daug problemų:

- smūginės kondensatoriaus C_1 įkrovimo srovės per induktyvumą L_1 gali siekti kelis tūkstančius amperų;

- kondensatoriaus C_1 įkrovimo momentinės įtampos gali siekti kelis kilovoltus;
- panaudojant puslaidininkinius komutatorius, valdymo signalai turi būti sinchronizuoti tinklo dažniui;
- pilniesiems kontūro $L_1 C_{1\Sigma}$ virpesių periodams turi būti numatyta grandinė ir neigiamiems virpesių pusperiodžiams;
- komutuojantys jėginiai puslaidininkiniai elementai turi komutuoti ne tik dideles momentines sroves, bet ir aukštuosius dažnius, kas prieštarauja vienas kitam;
- be to, tenka komutuoti ir kelių kilovoltų įtampas;
- naudojant komutavimui tiristorines schemas visam įtampos pusperiodžiui panaudoti, tikslinga sinchroninius impulsus paduoti tuo laiko momentu, kai tinklo įtampa lygi nuliui.

Tiristoriniame komutatoriuje buvo panaudoti optotiristoriai, sujungti nuosekliai ir valdomi nuo atskirų, gerai izoliuotų impulsinių transformatorių apvijų. Impulsai paduodami į visus nuosekliai sujungtus tiristorius vienu metu.

Sudėtingesnės valdymo sistemos su komparatoriumi ir specialiu impulsiniu stiprintuvu leidžia reguliuoti valdymo kampą beveik visame pusperiodyje. Valdymo schemos elementai parinkti pagal optimalų režimą eksperimentiškai.

Antrinis kontūras sudarytas iš antrinės ritės L_2 , savosios kontūro talpos žemės atžvilgiu ir, jei reikia, papildomo labai aukštos darbo įtampos (per 100 kV) kondensatoriaus C_2 . Kadangi ritės induktyvumas apie 102 mH , tai savosios talpos nepakanka, todėl galimi du būdai:

- pagaminti papildomą pakankamai didelių matmenų aukštosios įtampos kondensatorių, kurio talpa keli tūkstančiai pikofaradų;
- padidinti ritės L_2 induktyvumą, panaudojus papildomą feritinę šerdį;

Pasirinktas kompromisinis variantas, t. y. pagamintas papildomas nedidelės talpos kondensatorius C_{2p} ir panaudota feritinė šerdis.

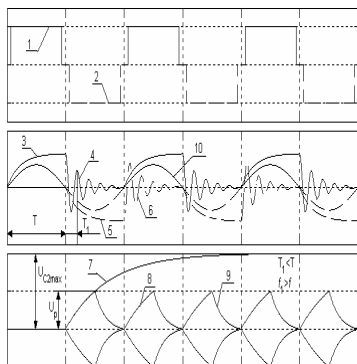
Bendras abiejų rezonansinių kontūrų $L_1 C_{1\Sigma}$ ir $L_2 C_{2\Sigma}$ darbas

Kondensatoriui C_1 įsikrovus iki tam tikros įtampos ir atsidarius tiristoriams (arba, jei tiristoriai pakeisti kibirkštinio oro tarpeliu, tai pramušus oro tarpelį), kondensatorius C_1 išsikraus per pirminę rezonansinio transformatoriaus apviją L_1 , ir pirminiame kontūre bus sužadinami silpstantys aukštojo dažnio virpesiai. Jei jie nėra slopinami, o antrinio kontūro dažnis f_2 yra lygus pirminio kontūro dažniui f_1 , tai antriniame kontūre $L_2 C_{2\Sigma}$ įvyksta įtampų rezonansas, kurio metu talpoje $C_{2\Sigma}$ įtampa gali pasiekti labai didelę vertę ir gali pramušti gana platų oro tarpą.

1 pav. parodyti eksperimentinės schemas pereinamieji procesai.

