

## АВТОНОМНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Вершинин Д.В., інженер, Водічев В.А., д.т.н., професор, Войтенко В.А., к.т.н., професор,  
Монік П.М., к.т.н., професор, Смотров Е.А., к.т.н.  
ОСКБ спеціальних верстатів, Одеський національний політехнічний університет,  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

*Досліджується бортове джерело живлення, що забезпечує накопичення кінетичної енергії засобу електротранспорту при гальмуванні з подальшим використанням її при розгоні і русі. Як накопичувач електричної енергії використовуються акумуляторна батарея і імпульсні конденсатори великої ємності.*

*The side source of feed, providing utilization of kinetic energy of electromobile at braking with the subsequent use of her at acceleration and motion, is explored. As the store of electric energy a storage battery and impulsive condensers of large capacity is used.*

Ключові слова: бортове джерело живлення, електричний транспорт, кінетична енергія, перетворювач напруги.

В умовах нестачі енергетичних ресурсів набувають розвитку транспортні засоби з автоматизованим електроприводом на основі мотор коліс. Для таких електроприводів розроблені схеми блоків управління мотор – колесами, автономних інверторів напруги, розраховані механічні характеристики і залежності ККД від навантаження [1]. При розробці таких електроприводів важливим є питання накопичення кінетичної енергії електричного транспортного засобу (ЕТЗ) в процесі гальмування у вигляді електричної енергії з подальшим її використанням. Застосування акумуляторних батарей (АБ) як накопичувачів електричної енергії утруднене низьким значенням струму заряду АБ. Ця обставина примушує використовувати в якості накопичувачів електричної енергії конденсаторні батареї (КБ), що складаються з іоністорів (електричних конденсаторів великої ємності). КБ характеризуються достатньо великим струмом процесів заряду і розряду. Відомі публікації [2, 3], в яких наголошується економічна доцільність застосування іоністорів в ЕТС. Проте в літературі відсутні рекомендації щодо вибору необхідної ємності КБ та схемної реалізації бортового джерела живлення (БДЖ).

Метою статті є розробка рекомендацій з вибору ємності КБ для БДЖ і формування вимог до технічних параметрів КБ і перетворювача напруги, що входять до складу БДЖ.

Навність у складі БДЖ іоністорів, призначених для швидкого прийому, зберігання і віддачі електричної енергії, яка генерується електричним двигуном при гальмуванні ЕТЗ, дозволяє збільшити пробіг ЕТЗ на одному заряді АБ. БДЖ має два режими роботи:

1. У режимі розгону ЕТЗ електрична енергія від АБ і КБ надходить в перетворювач напруги мотор-колеса (ПР-МК) і далі в мотор-колесо (МК). За наявності заряду в КБ велика частина електричної енергії повинна надходити від КБ, яка при розгоні ЕТЗ має розрядитися до напруги щоб бути готовою до прийому кількості електричної енергії що відповідає значенню кінетичної енергії на швидкості з якою рухається ЕТЗ.

2. У режимі гальмування ЕТЗ електрична енергія надходить від МК через ПР-МК в КБ і в АБ. При цьому в АБ електрична енергія повинна надходити відповідно до технічних вимог, що пред'являються до режиму заряду акумуляторної батареї, а саме струм заряду АБ і напруга на її затисках не повинні перевищувати допустимих значень. Надмірний струм повинен надходити в КБ.

На рис. 1 представлено варіант схеми БДЖ, в якій АБ підключена безпосередньо на затиски ПР-МК, а заряд КБ здійснюється через перетворювач конденсаторної батареї ПР-КБ, що дозволяє заряджати КБ до максимальної напруги, яка може значно перевищувати значення напруги на АБ ( $U_{КБ\text{ MAX}} > U_{АБ}$ ) і розряджати КБ до мінімальної напруги, що може бути значно меншою за значення напруги на АБ ( $U_{СК\text{ MIN}} < U_{АБ}$ ). Це дозволяє значно збільшити кількість накопичуваної енергії при незмінній ємності КБ. Регулюючи струм заряду КБ можна управляти струмом заряду АБ. Ця схема є більш простою і вільна від недоліків відомих схем. У ній відсутній перетворювач акумуляторної батареї, що знижує втрати і підвищує загальний ККД БДЖ.

