УДК 62-83: 621.313+621.314

В.М. Скіданов, д-р техн. наук, професор КНУБА

ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ЯК ФУНКЦІЯ СТРУКТУРНОЇ ПОБУДОВИ ТЯГОВИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Використання акумуляторного технологічного електротранспорту є неодмінною складовою у більшості промислових технологічних циклах та процесах, особливо за умов необхідності виконання транспортних операцій у закритих приміщеннях цехів, складів, теплиць, тощо, де застосування рухомого складу з двигунами внутрішнього згоряння вкрай небажане або взагалі неприпустиме. Тобто, автономний технологічний електротранспорт (електронавантажувачі, електрокари, електровізки, тощо) є практично безальтернативним для цілої низки виробництв і процесів.

Однак відзначимо, що інтенсивний графік роботи такого транспорту зумовлює прискорений розряд бортового джерела живлення (акумуляторної батареї) як у самому циклі робочої зміни, так і в цілому, тобто впродовж всього строку служби батареї. Така особливість з одного боку призводить до скорочення робочого ресурсу акумуляторів, а значить і самого електротранспорту у межах однієї зміни, а з другого – до значного зменшення таких важливих експлуатаційних показників батареї як ємність та кількість зарядно-розрядних циклів.

Загальновідомо, що до вказаних наслідків приводить збільшення як величини пускових струмів, так і кількості пускових режимів на одиницю часу. Причому позбавитись таких чинників дуже важко навіть застосуванням напівпровідникових перетворювачів, які забезпечують плавність пусків тягового двигуна та досить глибоке регулювання швидкості їх обертання.

Метою даної статті є дослідження енергетичних показників тягової акумуляторної батареї (ТАБ) у стані вихідної (послідовне з’єднання елементів) конфігурації та у стані оперативно реструктуризованої конфігурації а також обгрунтування доцільних меж секціонування (див. далі) тягового джерела.

Традиційна організація структури ТАБ являє собою послідовне з’єднання окремих елементів (акумуляторів) у батарею. Але, як витікає з попередніх досліджень [1] , однією з умов підвищення енергетичної ефективності АБ є збільшення її струму короткого замикання, що може бути досягнуто шляхом реструктуризації батареї з послідовного з’єднання елементів у змішане – послідовно-паралельне – з’єднання.

Саме таке дослідження з огляду на сучасне уявлення можливих варіантів побудови транспортних систем електроживлення з джерелом змінної структури розглянуто нижче.

У загальному випадку довільно структурована батарея може бути описана такими рівняннями:

$$E_{и} = k\,E_0\,, \tag{1}$$

$$r_{и} = k\,r_0\,/\,\iota\,, \tag{2}$$

причому задається

$$m = k \cdot \iota\,,\ (\iota \neq 1);\ m = k\,,\ (\iota = 1), \tag{3}$$

де m - загальна кількість елементів батареї; ι - кількість паралельно з’єднаних секцій, кожна з яких містить k послідовно ввімкнутих елементів (для кожної конкретної батареї треба мати $k = const$ для компенсації паразитних урівнювальних струмів між секціями, які можуть виникнути як наслідок неврівноваженості ЕРС у окремих секціях; $E_{и}$, $r_{и}$, E_0, r_0 - відповідно сумарна ЕРС та активний опір батареї у послідовній структурі та ЕРС та активний опір окремого складового елемента батареї.

У загальному випадку ККД батареї можна визначити за такою формулою:

$$\eta_E = 1 - \Delta P_u / P_u \,, \tag{4}$$

де $\Delta P = I^2_{еф}\, r_и$ – втрати потужності в батареї, $P_и = E_и\, I_{ср}$ – внутрішня потужність джерела, $I_{еф}$ та $I_{ср}$ відповідно ефективне та середнє значення струмів батареї.

Для визначення цих струмів запишемо систему рівнянь, що задають імпульс струму у імпульсному циклі розряду батареї.

$$i_1 = I - \Delta I / 2 + \Delta I\, t / t_и \,, \qquad 0 \le t \le t_и \,,$$

$$i_2 = 0, \qquad t_и \le t \le T \,,$$

i_1 , i_2 – миттєві струми батареї на першому та другому інтервалах комутації, I – середній струм імпульсу розряду за час імпульсу, ΔI – амплітуда пульсацій струму батареї, $t_и$ – час тривалості імпульсу струму, T – період комутації.

