

УДК 621.38

В. М. ЛЯШУК, М. М. ГРУДЗУР (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта lyashuk52@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАВАННЯ НА ДІЛЯНЦІ Л – В ПРИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ 3,3 КВ

Постановка проблеми

В даний час зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць шляхом стабілізації напруги в контактній мережі є однією з важливих проблем, які на сьогодні успішно вирішуються в тягових мережах міського електротранспорту при незначних струмах навантаження. Тому створення перетворювачів (стабілізаторів) напруги з великими струмовими навантаженнями є суттєвою проблемою [1].

Аналіз досліджень

Розглядається питання використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту, наводиться опис і принцип роботи стабілізатора напруги.

Живлення електричних ланцюгів електрифікованого транспорту здійснюється від повітряної контактної мережі постійного струму напругою $3,3\text{кВ} \pm 0,5\text{кВ}$. Номінальна напруга на виході тягової підстанції становить $3,3\text{кВ}$, максимальне – $3,8\text{кВ}$.

Проведені вимірювання напруги холостого ходу на тягових підстанціях на ділянці Лавочне - Воловець на Львівській залізниці показали, що в реальності вона піднімається до $3,8\text{кВ}$. Така підвищена напруга негативно позначається на дорогому комутаційному і перетворювальному електрообладуванні рухомого складу і часто призводить до виходу його з ладу. З іншого боку, зниження напруги контактної мережі призводить до перегріву обмоток тягових двигунів. Ясно, що стабілізація напруги мережі

живлення залізничного транспорту дозволяє значною мірою підвищити якість їх роботи, безпеку, надійність та знизити витрату електроенергії.

Постановка задачі

Досліджується модуль стабілізації напруги для тягових підстанцій, заснований на використанні ланки високої частоти, як найбільш економічний спосіб [1]. Система стабілізації напруги складається з інвертора, який перетворює постійну напругу $3,3\text{кВ}$ в змінну з частотою 5кГц , автотрансформатора, який служить для зміни амплітуди напруги з частотою 5кГц [3], випрямляча на IGBT транзисторах, датчика напруги і системи управління. Структурна схема системи стабілізації напруги приведена на рис. 1.

Основний матеріал

Силова частина системи стабілізації напруги наведена на рис. 2. У неї входить автономний інвертор, зібраний за мостовою схемою на IGBT транзисторах Z1-Z4. Інвертор перетворює постійну напругу в змінну з частотою 5кГц . Навантаженням для інвертора є автотрансформатор, вторинна обмотка якого служить для отримання різних за рівнем напруг на виході. Виводи автотрансформатора підключені до випрямляча, зібраному за мостовою схемою на силових діодах D1 і D2 IGBT транзисторах Z5, Z6, які працюють у ключовому режимі. Змінюючи тривалість імпульсу напруги затвор емітера U_{зэ} IGBT транзисторів Z5, Z6 можна керувати напругою на навантаженні, тобто на контактній мережі.



