

## Elektrolankinio suvirinimo įrenginio adaptyvioji valdymo sistema

**A. Dambrauskas, B. Karaliūnas, D. Šulskis**

*Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,*

*Naugarduko g. 41, LT-03227 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2745063, el. p. vgtufesto@el.vtu.lt*

### Įvadas

Suvirinimas – neišardomųjų jungčių sudarymo technologinis procesas, leidžiantis automatizuoti ir tobulinti metalinių konstrukcijų ir mašinų gamybą. Suvirinimo procesų ir būdų yra daug ir labai įvairių [1, 2]. Pramonėje, žemės ūkyje, statybose plačiausiai taikomas elektrolankinis suvirinimas. Šiuo būdu gali būti virinama lydžiuoju elektrodu nedujinėje arba inertinių bei aktyviųjų dujų aplinkoje, glaistytaisiais elektrodais bei plikąja, milteline savisaugė arba glaistytąja viela, elektrodine viela, juostiniu arba horizontaliuoju elektrodu po flisu ir t. t. Be lankinio suvirinimo, taip pat taikomi kontaktinis, dujinis, slėginis, terminis, indukcinis, lazerinis ir kiti suvirinimo būdai.

Literatūroje [3,4] pateikti duomenys rodo, kad elektrolankinio suvirinimo kokybė priklauso ne tik nuo lanko maitinimo šaltinio charakteristikų, bet ir nuo suvirinimo įrenginio elektros pavarų valdymo tikslumo ir jų pereinamųjų procesų tolygumo. Norint optimizuoti siūlės geometrinę formą, būtina stabilizuoti ne tik vežimėlio ir vielos pastūmos pavarų greičius bei vielos lydymosi greitį, bet ir lanko įtampą, srovę ir lanko ilgį. Todėl šio darbo tikslas – išnagrinėti suvirinimo įrenginio vežimėlio ir elektrodinės vielos pastūmos elektros pavarų adaptyviają valdymo sistemą, pritaikant kintamos struktūros ir kintamų parametrų reguliatorius.

### Suvirinimo įrenginio adaptyviosios valdymo sistemos sudarymo principai

Suvirinimo siūlių kokybė priklauso nuo daugelio veiksnių: lanko įtampos, srovės, suvirinimo greičio, lanko ilgio, įvairių trukdžių ir t. t. Todėl suvirinimo įrenginio adaptyvioji valdymo sistema skirta technologiniams parametrų reguliuoti ir valdyti. Tokia sistema valdo elektrodinės vielos pastūmos greitį, lanko įtampą, elektrodo laikiklio pastūmą priklausomai nuo suvirinamų detalių storio, tarpo tarp jų dydžio, siūlės geometrijos ir kitų veiksnių.

Aišku, kad adaptacijos būdai ir adaptyviosios sistemos galimybės bei tobulumas priklauso nuo iš jutiklių gaunamos informacijos, kuri leidžia įvertinti suvirinimo siūlės kokybę bei jos geometrinę charakteristiką. Tokią informaciją gali suteikti techninė regėjimo sistema, operatyviai reaguojanti į suvirinimo proceso pasikeitimus ir surandanti skirtumą tarp suvirinamojo ir etalono

gaminio. Dabartiniu metu techninio regėjimo sistemose naudojami specialūs regėjimo jutikliai, lazeriai, vaizdo kameros [5].

Bet koks nespaltotas atvaizdas gali būti aprašytas dviejų kintamųjų funkcija  $f(x, y)$ ; čia  $x$  ir  $y$  – ekrano koordinatės. Ši funkcija yra vaizdo taško su koordinatėmis  $(x, y)$  intensyvumas, ryškumas arba šviesumas. Atpažinimas yra objekto (reiškinio) tipo nustatymas pagal jo atvaizdą.

Atvaizdo požymiai gali būti nustatyti naudojant tokias požymių charakteristikas:

$$y(\omega_k) = \int_S f(x, y) \varphi(\omega_k, x, y) dl, \quad k = 0, \dots, p-1; \quad (1)$$

čia  $y(\omega_k)$  –  $k$ -ojo požymio dydis;  $L$  – identifikacijos kontūras;  $\varphi(\omega_k, x, y)$  – svorio funkcija;  $p$  – požymių skaičius;  $k$  – požymio numeris.