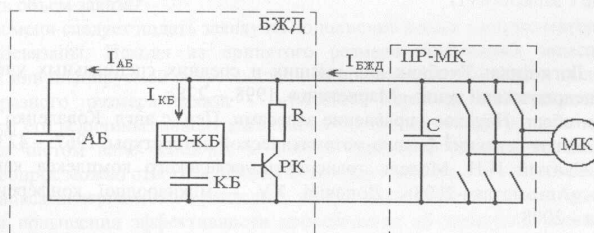


Рис. 1 – Функціональна схема підключення КБ і АБ

Для забезпечення нормального режиму заряду АБ і збереження максимальної кількості енергії, що генерується МК при гальмуванні ЕТЗ, необхідно, щоб значення ємності КБ і параметри перетворювача ПР-КБ відповідали запасу кінетичної енергії в ЕТЗ і потужності, з якою ця енергія надходить в БДЖ. Для визначення необхідного значення ємності КБ розглянемо процес перетворення кінетичної енергії в електричну енергію заряду конденсаторів при гальмуванні ЕТЗ. Відомо, що кінетична енергія ЕТЗ масою  $m$ , що рухається з лінійною швидкістю  $V$  визначається виразом

$$A_k = \frac{mV^2}{2}.$$

При гальмуванні кінетична енергія  $A_k$  перетворюється МК в електричну енергію  $A_{ЕЛ}$ . Врахуємо ККД двигуна  $\eta_{ДВ}=0,85$ , ПР-МК  $\eta_{ПР-МК}=0,95$  і ПР-КБ  $\eta_{ПР-КБ}=0,96$ . Крім того, частина кінетичної енергії ЕТЗ витрачається на перетворення поступового руху ЕТЗ в обертальний рух МК. Приблизно ці втрати врахуємо за допомогою ККД механічної частини ЕТЗ  $\eta_M=0,97$ . В результаті кількість електричної енергії, що генерується МК при гальмуванні ЕТЗ і надходить в БДЖ, може бути оцінена за допомогою виразу

$$A_{ЕЛ} = A_k \eta_{ДВ} \eta_{ПР-МК} \eta_M.$$

З урахуванням чисельних значень  $\eta_{ДВ}$ ,  $\eta_{ПР-МК}$  і  $\eta_{ПР-КБ}$  розрахуємо

$$A_{ЕЛ} = \eta_{\Sigma} A_k = 0,78 A_k,$$

де  $\eta_{\Sigma}$  – значення сумарного ККД, що відповідає перетворенню кінетичної енергії в електричну енергію, що генерується МК і надходить в БДЖ.

Кількість електричної енергії, що надходить в КБ буде менше кількості електричної енергії, що надходить в БДЖ на втрати енергії в ПР-КБ

$$A_{КБ} = \eta_{ПР-КБ} A_{ЕЛ} = 0,75 A_k. \quad (1)$$

Як відомо, запасена в КБ енергія, визначається ємністю  $C_{КБ}$  і напругою на клеммах КБ

$$A_{КБ} = \frac{C_{КБ} U_{СК}^2}{2}.$$

Напруга на клеммах КБ може змінюватися від максимальної  $U_{КБ MAX}$  до мінімальної  $U_{КБ MIN}$ . Розглянемо залежність коефіцієнта використання енергії конденсатора при зміні напруги на його клеммах

$$k_u = \frac{A_{КБ MAX} - A_{КБ MIN}}{A_{КБ MAX}},$$

$$k_u = 1 - \left( \frac{U_{КБ MIN}}{U_{КБ MAX}} \right)^2, \quad (2)$$

де  $A_{КБ MAX}$  і  $A_{КБ MIN}$  – запас електричної енергії в КБ відповідно при напрузі на його клеммах  $U_{КБ MAX}$  і  $U_{КБ MIN}$ . Відповідно до виразу (2) на рис. 2 побудований графік залежності коефіцієнта використання енергії КБ від співвідношення мінімального і максимального значень напруги заряду КБ. Як видно з представленої залежності доцільно розряджати КБ до мінімальної напруги  $U_{КБ MIN} \leq 0,2 U_{КБ MAX}$ . При цьому коефіцієнт використання енергії конденсаторної батареї  $k_u \geq 0,96$ . Для порівняння, при  $U_{КБ MIN} = 0,7 U_{КБ MAX}$  одержимо  $k_u = 0,51$ . В результаті, потрібно майже в два рази збільшити ємність КБ для рекуперації однієї і тієї ж кількості електричної енергії, що генерується МК при гальмуванні ЕТЗ.