Рис. 1. Структурна схема стабілізації напруги

© Ляшук В. М., Грудзур М. М., 2014

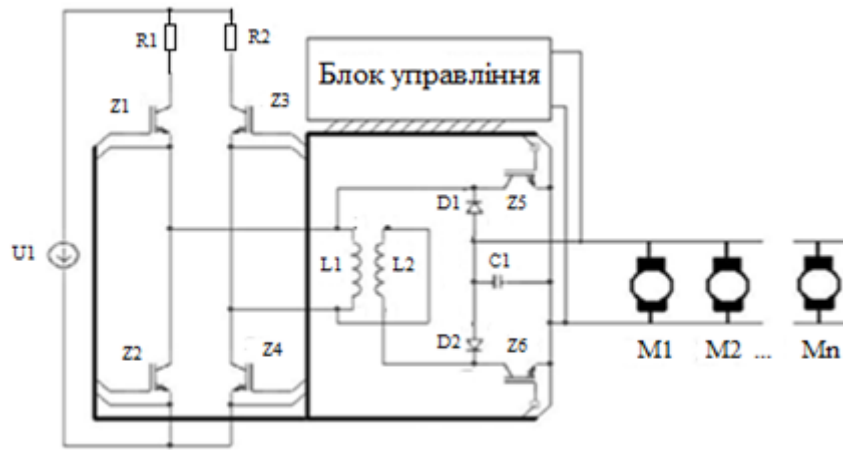


Рис. 2. Силова частина системи стабілізації

Блок управління виконує декілька функцій: управляє роботою транзисторних ключів інвертора, регулює кут відкриття транзисторів випрямляча, порівнює напругу в контактній мережі з еталонним значенням. M1, M2, Mn - тягові двигуни електротранспорту на ділянці контактної мережі.

Напруга на виході випрямного агрегату тягової підстанції (на схемі позначено U1) подається на вхід автономного інвертора, зібраного за мостовою схемою на транзисторах Z1-Z4. У момент часу від 0 до t₁ сигнал з блоку управ-

ління відкриває транзистори Z1, Z4 і на первинну обмотку автотрансформатора подається напруга U1.

У момент часу від t₁ до t₂, напруга на первинній обмотці автотрансформатора (клеми 1-4) U1 змінює свій знак на протилежний, так як відкриваються транзистори Z2, Z3, а транзистори Z1, Z4 закриваються. Таким чином, постійна напруга 3,3 кВ перетворюється в змінну напругу з частотою 5 кГц на первинній обмотці автотрансформатора. Залежність U1(t) наведена на рис. 3.

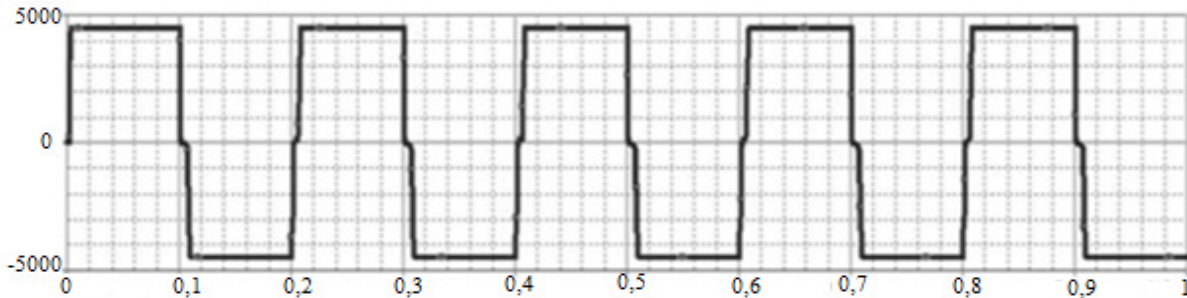


Рис. 3. Напруга U1(t) інвертора

Автотрансформатор складається з первинної обмотки L1, вторинної обмотки L2, феритового сердечника. Виводи вторинної обмотки автотрансформатора підключені до однофазного мостового випрямляча на діодах D1, D2 IGBT модулях Z5, Z6, який підключається кабелем електроживлення до контактної мережі.

Блок управління здійснює вимірювання напруги на навантаженні, порівнюється з еталоном, і якщо напруга в контактній мережі вище норми, то на транзистори Z5, Z6 подається напруга U_э менше, ніж у попередній момент часу. І навпаки, якщо в контактній мережі напруга нижче норми, тоді блок управління подає більшу напругу U_э на

транзистори Z5, Z6. Таким чином здійснюється стабілізація напруги.

Для виведення передавальної функції системи стабілізації тягової напруги розглянемо систему рівнянь тягового двигуна рис. 4. Основні рівняння тягового двигуна (двигуна з послідовним збудженням):

$$U = e + iR_p + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

де U – напруга тягової мережі, i – струм якоря, R – опір якорного ланцюга, що включає в себе опору:

- 1) обмотки збудження w_ε,
- 2) обмотки якорного ланцюга,

- 3) щіткових контактів,
- 4) регулювального реостата R_p (рис. 4);

e – ЕРС обмотки якоря визначаємо за формулою:

$$e = c_e \Phi n \quad (2)$$

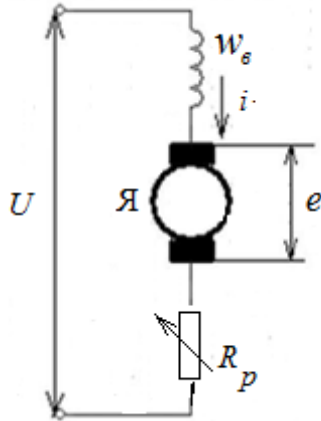


Рис. 4. Схема навантаження тягової напруги

У цій формулі c_e – обмотувальний коефіцієнт, Φ – потік, створюваний обмоткою збудження, n – число оборотів якоря [об. / Хв.].

Обмотувальний коефіцієнт c_e дорівнює:

$$c_e = pN / a \quad (3)$$

де p – число пар полюсів двигуна, N – число провідників обмотки якоря, a – число паралельних гілок обмотки якоря. Потік збудження Φ дорівнює:

$$T_2 = \frac{R + c_m 60k_\phi w_0}{c_m^2 60k_\phi^2 i_0^2} \quad (4)$$

Де τ – полюсний поділ якоря, рівне $\pi D / 2p$ (D – діаметр якоря), l_y – осьова довжина якоря, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [Н/м] – магнітна проникність вакууму, k_δ – зубцовий коефіцієнт, що дорівнює (1.3 ÷ 1.8), k_μ – коефіцієнт насичення участків магнітопровода – полюси, статора і ротора (якоря) і зубців, рівний (2 ÷ 2.5), δ – довжина зазора між якорем і полюсним наконечником; k_ϕ – коефіцієнт пропорційності потоку Φ і струму якоря i , визначається формулою (4) – зв'язок між числом оборотів n і обер-

товим моментом двигуна M визначається другим законом Ньютона для обертального руху:

$$M - M_C = I \frac{dw}{dt} \quad (5)$$

де M_C – момент опору транспортного засобу (тертя, ухилу шляху), I – момент інерції якоря, рівний:

$$w = 2\pi n / 60 \quad (6)$$

Обертаючий момент двигуна M визначається за формулою:

$$M = c_M \Phi i \quad (7)$$

Де

$$c_M = \frac{pN}{2\pi a} = c_e / 2\pi \quad (8)$$

Індуктивність L складається з індукції обмотки збудження L_B і індуктивності реакції якоря L_J . Обидві індуктивності визначаються в результаті розрахунку магнітного ланцюга двигуна.

Виключивши з рівнянь (1) – (8) проміжні величини - M , E , n , отримуємо:

$$k_y = \frac{I}{120c_m^2 60k_\phi^2 i_0^2} \quad (9)$$

$$I \frac{dw}{dt} - c_M k_\phi i^2 = M_C \quad (10)$$

Рівняння (9) -(10) дозволяють скласти передаточну функцію тягового двигуна. Для цього за загальноприйнятою методикою замінимо перемінні величини U , i , w на суму початкових значень U_0 , i_0 , w_0 і інфінітезимальних перетворень dU , di , dw , обумовлених динамікою в керованій системі зворотного зв'язку:

$$U = U_0 + dU$$

$$i = i_0 + di \quad (11)$$

$$w = w_0 + dw$$

і підставляємо в систему (9) – (10). Отримуємо для перетворень:

$$L \frac{d\delta w}{dt} + \delta i R + c_m 60k_\phi i_0 \delta w + c_m 60k_\phi w_0 \delta i = \delta U \quad (12)$$

$$I \frac{d\delta w}{dt} - 2c_m k_\phi i_0 \delta i = 0 \quad (13)$$

Для того, щоб об'єднати обидва рівняння в одне, тобто виключити δw , продиференціюємо рівняння (12) за часом і підставимо з рівняння

$$L \frac{d^2 \delta i}{dt^2} + (R + c_m 60k_\phi w_0) \frac{d\delta i}{dt} + 2\delta i \frac{c_m^2 60k_\phi i_0}{I} = \delta U \quad (14)$$

Переходячи до операторного зображення Лапласа, отримуємо:

$$\left[Lp^2 + (R + c_m 60k_\phi w_0)p + 2 \frac{c_m^2 60k_\phi i_0^2}{I} \right] \delta i(p) = \delta U \quad (15)$$

де $\delta i(p)$ – зображення δi .

