

ТЯГОВА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ТРОЛЕЙБУСА У РАЗІ ЖИВЛЕННЯ ВІД НИЗЬКОВОЛЬТНОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПІДВИЩУВАЛЬНОГО DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

С.М. Ковбаса^{1*}, докт. техн. наук, Ю.В. Вербовий^{1**}, К.А. Гупалов²

¹ Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

² ТОВ «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС»,
вул. Москаленка Сергія, 16-г/19, м. Бровари, Київська обл., 07403, Україна.
E-mail: skovbasa@ukr.net; yurii.verbovyi@gmail.com.

Роботу присвячено визначенню досяжних характеристик тягової електромеханічної системи односекційного тролейбуса за живлення від низьковольтної батареї в режимі автономного ходу. Проаналізовано особливості використання підвищувального DC/DC перетворювача для живлення векторно-керованого асинхронного електроприводу тролейбуса під час роботи в маневровому режимі за умови використання як первинного джерела енергії бортової акумуляторної батареї напругою 48 В. Показано, що силова частина підвищувального DC/DC перетворювача за вказаного застосування може бути реалізована з використанням штатної схеми вхідної частини перетворювача тягового електроприводу. Представлено алгоритми керування напругою ланки постійного струму та прямого векторного керування моментом і модулем вектора потокозчеплення, які можуть бути застосовані задля реалізації маневрового режиму руху тролейбуса. Запропоновану електромеханічну систему досліджено методом математичного моделювання з врахуванням широтно-імпульсної модуляції в DC-DC перетворювачі, а також параметрів односекційного тролейбуса і зусиль опору його руху. Показано, що у разі обмеження струму батареї на рівні 200 А та стабілізації напруги ланки постійного струму (вихідної напруги DC/DC перетворювача) на рівні 250 В ненавантажений тролейбус по рівній асфальтованій поверхні здатен досягти швидкості 12 км/год. Результати дослідження досяжної швидкості транспортного засобу за різних значень обмеження струму батареї та рівня завдання напруги ланки постійного струму також представлено в роботі. Результати виконаних досліджень можуть бути використані під час розробки нових та модернізації існуючих електромеханічних систем тролейбусів. Бібл. 11, рис. 8.

Ключові слова: підвищувальний DC/DC перетворювач, автономний хід, тролейбус, тяговий електропривод, асинхронний двигун, векторне керування.

Вступ. Сучасні системи векторного керування асинхронними двигунами (АД) на сьогодні стали стандартним рішенням в тягових електроприводах (ТЕП) міського електротранспорту з живленням від контактної мережі, зокрема тролейбусів. У порівнянні із загальнопромисловими електроприводами особливостями ТЕП є розширений допустимий діапазон напруги живлення від контактної мережі, що складає, як правило, від 400 до 720 В постійної напруги, а також можливість функціонування в режимі автономного ходу за живлення від низьковольтної (від 48 В до 96 В) або високовольтної (від 500 В до 700 В) акумуляторної батареї [1].

Спрощену функціональну схему тягового електроприводу тролейбуса наведено на рис. 1. На відміну від класичного загальнопромислового перетворювача частоти з ланкою постійного струму, на вході якого стоїть діодний випрямляч, у даній схемі постійна напруга контактної мережі подається в ланку постійного струму через транзисторний вхідний міст. Основним призначенням цього моста є забезпечення можливості заборони/дозволу рекуперації електричної енергії в контактну мережу під час генераторних режимів роботи тягового двигуна. Тобто в стандартній схемі живлення від контактної мережі транзистори Q1–Q4 комутуються в статичному режимі без використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Використання чотирьох транзисторів зумовлено тим, що в загальному випадку полярність напруги контактної мережі може змінюватися в залежності від ділянки руху. Дросель L1 забезпечує обмеження швидкості наростання струму мережі, в тому числі в аварійних режимах.

© Ковбаса С.М., Вербовий Ю.В., Гупалов К.А., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-2954-455X>; ** <https://orcid.org/0009-0001-7032-9536>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

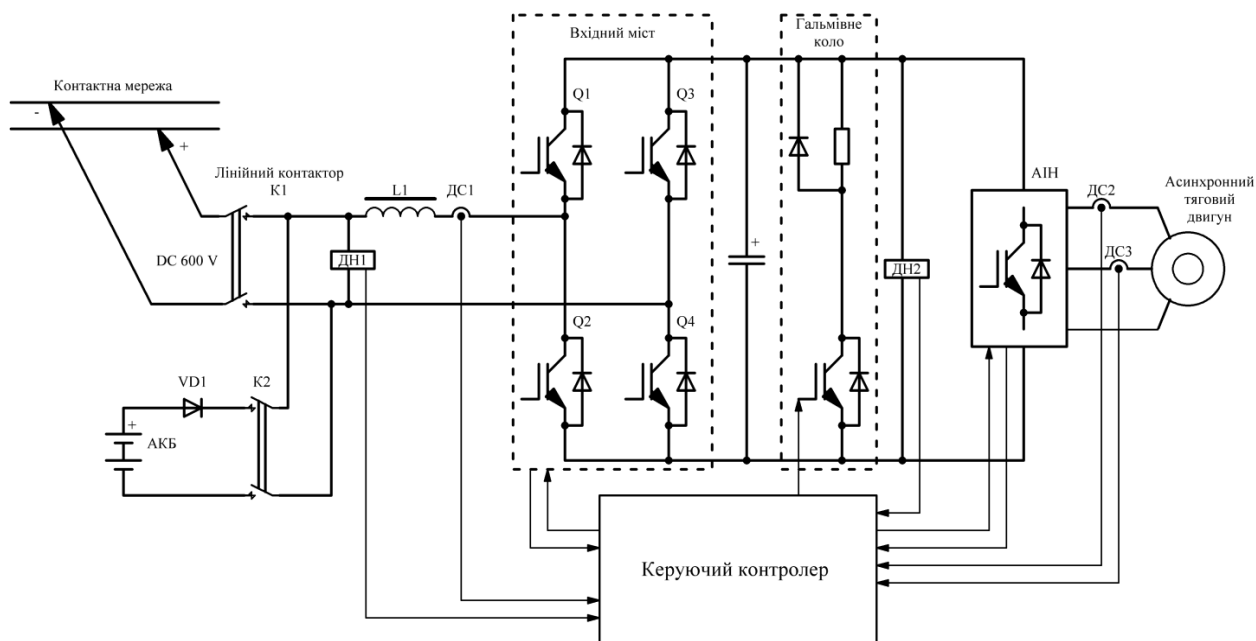


Рис. 1

В роботі розглядається стандартне виконання силової частини тролейбуса, в якому рекуперація енергії в АКБ не передбачається, тому батарея автономного ходу (БАХ) підключається до ланки постійного струму перетворювача через додатковий діод VD1 задля уникнення попадання високої напруги ланки постійного струму в режимах гальмування тягового двигуна.