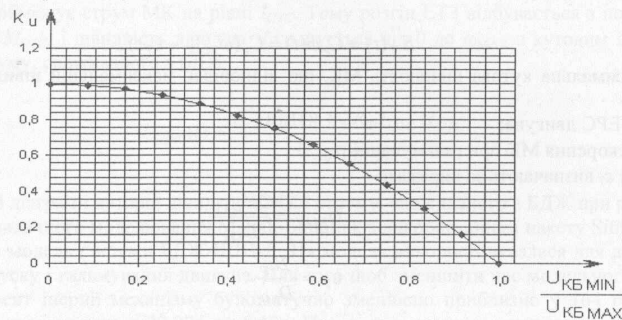


Рис. 2 - Залежність коефіцієнта використання енергії КБ від співвідношення мінімальної і максимальної напруги заряду

**ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО  
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Якщо припустити, що вся енергія, що генерується мотор-колесами при гальмуванні ЕТЗ надходить тільки в КБ і не використовується для заряду акумуляторної батареї, то значення ємності КБ, необхідне для накопичення всієї енергії  $A_{КБ}$  може бути визначене наступним чином

$$C_{КБ} = \frac{2A_{КБ}}{U_{КБМАХ}^2 - U_{КБМІН}^2}.$$

Якщо прийняти  $U_{КБМІН} = 0,2U_{КБМАХ}$ , то останній вираз може бути представлено в простішій для інженерних розрахунків формі

$$C_{КБ} \approx \frac{2,08A_{КБ}}{U_{КБМАХ}^2}.$$

З урахуванням виразу (1) одержимо

$$C_{КБ} \approx \frac{1,56A_K}{U_{КБМАХ}^2}.$$

Отже, на підставі максимальних значень кінетичної енергії ЕТЗ і максимального значення напруги на клеммах КБ можна оцінити необхідне значення її ємності. Наприклад, якщо, максимальна швидкість руху ЕТЗ масою 7000 кг дорівнює 22,22 м/с (80 км/год), то при  $U_{КБМАХ} = 350$  В,  $U_{КБМІН} = 70$  В для повної рекуперації кінетичної енергії необхідно мати конденсаторну батарею ємністю 22,01 Ф. Для порівняння при  $U_{КБМАХ} = 600$  В,  $U_{КБМІН} = 120$  В ємність конденсаторної батареї повинна бути 7,49 Ф.

Для визначення вимог до параметрів перетворювача ПР-КБ розглянемо потужність, з якою електрична енергія надходить в БДЖ при гальмуванні ЕТЗ. При гальмуванні кінетична енергія ЕТЗ  $A_K$  перетворюється мотор-колесами в електричну енергію  $A_{ЕЛ БДЖ}$ . Значення потужності, що розвиває ПР-МК при передачі електричної енергії в БДЖ визначається виразом

$$P_{ЕЛ}(t) = \frac{dA_{ЕЛБДЖ}(t)}{dt}.$$

Якщо в схемі, показаній на рис. 1, нехтувати зміною напруги на клеммах акумуляторної батареї при її заряді в процесі гальмування, то можна визначити значення струму, що генерується ПР-МК і надходить в БДЖ

$$I_{БДЖ}(t) = \frac{P_{ЕЛ}(t)}{U_{АБ}}. \quad (3)$$

Для спрощення аналізу розглядатимемо гальмування з постійним від'ємним прискоренням, яке має місце при постійному значенні гальмівного моменту. Час гальмування  $t_T$  ЕТЗ з максимальної швидкості  $V_{МАХ}$  до повної зупинки визначається технічним завданням відповідно до потрібного значення шляху гальмування. Значення прискорення при гальмуванні визначаємо за формулою

$$a_T = \frac{V_{МАХ}}{t_T}.$$

Значення сили, необхідної для гальмування ЕТЗ масою  $m$  з необхідним прискоренням  $a_T$

$$F_T = a_T m.$$

Сумарний гальмівний момент, що розвивається всіма МК при гальмуванні

$$M_T = F_T \frac{D_{МК}}{2},$$

де  $D_{МК}$  – діаметр мотор-колеса.

У режимі гальмування ПР-МК підтримує в МК постійний гальмівний струм  $I_T$ . При гальмуванні ЕРС, індукована в обмотках МК, буде змінюватись від максимального значення до 0 відповідно до виразу

$$E_D(t) = C_e \omega(t) = C_e (\omega_{МАХ} - \varepsilon_T t),$$

де  $\omega_{МАХ}$  – максимальна кутова швидкість МК, що відповідає максимальній швидкості пересування ЕТЗ  $V_{МАХ}$ ;

$C_e$  – коефіцієнт ЕРС двигуна;

$\varepsilon_T$  – кутове прискорення МК при гальмуванні.

