

Шифр «Електрична стійкість»

ЕЛЕКТРИЧНА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ НА ЗАГАЛЬНИЙ ГАЛЬМІВНИЙ
ОПІР ДВОХ ТЯГОВИХ МАШИН ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

ХАРКІВ – 2021 р.

РЕФЕРАТ

Актуальність роботи. Аварії, пов'язані з порушенням стійкості паралельної роботи у електричних системах, є важкими, які ведуть за собою розлад електропостачання великих районів та міст. Проблема стійкості наклала великий відбиток на схеми комутації, режими роботи та параметри устаткування й автоматики електричних систем. На стійку паралельну роботу станцій безпосередній вплив мають перехідні процеси в вузлах навантаження. Під час перехідних процесів при пусках, самозапусках двигунів, різких коливаннях на валу напруга може змінюватися за величиною і фазою вище розумних меж. Нерідко це може мати значний вплив на режим роботи системи електропостачання загалом. Тому, при проектуванні та експлуатації електроенергетичних установок постає питання про режими роботи вузлів навантажень і питанню стійкості електричних систем, має приділятися багато уваги.

Мета роботи і задачі дослідження: перевірка стійкості системи і визначення якості перехідного процесу при заданих параметрах системи;

Загальна характеристика наукової роботи: робота складається із вступу, 5 розділів і висновків. Загальний обсяг роботи становить 23 сторінки і список використаних джерел на 1 сторінці.

ЕЛЕКТРИЧНА СТІЙКІСТЬ, РЕОСТАТНЕ ГАЛЬМУВАННЯ, МАГНІТНИЙ ПОТІК, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, ПЕРЕХРЕСНА СХЕМА, РЕКУПЕРАТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ, НЕ ПЕРЕХРЕСНА СХЕМА.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. Аналіз стійкості автоматичних систем при реостатному гальмуванні.....	4
2. Аналіз стійкості роботи двох тягових машин в режимі реостатного гальмування при не перехресній схемі їхнього включення.....	12
3. Аналіз стійкості роботи двох тягових машин в режимі реостатного гальмування при перехресній схемі їх включення.....	14
4. Аналіз стійкості роботи двох тягових машин в режимі реостатного гальмування при перехресній схемі їх включення і регулюванні магнітного потоку однієї з машин.....	17
5. Визначення умови стійкості усталених режимів роботи.....	20
ВИСНОВКИ.....	22
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	23

ВСТУП

Система електричного гальмування повинна відповідати таким основним вимогам: мати електричну стійкість при всіх можливих експлуатаційних режимах і високу експлуатаційну надійність та стійкість по комутаційним, тепловим і ізоляційним властивостям тягових машин, володіти простотою та зручністю управління для водія; забезпечувати рівномірний розподіл струму між паралельно включеними ланцюгами тягових генераторів при розходженні їх характеристик, мати плавну і швидку появу гальмівної сили при установці контролера управління в гальмівне положення, необхідні гальмівні характеристики без перевищення допустимих меж для апаратів і обладнання.

1. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ ПРИ РЕОСТАТНОМУ ГАЛЬМУВАННІ

Електрична стійкість є одним з найважливіших експлуатаційних вимог до роботи тягових електричних машин на ЕПС. Умовно розрізняють зовнішню і внутрішню електричну стійкість роботи системи електричних машин. Під зовнішньою електричною стійкістю розуміють властивість системи відновлювати стійку електричну рівновагу по завершенню перехідних процесів, викликаних зовнішніми причинами по відношенню до тягових електричних машин: коливаннями напруги живильної мережі, порушенням зчеплення коліс з рейками, роботою регулюючих пристроїв і т.п.

Під внутрішньою електричною стійкістю розуміють властивість системи відновлювати стійку електричну рівновагу при нерівномірному розподілі струмів між паралельно працюючими тяговими машинами, спричиненої різними причинами: відмінністю діаметрів бандажів колісних пар, опорів паралельних ланцюгів системи, магнітних характеристик і струмів збудження машин і т.п. Тому поняття внутрішньої електричної стійкості відноситься тільки до систем, що мають два або більше паралельних ланцюга.

Вихідними даними для перевірки зовнішньої електричної стійкості простих систем, що складаються з одного контуру, служать зовнішні характеристики машин, що знаходяться в цьому контурі, і характеристики залежності напруги зовнішньої системи від струму в контурі. Струми перетину цих характеристик задовольняють умові електричної рівноваги при сталому режимі.

Завдання перевірки електричної стійкості вирішується по різному. Зазвичай її зводять до знаходження точок електричного рівноваги графічним методом та до перевірки стійкості цієї рівноваги для відповідних їм режимів.

Для цього передбачають виникнення в системі з якоїсь причини перехідного процесу, що супроводжується відхиленням струму від сталого значення.