У разі використання високовольтної АКБ режими роботи ТЕП фактично не відрізняються від режимів під час роботи від контактної мережі, за винятком необхідності обмеження потужності, що споживається від БАХ з метою уникнення її перегріву.

Пряме використання системи векторного керування АД з живленням від низьковольтної БАХ одразу викликає ряд суттєвих ускладнень, які зумовлені тим, що тяговий двигун має номінальну напругу близько 400 В (що фактично відповідає напрузі ланки постійного струму близько 550 В), а його номінальна швидкість досягається за лінійної швидкості транспортного засобу близько 27 км/год. Після досягнення номінальної швидкості система векторного керування переходить в режим роботи з обмеженням по напрузі та використовує алгоритми ослаблення поля задля досягнення швидкостей вище номінальних. У випадку використання БАХ з напругою 48 В обмеження напруги настає вже за швидкості близько 2.5 км/год, в той час як у більшості технічних вимог до тролейбусів максимальна швидкість в режимі низьковольтного автономного ходу вказується на рівні 10 км/год [2]. Наявність в системі керування жорстких обмежень додатково ускладнюється ефектами немодельованої динаміки, які завжди присутні в реальній системі. До них в першу чергу слід віднести ефекти мертвого часу інвертора (в тролейбусному перетворювачі потужністю 200 кВт мертвий час складає близько 4 мкс), вимірювальні шуми, неідеальності двигуна. В сукупності ці додаткові неконтрольовані збурення призводять до значних труднощів забезпечення стійкості системи векторного керування в умовах дії жорстких обмежень по напрузі.

Застосування розімкнених методів керування моментом АД також не дає бажаного результату, оскільки не забезпечує необхідного рівня моменту в зоні низьких швидкостей та необхідної плавності руху через відомі недоліки розімкненого керування координатами АД.

Можливим варіантом виходу з цієї ситуації є використання наявного в основній схемі тролейбуса вхідного мосту в режимі підвищувального DC/DC перетворювача. Підвищувальні DC/DC перетворювачі мають широке застосування в електротранспорті з батарейним живленням [3, 4] та розвинені методи керування [5]. Разом з тим, в даній схемі наявність діода VD1 не дає можливості забезпечити зарядний струм батареї, що накладає певні обмеження на функціонування системи живлення на основі підвищувального DC/DC перетворювача.

Метою даної роботи є дослідження досяжних характеристик системи векторного керування тяговим асинхронним електроприводом за живлення від БАХ напругою 48 В з використанням підвищувального DC/DC перетворювача.

Результати дослідження. Схема однонаправленого підвищувального DC/DC перетворювача (а), еквівалентні схеми заміщення (б, в), часові діаграми напруг та струмів (г – ж) наведені на рис. 2. Основними елементами схеми є: джерело живлення E , накопичувальний дросель L_1 , комутуючий елемент (транзистор) $Q1$, діод VD , вихідна ємність перетворювача C , навантаження R .

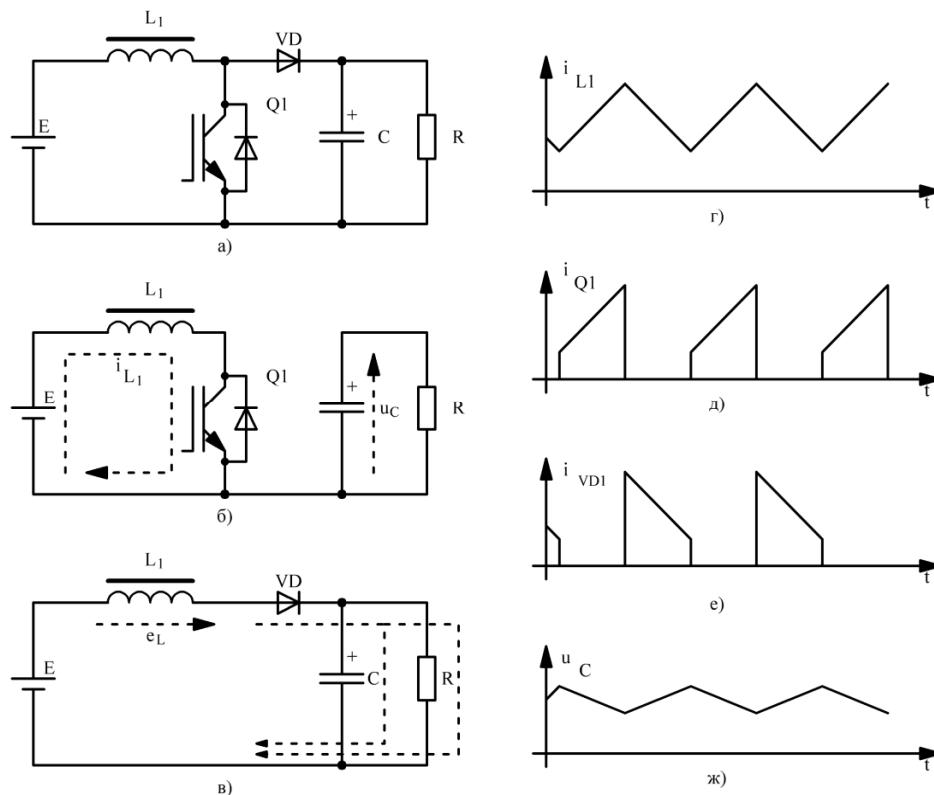


Рис. 2

Принцип роботи підвищувального перетворювача та основні розрахункові співвідношення представлені у багатьох роботах, наприклад, [6]. Процеси у схемі на періоді ШІМ зручно розглядати в межах двох послідовних інтервалів: на першому інтервалі (а, б) ключ замкнений, на другому (рис. 2, в) – розімкнений.