Atpažinimo procese gali būti pritaikytos diskriminantinės funkcijos, kuriomis nustatomas skirtumas tarp objekto atvaizdo ir etalono. Kadangi objektas beveik visuomet skiriasi nuo bet kokio etalono, būtina duoti tam tikrą šio skirtumo charakteristiką. Tuomet stebimojo objekto priklausymas vienai ar kitai klasei nustatomas pagal šios charakteristikos minimumą.

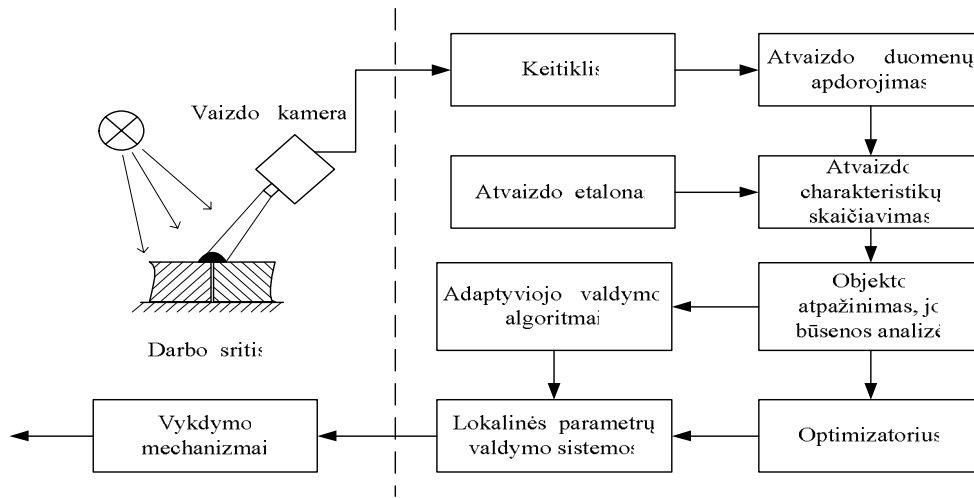
Tarkime  $f(x, y)$  – atvaizdas, o  $h(x, y)$  – etalonas; tada skirtumo charakteristika surandama iš formulės

$$d = \sum_i \sum_j [f(x_i, y_j) - h(x_i, y_j)]^2. \quad (2)$$

Tikrinant sutapimą su etalonu, nustatoma slenksčio vertė  $A$ . Jeigu  $d < A$ , laikoma, kad objektas sutampa su etalonu, o jeigu  $d \geq A$ , – nesutampa. Tuomet atvaizdas lyginamas su kitu etalonu ir t. t.

Lyginant objekto atvaizdą su etalonu gali būti panaudotas koreliacinis metodas, kurio pagrindas – etalono ir atvaizdo koreliacinės funkcijos skaičiavimas. Tuomet didesnę funkcijos vertę atitinka didesnė atvaizdo sutapimo su etalonu tikimybė. Koreliacinė funkcija apskaičiuojama pagal formulę

$$G = \sum_i \sum_j [f(x_i, y_j) - h(x_i, y_j)]. \quad (3)$$



1 pav. Elektrolankinio suvirinimo įrenginio adaptyviosios valdymo sistemos funkcinė schema

Atvaizdo požymiai (1) leidžia koreguoti suvirinimo parametrus priklausomai nuo siūlės geometrijos ir kitų veiksnių.

Charakteristikos (2) ir (3) naudojamos formuluojant optimizavimo sistemos tikslo funkciją ir apribojimus. Tokia sistema atlieka optimalių suvirinimo proceso parametrų paiešką ir adaptuoja lokales reguliavimo sistemas kintant proceso sąlygoms. Elektrolankinio suvirinimo įrenginio adaptyviosios valdymo sistemos funkcinė schema parodyta 1 pav.

