

КУЛАГІН Д.О, АНДРІЄНКО П.Д., ЧЕРНЕЦЬКИЙ Б.С.
КОНЦЕПЦІЯ ВИБОРУ СТРУКТУРИ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУХОМОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО
КОМПЛЕКСУ

На рухомих електротехнічних комплексах розповсюджених серій використовується, як правило, гідравлічна або електрична тягова передача. Передача потужності від дизеля до колісної пари повинна мати високу надійність і довговічність, мінімальні розміри, масу й вартість, високий коефіцієнт корисної дії в усіх режимах роботи, мінімальні витрати на обслуговування й ремонт.

Гідропередачі, які мають ряд відомих переваг, мають й недоліки, які обмежують їх застосування в тягових системах. Основні з них такі:

- зміна в'язкості робочих рідин в залежності від температури, що призводить до зміни робочих характеристик гідропередачі;

- виток робочої рідини з гідросистем знижує коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі, викликає нерівномірність руху вихідної ланки системи, ускладнює досягнення стійкої швидкості руху при малих швидкостях та створює значну загрозу навколишньому середовищу;

- вимога щодо виготовлення елементів гідропередачі за високим класом точності для досягнення малих зазорів між рухомими та нерухомими деталями, що ускладнює конструкцію і підвищує вартість її виготовлення;

- вибухо– та вогнебезпечність робочих рідин;

- складність передачі енергії на великі відстані через великі втрати на подолання гідравлічних опорів і різке зниження при цьому ККД системи.

Для сучасних електричних передач характерне збільшення потужності при збереженні майже тих же габаритних розмірів і зменшенні питомих мас елементів передачі. На транспорті застосовують електричні передачі потужності на постійному, змінно-постійному і змінному струмах.

При виборі структури тягового електроприводу рухомого електротехнічного комплексу необхідно виходити з положення, що первинна силова установка, тяговий генератор, тяговий перетворювач, система власних потреб, тяговий двигун

розглядаються не як окремі компоненти чи підсистеми для їх оптимізації, а як складові частини всього тягового електроприводу, який повинен оптимізуватись за певними обраними принципами лише вцілому. При цьому рішення окремих завдань щодо даних підсистем є необхідним лише для забезпечення оптимізації та вибору раціональних показників роботи всього тягового електроприводу вцілому.

Використання накопичувачів енергії (для енергії рекуперації, невикористаної енергії первинної силової установки) дозволить забезпечувати необхідний режим роботи як основного електрообладнання, так і допоміжного чи системи власних потреб у режимах, що не є раціональними для первинної силової установки, таким чином забезпечуючи раціональне споживання палива нею. Необхідним є також дослідження побудови системи стартер-генераторного пуску за рахунок накопиченої енергії.

Важливим є використання синергитичного підходу у побудові системи керування, за якого здійснюється поєднання інформаційних та електромеханічних потоків (хоча б на частковому рівні). Практична реалізація даної методики має знаходити своє відображення у формуванні та реалізації раціонального механізму оцінки ефективності функціонування структурних підсистем тягового електроприводу як складових елементів єдиного комплексу. Тобто оцінка ефективності діяльності елементів тягового електроприводу об'єктивно вимагає застосування комплексно-синергетичного підходу щодо них. В цілому під механізмом оцінки ефективності роботи та ступеня раціональності розуміється поєднання форм, методів, принципів оцінки щодо формування системи збалансованих показників, які враховують особливості тягового електроприводу в сучасних умовах для забезпечення кількісної та якісної оцінки ефективності роботи рухомого електротехнічного комплексу з метою вдосконалення системи керування та забезпечення раціональної роботи.

Особливо потрібно звернути увагу на можливість зниження ролі вартості окремих компонентів системи за рахунок часткової оптимізації показників їх роботи в своїй зоні робочих режимів. Це дозволяє виносити технічні характеристики та можливість оптимізації режимів роботи на перше місце в порівнянні з ціною.

Концепція вибору структури тягового електроприводу рухомого електротехнічного комплексу містить в собі декілька етапів, які будуть розглянуті нижче.

1 етап. Визначення основних параметрів руху електротехнічного комплексу.

На даному етапі необхідним є визначення основних вимог до проектованої тягової електропередачі та усього електротехнічного комплексу:

- маса;
- розрахункова швидкість руху;
- конструкційна швидкість;
- величини прискорень;
- величини ривків;
- визначення бажаної тягової характеристики комплексу;
- особливості використання електротехнічного комплексу.