1 pav. pažymėta: 1,2 – tiristorių valdymo įtampos, 3,4,5,6 – pirminio kontūro kondensatorių įsikrovimo ir išsikrovimo įtampos, 7 – įtampos U_{C2} amplitudės kitimo gaubiamoji ($U_{C2\text{max}} \gg U_p$), 8 – įtampos U_{C2} amplitudės ($U_{C2\text{max}} < U_p$), 9 – įtampos U_{C2} amplitudės kitimo dedamoji

kondensatoriui išsikraunant, kai kontūro kokybė bloga, 10 – pirmoji įtampos harmonika, U_p – oro tarpo pramušimo įtampa (išlydis), U_{C2max} – nusistovėjusi talpos antriniame kontūre C_2 įtampa, kai $U_{C2max} > U_p$.



1 pav. Proceso eksperimentinėje schemeje grafikai

Kaip matyti iš eksperimento rezultatų, didinant antrinį oro tarpelį (t. y. išlydžio tarpą), bus didesnė ir pramušimo įtampa U_p . Taigi, galimi atvejai, kai antrinės talpos įtampa U_{C2} tampa žymiai didesnė už U_2 (įtampa, perduodama iš pirminio kontūro į antrinį).

Įtampa U_2 priklauso nuo srovės švytvimų pirminiame kontūre vektoriaus I_1 ir nuo ričių savitarpio indukcijos M :

$$U_2 = j\omega_1 M I_1; \quad (3)$$

$$M = \frac{\pi}{8} \mu_0 W_1 W_2 \frac{d^2}{a \cdot A} (l_1 F_1 - l_2 F_2 - l_3 F_3 + l_4 F_4); \quad (4)$$

čia koeficientai $F_1, F_2 \dots F_4$ randami remiantis [10]; kiti dydžiai:

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{(D/2)^2 + x_1^2}, & l_2 = \sqrt{(D/2)^2 + x_2^2}, \\ l_3 = \sqrt{(D/2)^2 + x_3^2}, & l_4 = \sqrt{(D/2)^2 + x_4^2}, \\ x_1 = x + \frac{A+a}{2}, & x_2 = x + \frac{A+a}{2}, \\ x_3 = x + \frac{A+a}{2}, & x_4 = x + \frac{A+a}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Kai ritės yra viena kitoje ir turi bendrą šerdį, tai (4) lygtimi pasinaudoti negalima. Tuo atveju $\mu_1 = \mu_2$ ir, išmatavus induktyvumus, galima apskaičiuoti:

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \cdot k_m; \quad (6)$$

čia

$$k_m = \frac{\pi^2 d^2}{2aA\sqrt{\phi_1 \phi_2 d_1 d_2}} (l_1 F_1 - l_2 F_2 - l_3 F_3 + l_4 F_4).$$

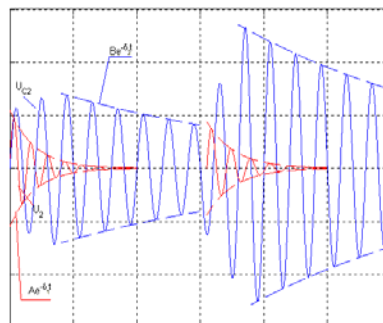
Jei įvykdoma sąlyga $R_1 \ll \sqrt{L_1/C_1}$, tai srovės amplitudė pirmajame kontūre $I_1 \approx \frac{U_{C1}}{\sqrt{L_1/C_1}}$ kis pagal tokį dėsnį:

$$U_{C_n} = U_{C_0} e^{-\frac{n\pi}{\omega} \delta_1} = U_{C_0} e^{-\frac{nT}{2} \delta_1}; \quad (7)$$

čia T – švytvimų periodas, U_{C_n} – kondensatoriaus C_1 įtampa, kai $t=0$, $\delta_1 = R_1/2L_1$ – pirminio kontūro gesimo koeficientas, n – pusperiodžio eilės numeris.

Įtampos amplitudės kitimas kondensatoriuje C_2 priklauso nuo slopinimo tiek pirminiame, tiek antriniame kontūruose, nuo įtampos U_2 ir nuo nagrinėjamo laiko momento $t = \frac{nT}{2}$.

Taigi, didėjant n , t. y. didėjant pusperiodžių skaičiui, įtampa U_{C2} , esant tam tikroms sąlygoms, palaipsniui didės, daug kartų viršys pradinę vertę. 2 pav. pavaizduotos galimos įtampos U_2 ir U_{C2} kitimo kreivės.