Objekto (suvirinimo siūlės) atvaizdas per optinį vaizdo kameros bloką perduodamas į matricinį vaizdą ir signalo keitiklį, kurio elektrinis signalas atvaizdo duomenų apdorojimo įrenginyje sustiprinamas ir išsimenamas. Toliau šis signalas, kartu su etaloniniu, naudojamas atvaizdo charakteristikoms apskaičiuoti, atvaizdo požymiams nustatyti, objekto ir jo būsenos analizei. Surastos charakteristikos (1) – (3) naudojamos lokalinėms parametrų valdymo sistemoms adaptuoti, taip pat leidžia formuoti optimizavimo sistemos tikslo funkciją ir apribojimus, atlikti nepertraukiamą optimalių suvirinimo parametrų paiešką. Optimizatoriuje taikomi kombinuotos simpleksinės paieškos algoritmai [6].

### Pagrindinės lygtys ir struktūrinė schema

Viena iš pagrindinių elektrolankinio suvirinimo optimalaus režimo sąlygų yra ta, kad lankas suvirinimo metu turi degti stabiliai, be trumpųjų sujungimų. Elektros lanko, kaip reguliavimo objekto, statinę charakteristiką galima gauti, išsprendus tokią lygčių sistemą [7]:

$$\begin{cases} v_v = v_e = const, \\ v_e = k_1 I_l + k_2 U_l; \end{cases} \quad (4)$$

čia  $v_v$  ir  $v_e$  – atitinkamai elektrodinės vielos pastūmos ir išsilydymo greičiai;  $I_l$  ir  $U_l$  – lanko srovės ir įtampos

efektinės vertės;  $k_1$  ir  $k_2$  – automatinio reguliavimo atitinkamai pagal srovę ir pagal įtampą koeficientai.

Suvirinimo kontūre su nuosekliai įjungtu elektros lanku nusistovi tokia suvirinimo srovė:

$$I_l = (v_v + k_2 U_l) \frac{1}{k_1}. \quad (5)$$

Pirmasis (5) išraiškos narys yra iš anksto nustatyta reikiama suvirinimo srovė, kurią ARS viso proceso metu turi palaikyti pastoviai. Tačiau svyruojant tinklo įtampai ir dėl kitų trikdžių atsiradus greičių pokyčiams  $\Delta v = v_v - v_e$ , keičiasi lanko ilgis ir jo elektriniai parametrai, lemiantys siūlės kokybę. Kadangi lanko srovė  $i_l$  yra sudėtinga kelių kintamųjų funkcija, priklausanti nuo maitinimo šaltinio ir lanko dinaminės varžos, tai srovės pereinamuosius procesus apibūdina tokia suvirinimo kontūro įtampų balanso lygtis:

$$L \frac{\partial i_l}{\partial t} = i_l (R_s - R_l) - E l_l; \quad (6)$$

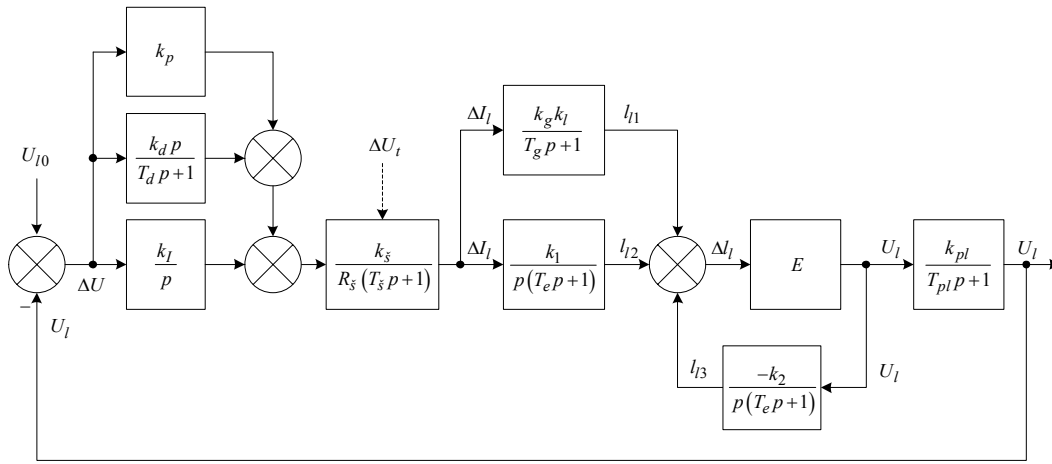
čia  $L = L_{tr} + L_{dr}$  – suvirinimo kontūro suminis induktyvumas;  $L_{tr}$  – transformatoriaus induktyvumas;  $L_{dr}$  – droselio induktyvumas;  $R_s$  – šaltinio dinaminė varža;  $R_l$  – lanko dinaminė varža;  $E$  – elektrinio lauko stiprio gradientas lanko stulpelyje;  $l_l$  – lanko ilgio pokytis.