Середнє та ефективне значення струмів батареї визначимо за формулами

$$I_{ср} = \tfrac{1}{T}\left(\int_0^{t_u} i_1 dt + \int_{t_u}^{T} i_2 dt \right) = I\gamma \tag{5}$$

$$I^2_{еф} = \tfrac{1}{T}\left(\int_0^{t_u} i_1^2 dt + \int_{t_u}^{T} i_2^2 dt \right) = I^2 \gamma k_\alpha \tag{6}$$

У випадку розряду (тяговий режим) АБ імпульсним струмом її ККД визначається за формулою

$$\eta_E^T = 1 - I^2_{еф}\, r_и / I_{ср}\, E_и \,,$$

а з урахуванням (1) - (6) одержимо

$$\eta_E^T = 1 - I^* \, k_\alpha \; / \; \iota \,, \tag{7}$$

де $I^* = I / I_{к.з.}$; $I_{к.з.} = E_и / r_и = E_0 / r_0$.

Якщо в колі батареї протікає квазісталий струм і джерело забезпечує певну вихідну потужність P_0, то рівняння балансу потужностей матиме вигляд

$$P = I^2\, r_и + P_0 \tag{8}$$

де $P = I\, E_и$ – внутрішня потужність джерела.

З останнього рівняння отримаємо:

$$I = E_u / r_u - \sqrt{(E_u / 2r_u)^2 - P_0) / r_u} \tag{9}$$

У виразі для струму (9) при вирішенні рівняння (8) залишено від'ємне значення кореня, оскільки мінімальному значенню струму батареї відповідає максимальний ККД. З огляду на те що для розряду постійним струмом значення $I_{еф}$ та $I_{ср}$ тотожні, а внутрішня потужність може бути обрахована як $P_0 = I\, U_{ср}$, отримаємо

$$\eta^T_{E-C} = (1 + \sqrt{1 - 4 I^* U^*}\,) / 2 \;, \; U^* = U_{ср} / E_и \tag{10}$$

Якщо середнє значення напруги для імпульсного циклу розряду задати як

$$U_{ср} = U\gamma = (E_и - I\, r_и)\gamma \,,$$

то вираз (10) приведемо до такого вигляду

$$\eta^T_{E-C} = (1 + \sqrt{1 - 4 I^* (1 - I^*)\gamma}\,) / 2 \tag{11}$$

Слід зауважити, що режими імпульсного розряду і заряду батареї квазісталим струмом мають місце лише за умови роботи джерела з ємнісним фільтром. Тому для об'єктивності дослідження слід врахувати втрати потужності у такому фільтрі, що докладно зроблено у роботі [2], а ми наведемо лише остаточний результат:

$$\Delta P_c = I^2\, \gamma\, (1 - \gamma) R_{Se},$$

де R_{Se} – активний опір конденсатора фільтра у послідовній еквівалентній заступній схемі.

Використавши відповідне рівняння балансу потужностей, отримаємо вираз для струму у колі "батарея – фільтр" у вигляді

$$I = E_u / r_u - \sqrt{(E_u / 2r_u)^2 - (\Delta P_c + P_0) / r_u} \tag{12}$$

Формула для ККД АБ може бути приведена до такого вигляду $\eta_{E-C} = 1 - I^2 r_и / I E_и$. Тоді з урахуванням двох останніх виразів та виразів (1) - (3) для довільно секціонованого джерела у тяговому режимі одержимо

$$\eta^{T}_{E-C} = (1 + \sqrt{l^2 - 4I^*\gamma(l - I^*[1 - k_C(1-\gamma)])})/2l, \quad (13)$$

де $k_C = R_{Se} / n\, r_и$ (n – кількість паралельно ввімкнених конденсаторів у фільтрі).

Далі розглянемо рекуперативний (гальмівний для транспортного засобу, тобто зарядний для джерела) режим довільно побудованої акумуляторної батареї для імпульсних та квазісталих струмів. У цьому разі АБ працює як елемент навантаження впродовж часу ($T - t_и$), а її ККД визначається формулою (4).

