

STUDY OF FIELD WEAKENING TRACTION DIRECT-CURRENT ENGINE WITH THE HELP OF THE COMPUTER SIMULATION

VILCES LĪDZSTRĀVAS DZINĒJA LAUKA VĀJINĀŠANAS REŽĪMU DATORMODELĒŠANAS IZPĒTE

V. Cīmanis, V. Hramcovs

Atslēgas vārdi: līdzstrāvas dzinējs, lauka vājināšana, ierosmes koeficients, kontakttikla sprieguma svārstības, bezkontakta elektroniskais slēdzis, aizsardzības algoritms

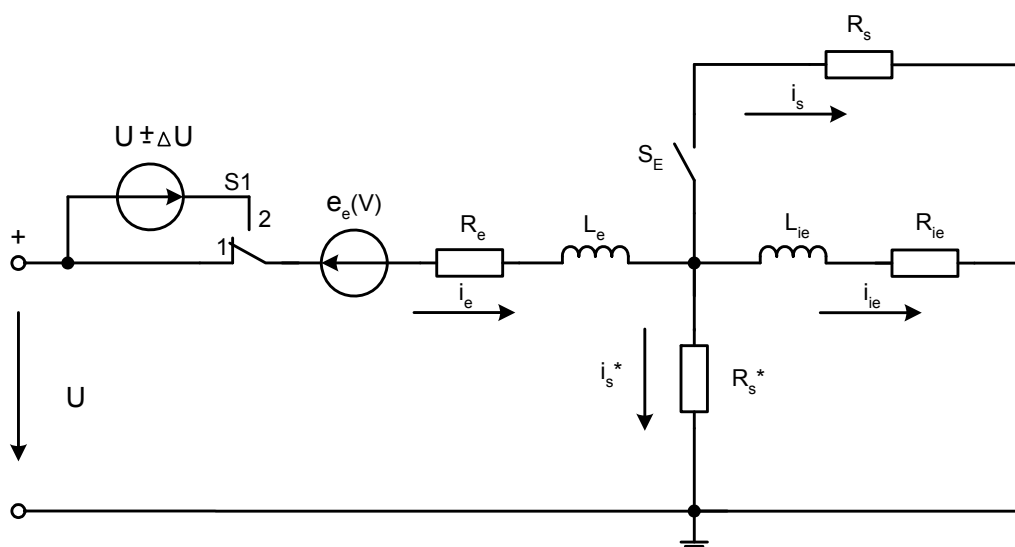
Pamatojoties uz izpētītiem vilces dzinēju vājināšanas mezgla darba režīmiem, tika piedāvāts sekojošais dzinējiem bīstamo režīmu (t.i. ar nepieļaujami zemu ierosmes koeficientu) novēršanas variants: aizvietot induktīvo šuntu ar ātrdarbīgo aizsardzību elektroniskā slēdža pamatā, tai darbojoties pēc sekojoša algoritma:

- aizsardzības nostrāde, t.i. ierosmes tinumu šuntējoša rezistora ķēdē bezkontakta slēdža atslēgšana, tiek veikta, ierosmes koeficientam samazinoties līdz $\beta = i_e/i_{e0} \leq 0,4$;
- aizsardzības atgriešana, t.i. bezkontakta slēdža atkārtota ieslēgšana, notiek dzinēju strāvai samazinoties ($i_e \approx i_{e0}$) elektrovilciena ieskrējiena gaitā līdz 150 A.

Dotais algoritms, protams, attiecas uz nemainīgo dzinēju lauka vājināšanas pozīciju elektrovilciena vadībā.

Aizsardzības darbība vilciena ieskrējiena apstākļos ar tīkla sprieguma uzmetieniem.

Vilces dzinēju reālas elektriskās ķēdes aizvietošanas shēma pārējas procesu analīzei parādīta 1. attēlā.



1. att. Vilces dzinēju reālas elektriskās ķēdes aizvietošanas shēma

Kā redzams no shēmas, režīmi tiek izskatīti, vilcienam pārvietojoties uz dzinēju dabiskās raksturlīknes, t.i. bez kādiem regulēšanas elementiem enkuru ķēdē.

Tad dzinēju nemainīgā ķēdē enkuru strāvu nosaka divi mainīgi lielumi:

- barojošais spriegums;
- dzinēju enkuru pret-EDS, atkarīgs no to griešanas frekvences n un magnētiskās plūsmas ϕ :

$$I_e = \frac{U - C_E * n * \phi}{R_{\Sigma}} \quad (1)$$

kur R_{Σ} - dzinēju ķēdes kopēja pretestība;

C_E – elektriskās mašīnas konstruktīva konstante.

Izsakot strāvu caur kustības lineāro ātrumu V , (neņemot vērā riteņu buksēšanas režīmus) un pieņemot atbilstošu dimensijai jaunu konstanti C :

$$I_e = \frac{U - C_E * V * \phi}{R_{\Sigma}} \quad (2)$$

Vilciena ieskrējiena režīmā tā kustību apraksta 2. Ņutona likuma vienādojums:

$$m_f * (1 + \gamma) * \frac{dv}{dt} = F - W, \quad (3)$$

kur F – vilces kopējais spēks;

W – kustībai pretestības kopējais spēks;

m_f – vilciena fiziskā masa;

$$\gamma = \frac{m_e}{m_f}$$

- vilciena rotējošo daļu inerces koeficients, kas uzskaita vilciena ekvivalentās masas m_e pieaugumu salīdzinājumā ar fizisko.

No izteiksmes (3) redzams, ka vilciena ieskrējienā ātruma izmaiņas (dv/dt) likums bez pašā vilciena mehāniskiem parametriem un tā dzinēju vilces spēka ir nosakāms arī no daudziem sarežģītiem faktoriem, kas ietekme kustības pretestību (gaisa vides pretestība, sliežu ceļa profils, līko ceļu pretestība u.c.).

Atgriežoties pie izteiksmes (2), ir redzams, ka arī vilciena ieskrējienā krītoša dzinēju strāva ir atkarīga no tiem pašiem faktoriem. Jāievēro, kā ātruma izmaiņa notiek nesamērīgi lēnāk nekā elektriskie pārejas procesi dzinēju ķēdēs komutāciju dēļ. Tomēr tas komutācijas nosaka vilciena elektromehānisko procesu raksturu, t.i. riteņu pāru kopējo lineāro ātrumu. Tādēļ vispārīgā gadījumā elektrisko un mehānisko pārejas procesu analīzei jābūt kopīgai.