Suvirinimo įrenginio AVS galima parinkti tokią reguliatoriaus statinės charakteristikos išraišką:

$$v_v = k_{reg} (U_l - U_{l0}); \quad (7)$$

čia  $k_{reg} = \frac{\Delta v_v}{\Delta U_l}$  – reguliatoriaus perdavimo koeficientas;  $U_{l0}$  – nustatyta lanko įtampa.

Išsprendus (4), (5) ir (7) lygtis kartu, gaunama tokia reguliuojamojo parametro išraiška:



2 pav. Siulės pločio automatinės stabilizavimo sistemos struktūrinė schema

$$U_l = (k_1 I_l + k_{reg} U_{l0}) \frac{1}{k_2 + k_{reg}}; \quad (8)$$

$k_{reg}$  parenkamas taip, kad AVS palaikytų reikiamą  $U_{l0}$  vertę, o  $I_l$  reguliuojama automatiškai keičiant suvirinimo kontūre įjungto droselio induktyvumą  $L_{dr}$ . Minimali šio koeficiento vertė parenkama taip:

$$k_{reg \min} = \frac{v_{e \max}}{U_{l \min} - U_{l0}}. \quad (9)$$

Atsiradus  $I_l$  ir  $U_l$  pokyčiams, aperiodiškai keičiasi elektrodo išsilydymo greitis, lanko ilgis, siulės gylis ir jos plotis. Šie pokyčiai apibūdinami atitinkamomis laiko pastoviosiomis  $T_e$ ,  $T_l$ ,  $T_g$  ir  $T_{pl}$  bei perdavimo koeficientais  $k_l$ ,  $k_g$  ir  $k_{pl}$ .

Nustatysime, kaip tokioje sistemoje keičiasi lanko įtampa ir siulės plotis, svyruojant tinklo įtampai nuo -10 iki +5 % nominaliosios vertės. Laikant, kad reguliuojamasis parametras yra siulės plotis  $b$ , o trikdys – tinklo įtampos pokytis  $\Delta U_l$ , galima sudaryti tokią sistemos perdavimo funkciją:

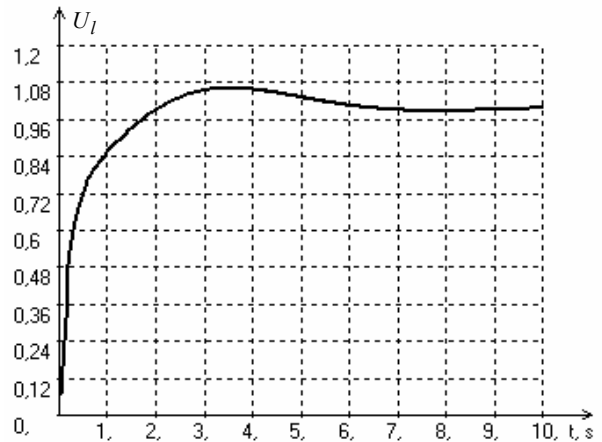
$$W(p) = \frac{-kk_{pl}k_{reg}}{(T_{pl}p+1)\{(T_e p+1)p-k_2 E\}} \times \frac{1}{(T_s p+1)(T_g p+1)-k}; \quad (10)$$

čia  $k = \frac{k_1 k_g k_l E}{k_s}$ .