Таким чином, передаточна функція тягового двигуна дорівнює:

$$W(p) = \frac{\delta U}{\delta i(p)} = \frac{k_y}{T_1^2 + T_2 p + 1} \quad (16)$$

Де k_y – коефіцієнт передачі, рівний

$$k_y = \frac{I}{120c_m^2 60k_\phi i_0^2} \quad (17)$$

T_1 і T_2 – постійні часу, рівні

$$T_1 = \frac{\sqrt{LI / 120}}{c_m^2 k_\phi i_0^2} \quad (18)$$

$$T_2 = \frac{R + c_m 60k_\phi w_0}{c_m^2 60k_\phi i_0^2} \quad (19)$$

Вибір елементної бази

Базовими елементами при розробці системи були обрані сучасні IGBT - транзистори, або модулі, характеристики якого дозволяють працювати з досить великими струмами і напругами [2].

Потужнострумкові модулі з електричною ізоляцією, як правило, містять ключі, з'єднані за полу мостовою ключовою схемою або з одноключевою конфігурацією. У цих модулях діапазон номінальних струмів коливається в межах від 25 до 5000 ампер, а робоча напруга доходять до 4,0 кВ.

Привабливими рисами потужнострумкових модулів є: наявність електричної ізоляції, простота монтажу з охолоджувачем і легкість зв'язку з іншими модулями для підвищення навантаження кола. Вони також дозволяють уникнути викорис-

(13) похідну $\frac{d\delta w}{dt}$. Після нескладних перетворень одержуємо:

тання паралельного з'єднання ключів для струмів, що перевищують сотні ампер [5].

Використання приладів з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами найбільше привабливими при розробці інверторів. У цьому випадку необхідне число силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з користуванням IGBT і діодів у вигляді окремих елементів. Перекриваються області діапазонів струмів, де використання дискретних приладів економічно переважніше в порівнянні з потужнострумковими модулями, можуть бути розширені за рахунок паралельного з'єднання окремих приладів [4].

Моделювання в середовищі ORCAD 9.2

Для моделювання роботи системи стабілізації з програмних пакетів обрана OrCAD 9.2. Серед OrCAD 9.2 є універсальним засобом наскрізного проектування електронних систем і володіє широкими можливостями.

На рис. 5 зображена модель системи стабілізації. Як ключі обрані IGBT модулі компанії MitsubishiElectric. Залежність $U_1(t)$ інвертора (напруга на виході) зображена на рис.3. Генераторами служать моделі джерел напруги прямокутних імпульсів V_{pulse} , вибрані з стандартних бібліотек OrCAD. Модель трансформатора взята з бібліотеки Analog, модель сердечника - з бібліотеки Magnetic. Модель IGBT модуля CM600HA - 12H теж присутня в стандартному наборі бібліотек OrCAD.

Діаграми, отримані в результаті моделювання в середовищі OrCAD 9.2 і показують роботу системи стабілізації показані на рис.6. Таким чином, випрямляч, який працює в режимі широтно-імпульсного модулятора, дозволяє стабілізувати напругу в контактній мережі тягового електротранспорту.