Наприклад, можна уявити, що відхилення струму від первісного сталого значення сталося через короткочасного зміни зовнішньої напруги. Якщо при поверненні напруги до первісного сталого значення струм теж повертається до свого початкового сталого значення, то електрична рівновага в розглянутій точці стійка, а система в розглянутому режимі володіє зовнішньої електричної стійкістю.

Для відповіді на питання: чи повернеться струм до свого початкового сталого значення при зазначених умовах, потрібно розглянути всі ЕРС, що діють і виникають в контурі при перехідному процесі. Ці ЕРС і визначають знак похідної струму за часом, а отже, і характер (знак) його можливої зміни. Розрахункову перевірку зовнішньої електричної стійкості простих систем ведуть в наступному порядку. Спочатку вибирають швидкість руху, прийняту за постійну. Таке допущення не спотворює результатів розрахунку, так як практично за час електричного перехідного процесу швидкість поїзда, що володіє відносно великою механічною інерцією, не встигає помітно зміниться. При вибраній швидкості розраховують і будують в масштабі зовнішню характеристику машини $U_k(I)$, обчислену за внутрішньою характеристикою машини - залежністю ЕРС від струму $E(I)$.

Рівняння зовнішньої характеристики машини або групи послідовно з'єднаних машин має вигляд:

$$n_c U_k = n_c C \Phi V \pm n_c r I = n_c E \pm n_c r I \quad (1.1)$$

де n_c - число послідовно включених машин; r - опір однієї машини; знак «плюс» відноситься до режиму двигуна роботи машин, знак «мінус» - до генераторного.

Величину $C\Phi$, пропорційну магнітному потоку, беруть в залежності від струму по навантажувальним характеристикам машини, а за їх відсутності

характеристику СФ (I) для машин послідовного збудження розраховують по швидкісній характеристиці режиму двигуна.

$$C\Phi = \frac{U_D - rI}{v_D} \quad (1.2)$$

Залежність $U_c(I)$ напруги зовнішньої системи від струму в контурі наноситься в тих же осях координат, як і зовнішні характеристики машин. Для тягових машин, які живляться від контактної мережі постійного струму, умовно вважають, що напруга на їхніх затискачах не залежить від струму в системі. При живленні тягових машин від перетворювальної установки залежність $U_c(I)$ являє зовнішню характеристику перетворювальної установки.

Точки перетину зовнішньої характеристики машин і залежності зовнішньої напруги від струму - точки електричної рівноваги. Стійкість електричної рівноваги в цих точках визначається з розгляду всіх ЕРС, що діють в контурі при переходом процесі.

Для перевірки електричної стійкості складних систем звичайно використовують методи аналізу диференціальних рівнянь перехідних процесів в контурах системи. Ці рівняння мають враховувати вплив на перехідний процес взаємних зв'язків між контурами системи. Така методика не вимагає графічного побудови характеристик. Вона дозволяє не тільки відповісти на питання, чи володіє система стійкістю при розглянутому режимі роботи, але і виявити умови, при яких система має зовнішню електричну стійкість [3].

Диференціальні рівняння процесів в контурах системи з урахуванням їх взаємних зв'язків складають систему рівнянь, рішення якої відносно струму дає диференціальне рівняння вищого порядку, що визначається числом контурів системи.

В загальному випадку це диференціальне рівняння має вигляд:

$$a_0 \frac{d^n I}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} I}{dt^{n-1}} + \dots + a_n I = C \quad (1.3)$$

де n - порядок похідної, $a_0, a_1, \dots, a_n, C$ - постійні коефіцієнти.

Загальне рішення такого рівняння:

$$I = I_0 + A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t} + \dots + A_n e^{P_n t} \quad (1.4)$$

де I_0 - усталене значення струму при $t \rightarrow \infty$.

Система має зовнішньої стійкістю, коли в ній відновлюється електрична рівновага, порушена якимись причинами. Це означає, що в стійкій системі при перехідному процесі струм прагне до якого-небудь сталого значення, але не до безкінечності, якщо час прямує до нескінченності. Система не володіє зовнішньої стійкістю, якщо при часі, що прагне до нескінченності, струм також прагне до нескінченності.

З розгляду рівняння (7) видно, що система має зовнішню електричну стійкість якщо при $t \rightarrow \infty$, $I \rightarrow I_0$, де I_0 , - нове усталене значення струму. Це можливо тільки коли змінні складові правої частини рішення диференціального рівняння (6) прагнуть до нуля при $t \rightarrow \infty$, $e^{P_1 t} \rightarrow 0$, $e^{P_2 t} \rightarrow 0, \dots, e^{P_n t} \rightarrow 0$.

Ця умова виконується, коли речові частини коренів рівняння негативні, тому що при $t \rightarrow \infty$ $e^{-Pt} = \frac{1}{e^{Pt}} \rightarrow 0$.