Pagal (10) perdavimo funkciją galima sudaryti 2 pav. parodytą struktūrinę schemą. Pateiktoje schemoje lanko maitinimo šaltinis pavaizduotas inercine grandimi su perdavimo koeficientu  $k_s$  ir laiko pastoviaja  $T_s$ . Minus ženklas rodo, kad šaltinio išėjimo charakteristika  $U_s = f(I_l)$  yra krintanti. (10) išraiškoje  $k_{reg}$  parenkamas taip, kad AVS palaikytų reikiamą  $U_l$ .

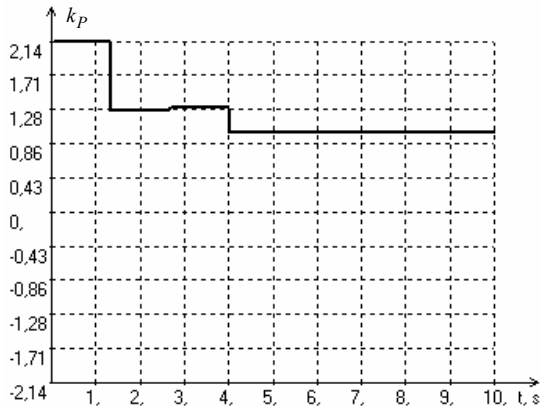
### Modeliavimo rezultatai

Kintamos struktūros suvirinimo sistemos sintezės uždavinys pagal 2 pav. schemą sprendžiamas, taikant simpleksinės paieškos algoritmus ir naudojant programų paketą *Kvazio 1* [7]. Pateiksime modeliavimo rezultatus tam atvejui, kai reguliuojamasis parametras yra lanko įtampa. 3 pav. parodytas suvirinimo valdymo sistemos pereinamasis procesas, kai sistemoje įjungtas pastovių parametru PID reguliatorius.

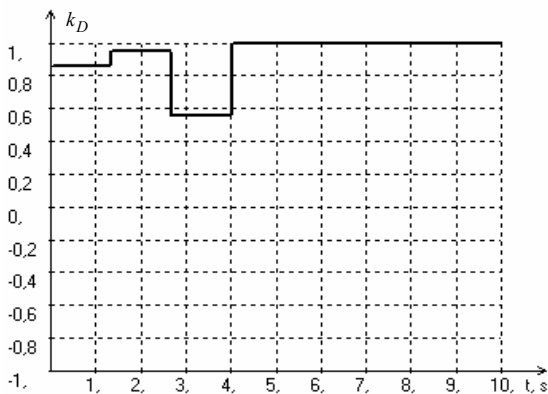


3 pav. Sistemos pereinamasis procesas, kai įjungtas pastovių parametru PID reguliatorius

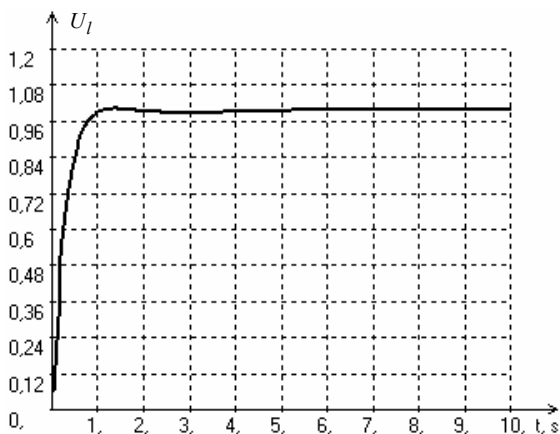
Pagal anksčiau pateiktą metodiką modeliuojant kompiuteryje programų paketu *Kvazio 1*, buvo gauti proporcinio  $k_p = f(t)$  ir diferencinio  $k_D = f(t)$  regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimo dėsniai. Jie atitinkamai parodyti 4 ir 5 pav., o juos atitinkantis valdymo sistemos pereinamasis procesas – 6 pav.