Apskatoties kontakttīkla sprieguma uzmetienu $U + \Delta U$ dzinēju lauka vājināšanas režīma ar sākumstrāvām:

$$I_{ie} = I_s = \frac{I_e}{2} \quad (I_s \gg I_s^*) \quad (4)$$

kur I_s – šunta strāva,

var pierakstīt dzinēju ķēdei spriegumu vienādojumu:

$$U + \Delta U = e_e(V) + I_e R_e + L_e \frac{dI_e}{dt} + I_{ie} R_{ie} + L_{ie} \frac{dI_{ie}}{dt}, \quad (5)$$

kur dzinēju enkuru EDS $e_e(V) = C * V(t) * \phi(I_{ie})$ ir dažu mainīgu lielumu nelineāra sarežģīta funkcija.

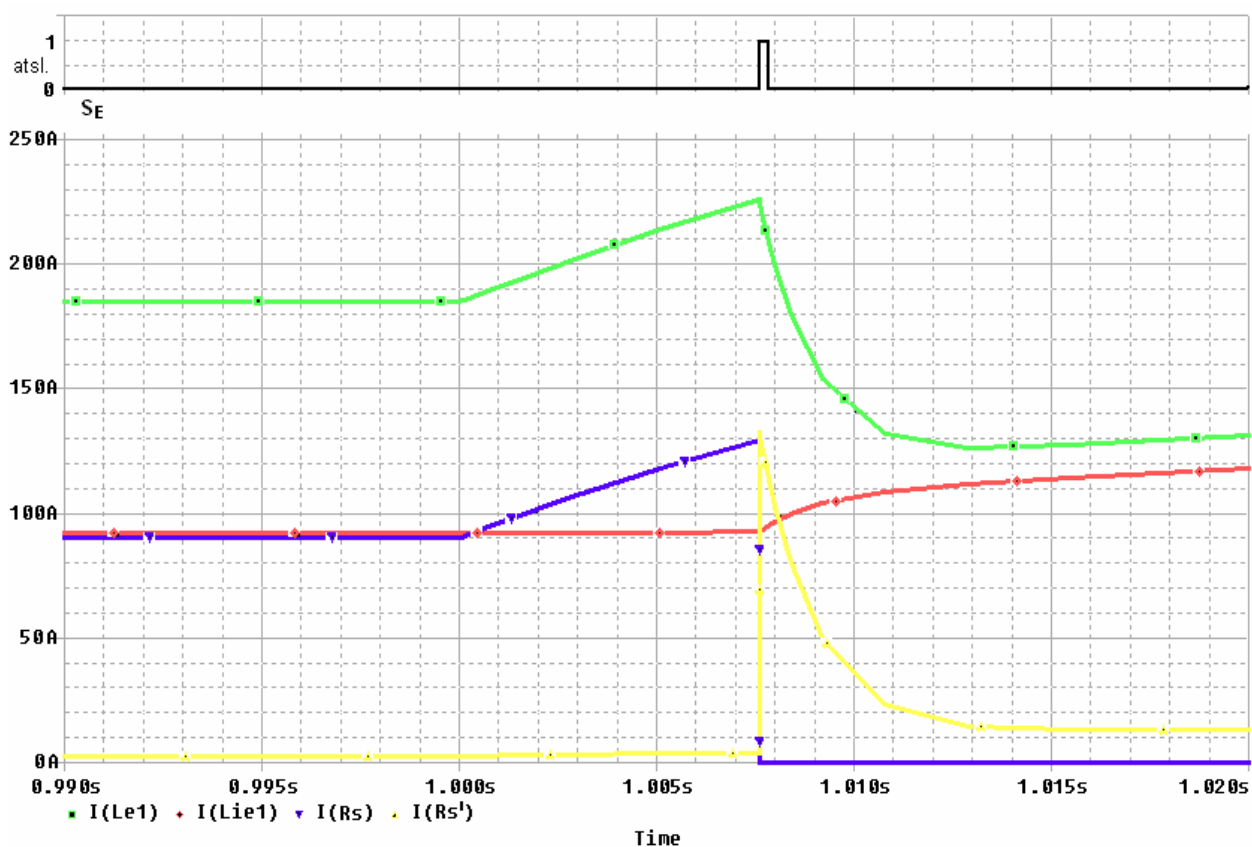
Šeit formulētam uzdevumam – analizēt procesus dzinēju ķēdē vājināšanas režīma aizsardzības nostrādes un atgriešanas gadījumos – nav nepieciešams iegūt precīzo atrisinājumu vilciena kustības kādam režīmam. Tamdēļ atspoguļojot vilciena ieskrējienā funkciju $I_e(V)$ un $V(t)$ tipisko raksturu, var pieņemt aprēķinā ar laiku augošo EDS lielumu patvaļīgi, protams, saskaņojot tā parametrus ar ieskrējiena laika un dzinēju strāvas reālām robežām.

Dotajā darbā, pielietojot datormodelēšanas metodi procesu analīzēm, enkuru EDS, vienkāršībai, pieņemts laika lineārās funkcijas veidā:

$$e_e(V) = a * t, \quad (6)$$

kur $a = \text{const}$ apskatāma laika posma ietvaros.

2. attēlā parādīti strāvu grafiki, iegūtie tīkla sprieguma uzmetiena procesā datormodelēšanas rezultātā.