На першому інтервалі через замкнений ключ $Q1$ індуктивність L_1 підключається до джерела живлення. Струм i_{L1} (рис. 2, г) так і струм ключа i_{Q1} (рис. 2, д) наростає від деякого мінімального значення на початку інтервалу до деякого максимального значення в кінці інтервалу. При цьому в індуктивності L_1 запасается енергія. Діод VD на першому інтервалі знаходиться в непровідному стані під дією зворотної напруги, що дорівнює напрузі u_C на конденсаторі вихідного фільтра C . Навантаження відключене від джерела живлення закритим діодом так, що струм у навантаженні підтримується лише струмом розряду конденсатора C .

На другому інтервалі ключ знаходиться в непровідному стані. Відповідно до першого закону комутації, струм через індуктивність L_1 продовжує протікати в тому ж напрямку. Відкриваючи діод VD , струм потрапляє в коло конденсатора вихідного фільтра C та в контур навантаження. Завдяки тому, що ЕРС самоіндукції індуктивності e_L сумується з вхідною напругою E , напруга u_C на виході підвищувального перетворювача виявляється більшою за величиною, ніж напруга E на його вході.

У міру того як енергія, запасена в індуктивності L_1 на попередньому інтервалі, віддається в навантаження, струм i_{L1} (рис. 2, г) зменшується, а вихідна напруга u_C збільшується (рис. 2, ж). На момент закінчення другого інтервалу струм i_{L1} знижується до початкового для першого інтервалу мінімального значення, тоді як напруга u_C досягає максимальної величини.

У разі роботи перетворювача в режимі нерозривних струмів та через нехтування паразитними параметрами елементів схеми співвідношення між вхідною та вихідною напругами перетворювача визначається як

$$V_o = E/(1-D), \quad (1)$$

де V_o – вихідна напруга перетворювача; D – шпаруватість імпульсів керування, $D = t_{on} / T_s$, де t_{on} – тривалість включеного стану силового ключа, $T_s = 1/F_s$ – період повторення імпульсів, що подаються на силовий ключ, F_s – частота імпульсів керування силовим ключем.

Незважаючи на значний розвиток методів керування напругою ланки постійного струму DC/DC перетворювачів, повного вирішення проблеми керування таким об'єктом до цього часу не знайдено. Існуючі рішення ґрунтуються на суттєвих спрощуючих припущеннях, оскільки математична модель підвищувального DC/DC перетворювача є немінимально-фазовою [8]. Цей факт не дає змоги за допомогою стандартних підходів отримати високі динамічні показники регулювання вихідної напруги в ланці постійного струму. В рамках дослідження використано нелінійну математичну модель DC/DC перетворювача [7]

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C} \left(\frac{ui}{V_{dc}} - i_L \right), \quad (2)$$

$$\dot{i} = -\frac{R}{L}i + \frac{E}{L} - \frac{1}{L}u, \quad (3)$$

де i – вхідний струм; L , R – індуктивність та внутрішній опір дроселя; E – ЕРС джерела живлення; C – вихідна ємність перетворювача; i_L – струм навантаження; $u = V_{dc}p/2$ – керуючий вплив; p – функція перемикачів перетворювача.

Задля керування координатами DC/DC перетворювача, заданого математичною моделлю у вигляді рівнянь (2), (3), використано результат роботи [8], який ґрунтується на використанні принципу розділення в часі процесів регулювання напруги та струму. Задля цього використовуються два ПІ регулятори [9]:

– ПІ-регулятор струму

$$u = E - Ri^* + L(k_{ii}\tilde{i} - \dot{x}_i), \quad (4)$$

$$\dot{x}_i = -k_{ii}\tilde{i},$$

де $k_{ii} > 0$, $k_{ii} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму; $\tilde{i} = i - i^*$ – похибка відпрацювання струму; i^* – заданий струм;

– ПІ-регулятор напруги

$$\dot{i}^* = -\frac{C}{2E}(k_v\tilde{z} - \dot{x}), \quad (5)$$

$$\dot{x} = -k_v\tilde{z},$$

де $k_v > 0$, $k_{vi} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора напруги; $\tilde{z} = V_{dc}^2 - V_{dc}^{*2} = z - z^*$ – похибка відпрацювання квадрату напруги, V_{dc}^* – задана вихідна напруга.

Під час налаштування системи зазвичай k_{ii} , k_{ii} обирають «великими», тобто такими, щоб забезпечувати розділення в часі процесів регулювання напруги та струму на рівні $\omega_{oi} > (3 \div 4)\omega_{ov}$, де власні частоти недемпфованих коливань ізольованих підсистем (контурів) струму та напруги визначаються як: $\omega_{oi}^2 = k_{ii}$, $\omega_{ov}^2 = k_{vi}$ [9].

Дослідження динамічних процесів у разі керування координатами системи (2), (3) за допомогою регуляторів (4), (5) виконано методом математичного моделювання з врахуванням ШІМ. Під час дослідження використано параметри, що відповідають реальному перетворювачу тролейбуса: індуктивність дроселя $L = 900$ мкГн, внутрішній опір $R = 0.01$ Ом, ємність конденсатора ланки постійного струму $C = 3600$ мкФ. Частота ШІМ становить 3 кГц, величина вхідної напруги складає 48 В.

Для алгоритму керування DC/DC перетворювачем прийнято наступні коефіцієнти регулятора напруги: $k_v = 100$, $k_{vi} = k_v^2/2 = 5000$ та регулятора струму: $k_{ii} = 1000$, $k_{ii} = k_i^2/2 = 500000$. Тест виконано за наступних умов: в початковий момент часу виконується формування вихідної напруги з початкового значення 48 В (відповідає напрузі БАХ) до заданого рівня $V_{dc}^* = 250$ В за час 0.5 с, потім відбувається прикладання ($t = 0.6$ с) та зняття ($t = 0.8$ с) струму навантаження величиною 40 А, в мо-

мент часу ($t = 1$ с) відбувається прикладання від'ємного струму навантаження величиною 40 А, а в момент часу ($t = 1.25$ с) – його зняття. Величину струму навантаження обрано так, щоб формувати вихідну потужність на рівні 10 кВт, що, як буде показано далі, відповідає параметрам руху незавантаженого тролейбуса на швидкості близько 10 км/год.