4 pav. Proporcinio regulatoriaus stiprinimo koeficiento kitimo dėsnis



5 pav. Diferencinio regulatoriaus stiprinimo koeficiento kitimo dėsnis



6 pav. Sistemos pereinamasis procesas, kai regulatoriaus parametrai kintami

Modeliavimo rezultatai rodo, kad atsiradę  $U_I$  ir  $I_I$  svyravimai sukelia elektrodinės vielos ir pagrindinio metalo lydymosi greičio pokyčius. Dėl to lanko įtamos ir srovės svyravimai turi įtakos siūlės pločiui, aukščiui ir metalų išsilydymo gyliui. Šie veiksniai lemia siūlės geometrinę formą, jungties mechaninį atsparumą bei jos eksploatacines savybes. Gauti rezultatai rodo, kad suvirinimo aplinkoje veikiant trikdžiams lanko įtamos pereinamasis procesas yra aperiodinis ir artimas optimaliam. Dėl to stabilizuojama suvirinimo srovė ir lanko degimo procesas.

Čia pateikta adaptyvi kintamos struktūros paieškinė sistema priklausomai nuo suvirinimo proceso įvairių būsenų, kurios atsiranda darbo metu, pajėgi greitai pakeisti savo parametrus ir struktūrą ir tai gerokai padidina valdymo efektyvumą bei palaiko reikiamą suvirinimo įtampą norimu tikslumu.

## Išvados

1. Norint optimizuoti elektrolankinio suvirinimo procesą, būtina stabilizuoti ne tik vežimėlio ir vielos pastūmos elektros pavarų greičius, bet ir lanko įtampą, srovę, jo ilgį bei elektrodinės vielos lydymosi greitį. Šiuos uždavinius geriausiai gali išspręsti tik daugiakontūrė adaptyvioji suvirinimo įrenginio valdymo sistema, turinti loginį programuojamąjį valdiklį bei optimizacijos ir adaptacijos blokus.

2. Panaudojus techninę regos sistemą su vaizdo atpažinimo kameromis ir suvirinimo siūlės geometrinės formos loginiais operatoriais aprašytą modelį, galima sukurti adaptyviąją paieškos sistemą, reaguojančią į trikdžius bei faktinę proceso būseną ir galinčią greitai pakeisti savo parametrus ir struktūrą ir šitaip optimizuoti patį suvirinimo procesą.

## Literatūra

1. **Adamonis D., Žunda A.** Suvirinimo standartai, procesų klasifikacija ir jungčių paruošimas // *Agroinžinerija ir energetika. Mokslo ir gamybos žurnalas. LŽŪU.* – 2003. – Nr.8. – P. 3–11.
2. **Naruševičius J.** Suvirintojo vadovas. – Vilnius: Mažoji Evelina, 2003. – 350 p.
3. **Халиков В. А., Липковский К. А., Паханян В. М., Шатан А. Ф.** Исследование энергоэффективности источников сварочной дуги современными программными пакетами моделирования // *Техническая электродинамика.* – 2004. – № 3. – С. 17–22.
4. **Pires J.** Using Matlab to interface industrial robotic and automation equipment // *IEEE Robotics and Automation Magazine.* – 2000. – Vol. 7. – P. 32–41.
5. **Кривин В. В.** Измерительный преобразователь сигналов в процессе сварки плавлением // *Известия вузов. Электромеханика.* – 2003. – № 4. – С. 26–28.
6. **Dambrauskas A.** Simpleksinės paieškos metodai. – Vilnius: Technika, 1995. – 230 p.
7. **Dambrauskas A., Karaliūnas B., Šulskis D.** Elektrolankinio suvirinimo procesų kompiuterinis modeliavimas // *Elektronika ir elektrotechnika.* – Kaunas: Technologija. – 2004. – Nr. 4(53). – P. 80–85.