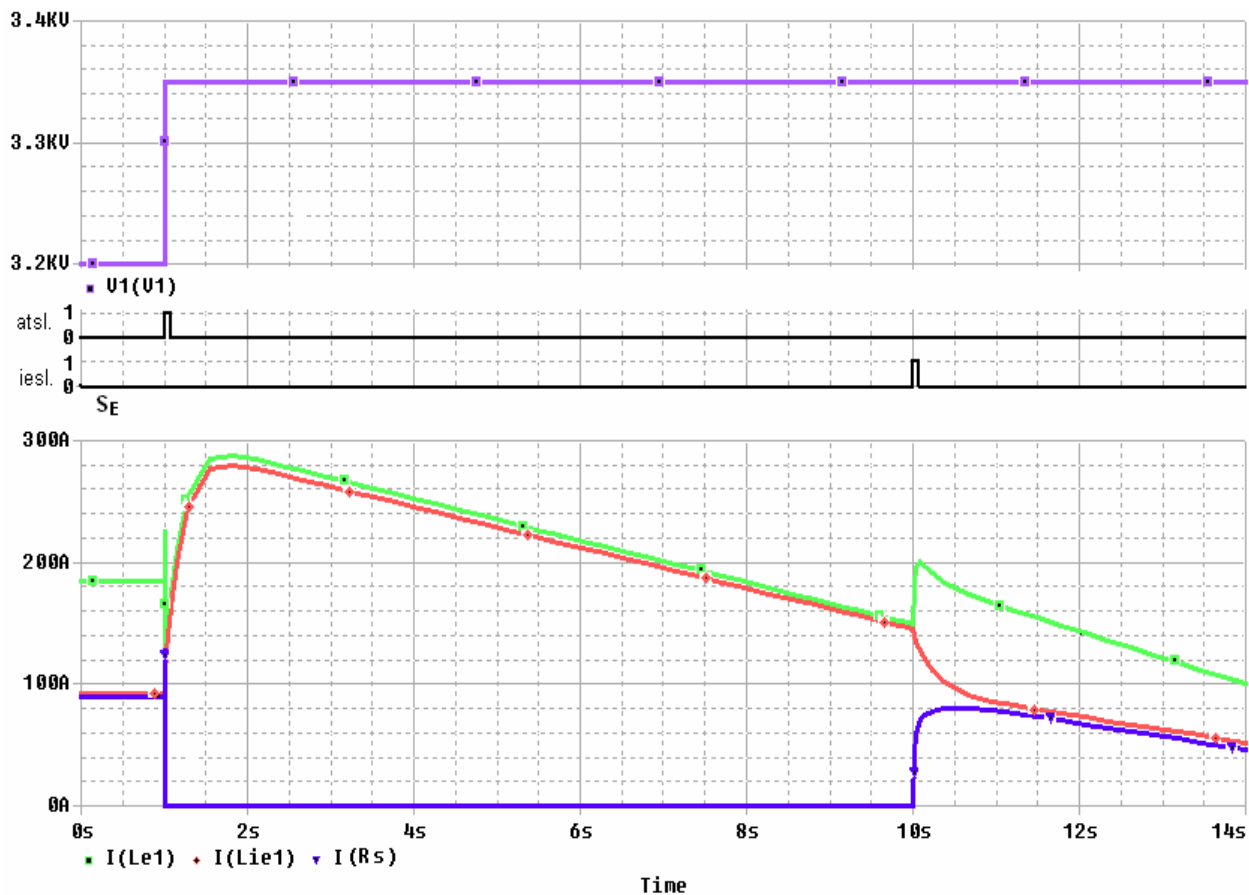


2. att. Aizsardzības darbība ar tīkla sprieguma uzmetienu

Pārejas procesi notiek aizsardzībai nostrādājot (atslēdzot šuntējošo rezistoru Rš) atbilstoši izvēlētam algoritmam, t.i. pie:

$$\beta = \frac{I_{ie}}{I_e} \leq 0,4. \quad (7)$$

3. attēlā citā laika mērogā attēlots šī procesa turpinājums vilciena ieskrējiena gaitā pie $U + \Delta U$ ar krītošām strāvām $I_e \approx I_{ie}$. Pēc pieņemta algoritma aizsardzības atgriešana (t.i. lauka vājināšanas atkārtota ieslēgšana) notiek, strāvām samazinoties līdz 150 A.



3. att. Aizsardzības darbība vilciena ieskrējiena apstākļos ar tīkla sprieguma uzmetienu

Izteiksmē (5) reāliem parametriem:

$$U + \Delta U \gg i_e R_e + i_{ie} R_{ie} . \quad (8)$$

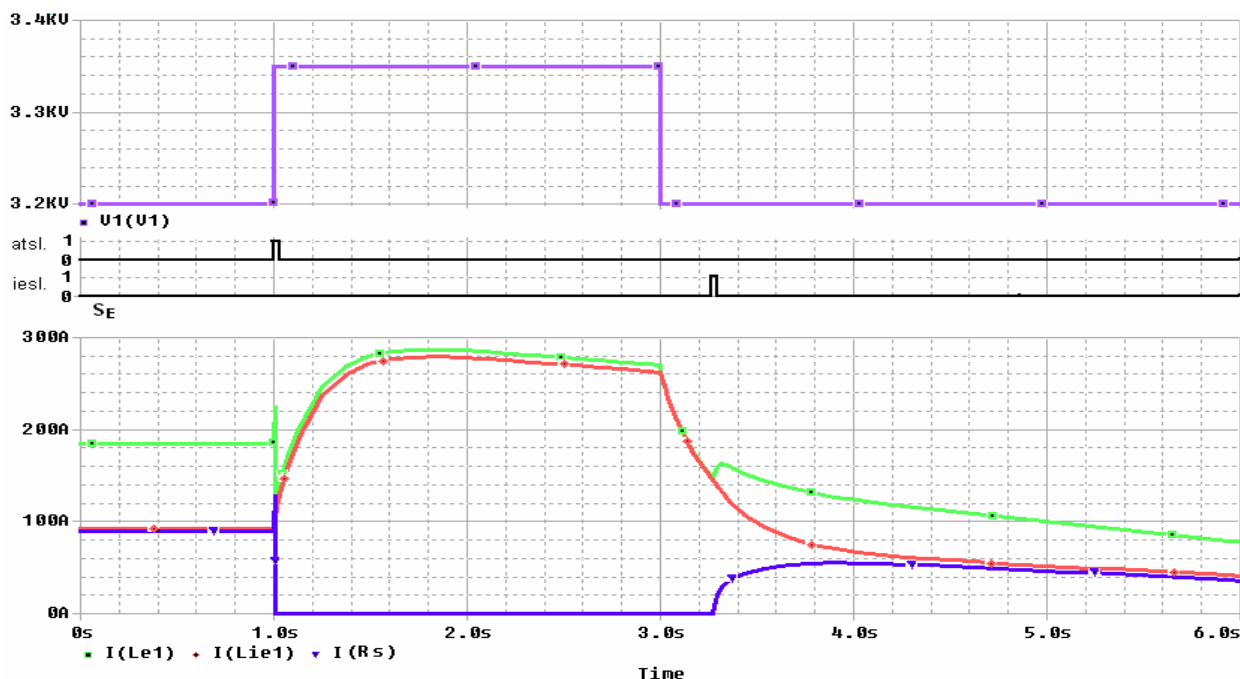
Pēc aizsardzības nostrādes $i_e \approx i_{ie}$ un $di_{ie}/dt \approx di_e/dt$, tad

$$\frac{di_e}{dt} \approx \frac{U + \Delta U - at}{L_e - L_{ie}} , \quad (9)$$

kur $a = \text{const}$, ar dimensiju V/s enkuru EDS $e_e(t)$ lielumam, bet vilciena kustības vienādojumā atbilstoša konstante atspoguļo paātrinājumu, vidēju par ieskrējiena posmu.

Acīmredzams, strāvu $i_e \approx i_{ie}$ maksimāla sasniedzama vērtība (3. att.), pie $di_e/dt = 0$ izteiksmē (9) laika momentā $t = (U + \Delta U)/a$ noteicama gan pēc barošanas sprieguma, gan pēc vilciena kustības režīma parametriem.