Значення  $\omega_{МАХ}$  і  $\varepsilon_T$  визначають за виразами

$$\omega_{МАХ} = \frac{2V_{МАХ}}{D_{МК}},$$

$$\varepsilon_T = \frac{2a_T}{D_{МК}}.$$

Отже, електрична потужність, що розвивають МК в режимі гальмування, змінюватиметься від максимального значення  $P_{ТМАХ}$  до 0 відповідно до виразу

$$P_T(t) = M_T(\omega_{MAX} - \varepsilon_T t) - 2R_\Phi I_T^2.$$

Оскільки потужність електричної енергії, що надходить в БДЖ, пропорційна електричній потужності, що генерують МК в режимі гальмування, то згідно (3) при постійній напрузі  $U_{AB}$  діаграма струму  $I_{БДЖ}$  аналогічна діаграмі швидкості (або ЕРС) двигуна (рис. 3).

$$I_{БДЖТ}(t) = \frac{M_T(\omega_{MAX} - \varepsilon_T t) - 2R_\Phi I_T^2}{U_{AB}} \eta_{ПР-МК}, \quad (4)$$

де  $R_\Phi$  – опір однієї фази статора синхронного двигуна, на базі якого виконано МК;  
 $\eta_{ПР-МК}$  – ККД перетворювача мотор-колеса.

З виразу (4) видно, що струм  $I_{БДЖ}$  лінійно залежить від часу. На початку процесу гальмування ( $t=0$ ) значення струму, що надходить в БДЖ, буде максимальним

$$I_{БДЖТ}(t) = \frac{M_T \omega_{MAX} - 2R_\Phi I_T^2}{U_{AB}} \eta_{ПР-МК}. \quad (5)$$

На інтервалі часу  $t_2-t_T$  (рис. 3) значення кутової швидкості МК і ЕРС, що генерується двигуном, будуть дуже малими, щоб забезпечити необхідне значення гальмівного струму, тому ПР-МК споживатиме струм від БЖД і подаватиме його в МК, при цьому втрати в ПР-МК покриватимуться за рахунок енергії БЖД.

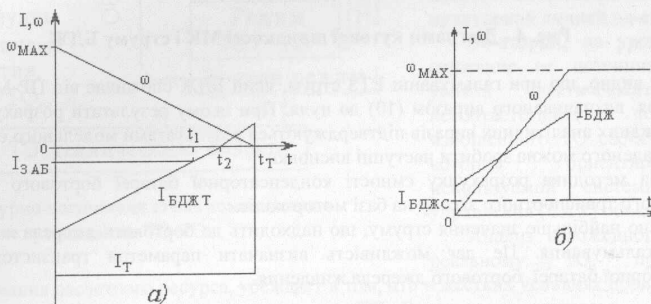


Рис. 3 - Діаграми кутової швидкості МК і струму БДЖ при гальмуванні ЕТЗ (а) і при розгоні ЕТЗ (б)

Враховуючи те, що напруга на клеммах АБ є постійною можна стверджувати, що потужність електричної енергії, споживаної БДЖ, при гальмуванні ЕТЗ буде пропорційна струму  $I_{БДЖ}$  та графік залежності  $P_{ЕЛ}(t)$  відрізнятиметься від графіка  $I_{БДЖ}(t)$  тільки масштабом.

Таким чином, при гальмуванні ЕТЗ струм, що надходить в БДЖ зменшується від максимального значення до нуля в кінці процесу гальмування. Наприклад, при гальмуванні ЕТЗ масою 7000кг з прискоренням  $1m/c^2$  необхідно створити гальмівний момент  $M_T = 2625Nm$ . В результаті, при напрузі акумуляторної батареї  $U_{AB}=350V$  струм, що надходить в БДЖ на початку процесу гальмування досягатиме значення  $I_{БДЖТ MAX} = 346,6A$ . З урахуванням цього значення струму необхідно вибирати елементи, що входять до складу перетворювача ПР-КБ.