З рис. 3 видно, що алгоритм (4), (5) в класичній схемі (рис. 2) забезпечує асимптотичне регулювання напруги, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{V}_{dc} = 0$, а також асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії струму, тобто виконується умова $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i} = 0$.

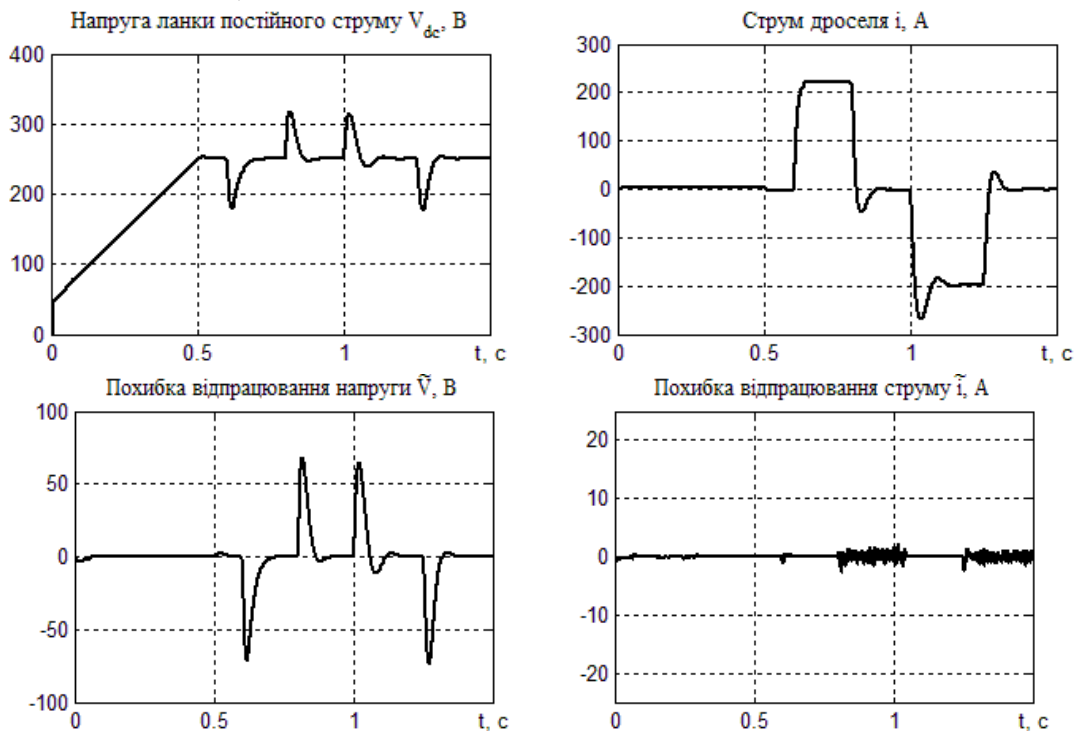


Рис. 3

Зі спрощеної функціональної схеми тягового електроприводу (рис. 1) видно, що він містить всі необхідні компоненти задля реалізації підвищувального DC/DC перетворювача в умовах рухомого складу. За допомогою контактора К1 електропривод відключається від контактної мережі, а за допомогою контактора К2 до вхідного мосту підключається низьковольтна БАХ.

Під час роботи схеми в режимі підвищення напруги дросель L_1 використовується як накопичувальний елемент. Відповідно до рис. 1, задля реалізації системи стабілізації напруги V_{dc} струм індуктивності вимірюється наявним в схемі давачем струму мережі ДС1, вхідна напруга вимірюється штатним давачем напруги контактної мережі ДН1, вимірювання напруги ланки постійного струму здійснюється за допомогою давача ДН2.

Еквівалентну схему вхідної частини перетворювача під час проходження фази накопичення енергії наведено на рис. 4, а. У цій фазі дросель L_1 за допомогою включених транзисторів Q2 та Q3, а також антипаралельних діодів транзисторів Q1 та Q4 підключається до акумуляторної батареї, струм в індуктивності починає наростати, і в дроселі накопичується енергія. В цей час автономний інвертор напруги (АІН), який є навантаженням DC/DC перетворювача, отримує енергію від конденсатора ланки постійного струму.

Еквівалентну схему вхідної частини перетворювача на інтервалі віддачі енергії наведено на рис. 4, б. У цій фазі дросель L_1 за допомогою антипаралельних діодів закритих транзисторів Q1 та Q4 підключається до конденсаторів ланки постійного струму, і енергія, накопичена в дроселі у попередній фазі роботи, переходить в конденсатор, що призводить до збільшення напруги ланки постійного струму.