4. attēlā parādīti grafiki, kas attiecas uz posmiem, modelētiem pēc samēra īslaicīga sprieguma uzmetiena barošanas tīklā. Aizsardzības nostrāde un atgriešanos notika pēc tiem pašiem, augšā minētiem, noteikumiem.



4. att. Aizsardzības darbība ar tīkla īslaicīgu sprieguma uzmetienu

Atgriežoties pie paradītiem 2. attēlā grafikiem jāatzīmē, kaut gan īslaicīgs, bet ievērojams amplitūdas strāvas impulss rezistorā $R_{\text{š}}^*$, izslēdzoties elektroniskam slēdzim SE . Tieši tā amplitūda nosaka slēdzim pieliekama sprieguma maksimālo vērtību:

$$U_{SE\text{MAX}} = (I_e(0) - I_{ie}(0)) * R_{\text{š}}^*, \quad (10)$$

kur par laika nulles momentu pieņemts slēdža izslēgšanas brīdis.

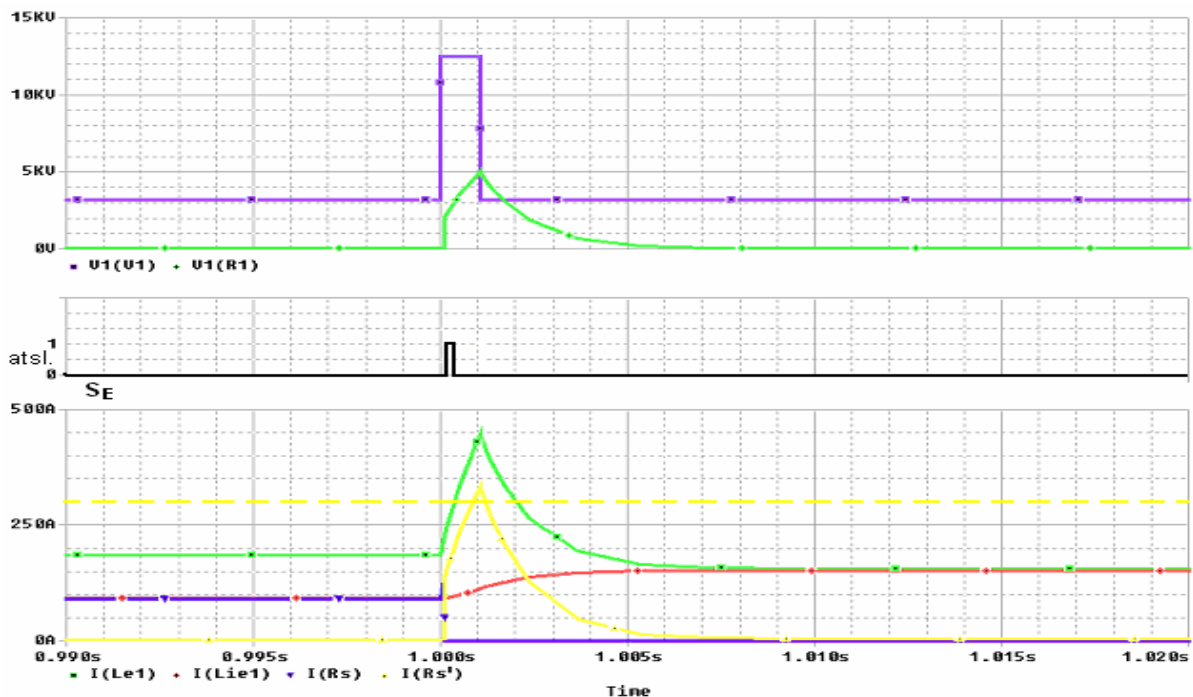
Aizsardzības darbība atmosfēras pārspriegumu laikā.

Līdzsprieguma elektrovilciena motorvagonā pārspriegumu novadītājs ierobežo spēka ķēdes spriegumu ne augstāk par 12,5 kV līmenī. Atmosfēras pārspriegumu impulsi kontakttīklā var būt dažādās formas, enerģijas un ilguma. Dzinēju darba laikā tie impulsi var izraisīt motorvagona aizsardzības automātslēdža atslēgšanos (divu dzinēju grupu kopējas strāvas iestatījumus 595 – 600 A, pašā nostrādes laiks 2,5 ms). Ar tādu automātslēdža ātrdarbību var secināt, ka dzinēju magnētiskā plūsma nepaspēj izmainīties pārsprieguma laikā, tātad lauka vājināšanas mezglā elektroniskās aizsardzības iedarbībai nav īpašas nozīmes.

Tomēr tā nostrādās saskaņā ar pieņemtu funkcionēšanas algoritmu pie $\beta = 0,4$.

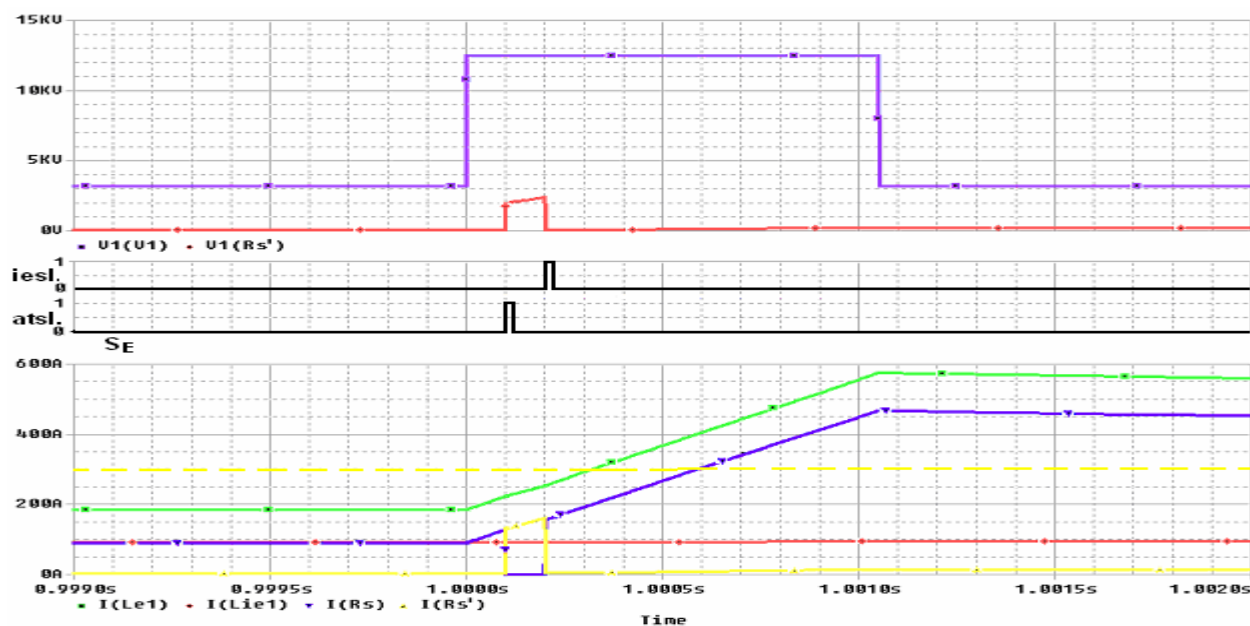
Atmosfēras pārsprieguma robežās: $4,0 < U + \Delta U < 12,5$ kV – atslēdzoties bezkontakta slēdzim SE , spriegums uz tā izvadiem var pārsniegt pieļaujamo vērtību, kas prasīs vai paredzēt papildus varistoru, lavindiodi, vai citu sprieguma ierobežošanas elementu, vai papildināt elektroniskās aizsardzības darbības pašu algoritmu.