Корні диференціального рівняння знаходять з характеристичного рівняння, яке в загальному випадку має вигляд

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (1.5)$$

Аналіз коренів характеристичного рівняння другого порядку показує, що система другого порядку електрично стійка, якщо коефіцієнти рівняння a_0, a_1 і a_2 мають однакові знаки. Для рівнянь більш високого порядку повинні дотримуватися більш складні співвідношення між постійними коефіцієнтами характеристичних рівнянь. Ці співвідношення, представлені у вигляді нерівностей, називають алгебраїчними критеріями стійкості системи або критеріями Гурвіца.

Цей метод дозволяє не тільки відповісти на питання, чи володіє система в даних умовах зовнішньої електричної стійкістю, але і визначити її граничні умови. Якщо позитивний знак дійсної частини хоча б одного з коренів характеристичного рівняння, система нестійка. Граничні умови можна виявити, прирівнюючи коріння характеристичного рівняння до нуля.

Внутрішня електрична стійкість окремих найпростіших систем перевіряється аналізом внутрішніх і зовнішніх характеристик паралельно включених машин. При цьому зовнішня характеристика машин однієї з паралельних ланцюгів розглядається як зовнішня характеристика системи іншого паралельної ланцюга.

У більшості практичних випадків перевірка внутрішньої електричної стійкості системи вимагає складання і дослідження диференціальних рівнянь, як і при перевірці зовнішньої електричної стійкості складних систем.

При реостатному гальмуванні двох тягових двигунів послідовного збудження, що працюють в тяговому режимі паралельно, доцільно залишити схему їх з'єднання без зміни, так як при реостатному гальмуванні підвищується в 1,5-2 рази напруга на кожному з двигунів і послідовне з'єднання двигунів привело б до збільшення напруги в 3-4 рази по відношенню до номінального. Це викликало б необхідність ускладнення апаратури управління і призвело б до збільшення загального опору гальмівного реостата, пропорційного підвищення напруги.

Однак при паралельному з'єднанні двигунів послідовного збудження доводиться приймати спеціальні заходи для забезпечення їх сталої роботи та рівномірного розподілу навантаження між ними [1].

Найкраще розподіл навантажень між тяговими машинами та їх стійку роботу забезпечує так звана перехресна схема, в якій обмотка збудження другого двигуна з'єднана послідовно з якорем першого, а його обмотка збудження - послідовно з якорем другого двигуна. Зростання струму в обмотці якоря

будь-який з цих машин викликає збільшення магнітного потоку і ЕРС іншої машини, що забезпечує стійку роботу і хороший розподіл навантажень.

У схемі з діагональним включенням гальмівного резистора R_T , зображеної на рис.3, не потрібно реверсувати обмотки збудження при переході з тягового на гальмівний режим. Для переводу на гальмівний режим достатньо відключити тягові машини від мережі живлення і приєднати до точок а і б гальмівний резистор R_T , через який піде сумарний струм $I_T = I_1 + I_2$.

Однією з істотних переваг електричної тяги є можливість застосування електричного гальмування, заснованого на використанні оборотності електричних машин: кожен електричний двигун може працювати в якості генератора і навпаки. Властивість оборотності є найважливішою перевагою електричних машин перед іншими перетворювачами енергії. Гальмівна сила електричного гальмування має ту ж природу, що і сила тяги, але спрямована в бік, протилежний руху поїзда. Різниця в абсолютних значеннях сил тяги та електричного гальмування обумовлено лише різним впливом механічних і магнітних втрат в двигуні і втрат у передачі. У той час як при тяговому режимі ці втрати викликають зниження сили тяги в порівнянні з електромагнітною на величину $\Delta F_k = 3,6(\Delta P_m + \Delta P_{mx} + \Delta P_z)/V$, при генераторному режимі вони збільшують на таку ж величину гальмівну силу і сприяють гальмуванню поїзда. Тому гальмівна сила B_k , яка розвивається однією тяговою машиною при будь-якій системі електричного гальмування, Н,

$$B_k = B_{зм} + \Delta B_k = 3,6 \frac{P_{зм}}{V} + \Delta B_k = 3,6 \cdot C\Phi I + 3,6 \frac{\Delta P_m + \Delta P_{mx} + \Delta P_z}{V} \quad (1.6)$$

а гальмівна сила поїзда при n_d двигунах, Н,

$$B = n_d B_k = n_d (3,6 \cdot C\Phi I + \Delta B_k) \quad (1.7)$$

де ΔB_{κ} - збільшення гальмівної сили, викликане магнітними і механічними втратами в двигуні і передачі, яке визначається формулою, аналогічною формулі для визначення втрати сили тяги, Н:

$$\Delta B_{\kappa} = 3,6 \frac{\Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\text{ак}} + \Delta P_{\text{э}}}{v} \quad (1.8)$$

Форма гальмівної характеристики В (V) залежить від системи електричного гальмування. На відміну від механічного гальмування тут відповідним вибором схеми включення тягових машин і параметрів цих схем можна отримати характеристики бажаної форми: жорсткі - для обмеження швидкості на спусках або м'які - для зупинки поїзда, коли потрібно підтримувати мало що змінюється гальмівну силу в широкому діапазоні швидкостей.