2 pav. Galimos įtampos U_2 ir U_{C2} kitimo kreivės

Eksperimento rezultatai

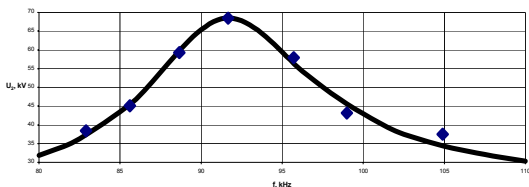
Su bandymo modeliu buvo atlikti įvairūs bandymai:

- keičiant kontūro $L_1 C_{1\Sigma}$ kondensatoriaus C_1 talpą nuo 100 nF iki 165 nF (arti rezonanso, kas 10 pF), išmatuotas rezonansinis dažnis $f_0=91,654$ KHz, o įtampos U_2 amplitudė 68450 V (kai įėjimo įtampa U_{C1} siekia $U_{C1}=108$ V (rezonansinė kreivė 3 pav.));
- keičiant įėjimo įtampą U_1 ir suderinus abu kontūrus rezonansui, kraštinės vertės buvo nuo $U_1=23$ V (tada $U_2=14,57$ kV) iki $U_1=2000$ V (tada $U_2=1867$ kV);
- pagal eksperimentų rezultatus buvo apskaičiuota ir susidarančio išlydžio kanalo aktyvioji varža R_0 . Nustatyta, kad kanalo varža didelė ir labai priklauso nuo antrinės įtampos U_{2m} . Pavyzdžiui, kai išlydžio ilgis (atstumas tarp elektrodų) yra 50 mm, įtampa $U_{2m}=80$ kV, išlydžio kanalo aktyvioji varža $R_0=2.86 \cdot 10^4 \Omega$, o kai $U_{2m}=300$ kV, – $R_0=0,21 \cdot 10^4 \Omega$.

Bandymo modelis ir atlikti eksperimentai padėjo išsiaiškinti trūkumus, netikslumus, kurie įvertinti siekiant tobulinti modelio konstrukciją ir gerinti laidaus kanalo savybes. Skaičiuojant patikslintus parametrus, pasinaudota atliktais bandymo modelio tyrimais. Bandymo modelio eksperimento rezultatų kreivė pavaizduota 3 pav.

Išvados

1. Eksperimentiniai bandymai parodė, kad paprastoje atmosferoje, gerinant aukštosios įtampos išlydžio šaltinio parametrus, reikia aukštosios darbo įtampos šaltinio ir aukštos kontūrų kokybės Q .



3 pav. Bandyto modelio eksperimento rezonansinė kreivė (pavaizduoti eksperimento taškai ir aproksimuota eksperimento kreivė)

2. Išlydžio ilgis tiesiogiai priklauso nuo antrinės įtampos ir srovės.
3. Mažėjant atstumui tarp elektrodų, t. y. išlydžio ilgiui, kanalo varža vienam ilgio vienetui mažėja.
4. Išlydžio ilgis atmosferoje priklauso nuo antrinio kontūro $L_2C_{2\Sigma}$ suderinimo su pirminiu kontūru $L_1C_{1\Sigma}$ tikslumo (turi būti $f_1=f_2$).
5. Tam tikrose ribose kanalo varžos R_0 priklausomybė nuo antrinės įtampos yra netiesinė.
6. Kai išlydžio kanalo ilgis fiksuotas, didinant įtampą (esant tam tikroms U_{2m} vertėms), kanalo varža R_0 mažėja lėčiau ir priklausomybė tampa panaši į hiperbolės dalį.
7. Išlydžio kanalo varža gana didelė ir be papildomų priemonių, sukuriančių plazmą išlydyje, (daug energijos) perduoti neįmanoma. Reikalingi eksperimentai su nepertraukiamo veikimo lazeriais arba kitais agentais, sudarančiais pradinę jonizaciją.