5. attēlā paradīti procesa modelēšanā iegūtie grafiki pie dzinēju ķēdē maksimāli iespējama atmosfēras pārsprieguma impulsa. Pie ilguma 1,0 ms tam piemīt ievērojama enerģija (jo pieņemta nemainīgā taisnstūrīgā forma).



5. att. Aizsardzības darbība pie maksimāli iespējama atmosfēras pārsprieguma impulsa

Kā redzams no grafikiem, dzinēju strāvai sasniedzot 300 A (automātslēdža iestatījuma $\frac{1}{2}$ daļa) un pārsniedzot šī vērtību tikai 1,5 ms laikā, automātslēdzis diez vai paspēs izslēgties, bet vājināšanas mezgla elektroniskais slēdzis izslēgsies noteikti (pēc savas aizsardzības darbības algoritma) un iegūs uz saviem izvadiem pārsprieguma impulsu līdz 5000 V. Attiecināti uz iepriekš izvēlēto elektroniskā slēdža tipu (divu virknē slēgto IGBT tranzistoru modulis ar darba spriegumu 1200 V katrā), tāda lieluma, $5000 > 2400$ V, pārspriegumam jābūt ierobežotam ar kādu speciālo elementu, vai tam sasniedzot nozīmēto maksimāli pieļaujamo vērtību (šeit $U_{SE\ max} = 2200$ V) jāveic elektroniskā slēdža atkārtota piespiesta ieslēgšana, kā tas ir parādīts 6. attēlā.



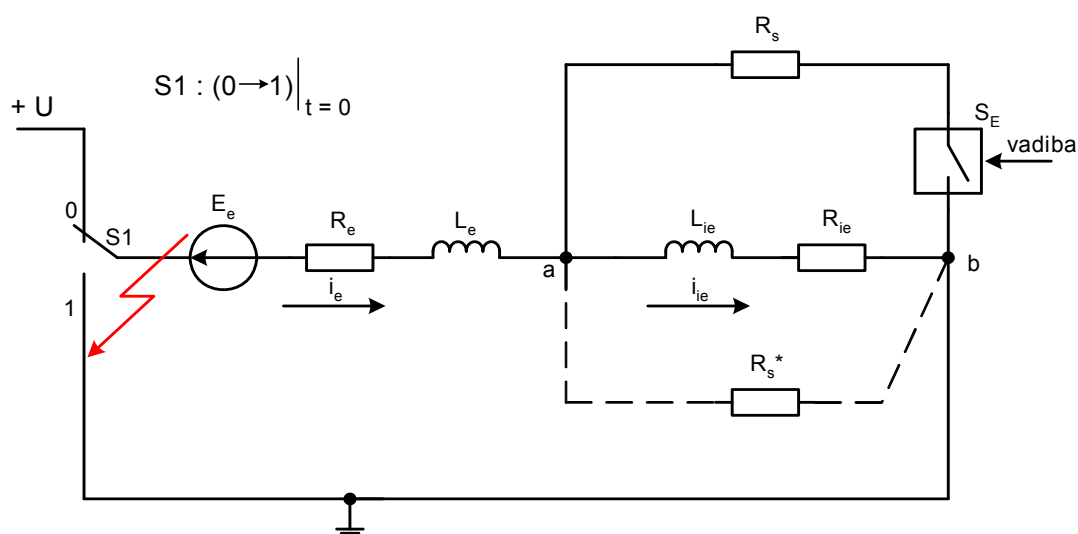
6. att. Aizsardzības darbība ar slēdža atkārtotu piespiesto ieslēgšanu

Par cik atmosfēras pārspriegumiem ir raksturīgi īsa ilguma ($10 - 100 \mu s$) impulsi (viļņa ar lielā stāvuma asāku priekšēju fronti veidā), tad, kā jau bija minēts, lauka vājināšanas mezgla aizsardzības nostrādei nav nepieciešamības. Tamdēļ iedarbības varianti var būt:

- elektroniskā slēdža aizsardzība pret pārspriegumu ar papildelementa palīdzību;
- elektroniskā slēdža piespiesta ieslēgšana, sasniedzot sprieguma pieņemto maksimālo vērtību.

Aizsardzības darbība dzinēju ķēdes īssavienojumā.

7. attēlā parādīta shēma pārejas procesu analīzei, kas notiek vilces dzinēja izolācijas caursītes gadījumā. Kā piemērs caursītes vieta pieņemta punktā ar vislielāko potenciālu pret zemi (t.i. pret mīnusu uz slīdēm), jo citās vietās īssavienojums izraisa mazāka lieluma avārijas strāvas.



7. att. Analizējama shēma īssavienojuma režīmā (enkura un ierosmes tinuma elementi pieņemti apvienoti visai grupai ar diviem vilces dzinējiem)

Tāda veida avārijas režīms ir diezgan raksturīgs dzinējiem elektrovilcienu ekspluatācijā un saistīts ar sukaturētāju kronšteina izolācijas bojājumiem. Īssavienojumā caursītes rezultātā veidojas avārijas strāvu divas ķēdes:

- barošanas kontakttīklā pusē;
- dzinēju ķēdes iekšējā kontūrā enkuru EDS iedarbībā.

Īsslēguma strāva no tīkla puses pietiekami ātri (atkarībā no kontaktlīnijas parametriem strāvas noņemšanas punktā) tiek atslēgta ar aizsardzības automātslēdzi motorvagonā, bet ar dzinējiem izveidota avārijas ķēde nav aizsargāta ar automātslēdzi. Tādēļ ir svarīgi izanalizēt avārijas režīma gaitu un tā īpatnības dažādos apstākļos.