Застосування електричного гальмування дає змогу одержувати економію витрат енергії на рух потяга (в випадку використання рекуперативного гальмування) і підвищує надійність та безпеку експлуатації РС з наступних причин:

- 1) при русі на ухилі електричне гальмування має механічно стійку характеристику, при якій будь-яке довільне підвищення швидкості супроводжується збільшенням гальмового зусилля, що не властиво механічному гальмуванню;
- 2) гальмування на затяжних ухилах не супроводжується досить небезпечним в експлуатації нагріванням гальмівних колодок і бандажів, що має місце при механічному гальмуванні;
- 3) імовірність заклинювання коліс при юзі у випадку електричного гальмування значно менше, ніж при механічному;
- 4) на ЕРС з'являється другий вид гальма, оскільки механічне гальмування зберігається у вигляді додаткових поїзних або резервних гальм.

Основний недолік електричного гальмування полягає в тому, що дія його поширюється тільки на колеса, зв'язані з тяговими двигунами; це значно обмежує максимально можливу гальмівну силу [4].. Недоліком електричного

гальмування є також необхідність збільшення потужності тягових двигунів, які повинні працювати не тільки в тяговому, але й гальмівному режимі, а також ускладнення пристроїв керування ЕРС.

При двигунах послідовного збудження для здійснення рекуперативного гальмування необхідні спеціальні збуджувальні агрегати, а для реостатного гальмування - збільшення потужності пускових реостатів.

Найбільшого поширення набуло реостатне гальмування. На ЕПС з ТЕД змішаного збудження застосовують обидва види електричного гальмування - рекуперативне і реостатне. Рекуперативне гальмування використовують головним чином як засіб зниження швидкості і для пригальмовування на спусках; управління рекуперативним гальмуванням при цьому здійснюється переміщенням валу контролера управління з позицій високої на позиції низькій швидкості. При гальмуванні до зупинки зазвичай використовують тільки реостатне гальмування.

2. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ РОБОТИ ДВОХ ТЯГОВИХ МАШИН ПРИ НЕ ПЕРЕХРЕСНІЙ СХЕМІ ЇХНЬОГО ВКЛЮЧЕННЯ

Рішення перехідних процесів для контурів струму не перехресної схеми [1].

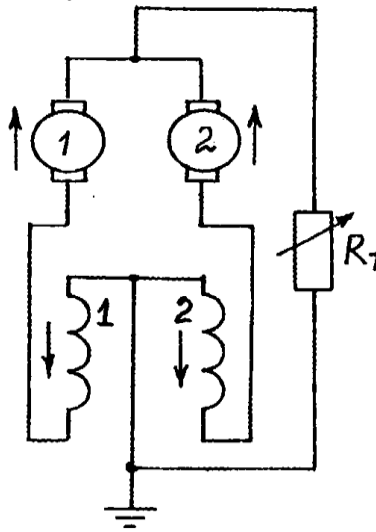


Рисунок 1- Не перехресна схема реостатного гальмування двох паралельно ввімкнених двигунів

$$C_e n \phi_1 - r I_1 - R_T (I_1 + I_2) - L \frac{dI_1}{dt} = 0 \quad (2.1)$$

$$C_e n \phi_2 - r I_2 - R_T (I_1 + I_2) - L \frac{dI_2}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

Відповідно до прийнятого допущення вводимо лінійну залежність магнітного потоку від струму:

$$C_e \phi_1 = C_e \phi_0 + K I_1 \quad (2.3)$$

$$C_e \phi_2 = C_e \phi_0 + K I_2 \quad (2.4)$$

Підставляючи ці вирази до рівняння (9) (10), отримуємо:

$$L \frac{dI_1}{dt} + (R_T + r - K n) I_1 + R_T I_2 = C_e n \phi_0 \quad (2.5)$$

$$L \frac{dI_2}{dt} + (R_T + r - Kn)I_2 + R_T I_1 = C_e n \phi_0 \quad (2.6)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (2.1), (2.2) щодо струму I_1 отримуємо:

$$\frac{d^2 I_1}{dt^2} + \frac{2\alpha(R_T + r - Kn)}{\alpha^2} \frac{dI_1}{dt} + \frac{(R_T + r - Kn)^2 - R_T^2}{\alpha^2} I_1 = C \quad (2.7)$$

Характеристичне рівняння

$$P^2 + 2 \frac{R_T + r - Kn}{L} P + \frac{(R_T + r - Kn)^2 - R_T^2}{L^2} = 0 \quad (2.8)$$

Корені характеристичного рівняння

$$P_1 = \frac{r - Kn}{L}, \quad P_2 = -\frac{2R_T + r - Kn}{L} \quad (2.9)$$

Система має внутрішню електричну стійкість тільки тому випадку, коли всі корені характеристичного рівняння негативні, тобто коли $r > Kn$.