Визначення діючих і середніх струмів та потужностей докладно виконано у роботі [3]. Значення коефіцієнтів, що входять у вирази для спожитої і втраченої потужності для секціонованої батареї з урахуванням (1) – (3) запишемо у такому вигляді

$$k_i = E_0 / r_0 I_к ; \quad (14)$$

$$k_и = m\, r_0 / r_я = k\, \iota\, r_0 / r_я. \quad (15)$$

Тоді вирази для втраченої та спожитої потужності можна визначити за такими формулами

$$\Delta P^*_и = \Delta P_и / P_к = (I^* k_i)^2 k_и k_\alpha (1-\gamma) \cdot \iota^{-2} ; \quad (16)$$

$$P^*_и = P_и / P_к = I^* k_i^2 k_и (1-\gamma)^2 E_m / E_и - [I^* k_i (1-\gamma)]^2 , \quad (17)$$

де відношення $E_m / E_и = (1-\gamma) / \iota - I^*$, E_m – ЕРС тягового двигуна в генераторному режимі його роботи.

З урахуванням останніх виразів для ККД секціонованої батареї у рекуперативному режимі при імпульсних зарядних струмах одержимо таку формулу

$$\eta^{P}_{E} = 1 - I^* k_u k_\alpha / \cdot \iota (1-\gamma)[k_и (1-\gamma) - 2 I^* \iota] \quad (18)$$

Розглянемо режим імпульсної рекуперації при квазісталих струмах заряду ТАБ, що забезпечується вмиканням у контур батареї ємнісного фільтру. Втрати потужності у фільтрі у відносних одиницях визначаються рівнянням [3]

$$\Delta P^* = I^2_{C\,еф} R_C / I^2_к r_я = (I^* k_i)^2 \gamma(1-\gamma)\, k_{ся} , \quad (19)$$

У цьому виразі коефіцієнт k_α не фігурує, оскільки при наявності конденсатора достатньої ємності ($10 \cdot 10^3$ мкФ) пульсації струму практично відсутні, а $k_C = R_{Se} / n\, r_я$ (n – кількість паралельно ввімкнених конденсаторів у фільтрі)

Втрати потужності у батареї при квазісталому струмі у відносних одиницях:

$$\Delta P^*_и = I^2 r_и / I^2_к r_я = (I^* k_i)^2 k_и \iota^{-2} \quad (20)$$

Потужність, що споживається контуром ($E_и – C$) визначимо у такому вигляді

$$P^*_{E\text{-}C} = P_{E\text{-}C} / P_к = I^* k_i^2 (1-\gamma) [k_и (1-\gamma)/ \iota - 2 I^*] \quad (21)$$

Вираз для ККД довільно секціонованої батареї у рекуперативному режимі при квазісталих струмах заряду одержимо у такому остаточному вигляді:

$$\eta^{P}_{E-C} = 1 - (\Delta P^*_u + \Delta P^*_C) / P^*_{E-C} = = 1 - I^* [k_и + \iota^2 \gamma(1-\gamma) k_{ся}] / (1-\gamma)[k_и (1-\gamma) - 2\, \iota I^*] \quad (22)$$

Таким чином, одержані вирази (7), (13), (18), (22) для ККД акумуляторної батареї у різних режимах роботи містять параметр ι, який визначає глибину секціонування батареї, тобто кількість ідентичних паралельно ввімкнутих секцій, кожна з яких складається з $k = \text{const}$ елементів (умова (1)). Відзначимо при цьому, що у випадку $\iota = 1$ одержані формули адекватні виразам для ККД традиційно побудованої (послідовне з'єднання елементів) батареї у відповідних режимах [1].

Розрахунки за одержаними вище аналітичними виразами для ККД були виконані для нікель-цинкової тягової акумуляторної батареї типу 84НЦ-125-У2 з характеристиками: $I_{макс} = 250$А, $U_{ном} = 135$В, $I_{к.з.} = 1350$А, $r_и = 0{,}1$Ом, (вихідна конфігурація – 84 послідовно з'єднаних елементів, кожний з яких має ЕРС 1,6В). Батарея призначена для роботи у тяговому приводі портужністю до 30 кВт.

На базі проведених розрахунків досліджувались залежності ККД батареї у функції коефіцієнта γ заповнення імпульсного циклу (КЗІЦ), частоти комутації перетворювача, що виконує регулювання струму навантаження в розрядних та зарядних режимах, та для різної глибини секціонування $\iota = (1 \div 8)$ у тяговому та рекуперативному режимах роботи джерела. У тяговому режимі при імпульсних розрядних струмах характер залежностей має параболічний характер (максимальні втрати від пульсацій мають місце для $\gamma = 0,5$), а із збільшенням частоти парабола спрямляється і вже при $f > 1$ кГц залежність $\eta = \varphi\ (\gamma)$ наближається до прямої і не залежить від γ.