2 етап. Вибір силової установки електротехнічного комплексу.

До силової установки – дизеля – пред’являється ряд вимог, першочерговими з яких є мінімальні значення маси і габарити, що дозволить максимально компактно спроектувати тяговий відсік комплексу. Відповідно до закордонної практики визначаються вимоги щодо вмісту шкідливих речовин у вихлопних газах.

Особливістю використання дизелів на вітчизняному залізничному транспорті та на транспортних засобах міського руху є те, що дизель значну частину часу працює на низькому та середньому навантажувальному і швидкісному режимах, що також необхідно враховувати при виборі того чи іншого типу дизеля.

Важливою задачею для транспорту зі значним підкузовним простором (залізничний транспорт, важкі самоскиди, трактори та комбайни) є врахування можливості розміщення силових модулів та допоміжного устаткування під кузовом разом зі зменшенням питомої маси та питомих навантажень на конструкційні елементи. Це дозволяє значно економити вільне місце безпосередньо всередині електротехнічного комплексу.

Основними показниками, за якими проводиться оцінка технічного рівня дизеля є питома витрата палива, потужність,

масо-габаритні показники, ресурс роботи, вартість та складність обслуговування.

У системі автономного електропостачання транспорту виникає потреба в збільшенні одиничних потужностей машин при практично постійних габаритах і масі. Це досягається за рахунок підвищення ступеня використання активних матеріалів і приводить до ряду небажаних наслідків, таких як збільшення синхронних і перехідних опорів, росту електромагнітних і теплових навантажень. Тому при проектуванні автономних електроенергетичних систем транспорту необхідно правильно підбирати комплекс електроустаткування, найбільш підходящий до завдання створення системи в цілому.

В автономній системі електропостачання транспорту, заснованій на використанні тихохідних дизель-генераторів великої потужності спостерігаються низькочастотні процеси, обумовлені збігом так званої оборотної частоти дизеля та власної частоти коливань ротора тягового генератора. Практика боротьби з коливаннями потужності дизеля на оборотній частоті припускає в якості основного заходу підвищення величини механічної інерційної постійної, тобто значне ускладнення системи тягового генератора та збільшення його маси. Зменшення таких коливань є можливим за рахунок оптимізації конструкції демпферної системи генератора, налаштуванням системи збудження та відповідними налаштуваннями регулятора частоти обертання дизель-генератора.

При проектуванні тягового електроприводу необхідно враховувати можливість дизеля працювати в режимі компресора – реверсування дизеля. При реверсуванні дизелів гальмування їх відбувається спочатку під впливом сил тертя в дизелі і гальмівний момент зменшується зі зменшенням частоти обертання колінчатого вала дизеля. Після зниження частоти обертання вала дизеля до приблизно 13–15% від номінальної частоти може бути подане у циліндри контрповітря, яке здійснює на частині повного оберту вала дизеля його гальмування та зупинку за рахунок збільшеної роботи на ході стиску, а потім запуск у новому заданому напрямку.

Контрповітря, подане на більш високих обертах не в змозі загальмувати дизель. Воно починає працювати як пневматична пружина і розкручує вал дизеля у попередньому напрямку навіть

зі збільшенням частоти обертання. Це призводить до зтяжного процесу гальмування дизеля та відповідно рухомого електротехнічного комплексу.

Для скорочення часу гальмування дизеля та всього комплексу необхідно забезпечити стійкий гальмівний момент на валу дизеля достатньої величини. Це може бути досягнуто за рахунок реалізації в період гальмування в циліндрах дизеля циклу повітряного компресора. У цьому випадку можна досягти величини гальмівного моменту на рівні до 60% від номінального. Спеціальні технічні рішення щодо конструкції дизеля у поєднанні з використанням активного перетворювача дозволяють включити режим гальмування практично при будь-якій частоті обертання вала дизеля і забезпечити цим істотне скорочення тривалості реверсу та вибігу об'єкта, що різко підвищує експлуатаційні властивості транспортного засобу.

Використання швидкохідних дизелів дозволяє встановлювати в системі синхронні генератори великої частоти, що сприяє зменшенню масо-габаритних показників електроприводу.