Помножимо праву й ліву частини написаної нерівності на збільшення струму ΔI_1 , тоді $\Delta I_1 r > Kn \Delta I_1$.

Отже, граничною умовою електричної стійкості системи є рівність збільшення спадання напруги на обмотках машини збільшенню її ЕРС. Це можливо тільки при $R_T = 0$, коли машина працює не в режимі реостатного гальмування, а в режимі короткого замикання. Таким чином, розглянута схема вмикання машин не має внутрішньої електричної стійкості у режимі реостатного гальмування.

3. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ РОБОТИ ДВОХ ТЯГОВИХ МАШИН ПРИ ПЕРЕХРЕСНІЙ СХЕМІ ЇХНЬОГО ВКЛЮЧЕННЯ

Для відповіді на питання, чи володіє дана схема з'єднання тягових машин в заданих умовах роботи внутрішньою електричною стійкістю, а також для визначення граничних умов і виявлення можливості виникнення незатухаючих коливальних процесів, необхідно провести аналіз диференціальних рівнянь перехідних процесів в контурах розглянутої схеми [6].

Запишемо рівняння перехідних процесів для контурів схеми, зображеної на рис. 2 (контакт К розімкнений і $I_4 = I_1$), вважаючи однаковими опор і індуктивність якірних ланцюгів обох машин.

$$r_1 = r_2 = r; L_1 = L_2 = L; r_1 = r_{я1} + r_{б1}; r_2 = r_{я2} + r_{б2}; L_1 = L_{я1} + L_{б1}; L_2 = L_{я2} + L_{б2})$$

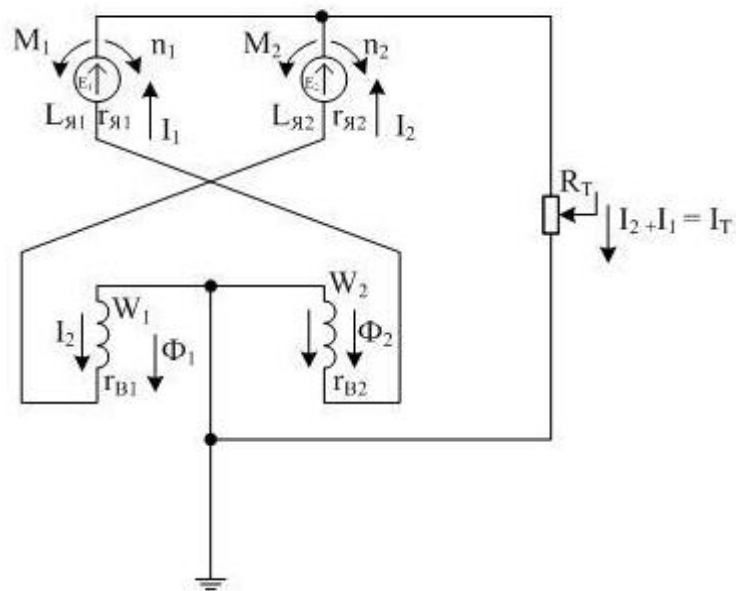


Рисунок 2 - Перехресна схема реостатного гальмування двох тягових двигунів

$$C_e n_1 \Phi_1 - I_1 r - I_T R_T - L \frac{dI_1}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

$$C_e n_2 2 - 2r - I_T R_T - L \frac{dI_2}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

Припустимо, що до початку перехідного процесу усталені значення частот обертання, струмів і магнітних потоків першої та другої машини однакові:

$$n_1 = n_2 = n; I_{01} = I_{02} = I; C_e \Phi_{01} = C_e \Phi_{02} = C_e \Phi_0 \quad (3.3)$$

З урахуванням перехресного включення обмоток збудження вводимо лінійну залежність магнітного потоку від струму:

$$C_e \Phi_1 = C_e \Phi_0 + K I_2; C_e \Phi_2 = C_e \Phi_0 + K I_1 \quad (3.4)$$

З урахуванням рівнянь (3.4) і (3.5) рівняння (3.1) і (3.2) приймають вид:

$$L \frac{dI_1}{dt} + (r + R_T) I_1 + (R_T - K n) I_2 = C_e n \Phi_0 \quad (3.5)$$

$$L \frac{dI_2}{dt} + (r + R_T) 2 + (R_T - K n) I_1 = C_e n \Phi_0 \quad (3.6)$$

Вирішуючи спільно рівняння (22) і (23) щодо струму I_1 , отримуємо:

$$\frac{d^2 I_1}{dt^2} + 2 \frac{R_T + r}{L} \frac{dI_1}{dt} + \frac{(R_T + r)^2 - (R_T - K n)^2}{L^2} I_1 = C \quad (3.7)$$