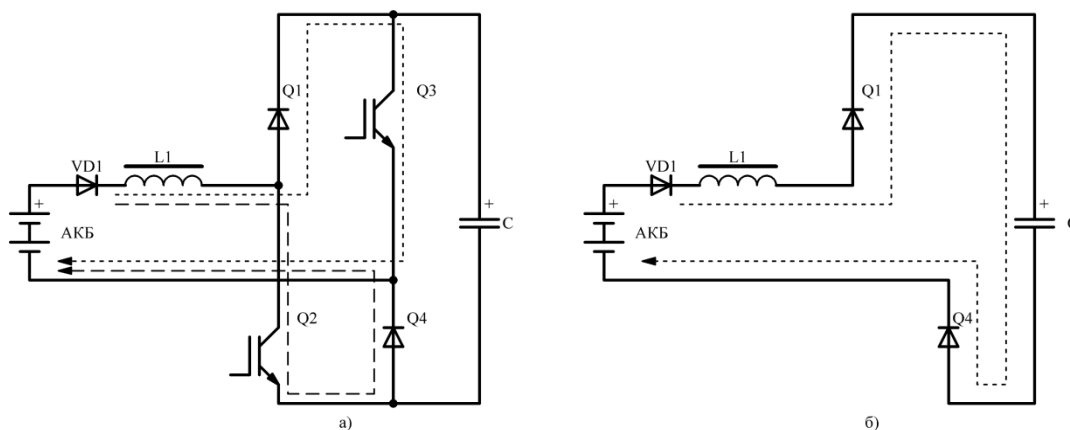


Рис. 4

Задля дослідження впливу діода VD1 на якість перехідних процесів стабілізації напруги ланки постійного струму методом математичного моделювання за умов, аналогічних до рис. 3, виконано моделювання роботи перетворювача з наявним діодом VD1. Результати дослідження показано на рис. 5, звідки встановлюємо, що діод VD1 унеможливує протікання від'ємного струму через дросель L_1 , що, в свою чергу, призводить до незначного погіршення якості регулювання напруги в динаміці під час прикладання додатного струму навантаження та унеможливує стабілізацію напруги на заданому рівні 250 В під час скидання струму навантаження або дії від'ємних струмів навантаження. Тому в режимі рекуперації ТЕП енергія в такій конфігурації вхідного кола розсіюється на гальмівному резисторі R_{br} (рис. 1) з встановленим обмеженням напруги ланки постійного струму на рівні 700 В.

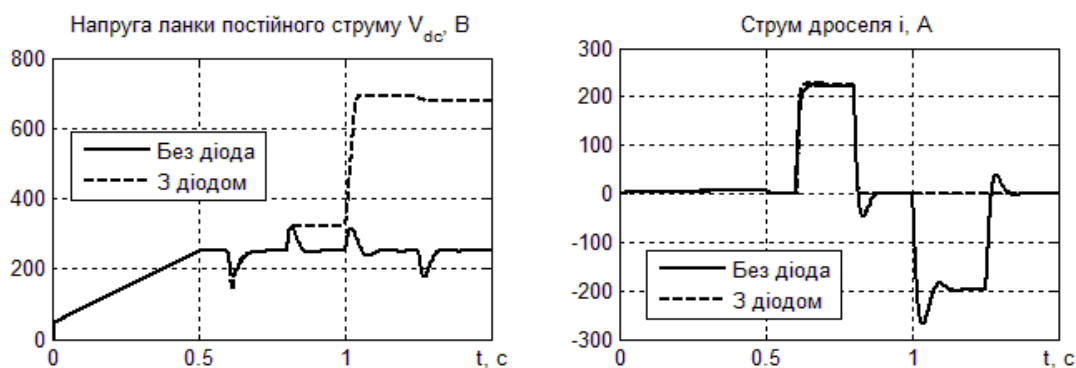


Рис. 5

Алгоритм прямого векторного керування моментом та модулем вектора потокозчеплення АД. Базуючися на концепції прямого полеорієнтування, алгоритм керування моментом і модулем вектора потокозчеплення задається наступними рівняннями [10]:

– регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$\begin{aligned} i_d^* &= (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi e_\psi - x_\psi) / \alpha L_m, \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} e_\psi; \end{aligned} \quad (6)$$

– спостерігач модуля вектора потокозчеплення

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}} &= -\alpha \hat{\psi} + \alpha L_m i_d, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_q}{\hat{\psi}}; \end{aligned} \quad (7)$$

– регулятори струмів

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_d^* - \alpha \beta \hat{\psi} + \dot{i}_d^* - k_i \tilde{i}_d + x_d), \\ \dot{x}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma(\gamma i_q^* + \omega_0 i_q^* + \beta \omega p_n \hat{\psi} + \dot{i}_q^* - k_i \tilde{i}_q + x_q), \\ \dot{x}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q; \end{aligned} \quad (9)$$

– регулятор моменту

$$\dot{i}_q^* = \frac{1}{\mu_1} \frac{M^*}{\psi^*}, \quad \hat{\psi} > 0, \quad \dot{i}_q^* = \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right), \quad (10)$$

де $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$; $\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$; $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}$; $\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m$; $\mu_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2}$; R_1, R_2 і L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно; L_m – індуктивність контуру намагнічування; p_n – число пар полюсів, i_d^*, i_q^* – завдання на струм збудження та моментоутворюючий струм статора; ω – кутова швидкість ротора; u_d, u_q – компоненти вектора керуючої напруги статора; ε_0, ω_0 – кутове положення та швидкість обертання синхронної системи координат (d-q) по відношенню до стаціонарної (a-b); $\hat{\psi}$ – оцінка модуля вектора потокозчеплення ротора; ψ^* – задане потокозчеплення ротора; M^* – заданий момент двигуна; $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*, \tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ – похибки відпрацювання струмів статора; $e_\psi = \hat{\psi} - \psi^*$ – похибка відпрацювання оціненого потокозчеплення; $(k_\psi, k_{\psi i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора потокозчеплення; $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

Алгоритм векторного керування АД, заданий рівняннями (6) – (10), забезпечує [10]: асимптотичне полеорієнтування керування за вектором потокозчеплення ротора, асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та модуля вектора потокозчеплення, асимптотичну розв'язку процесів керування моментом та модулем вектора потокозчеплення ротора.

У відповідності до рис. 1 збудженням DC/DC перетворювача є струм навантаження i_L , який необхідно розраховувати для поточних значень вихідної напруги перетворювача V_{dc} та активної потужності P_a , що споживається електроприводом

$$i_L = P_a / V_{dc}. \quad (11)$$

Під дією струму збудження, а також через наявність струмообмеження в алгоритмі керування DC/DC перетворювачем його вихідна напруга, тобто напруга ланки постійного струму V_{dc} , може змінюватися, тому в алгоритм керування моментом необхідно ввести обмеження модуля напруги статора. Через те, що напруга статора за віссю d відповідає за регулювання струму збудження АД, обмеження відбувається по осі q згідно виразу

$$u_q \leq u_{q\max} = \sqrt{V_{dc}^2 / 3 - u_d^2}. \quad (12)$$

Тестування композитної системи, що складається з підвищувального DC/DC перетворювача, зібраного за схемою рис. 1, і ТЕП, що від нього живиться, виконано методом математичного моделювання для односекційного тролейбуса довжиною 12 м з наступними параметрами [11]: порожня маса тролейбуса у спорядженому стані 11860 кг, максимальна маса тролейбуса 19000 кг, максимальна швидкість руху не менше 55 км/год, час розгону повністю завантаженого тролейбуса до швидкості 45 км/год не більше 18 с, загальне передавальне число механічної передачі 9.871.