Parastā vilces dzinēju shēmā ar induktīvo šuntu lauka vājināšanas ķēdē līdzīgs avārijas process norimst ierosmes strāvai pārgājot nulles līmeni, t.i. sasniedzot magnētiskās plūsmas $\Phi = 0$ un EDS $E_e = 0$ vērtības. Tad strāvas dzinēju tinumos, sākot no pirmsavārijas vērtībām, pakāpeniski samazinās pārejas procesā (un tāpēc papildus aizsardzības aparāts tieši dzinēju ķēdē, protams, nav nepieciešams).

Aizvietojojam induktīvo šuntu pret praktiski bezinduktīvo parasto rezistoru, pārejas process attīstās savādāk un tam jābūt izskatītam atsevišķi.

Pārejas procesam shēmā, parādītāja 7. attēlā, slēdzim S1 saslēdzoties S1(0→1) pozīcijā, var sastādīt diferenciālvienādojumus pie sākumnosacījumiem: $I_S(0) = I_{ie}(0) = I_e/2$ (aplūkojot avārijas režīmu 50% lauka vājināšanā):

$$\left. \begin{aligned} i_{ie} &= i_s + i_{ie} \\ U_{ab} &= i_{ie} R_{ie} + L_{ie} \frac{di_{ie}}{dt} \\ i_s &= \frac{U_{ab}}{R_s} = i_{ie} \frac{R_{ie}}{R_s} + \frac{L_{ie}}{R_s} \frac{di_{ie}}{dt} \\ i_e &= i_{ie} + i_{ie} \frac{R_{ie}}{R_s} + \frac{L_{ie}}{R_s} \frac{di_{ie}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Visai enkuru ķēdei saskaņā ar 2. Kirhoha likumu:

$$-E_e = R_e (i_{ie} + i_s) + L_e \frac{d}{dt} (i_{ie} + i_s) + U_{ab} \quad (12)$$

Ievietojot izteiksmes no (11):

$$-E_e = i_e R_e + i_{ie} \frac{R_{ie} R_e}{R_s} + L_e \left[\frac{di_{ie}}{dt} \left(1 + \frac{R_{ie}}{R_s}\right) + \frac{L_{ie}}{R_s} \frac{d^2 i_{ie}}{dt^2} \right] + i_{ie} R_{ie} + L_{ie} \frac{di_{ie}}{dt} \left(1 + \frac{R_e}{R_s}\right) \quad (13)$$

$$\frac{L_e L_{ie}}{R_s} \frac{d^2 i_{ie}}{dt^2} + \left[L_e \left(1 + \frac{R_{ie}}{R_s}\right) + L_{ie} \left(1 + \frac{R_e}{R_s}\right) \right] \frac{di_{ie}}{dt} + i_{ie} \left(R_e + R_{ie} + \frac{R_{ie} R_e}{R_s} \right) = -E_e \quad (14)$$

Apskatoties dota pārejas procesa datormodelēšanas rezultātus, iegūtos pie ķēdes parametru reālajiem parametriem un divvirzienu bezkontakta slēdzi, pieņemta nemainīgā enkuru EDS $E_e = \text{const}$ (magnētiskā plūsma $\Phi \approx \text{const}$ apskatāmā īsā laika intervālā) var secināt:

- vispārīgā izteiksmē (14) ierosmes strāvas otrās kārtas $d^2 i_{ie}/dt^2$ atvasinājums izpaužas ļoti maz;
- dzinēju ierosmes strāva šunta mazās pretestības dēļ ($R_S = R_{ie}$) rimst ļoti lēni, kas veicina dzinēju (ka arī slēdža S_E) smagāko avārijas režīmu.

Analizējot izteiksmi (14), vienkāršībai neņemot vērā sprieguma kritumu

$$i_{ie} \left(R_e + R_{ie} + \frac{R_{ie} R_e}{R_s} \right) \ll -E_e \quad (15)$$

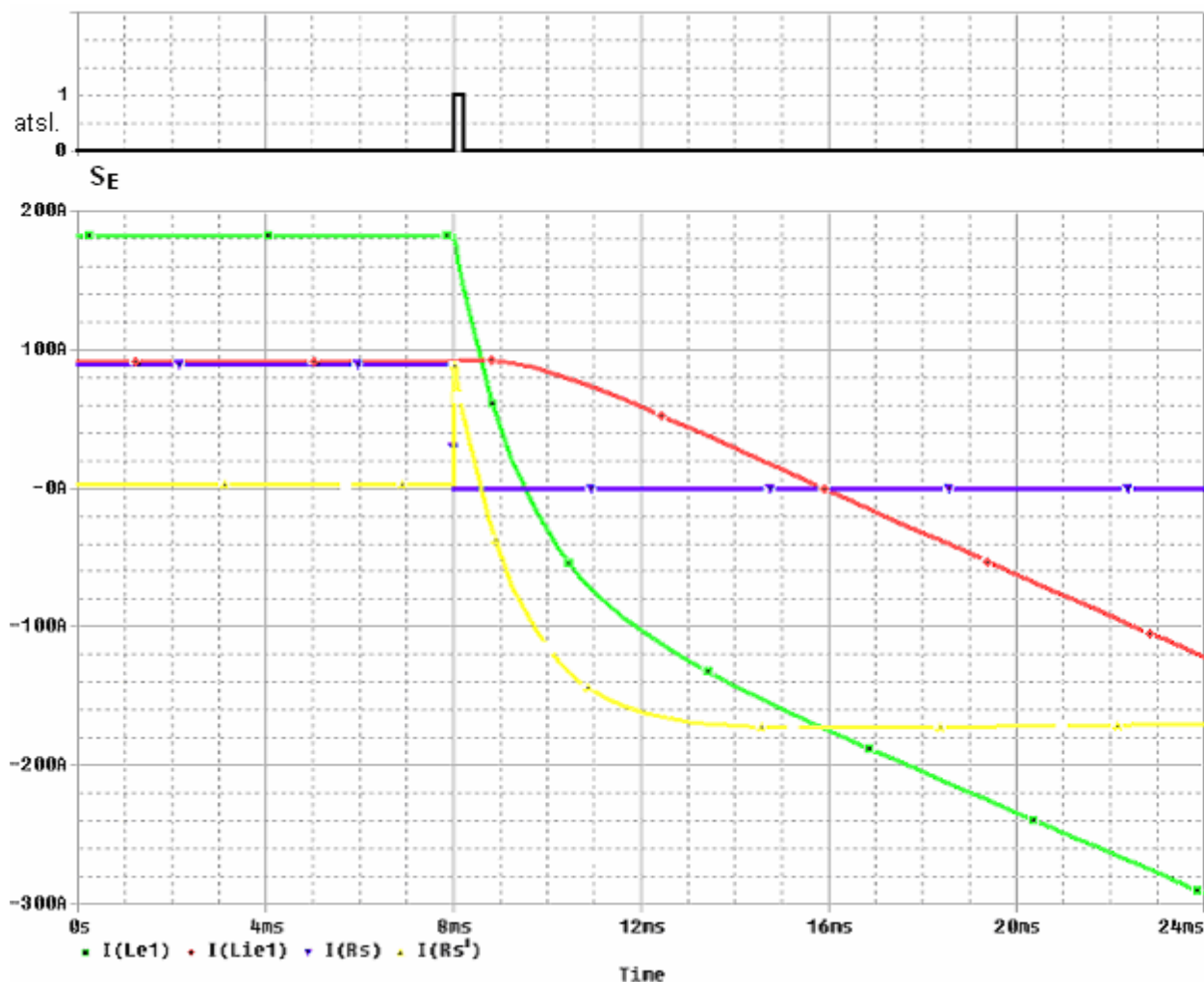
un apzīmējot strāvas i_{ie} atvasinājumu koeficientus, iegūstam:

$$A \frac{d^2 i_{ie}}{dt^2} + B \frac{di_{ie}}{dt} = -E_e = \text{const}, \quad (16)$$

$$\text{kur} \quad A = \frac{L_e L_{ie}}{R_s}; \quad B = L_e \left(1 + \frac{R_{ie}}{R_s}\right) + L_{ie} \left(1 + \frac{R_e}{R_s}\right)$$

Tad ir redzams, ka augot šunta rezistora pretestībai R_S , koeficientu A, B relatīvās izmaiņas ir ļoti atšķirīgas: pēc absolūtas vērtības strāvas i_{ie} otras kārtas negatīvais atvasinājums var pieaugt tik daudz, ka pirmās kārtas atvasinājums kļūst pozitīvs.

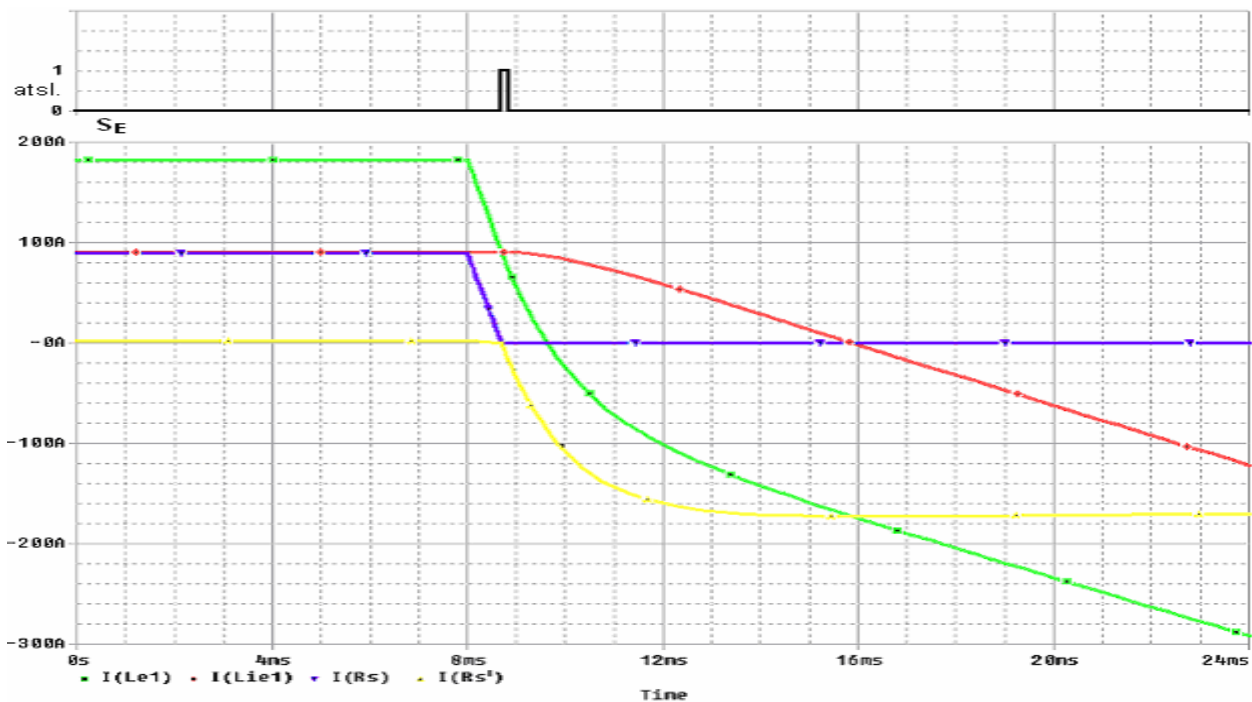
8. attēlā parādīti pārejas procesa aprēķina grafiki, slēdzim S_E izslēdzoties no aizsardzības loģiskā bloka pēc signāla par izolācijas caursiti (praktiski tāds signāls iegūstāms no ātrdarbīga diferenciālreleja motorvagona spēkā shēmā). Tad lauka vājināšanas ķēdē paliek tikai salīdzinoši lielās pretestības rezistors $R_{\check{s}}^* \gg R_{\check{s}}$, kas paredzēts pārspriegumu ierobežošanai pārejas procesā.



8.att. Aizsardzības darbība izolācijas caursites gadījumā (slēdzim S_E izslēdzoties uzreiz pēc signāla par izolācijas caursiti)