Характеристичне рівняння диференціального рівняння має вигляд:

$$p^2 + 2 \frac{R_T + r}{L} p + \frac{(R_T + r)^2 - (R_T - K n)^2}{L^2} = 0 \quad (3.8)$$

Коріння характеристичного рівняння:

$$p_{1,2} = -\frac{R_T + r}{L} \pm \sqrt{\frac{(R_T - K n)^2}{L^2}} \quad (3.9)$$

Якщо $R_T = K n$, то $p_1 = p_2 = -(R_T + r)/L$.

Якщо $K n > R_T$ або $R_T > K n$, то $p_1 = -(r + K n)/L$ і $p_2 = -(2R_T + r - K n)/L$.

Загальною ознакою стійкості системи служать негативні значення реальних частин коренів характеристичного рівняння. Отже, умова внутрішньої

електричної стійкості даної системи може бути представлено у вигляді нерівності:

$$(2R_T + r) \geq Kn \quad (3.10)$$

Помножимо праву і ліву частини нерівності (3.10) на прирощення струму ΔI_1 , тоді отримаємо:

$$\Delta I_1 (2R_T + r) \geq \Delta I_1 Kn \quad (3.11)$$

Висновок: співвідношення (28) збільшень падіння напруги на гальмівному опорі і на затискачах машини виконується, тому розглянута система реостатного гальмування володіє внутрішньою електричною стійкістю.

4. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ РОБОТИ ДВОХ ТЯГОВИХ МАШИН ПРИ НЕ ПЕРЕХРЕСНІЙ СХЕМІ ЇХНЬОГО ВКЛЮЧЕННЯ І РЕГУЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ОДНІЄЇ З МАШИН

Визначимо умови внутрішньої електричної стійкості перехресної схеми з діагональним включенням гальмівного резистора в разі шунтування однієї обмотки збудження резистором $R_{ш}$. (Рис.2, контакт К включений). Рівняння перехідних процесів для трьох незалежних контурів цієї схеми, приймаючи, що контурних струмами являються струми I_1, I_2 і $I_{ш} = I_3$, мають вигляд:

$$C_e n_1 \Phi_1 - r I_1 - L \frac{dI_1}{dt} - R_T (I_1 + I_2) + r_B I_3 + L_B \frac{dI_3}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

$$C_e n_2 \Phi_2 - r I_2 - L \frac{dI_2}{dt} - R_T (I_1 + I_2) = 0 \quad (4.2)$$

$$I_3 (r_B + R_{ш}) + L \frac{dI_3}{dt} - r_B I_1 + L_B \frac{dI_1}{dt} = 0 \quad (4.3)$$

де r_B і L_B - опір і індуктивність обмотки збудження.

Вводимо лінійну залежність магнітного потоку машини від струму.

$$C_e \Phi_1 = C_e \Phi_{01} + K_1 I_2; C_e \Phi_2 = C_e \Phi_{02} + \alpha K_2 I_1 \quad (4.4)$$

де $\alpha = R_{ш} / (r_B + R_{ш})$ - коефіцієнт регулювання збудження.

Вважаємо, що до початку перехідного процесу, обумовленого включенням $R_{ш}$, мають місце співвідношення:

$$n_1 = n_2 = n; C_e \Phi_{01} = C_e \Phi_{02} = C_e \Phi_0 \quad (4.5)$$

Після підстановки (4.4) і (4.5) в рівняння (4.1) і (4.2) і проведення перетворень отримуємо систему лінійних однорідних диференціальних рівнянь.

$$\frac{dI_1}{dt} = - \frac{r + R_T - r_B}{L - L_B} I_1 + \frac{K_1 n - R_T}{L - L_B} I_2 - \frac{R_{ш}}{L - L_B} I_3 \quad (4.6)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{\alpha K_2 n - R_T}{L} I_1 + \frac{r + R_T}{L} I_2 \quad (4.7)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{r_B L - L_B(r + R_T)}{(L - L_B)L_B} I_1 + \frac{K_1 n - R_T}{L - L_B} I_2 - \frac{(r_B + R_{in})L - r_B L_B}{L - L_B} I_3 \quad (4.8)$$