Тролейбус оснащений тяговим асинхронним двигуном типу ДТА – 2У1 з наступними параметрами: номінальна потужність на валу 180 кВт ($s_2 = 60$ хв), частота напруги живлення 50 Гц, номінальна синхронна частота обертання 1500 об/хв, максимальна частота обертання 4000 об/хв, число пар полюсів 2, індуктивність намагнічуючого контуру $L_m = 0.006621$ Гн, індуктивність розсіювання статора $L_{1\sigma} = 0.000308$ Гн, індуктивність розсіювання ротора $L_{2\sigma} = 0.000306$ Гн, активний опір статора $R_1 = 0.0196$ Ом, активний опір ротора $R_2 = 0.00859$ Ом. Під час дослідження враховано зусилля тертя кочення та зусилля аеродинамічного опору руху тролейбуса.

Тестування композитної системи виконано згідно наступної послідовності операцій керування:

– в початковий момент часу виконується формування вихідної напруги DC/DC перетворювача з початкового значення 48 В до заданого рівня 250 В за час 0.5 с;

- в момент часу 1 с розпочинається збудження двигуна по заданій траєкторії потокозчеплення, яка досягає значення $\psi^* = 0.9$ Вб за 1 с;
- в момент часу 2.5 с розпочинається відпрацювання заданої траєкторії моменту на розгін з максимальним значенням 500 Нм, часом наростання та спадання 0.5 с;
- в момент часу 16 с розпочинається відпрацювання заданої траєкторії моменту на гальмування з максимальним значенням -500 Нм, часом наростання та спадання 0.5 с;
- час прикладання трапеції моменту на розгін та гальмування підібрано таким чином, щоб під час розгону тролейбус досягав швидкості 9 км/год, а при гальмуванні швидкість знижувалася до нуля.

Задля керування гальмівним транзистором використано релейний регулятор напруги. Опір резистора розрядного кола складає 5 Ом, напруга включення гальмівного ключа складає 700 В, напруга відключення гальмівного ключа – 680 В.

Параметри регуляторів системи прямого векторного керування моментом АД наступні: регулятор потоку: $k_\psi = 200$, $k_{\psi i} = k_\psi^2 / 2 = 20000$, регулятори струму: $k_i = 500$, $k_{ii} = k_i^2 / 2 = 125000$.

Перехідні процеси в алгоритмі прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна та в алгоритмі керування DC/DC перетворювачем наведено на рис. 6 та 7.

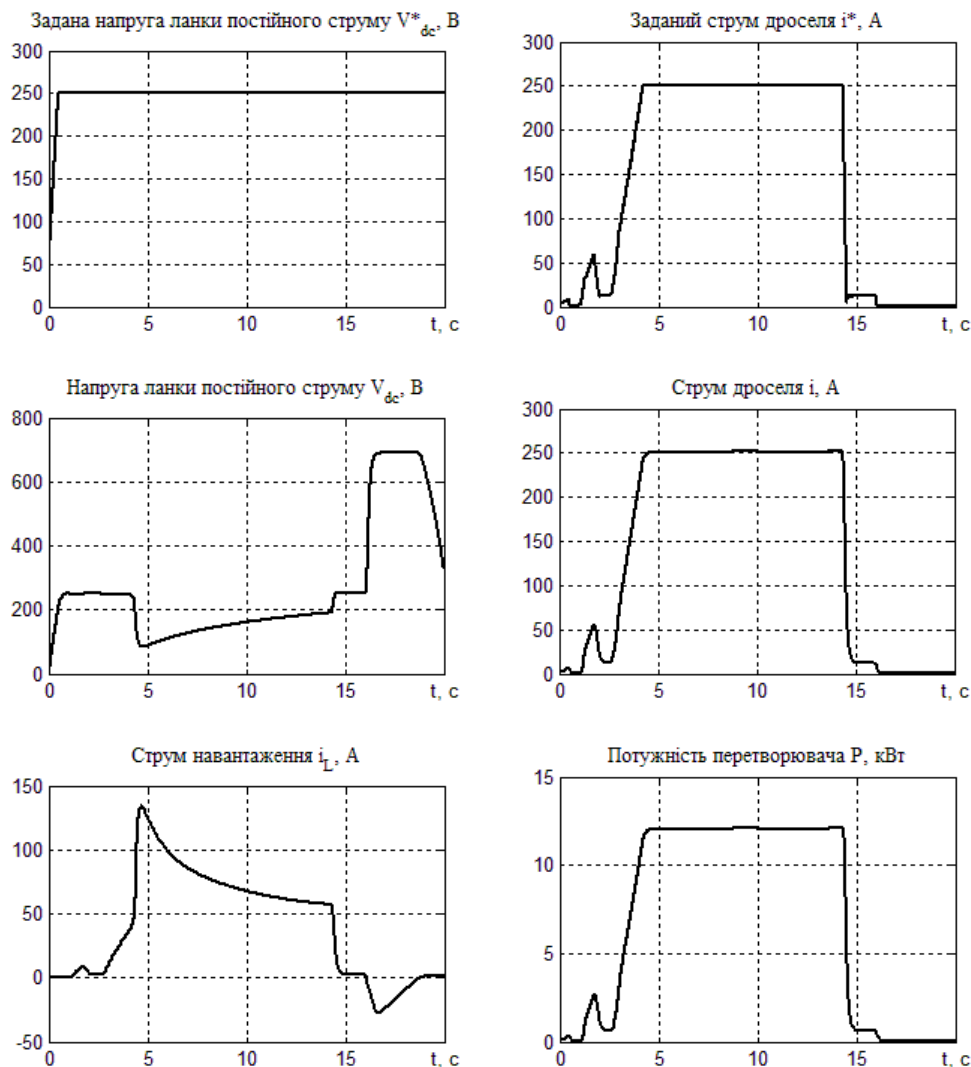


Рис. 6

Як випливає з графіків рис. 6 та 7, DC/DC перетворювач забезпечує стабілізацію напруги ланки постійного струму на етапі збудження АД. Відпрацювання заданої траєкторії моменту призводить до швидкого входження системи керування DC/DC перетворювачем в режим струмообмеження

(встановлено на рівні 250 А), що, в свою чергу, призводить до зменшення напруги ланки постійного струму до рівня 100В. Внаслідок настання обмеження напруги у відповідності до виразу (12), моментотворююча складова струму статора починає зменшуватися оберненопропорційно до швидкості двигуна, що призводить до поступового зменшення струму навантаження DC/DC перетворювача. Як наслідок, в умовах дії струмообмеження вихідна напруга DC/DC перетворювача також підвищується по мірі наростання швидкості.