З аналізу режиму розряду батареї квазісталим струмом витікає, що за усіх інших умов ККД секціонованої батареї (для $\iota = 4$) завжди більше ніж у її послідовній структурі (для $\iota = 1$). У рекуперативному режимі характер залежностей ККД батареї від КЗІЦ дещо інший, а саме – ККД істотно зменшується при зростанні γ, однак при ідентичному характері змінювання ККД секціонованої батареї, як і у тяговому режимі, має більші значення ніж ККД ТАБ з послідовним ввімкненням елементів.

Найбільш цікавий результат одержано для залежностей ККД акумуляторної батареї від глибини її секціонування саме у рекуперативному режимі, де крім монотонно зростаючих залежностей для малих КЗІЦ ($\gamma < 0,3$) та малих струмів ($I < 50$А), що в цілому характерно для тягового режиму, маємо більшість залежностей параболічного характеру з явно існуючою зоною максимумів. Фізична сутність такого ефекту пояснюється таким чином. Початкове монотонне зростання значень ККД при збільшенні глибини секціонування навіть для великих значень струмів та КЗІЦ перетворювача дає позитивний ефект, але у подальшому (при зростанні струмів від $0,5I_{max}$ і вище) позитивний фактор секціонування не може скомпенсувати негативні наслідки дії режимних (управлінських) факторів. Останнє витікає з такого. Втрати у батареї зменшуються пропорційно квадрату глибини секціонування ι – (16) та (20), але при цьому вони й зростають пропорційно квадрату струму навантаження. В той же час потужність споживання (17) пропорційна відношенню $(1\text{-}\gamma)/(\iota - I^*)$, звідки видно, при одночасному збільшенні ι та I^* останній вираз інтенсивно зменшується, що обумовлює різке зниження потужності споживання джерела. Збалансоване таким чином зростання втрат потужності та зменшення потужності споживання призводить до зниження ККД бортового джерела живлення – акумуляторної батареї – в цілому.

Висновки. Викладене вище дозволяє стверджувати таке.

1. Оперативна (засобами управління та бортової комутаційної апаратури) реструктуризація, тобто секціонування, тягових акумуляторних батарей в цілому дає позитивний ефект – збільшення ККД джерела як у тяговому, так і в рекуперативному режимах.

2. Для тягового режиму з точки зору ККД батареї глибина секціонування практично не обмежена і показник ι доцільно вибирати лише виходячи з нижнього припустимого рівня напруги, який матиме реструктуризована батарея, від якої отримують живлення силові, керуючі та допоміжні компоненти тягового електрообладнання. З нашої точки зору для тягового режиму мати $\iota > 4$ не доцільно.

3. Найбільш прийнятним діапазоном для показника глибини секціонування ι у рекуперативному (зарядному) режимі слід вважати діапазон, де $2 \leq \iota \leq 4$. У цьому випадку забезпечуватиметься гальмування транспортного засобу з поверненням кінетичної енергії у батарею до, так званих, повзучих швидкостей транспортного засобу і, відповідно, достатньо тривалий підзаряд бортового джерела струмами, що задовольняють регламентованим експлуатаційним показникам для переважної більшості вітчизняних та зарубіжних бортових тягових джерел живлення.

На закінчення відзначимо, що одержані результати у достатній мірі співпадають з результатами, одержаними у дослідженні [1] відносно позитивного ефекту від збільшення

струмів короткого замикання АБ, які у загальному випадку пропорційні глибині секціонування бортового тягового джерела.

Література

1. Скіданов В.М. Метод визначення гарантованої ефективності автономних транспортних електроприводів за статичними константами їх складових компонентів // Технічна електродинаміка. - 1997.- №6.- С.21-28.
2. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока / Павлов В.Б., Шидловский А.К., Скиданов В.М., Рычков В.А. – К.: Наук. Думка, 1987. - 284 с.
3. Скиданов В.М. Энергетический анализ и оптимизация управления в системе аккумуляторная батарея – импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока в режиме рекуперативного торможения .- К.: 1984.– 54 с. (Препр. / АН Украины. Ин-т электродинамики; №361).