Вводимо позначення:

$$a_{11} = -\frac{r + R_T - r_B}{L - L_B}, a_{12} = \frac{K_1 n - R_T}{L - L_B}, a_{13} = \frac{R_{in}}{L - L_B},$$

$$a_{21} = \frac{\alpha K_2 n - R_T}{L}, a_{22} = \frac{r + R_T}{L}, a_{23} = 0,$$

$$a_{31} = \frac{r_B L - L_B(r + R_T)}{(L - L_B)L_B}, a_{32} = \frac{K_1 n - R_T}{L - L_B}, a_{33} = \frac{(r_B + R_{in})L - r_B L_B}{L - L_B}.$$

Тоді система рівнянь (4.6) - (4.8) отримує вигляд:

$$\frac{dI_1}{dt} = a_{11}I_1 + a_{12}I_2 + a_{13}I_3$$

$$\frac{dI_2}{dt} = a_{21}I_1 + a_{22}I_2 + a_{23}I_3 \quad (4.9)$$

$$\frac{dI_3}{dt} = a_{31}I_1 + a_{32}I_2 + a_{33}I_3$$

Характеристичне рівняння системи рівнянь (4.9)

$$\begin{bmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - \lambda \end{bmatrix} = 0$$

Або в розгорнутому вигляді.

$$\lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0 \quad (4.10)$$

де $a_1 = -(a_{11} + a_{22} + a_{33})$;

$$a_2 = a_{11} a_{22} + a_{11} a_{33} + a_{22} a_{33} - a_{12} a_{21} - a_{13} a_{31};$$

$$a_3 = a_{12} a_{21} a_{33} + a_{13} a_{22} a_{31} + a_{11} a_{22} a_{33} - a_{13} a_{21} a_{32}.$$

Для полінома:

$$P_3(\lambda) = \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3$$

Складаємо матрицю Гурвіца [3]

$$M = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Для того, щоб поліном $P_3(\lambda)$ був поліномом Гурвіца, у якого дійсні частини всіх його коренів негативні, необхідно і достатньо, щоб всі головні діагональні мінори його матриці (39) були позитивними, тобто

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \Delta_2 = \begin{bmatrix} a_1 & 1 \\ a_3 & a_2 \end{bmatrix} = a_1 a_2 - a_3 > 0, \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0.$$

Висновок: дослідження показали, що умовами позитивності величин $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$, а отже, умовами внутрішньої електричної стійкості системи,

представленої на рис.2, є нерівності

$$nR_T(K_1 + \alpha K_2) > (R_T^2 + \alpha K_1 K_2 n^2),$$

$$r_B L > (r + R_T) L_B.$$

5. ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧОК СТІЙКИХ СТАЛИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Визначимо точки електричної стійкості роботи на загальний гальмівний опір двох тягових машин при регулюванні магнітного потоку однієї машини (рис.3).

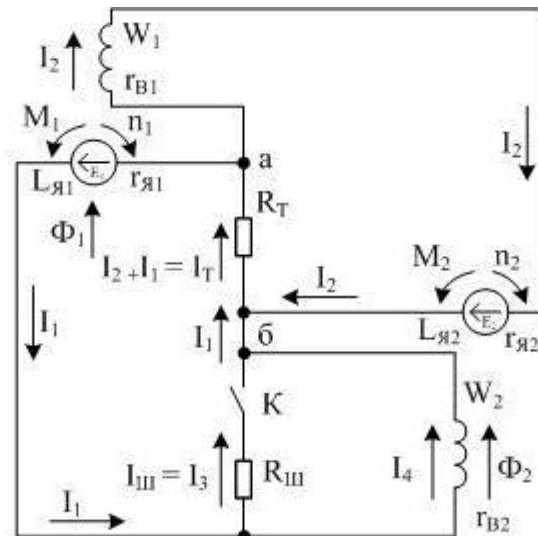


Рисунок 3 – Перехресна схема двох тягових двигунів з діагональним включенням гальмівного реостату

Передбачається, що машини 1 і 2 однакові і у них $r_{я1} = r_{я2} = r_{я}$, $L_{я1} = L_{я2} = L_{я}$, $W_1 = W_2 = W$, $r_{B1} = r_{B2} = r_B$, $E_1 = C_e n_1 \Phi_1$, $E_2 = C_e n_2 \Phi_2$, $M_1 = C_M \Phi_1 I_1$, $M_2 = C_M \Phi_2 I_2$

і обидві гальмують один вал $n_1 = n_2 = n$. Магнітні характеристики $\Phi_1(I_2)$ та $\Phi_2(I_4)$ описуються однією і тією ж залежністю $\Phi(I)$.