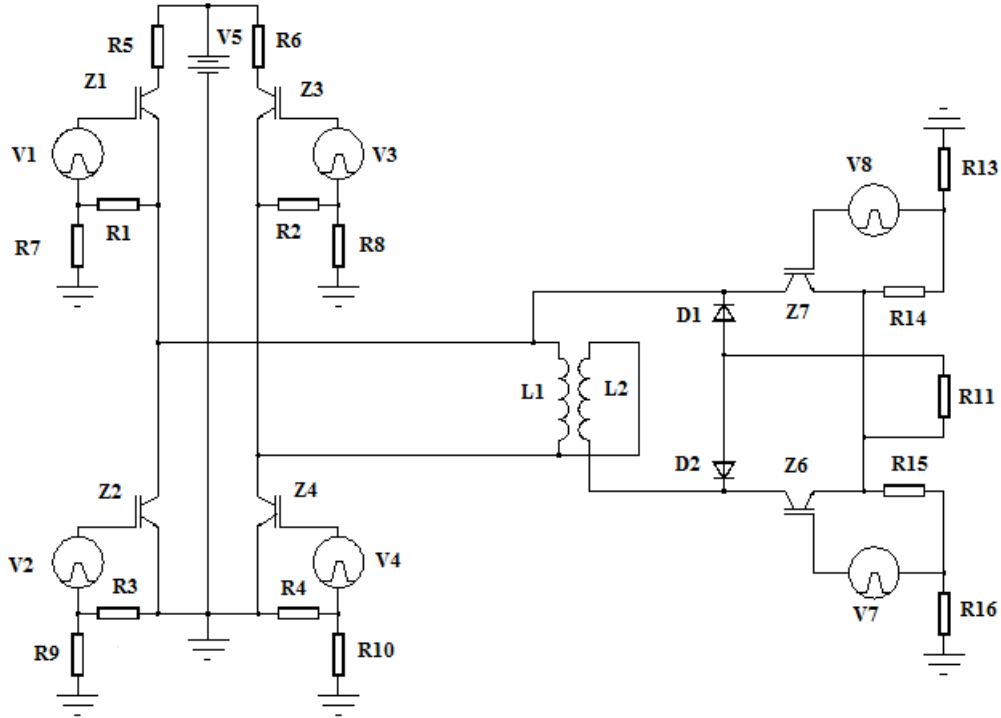


Рис. 5. Модель силової частини системи стабілізації

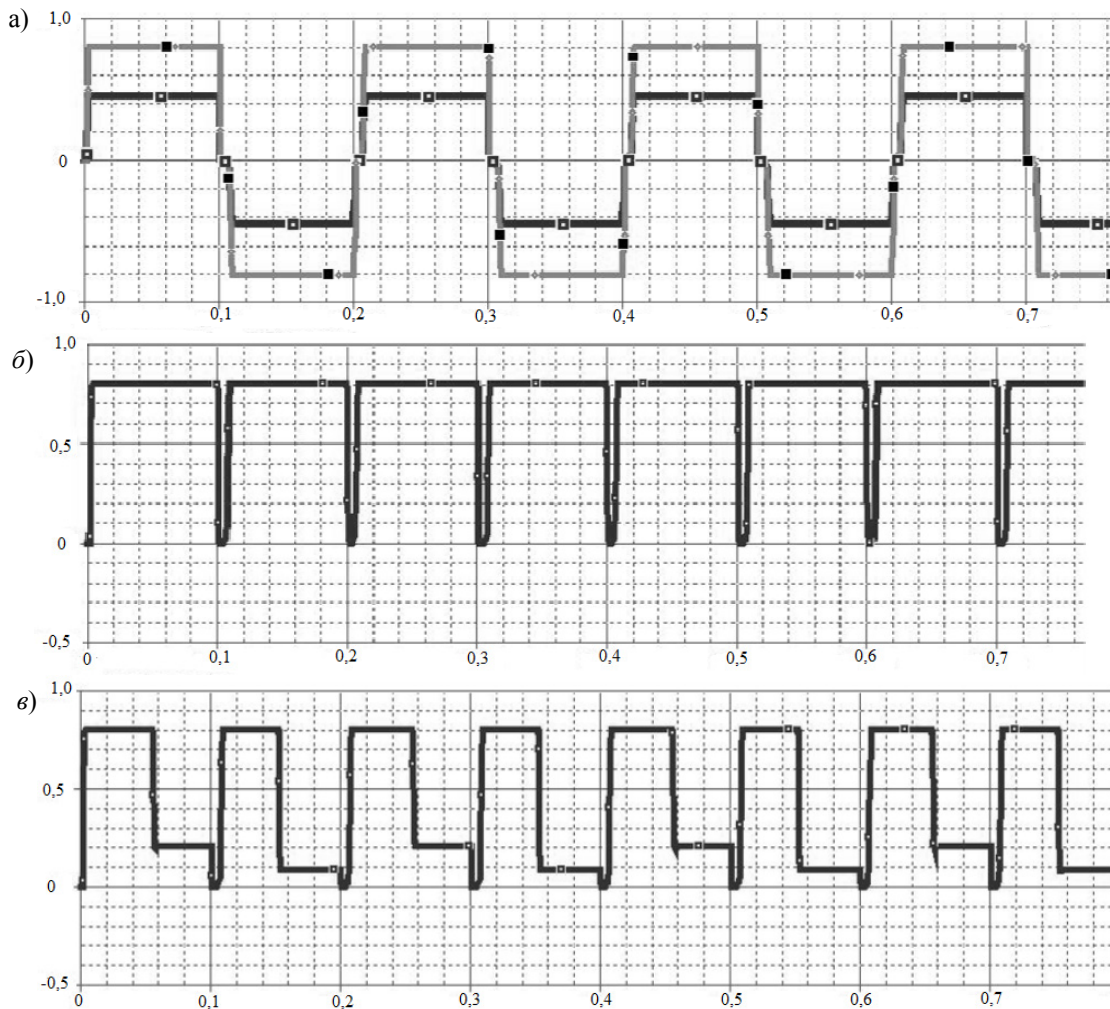


Рис. 6. Діаграми напруг при роботі системи стабілізації: а - форма напруги на вході і на виході автотрансформатора; б - форма напруги на виході випрямляча при повністю відкритих модулях Z5, Z6; в - форма напруги на виході випрямляча при відкритих на 50% модулях Z5, Z6.

© Ляшук В. М., Грудзур М. М., 2014

Висновки

Таким чином зробивши відповідні дослідження ефективність тягового електропостачання безпосередньо залежить від стабілізації напруги, а саме від його якості електроенергії,

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры: підручник / Л. А. Краус, Г. В. Гейман, М. М. Лапиров-Скобло, В. І. Тихонов.– М.: Энергия, 1980. – 288с.
2. Шапиро С. В. Резольвента Лагранжа и ее применение в электромеханике: науч. изд. / С. В. Шапиров. – М.: Энергоатомиздат, –2008. – 156 с.
3. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов: / С. С. Вдовин. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
4. Дьконов В. П. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах: / В. П. Дьконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 512 с.
5. Колпаков А. А. MELCOSIM? IPOSIM? EMISEL? О выборе и замене модулей IGBT / А. А. Колпаков// Силовая электроника. – М., 2005. – Вып. 1. – С. 43–48.
6. [http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1\(40\)/11.pdf](http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1(40)/11.pdf)