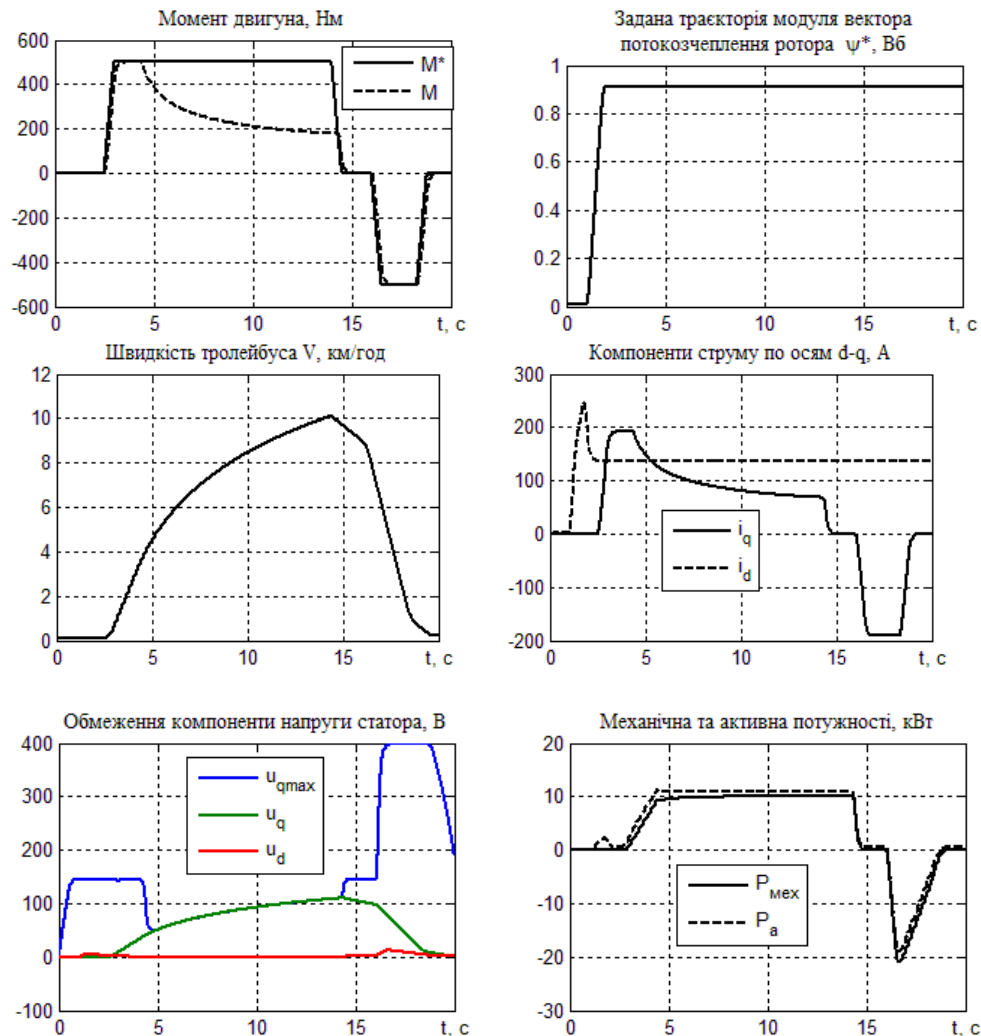


Рис. 7

Разом з тим, зменшення моменту створює додатковий момент струму, який призводить до зменшення моменту, тому на рух транспортного засобу будуть суттєво впливати збурюючі фактори: ухил дорожнього покриття, сили тертя кочення та аеродинамічного опору.

В режимі вибігу регулятор напруги ланки постійного струму виходить з режиму струмообмеження і забезпечується її стабілізація. Під час гальмування АД переходить в режим рекуперації. Через те, що наявність діоду VD1 не дає можливості повертати енергію в батарею, напруга V_{dc} зростає до рівня 700 В, де відбувається її стабілізація за рахунок роботи гальмівного транзистора. Система векторного керування АД при цьому працює в режимі без обмежень по напрузі.

Зазначимо, що активна потужність на виході інвертора під час розгону АД знаходиться на рівні близько 10 кВт.

Задля визначення досяжних швидкостей руху тролейбуса за різних комбінацій величини задання напруги ланки постійного струму та обмеження струму з низьковольтної БАХ, було проведено окрему серію тестів, під час яких досліджувався процес розгону тролейбуса з заданням на момент на рівні 500 Нм. Тести проводилися за умов руху ненавантаженого тролейбуса по рівній асфальтованій ділянці дороги. Кінцевою швидкістю вважалася швидкість, за якій динамічний момент ставав рівним нулю, тобто тролейбус переставав розганятися під дією сил тертя кочення та аеродинамічного опору.

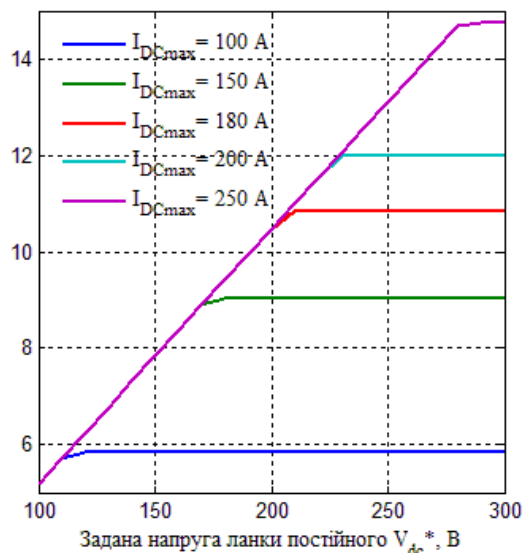


Рис. 8

Результати моделювання наведено на рис. 8, з якого випливає, що за умов струмообмеження DC/DC перетворювача на рівні 200 А та напруги ланки постійного струму 250 В можна досягти швидкості 12 км/год, чого цілком достатньо для реалізації маневрового режиму руху транспортного засобу [2].