При частотах до 500 Гц і великих потужностях (300 кВт і більше) застосовують звичайні явнополусні синхронні генератори. На більш високі частоти, особливо при низьких потужностях, виготовляють тільки індукторні генератори. При цьому при підвищенні частоти обертання втрати в міді скорочуються, а в сталі зростають. Одночасно підсилюється ефективність охолодження, особливо для генераторів із вбудованим вентилятором на загальному валу.

В цілому підвищення частоти змінного струму має наступні переваги та недоліки:

для синхронних машин – зменшення габаритних розмірів, маси і вартості, підвищення стійкості паралельної роботи, збільшення магнітних втрат, зниження ККД;

для асинхронних двигунів – зменшення габаритних розмірів, маси та вартості, збільшення числа ступенів регулювання частоти обертання, можливість підвищення її верхньої межі вище 3000 об/хв, збільшення втрат у сталі, істотне зменшення коефіцієнта потужності, зменшення пускового та максимального моментів.

З погляду повного використання доступної механічної енергії й забезпечення максимальної енергоефективності в діапазоні швидкостей обертання від мінімальної до номінальної, слід використовувати режим роботи дизеля з максимальним постійним значенням коефіцієнта використання його енергії.

3 етап. Визначення можливих конструкцій тягового електроприводу, який може забезпечити встановлені параметри руху електротехнічного комплексу.

На даному етапі, виходячі з характеристик обраного дизеля, визначаються можливі варіанти схемотехнічного виконання тягового електроприводу – визначення виду двигуна, його типу, підбір відповідного генератора та системи перетворювача, вибір способу живлення системи власних потреб.

Для кожного типу двигуна проводиться проектування всього тягового електроприводу з метою визначення тягових характеристик та співставлення техніко-економічних показників. При цьому всі компоненти тягового електроприводу мають бути узгоджені між собою за всіма показниками для зменшення встановленої потужності комплексу в цілому за умови досягнення всіх його робочих характеристик.

У якості головного показника роботи електродвигуна як основного елемента тягового привода традиційно використовують коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі роботи. Проте, широкий діапазон навантажень тягових двигунів в експлуатаційних режимах впливає на їхню економічність та величину поточного ККД, що також необхідно враховувати при оцінці ефективності тягового привода.

Характерною рисою тягового електроприводу повороту є великий маховий момент інерції механізму тягової електропередачі, який перевищує маховий момент двигуна в 10–15 разів. Це накладає на систему автоматичного керування вимоги забезпечення плавного прикладення обертаючого моменту двигунів та підтримки заданого темпу розгону і гальмування. Тому приділяється велика увага побудові систем автоматичного керування і розробці регуляторів, що забезпечують контроль над швидкістю прикладення обертаючого моменту, прискорення та ривка.

На основі багатьох практичних досліджень встановлено, що більш адекватно реальному експлуатаційному стану відповідає

величина інтегрального ККД, який за своїм фізичним змістом може характеризувати тяговий привод як з погляду реалізації його якнайкращих енергетичних характеристик в певних режимах, так і з погляду використання його в цих режимах. Інтегральний ККД величина відносна. Фізичне значення цієї величини таке: інтегральний ККД рівний 1 тільки у тому випадку, коли тяговий привод не має втрат і рухомий електротехнічний комплекс завжди працює в режимі максимальної сили тяги при конструкційній швидкості руху. Тобто інтегральний ККД враховує не тільки ККД приводу, але і режим експлуатації рухомого електротехнічного комплексу [1-3].

Основними критеріями, які визначають доцільність застосування різних конструкцій та типів електропривода є:

- маса та габаритні розміри агрегатів і вузлів;
- експлуатаційні властивості (надійність, трудомісткість, ремонтпригодність);
- загальний та інтегральний ККД системи привода;
- термін служби агрегатів;
- вартість агрегатів і вузлів привода.

Попередній вибір тягового двигуна проводиться за умов оптимального співвідношення показників тяговий момент – маса та тяговий момент – втрати. Доцільність застосування тягового привода рухомого електротехнічного комплексу пропонується оцінювати за допомогою цільової функції, побудованої із критеріїв ефективності тягового електродвигуна, у якості яких прийняті:

$$\begin{cases} \eta_{ном} \rightarrow \max; \\ \eta_f \rightarrow \max; \\ k_{п.в.} \rightarrow \min; \\ k_e \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

де $\eta_{ном}$ – номінальне значення ККД електродвигуна;

η_f – інтегральне значення ККД електродвигуна;

$k_{п.в.}$ – значення питомого вартісного показника електродвигуна;

k_e – значення питомого габаритного показника електродвигуна.