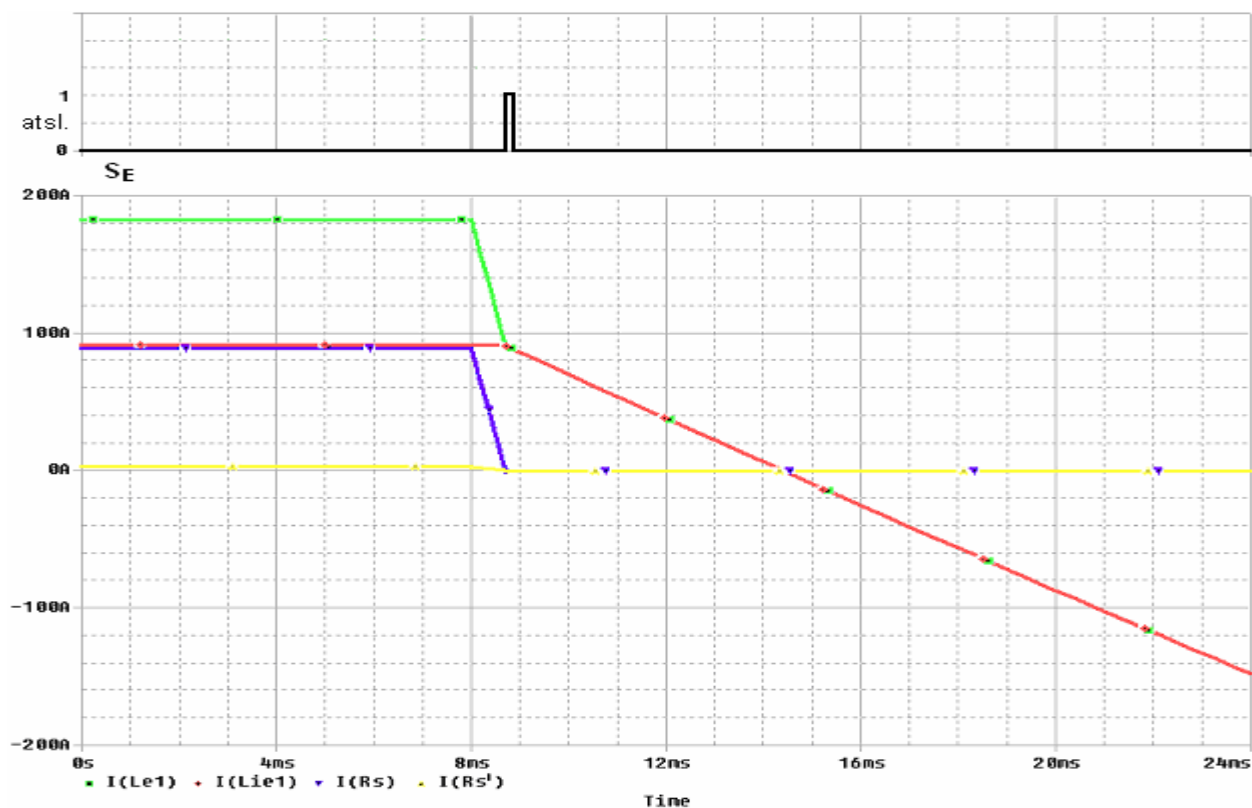
No 8. attēla redzams, ka dotajā gadījumā pēc ierosmes strāvas nelielā pieauguma procesa sākumā ($di_{ie}/dt > 0$ izteiksmē (16)) turpmāk šī strāva, samazinoties diezgan ātri sasniedz nulles līmeni. Tas nozīmē arī enkuru EDS un visā avārijas procesa rimšanu.

Praktiski tik pat ilgā laika intervālā (sk. 9. att.) rimst ierosmes strāva, ja slēdzis S_E tiek izslēgts, šunta zara strāvai i_š pārejot nulles līmeni (slēdzim kļūstot, būtībā, ar vienu strāvas virzienu, kas praktiski sasniedzams ar ieslēgtas virknē diodes palīdzību). Šajā gadījumā nav nepieciešams no diferenciālreleja spēkā ķēdē signāls par izolācijas caursiti.



9. att. Aizsardzības darbība izolācijas caursītes gadījumā (slēdzim SE izslēdzoties strāvai i_{ξ} pārejot nulles līmeni)

Vēl efektīvāk tiek lokalizēts avārijas režīms, ja papildrezistors R_{ξ}^* arī tiek pieslēgts caur jau minēto diodi VD. Tādam pieslēgumam atbilstoša pārejas procesa grafiki parādīti 10. attēlā, kur redzams, ka ierosmes strāva rimst līdz nullei par 1,5 ms (18,7 %) agrāk, nekā iepriekšējo variantu gadījumos.



10. att. Aizsardzības darbība izolācijas caursītes gadījumā (R_{ξ}^* pieslēgts caur diodi)

Literatūra

1. Greivulis J., Raņķis I. Iekārtu vadības elektroniskie elementi un mezgli. – Rīga: Avots, 1998.-288 lpp.
2. Raņķis I. Energoelektronika. – RTU, 2002.-142 lpp.
3. Рубчинский З., Тастевен Е., Лынюк Л., Эглон Е. Устройство и работа моторвагонного подвижного состава. - Москва: Транспорт, 1969.-352 с.
4. Тихменев Б., Трахтман Л. Подвижной состав электрических железных дорог. Теория работы оборудования. - Москва: Транспорт, 1969.-417 с.

Vladimirs Cimanis, mag. sc.ing
Riga Technical University
Address: Kronvalda bulv. 1, LV 1010 Riga, Latvia
Phone: +371 29679741
E – Mail: vlad_cms@inbox.lv

Vladimirs Hramcovs, Assoc.prof., Dr. ing. sc.
Riga Technical University, Institute of Industrial Electronics and Electrical Drives
Address: Meza str. 1, LV 1048 Riga, Latvia
Phone +371 7089503
E – Mail: vladimirs.hramcovs@rtu.lv

Cīmanis V., Hramcovs V. Vilces līdzstrāvas dzinēja lauka vājināšanas režīmu datormodelēšanas izpēte.
Izpētīti elektrovilciena vilces dzinēju režīmi, aprīkojot ierosmes tinumus šuntējošo ķēdi ar bezkontakta ātrdarbīgo komutācijas elementu.
Izmantojot datormodelēšanu, iegūti pārejas procesu aprēķinu rezultāti vilciena ieskrējiena laikā kontakttīklā spriegumu uzmetienu apstākļos, kā arī dzinēju enkuru ķēdē izolācijas caursītes gadījumā.
Rezultāti atspoguļo elektroniskā aizsardzības mezgla darbību, pamatojoties uz strāvu devēju signāliem, atbilstoši pieņemtam algoritmam.

Cīmanis V., Hramcovs V. Study of Field Weakening Traction Direct-Current Engine with the Help of the Computer simulation.

Analyzed traction engine modes of electric train, equipping it exiting coils of shunting electrical circuit with non-contact high-speed commutation element.
By means of computer modeling the results of transient process are obtained in circumstances of contact network voltage rise while electric train is accelerating, as well as in case of engine keeper's circuit insulation fault.
The results reflect the performance of the electronic protective knot on the basis of current sensors signals, according to the algorithm used.

Циманис В., Храмцов В. Исследование ослабления поля тягового двигателя постоянного тока с помощью компьютерного моделирования.

Исследованы режимы тяговых двигателей электропоезда, оснащённых быстродействующим бесконтактным коммутирующим элементом в цепи шунтирования обмоток возбуждения.
Используя компьютерное моделирование, получены результаты расчётов переходных процессов при разгоне электропоезда в условиях набросов напряжения в питающей контактной сети, а также в случае пробоя изоляции в якорной цепи двигателей.
Полученные результаты отображают работу электронного защитного узла на основе сигналов датчиков тока в соответствии с принятым алгоритмом.