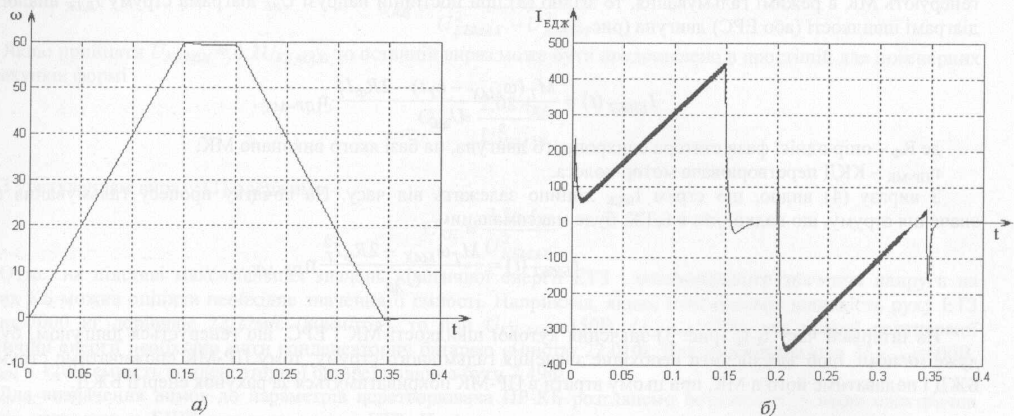
При пуску ПР-МК обмежує струм МК на рівні  $I_{ОТС}$ . Тому розгін ЕТЗ відбувається з постійним значенням пускового моменту  $M_{ПТ}=M_{ОТС}$ , і швидкість двигуна збільшується від 0 до  $\omega_{MAX}$  з кутовим прискоренням  $\varepsilon_{П}(t)$ . При цьому значення струму, споживаного з БДЖ

$$I_{БДЖ}(t) = \frac{(C_E \varepsilon_{П}(t)t + 2R_\Phi I_{ОТС}) I_{ОТС}}{U_{AB} \eta_{ПР-МК}},$$

На рис. 3, б показані діаграми кутової швидкості МК і струму, споживаного з БДЖ при розгоні ЕТЗ.

У середовищі математичного моделювання Matlab-Simulink з використанням пакету SimPowerSystems була розроблена математична модель системи БДЖ-ШПП-Д. Ця модель використовувалася для дослідження струму БДЖ ( $I_{БЖД}$ ) в режимах пуску і гальмування двигуна. Для того щоб зменшити час модельного експерименту з 5 годин до 5 хвилин момент інерції механізму було штучно зменшено приблизно у 164 рази, що дозволило зменшити час розгону і гальмування з 22,22с до 0,15с. При цьому значення струму і моменту, що розвиває двигун відповідають об'єкту моделювання. Результати моделювання подані на рис. 4. З діаграми кутової швидкості мотор-колес (рис. 4, а) виходить, що максимальній швидкості руху ЕТЗ відповідає максимальна

кутова швидкість МК дорівнює 59,25р/с. Діаграма струму БДЖ (рис. 4, б) показує, що при розгоні ЕТЗ струм, що споживає ПР-МК зростає від початкового значення, яке визначається виразом (8) до кінцевого значення, визначуваного виразом (9).



**Рис. 4 - Діаграми кутової швидкості МК і струму БДЖ**

З рис.4, б також видно, що при гальмуванні ЕТЗ струм, який БДЖ споживає від ПР-МК зменшується від початкового значення, визначуваного виразом (10) до нуля. При цьому результати розрахунків, проведених з використанням одержаних аналітичних виразів підтверджуються результатами модельного експерименту.

На підставі викладеного можна зробити наступні висновки.

1. Розроблена методика розрахунку ємності конденсаторної батареї бортового джерела живлення електричного транспортного засобу на базі мотор-коліс.
2. Встановлено найбільше значення струму, що надходить до бортового джерела живлення на початку процесу гальмування. Це дає можливість визначати параметри транзисторів перетворювача конденсаторної батареї бортового джерела живлення.

#### **Література**

1. Вершинін Д.В., Водічев В.А., Войтенко В.А., Смотров Є.О. Багатодвигунний автоматизований електропривод електромобіля// Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Науково-виробничий журнал. \_ Одеса: ОНАХТ. – 2010.– №1. – С.39 – 44.
  2. A.Imayanagita, T.Kiriya, M.Arimura, M.Navamura. Development of In-wheel Motor System for Large-size Bus using 22.5 inch Wheel Mounted Motor. 2006.
  3. T.Gage. The ZEV Technology Objectiv: Transportation Without Petroleum. CARB ZEV Technology Simposium. Sacramento,CA. Sept.2006.
- УДК 621.18:66.096

## **О РЕЗЕРВЕ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКИ**

**Воинова С. А., канд. техн. наук, доцент  
Одесская национальная академия пищевых технологий**

*Викладено резерви підвищення технологічної ефективності технічних об'єктів, що управляються автоматично.*

*Изложены резервы повышения технологической эффективности технических объектов, управляемых автоматически.*

*The reserves of increase of technological efficiency of technical objects controlled automatically are stated.*

Ключевые слова: резервы, технический объект, управление, технологическая эффективность, повышение.

Исходный уровень технологической эффективности (ТЭ) технического объекта (ТО) формируется в процессе его создания, состоящем из трех этапов: этапа выбора технологии заданного производственного