У якості питомого вартісного показника електродвигуна пропонується залежність вартості двигуна від потужності на валу.

У якості питомого габаритного показника електродвигуна пропонується залежність максимального габаритного розміру двигуна від потужності на валу.

Розрахунки значень інтегрального ККД виконується відповідно до залежності

$$\eta_{\int} = \frac{\int_0^t \eta(t) dt}{t}, \quad (2)$$

де $\eta(t)$ – поточне значення ККД електротехнічного комплексу;

t – час руху.

У результаті досліджень встановлено, що в середньому інтегральний ККД тягових електродвигунів на 14÷18% нижче значень їх номінального ККД, тому оцінка ефективності роботи тягових двигунів за значенням номінального ККД є необ'єктивною [2-4]. Зі збільшенням потужності тягових електродвигунів збільшується різниця між значеннями інтегрального та номінального ККД.

При виборі тягового перетворювача виникає ряд специфічних особливостей, що викликані обставинами використання перетворювача на автономному рухомому складі:

- підвищені вібрації від працюючого дизеля;
- наявність у охолоджуючому повітрі пари машинних олів та сумішей різних відпрацьованих газів;
- обмежена потужність силової установки ставить жорсткі вимоги щодо максимізації ККД та ефективного використання відібраної потужності;
- режим руху з частими зупинками та пусками викликає значні термічні дії на елементи всієї тягової передачі;
- жорсткі вимоги до оптимальної компоновки та мінімізації габаритів і маси перетворювача;

– надійний захист в аварійних режимах з можливістю ручного керування для руху до найближчої станції чи пункту технічного обслуговування;

– уніфікація елементної бази.

4 етап. Уточнення і зменшення параметрів. Вибір остаточної топології тягового електроприводу.

Під час проведеного попереднього аналізу з попереднього списку визначених показників елементів тягового електроприводу необхідно виключити залежні один від одного параметри вибору. В той же час варто розуміти, що оцінка створеної системи за одним або декількома показниками є неточною.

У ряді випадків застосування уніфікованих рішень для побудови тягових систем може збільшувати початкову ціну електроприводу, що в цілому виправдовує себе в експлуатаційних режимах.

Аналіз функціональних схем тягових приводів показує, що найнефективніше розв'язується завдання уніфікації шляхом організації загальної шини постійного струму напругою 1500 В, яка характерна для всіх рухомих електротехнічних комплексів, окрім електропоїздів постійного струму, живлення яких здійснюється від мережі 3 кВ. Цей вид приміських електропоїздів передбачає послідовне з'єднання електрообладнання, підключеного до шини 1500 В. Це в свою чергу вимагає використання тягового двигуна з двообмоточним виконанням, кожна з обмоток якого живиться від інвертора напругою 1150 В змінного струму. Такий підхід вимагає створення уніфікованих тягових інверторів на 1500 В, сполучених послідовно, і спеціальних типів тягових двигунів. Використання загальної шини 3 кВ вимагає створення нового тягового інвертора на 3 кВ, спеціальних типів тягових двигунів на 2300-2400 В і перетворювача власних потреб відповідної напруги. Живлення перетворювача здійснюється від шин 1500 В, 3000 В, утворюючих головне коло.

До складу перетворювача власних потреб входять стабілізатор постійної напруги шини напругою 550 В і однофазний інвертор напруги з трансформатором гальванічної розв'язки.

Використання загальних шин постійного струму напругою 1500 В дозволяє обходитися уніфікованими блоками тягових перетворювачів для всіх видів рухомих електротехнічних комплексів, маючи два основних типовиконання тягових двигунів. Використання ж шини 3000 В вимагає подвійного виконання статичних тягових перетворювачів і двох типовиконань тягових двигунів.

На даному етапі також необхідно остаточно визначитись із встановленою конструкцією тягового електроприводу.

5 етап. Визначення оптимальних керуючих впливів для забезпечення встановленого рівня роботи тягового електроприводу та визначення режимів роботи.

В залежності від сили тяги та швидкості руху необхідно визначити всі статичні режими роботи тягового приводу. Необхідно окреслити область, в якій реалізуються всі тягові і гальмівні характеристики тягового електроприводу. На цьому етапі для кожної точки цієї області необхідно знайти оптимальне значення вектора керуючих впливів і визначити ККД тягового привода при цих оптимальних співвідношеннях.