Висновки. В результаті дослідження методом математичного моделювання тягового електроприводу тролейбуса за живлення від низьковольтної акумуляторної батареї з використанням підвищувального DC/DC перетворювача отримано залежності досяжних швидкостей руху тролейбуса за різних комбінаціях величини завдання напруги ланки постійного струму та обмеження струму з низьковольтної батареї автономного ходу. Зокрема встановлено, що за умов руху односекційного тролейбуса довжиною 12 м по рівному асфальтобетонному покриттю система дає змогу досягти швидкості руху 12 км/год у разі завдання напруги ланки постійного струму $V_{dc}^* = 250 \text{ В}$ та за обмеженні струму батареї автономного ходу на рівні 200 А. Досяжної швидкості

цілком достатньо для реалізації маневрового режиму руху транспортного засобу.

Отримані залежності дають можливість забезпечити вибір необхідної ємності (і відповідно максимально допустимого струму) тягової батареї в залежності від заданої швидкості руху в режимі автономного ходу тролейбуса.

Показано, що наявності діода між батареєю автономного ходу та ланкою постійного струму призводить до нехтувано малого погіршення якості стабілізації напруги в русійному режимі, проте не викликає втрати стійкості в розглянутих режимах роботи тягового електроприводу.

Подальшим розвитком запропонованої системи може бути виключення захисного діода між батареєю автономного ходу та ланкою постійного струму, а також модифікація алгоритму керування комутацією транзисторів Q1–Q4 з метою організації схеми двонаправленого DC/DC перетворювача і забезпечення керованої рекуперації енергії в батарею автономного ходу.

Запропоноване рішення може бути основою для реалізації режиму автономного ходу в нових та модернізованих одиницях рухомого складу тролейбусів. Його перевагою є можливість реалізації на існуючій в транспортному засобі елементній базі без зміни схеми вхідних кіл штатного перетворювача.

1. Diez A. E., Bohórquez A., Velandia E., Roa L. F., Restrepo M. Modern trolleybuses on bus rapid transit: Key for electrification of public transportation. *IEEE ANDESCON*. 2010. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2010.5633684>.
2. State Standard of Ukraine 4905:2008. Wheeled vehicles. Passenger trolleybuses. General technical requirements. NDKTI MG. 2008.
3. Rachid A., Fadil H. E., Belhaj F. Z., Gaouzi K., Giri F. Lyapunov-based control of single-phase AC-DC power converter for BEV charger. *International Conference on Electrical and Information Technologies*. 2017. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/EITech.2017.8255296>.
4. Sandhya P., Nisha G. K. Review of battery charging methods for electric vehicle. *IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems*. 2022. Pp. 395-400. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPICES52834.2022.9774068>.
5. Forouzesh M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A., Blaabjerg F., Lehman B. Step-up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32. No 12. Pp. 9143-9178. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>.
6. Bose B. K. Modern power electronics and AC drives. 2002. 738 p.
7. Caliskan V. A., Verghese O. C., Stankovic A. M. Multifrequency averaging of DC/DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1999. Vol. 14. No 1. Pp. 124-133. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.737600>.
8. Peresada S., Kovbasa S., Pristupa D., Pushnitsyn D., Nikonenko Y. Nonlinear control of voltage source AC-DC and DC-DC boost converters. *Bulletin of National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. "Problems of Automated Electric Drives. Theory and Practice"*. 2017. No. 27. Pp. 84-88.
9. Peresada S., Nikonenko Y., Kovbasa S., Kuznetsov O., Lukyanchikov A. Design of cascaded voltage control systems of bidirectional DC-DC buck-boost converters. *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 1. Pp. 27-36. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.027>. (Ukr).
10. Peresada S. M., Kovbasa S. N., Bovkunovych V. S. Robust vector control of torque and flux in induction motor. *Technical electrodynamics*. 2010. No 1. Pp. 60-66.
11. Trolleybus type PTS 12. *Instructions for use*. PTS 12.000.000.00 HE. 2021.

TRACTION ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF THE TROLLEYBUS FED BY LOW VOLTAGE ON-BOARD BATTERY USING BOOST DC/DC CONVERTER

S.M. Kovbasa¹, Yu.V. Verbovyi¹, K.A. Hupalov²

¹ National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

² "Politekhnoservis" LLC,
st. Serhiy Moskalenko, 16-g/19, Brovary city, Kyiv region, 07403, Ukraine.
E-mail: skovbasa@ukr.net , yurii.verbovyi@gmail.com.

This paper deals with an electromechanical system of the trolleybus which is fed by low voltage on-board battery using boost DC/DC converter. Peculiarities of the use of the boost converter to power up field-oriented controlled traction electric drive were studied. It is shown that already existing primary stage of the traction electric drive can be used to implement boost DC/DC converter. Control algorithms for stabilizing the voltage of the direct current link and direct field-oriented control of the torque and the flux of induction motor are presented, which can be applied to implement the maneuvering operation mode of trolleybus. Proposed electromechanical system was tested by the mathematical modeling, taking into account the pulse width modulation in the DC/DC converter, as well as the parameters of the single-section trolleybus and the forces of resistance to its movement. It is shown that when the battery current is limited to 200 A and the voltage of the direct current link (the output voltage of the DC/DC converter) is stabilized at 250 V, unloaded trolleybus can reach a speed of 12 km/h on a flat asphalt surface. The results of the study of the achievable speed of the vehicle at different values of the battery current limit and the level of the DC link voltage task are also presented in the paper. The results of the performed research can be used in the development of new and modernization of existing electromechanical systems of trolleybuses. References 11, figures 8.

Key words: boost DC/DC converter, autonomous operation, trolleybus, traction electric drive, induction motor, field- oriented control.

Надійшла 27.08.2024
Остаточний варіант 11.11.2024