Струми I_1 і I_4 пов'язані співвідношенням:

$$I_3 R_{ш} = I_4 r_B + W \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{dI_4}{dt} \quad (5.1)$$

звідки:

$$I_3 = I_4 \frac{r_B}{R_{ш}} + \frac{W}{R_{ш}} \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{dI_4}{dt} \quad (5.2)$$

та

$$\frac{dI_3}{dt} = \frac{r_B}{R_{III}} \frac{dI_4}{dt} + \frac{W}{R_{III}} \frac{d^2 \Phi_2}{dI_4^2} \left(\frac{dI_4}{dt} \right)^2 + \frac{W}{R_{III}} \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{d^2 I_4}{dt^2} \quad (5.3)$$

Згідно з першими рівняннями Кірхгофа :

$$I_1 = I_3 + I_4 = \frac{r_B + R_{III}}{R_{III}} I_4 + \frac{W}{R_{III}} \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{dI_4}{dt} \quad (5.4)$$

$$I_T = I_1 + I_2 = I_2 + \frac{r_B + R_{III}}{R_{III}} I_4 + \frac{W}{R_{III}} \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{dI_4}{dt} \quad (5.5)$$

Згідно з другими рівняннями Кірхгофа для двох незалежних контурів:

$$E_1 = C_\epsilon n_1 \Phi_1 = r_{\bar{\alpha}} I_1 + L_{\bar{\alpha}} \frac{dI_1}{dt} + R_{III} I_3 + R_T (I_1 + I_2) \quad (5.6)$$

$$E_2 = C_\epsilon n_2 \Phi_2 = r_{\bar{\alpha}} I_2 + L_{\bar{\alpha}} \frac{dI_2}{dt} + R_T (I_1 + I_2) + W \frac{d\Phi_1}{dI_2} \frac{dI_2}{dt} \quad (5.7)$$

З урахуванням виразів (5.1), (5.2), (5.3) рівняння (5.6) і (5.7) приймають вид:

$$E_1 = R_T I_2 + \left[(r_{\bar{\alpha}} + R_T) \frac{r_B + R_{III}}{R_{III}} + r_B \right] I_4 + \frac{L_{\bar{\alpha}} (r_B + R_{III})}{R_{III}} \frac{dI_4}{dt} + \frac{W (r_{\bar{\alpha}} + r_B + R_{III})}{R_{III}} \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{d^2 I_4}{dt^2} + \frac{L_{\bar{\alpha}} W}{R_{III}} \left[\frac{d^2 \Phi_2}{dI_4^2} \left(\frac{dI_4}{dt} \right)^2 + \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{d^2 I_4}{dt^2} \right] \quad (5.8)$$

$$E_2 = (r_{\bar{\alpha}} + R_T) I_2 + \frac{R_T (r_B + R_{III})}{R_{III}} I_4 + \left(L_{\bar{\alpha}} + W \frac{d\Phi_1}{dI_2} \right) \frac{dI_2}{dt} + \frac{W R_T}{R_{III}} \frac{d\Phi_2}{dI_4} \frac{dI_4}{dt} \quad (5.9)$$

Так як $C_\epsilon n_1 = C_\epsilon n_2$, то рівняння (5.6) і (5.7) взаємопов'язані.

$$\Phi_2 E_1 = \Phi_1 E_2 \quad (5.10)$$

Висновок: точки стабільного режиму будуть при $\frac{dI}{dt} = 0$ і $\frac{d^2 I}{dt^2} = 0$, тобто при

$$\Phi_2 \left\{ R_T I_2 + \left[(r_{\bar{\alpha}} + R_T) \frac{(r_B + R_{III})}{R_{III}} + r_B \right] I_4 \right\} = \Phi_1 \left\{ (r_{\bar{\alpha}} + R_T) I_2 + \frac{R_T (r_B + R_{III})}{R_{III}} I_4 \right\} \quad (5.11)$$

ВИСНОВКИ

У роботі зроблено перевірку стійкості системи при заданих параметрах, а саме:

1. Зроблено аналіз електричної стійкості роботи двох тягових машин в режимі реостатного гальмування при не перехресній схемі їх включення. Встановлено, що розглянута схема вмикання машин не має внутрішньої електричної стійкості у режимі реостатного гальмування.
2. Зроблено аналіз електричної стійкості роботи двох тягових машин в режимі реостатного гальмування при перехресній схемі їх включення без регулювання магнітного потоку однієї з машин. Розглянута система реостатного гальмування володіє внутрішньою електричною стійкістю.
3. Зроблено аналіз електричної стійкості роботи двох тягових машин в режимі реостатного гальмування при перехресній схемі їх включення і при регулюванні магнітного потоку однієї з машин.
4. Визначені точки стійких сталих режимів роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи електричної тяги: навч. посібник / В.Х. Далека, П.М. Пушков, В.П. Андрійченко, Ю.В. Мінеєва; Харк.нац.міськ.госп-ва.-Х.: ХНАМГ, 2012. - 312с.
2. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404с.
3. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів: Навч. посібник - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.
4. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. вузов / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; под ред. И. Я. Браславского. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 256 с.
5. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б та ін. Електро-механічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006 – 265 с.