В залежності від показників визначеної області на тяговій характеристиці визначаються параметри режимів роботи всього електротехнічного комплексу.

6 етап. Остаточний вибір агрегатного наповнення тягового електроприводу.

Даний етап передбачає вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації показників роботи та показників технічного рівня кожного агрегату та вузла тягового електроприводу.

Проблема пошуку розв'язків задачі глобальної оптимізації для тягового електроприводу має ряд специфічних особливостей. У таких задачах цільова функція має велику кількість змінних і може бути не заданою в аналітичній формі, а обчислюється як деяка інтегральна характеристика складного процесу.

Постановка завдання рішення задачі оптимізації вибору системи тягового електроприводу полягає в наступному. Розглядається обмежена, безперервна функція $f(x): \Omega \rightarrow R$, де $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Omega \subset R^n$.

Множина Ω є областю припустимих значень змінних і в найпростішому випадку представляє n -мірний паралелепіпед із заданими сторонами: $[x_i^{[0]} - d_i, x_i^{[0]} + d_i]$, $(i = 1, 2, \dots, n)$.

Необхідно знайти точку $x_{\min}$, у якій реалізується глобальний мінімум

$$f(x_{\min}) = \min f(x), \quad x \in \Omega, \quad (3)$$

Передбачається, що дана точка є єдиною на всій множині.

Обчислювальна процедура знаходження наближеного значення $f(x^*)$ в крапці $x^* \in \Omega$ за умови досягнення певного рівня, нижче заданої похибки обчислень, яка будується на основі ітераційного процесу руху часток-агентів базового шару.

Важливою складовою пропонованого обчислювального алгоритму є вибір або селекція із трьох віртуальних шарів часток-агентів базового роя часток, який по евристичній оцінці є кращим або більш перспективним для продовження руху. Цей вибір здійснюється на основі експертно сформульованих правил і нечіткого логічного виводу в завданні класифікації: по заданому вектору інформаційних ознак для трьох шарів віртуальних часток проводиться їхнє ранжирування.

Уведемо позначення для локальної оцінки константи Липшица в околі j -ї частки p -го шару

$$L_p^{(j)[k]} = \max_{(S=p); (j=1, 2, \dots, M^{[k]})} \frac{|f(x_s^{(j)[k]}) - f(x_p^{(j)[k]})|}{\|x_s^{(j)[k]} - x_p^{(j)[k]}\|}; \quad j = 1, 2, \dots, M^{[k]} \quad (4)$$

де $x_s^{(j)[k]}$ – координати i -ї частки S -ого шару.

Для оцінки показника змінюваності p -ого шару часток розглядаються величини

$$L_p^{[k]} = \max_{j=1, 2, \dots, M^{[k]}} L_p^{(j)[k]}, \quad (5)$$

для кожного із шарів віртуальних часток обчислюються амплітуди

$$\lambda_p^{[k]} = f_{p \max}^{[k]} - f_{p \min}^{[k]}, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} f_{p \max}^{[k]} &= \max_{j=1,2,\dots,M^{[k]}} f(x_p^{(j)[k]}); \\ f_{p \min}^{[k]} &= \min_{j=1,2,\dots,M^{[k]}} f(x_p^{(j)[k]}) \end{aligned} \quad (7)$$

Базовим шаром часток вважається той, для якого оцінка показника змінюваності є максимальною. Додатковими інформаційними ознаками або показниками при виборі базового шару часток можуть служити амплітудні значення та інші характеристики.

Список джерел

1. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія / Д. О. Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 с.
2. Любарский Б. Г. Выбор критерия эффективности тягового привода подвижного состава / Б. Г. Любарский // Тезисы VI Международный симпозиум «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте Eltrans'2011, Санкт-Петербург: ПГУПС., 25-28 октября 2011 г – С.78.
3. Логинова Е. Ю. Обоснование выбора типа тягового электропривода по критериям условной эффективности / Логинова Е. Ю., Солдатенко Д. А. // Транспорт: наука, техника, управление. – 2004. – №12. С. 26–29.
4. Kulagin D. O. Features of Monitoring the Traction Transmission of a Running Electrical Complex in the Event of its Deviation from the Schedule / D. O. Kulagin, P. D. Andryenko // Computational problems of electrical engineering. – 2014. – Vol. 4, № 1. – P. 11–16.