8. Išlydis atmosferoje sukuria rezonansinio dažnio spinduliuotę, kurią galima sumažinti iš dalies ekranuojant kontūrus.

Literatūra

1. **Норинский Л.В., Ривилин В.А.**, Исследование оптически инициированного электрического пробоя в газе // ЖЕТФ. – 1972. – Т. 63. – 56 с.
2. **Райзер Ю.П.** Лазерная искра и распространение разрядов. Москва, 1974. –23 с.
3. **Летохов В.С., Устинов Н.Д.** Мощные лазеры и их применение. Москва, Советское радио, 1980. –64 с.
4. **Райзер Ю.П.** Оптические разряды // УФН. – 1980. – Т. 132. –549 с.
5. **Полонский Л.И.** Формирование сплошной протяжной лазерной искры и электрические свойства ее канала: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. – Институт высоких температур АН СССР, 1985. –28 с.
6. **Полонский Л.И.** Физические основы создания и применения лазерных искр: Диссертация на соискание степени доктора технических наук. – Институт высоких температур АН СССР, 1990. –310 с.
7. **Василяк Л.М., Унковский С.Ю.** Прохождение электрического импульса по лазерной искре // Физико-химические процессы в преобразователях энергии. – Москва, 1989. – С. 40–43.
8. **Malkevičius S.** Tesla transformatorius – ilga linija. Klaipėda, 1995. – 7 p.

Pateikta spaudai 2004 08 30

E. Guseinoviėnė, V. Cirtautas, A. Senulis, S. Malkevičius. Laidaus kanalo atmosferoje formavimo ir tyrimo galimybės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 1(57). – P. 52–55.

Apžvelgtos kai kurios laidaus kanalo atmosferoje formavimo ir techninio taikymo galimybės. Suformuluoti pagrindiniai laidaus kanalo atmosferoje formavimo ir tyrimo tikslai. Laidžiam kanalui suformuoti buvo sukurti laboratoriniai aukštosios įtampos šaltiniai, paruošta įranga kanalo savybėms tirti. Apžvelgtos kondensatoriaus įkrovimo ir iškrovimo valdymo problemos, nagrinėtas bendras rezonansinių kontūrų darbas, pateikti eksperimento su bandymo modeliu rezultatai ir pavaizduotos jų kreivės. Atliekant eksperimentus su bandymo modeliu buvo pastebėta, kad kanalo laidumas yra proporcingas kanalą formuojančiai srovei. Pavaizduoti atliktų eksperimentų rezultatai parodė bandymo modelio netikslumus bei trūkumus, kurie įvertinti tikslinant laidaus kanalo parametrus ir tobulinant modelį. Il. 3, bibl. 8 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

E. Guseinoviėnė, V. Cirtautas, A. Senulis, S. Malkevičius. Possibilities of Formation and Investigation of Conductive Channel // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 1(57). – P. 52–55.

This paper deals with the principles of formation and investigation of conductive channel in atmosphere and possibilities of technical application of such channel. The main aims of investigation and formation of such channel in atmosphere are formed. The special (of laboratory purpose) sources of high voltage were created, equipment for investigation of channel quality was prepared. Some problems of charging and discharging of capacitor were carried out, common work of resonant contours were analysed. Experiment with the physical model for creation of conductive channel shows that electroconductivity is proportional to the current, which forms the channel. Some data of experimental investigation are presented. The results of experiment show inaccuracy and imperfection of the experimental model, which are evaluated revising the model. Ill. 3, bibl. 8 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

Э. Гусейновене, В. Циртаутас, А. Сenuлис, С.Малькявичус. Возможности формирования и исследования проводящего канала в атмосфере // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. –№ 1(57). – С. 52–55.

Рассматриваются некоторые возможности создания проводящего канала в атмосфере с целью передачи энергии. Сформулированы основные цели формирования и исследования проводящего канала. Созданы лабораторные источники высокого напряжения, подготовлено оборудование для исследования свойств проводящего канала. Рассмотрены проблемы управления зарядкой и разрядкой конденсатора, исследована совместная работа резонансных контуров, представлены кривые результатов эксперимента. Эксперимент с физической моделью показал, что проводимость канала пропорциональна формирующему канал току. Предъявлены результаты эксперимента. Данные эксперимента показали неточности и недостатки физической модели, которые учитываются при уточнении параметров проводящего канала и усовершенствовании конструкции модели. Ил. 3, библи. 8 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).