Pateikta spaudai 2005 03 09

**A. Dambrauskas, B. Karaliūnas, D. Šulskis. Elektrolankinio suvirinimo įrenginio adaptyvioji valdymo sistema // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 8(64). – P. 60–64.**

Nagrinėjami dažniausiai pasitaikantys elektrolankinio suvirinimo jungčių defektai, jų priežastys ir veiksniai, lemiantys suvirintųjų siūlių susiformavimo kokybę. Norint optimizuoti suvirinimo procesą, būtina stabilizuoti ne tik vežimėlio ir elektrodinės vielos pastūmos pavarų greičius, bet ir lanko įtampą, srovę, lanko ilgį bei vielos lydymosi greitį. Nagrinėjami suvirinimo įrenginio adaptyviosios valdymo sistemos sudarymo principai, pateikta jos funkcinė ir struktūrinė schemas.

Tyrimų rezultatai rodo, kad panaudojus techninę regos sistemą su vaizdo atpažinimo kameromis ir suvirinimo siūlės geometrinės formos loginiais operatoriais aprašytą modelį, galima sukurti adaptyvią paieškos sistemą, kuri pajėgi greitai pakeisti savo parametrus ir struktūrą ir šitaip optimizuoti patį suvirinimo procesą. Kintamos struktūros suvirinimo sistemos sintezės uždavinys spręstas kompiuteriniu programų paketu *Kvazio 1*, taikant simpleksinės paieškos algoritmus. Gauti ir išnagrinėti proporcinio ir diferencinio regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimo dėsniai. Modeliavimo rezultatai rodo, kad, veikiant trikdžiams, lanko įtampos pereinamasis procesas yra aperiodinis ir artimas optimaliam. Dėl to stabilizuojama suvirinimo srovė, lanko degimo procesas ir siūlės geometrinė forma. Il. 6, bibl. 7 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**A. Dambrauskas, B. Karaliūnas, D. Šulskis. Adaptive Control System of the Arc Welding Equipment // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 8(64). – P. 60–64.**

There is presented investigation into defects of the arc welding flanges, they reasons and factors, which decide on quality of formation weld seams. If you like to optimize welding process, it is necessary to stabilize not only the speed of electric drives of the filler wire and little cart, but also the arc current, voltage, length and electrode wire melting speed. The formation principles of the adaptive control system there are presented, the function and structural schemes are obtained.

Research results shows, that by employment of technical vision system and mathematical model of weld seams describing with logical operators the adaptive search system may be created. This system may quickly to change its parameters and structure, and in that way to optimize the same welding process. The problem on synthesis of the welding control system with the changeable structure and parameters was solved by using computer package *Kvazio 1* with simplex search algorithms. The change laws of the amplification coefficients of the proportional and differential regulators where obtained. Modelling results shows, that the transitional process of the arc voltage is aperiodical and intimate to optimal. Because that is stabilizing the arc current, arc buring process and geometrical form of the weld seam. Ill. 6, bibl. 7 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

**А. Дамбраускас, Б. Каралиюнас, Д. Шульскис. Адаптивная система управления устройством электродуговой сварки // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – № 8(64). – С. 60–64.**

Рассматриваются причины наиболее часто встречающихся дефектов электродуговой сварки и факторы, влияющие на качество сварных соединений. Для оптимизации сварочного процесса необходимо стабилизировать не только скорости привода каретки и привода подачи электродной проволоки, но и напряжение, ток, длину дуги, а также скорость расплавления проволоки. Рассмотрены принципы построения адаптивной системы управления сварочным устройством, представлена функциональная и структурная схема такой системы.

Результаты проведенных исследований показывают, что при использовании системы технического обзора с камерами опознавания объекта и применяя модель сварного шва в виде логических операторов, возможно создать адаптивную поисковую систему, способную быстро менять свои параметры и структуру и таким образом оптимизировать сам процесс сварки. Задача синтеза системы управления процессом сварки решена компьютерным программным пакетом *Kvazio 1* с использованием алгоритмов симплексного поиска. Получены также законы изменения коэффициентов усиления пропорционального и дифференциального усилителя. Результаты моделирования показывают, что в условиях возмущений получен переходной процесс напряжения дуги близкий к оптимальному. Поэтому во время сваки стабилизируются процесс горения дуги и геометрическая форма сварочного шва. Ил. 6, библи. 7 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).