Надійшла до друку 21.05.2014.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

яка подається безпосередньо на електрорухо- мий склад залізниці.

Вирішення цієї проблеми повинне базувати- ся на проведенні переоснащення господарства електропостачання та його модернізації.

REFERENCES

1. Kraus L. A., Gaiman G. V., Lapirovo-Skoblo M. M., Tikhonov V. I. *Proektirovanie stabilizirovannykh istochnikov elektropitaniya radioelektronnoy apparatury* [Designing stabilized power supply of electronic equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 288p.
2. Shapiro S. V. *Rezolventa Lagranzha i ee primeneniye v elektromekhanike* [Lagrange resolvent and its application in electromechanics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2008. 156p.
3. Vdovin S. S. *Proektirovanie impul'snykh transformatorov* [Design of pulse transformers]. Lenin- grad, Energoatomizdat Publ., 1991. 208 p.
4. Diyakonov V. P. *Entsiklopediya ustroystv na polevykh tranzistorakh* [Encyclopedia FET devices]. Moscow, SOLON- R Publ., 2002. 512p.
5. Kolpakov A. A. O vybore i zamene moduley IGBT [On the choice and replacement of modules IGBT]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. Moscow, 2005, issue 1, 43-48 pp.
6. [http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1\(40\)/11.pdf](http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1(40)/11.pdf)

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

В даний час зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць шляхом стабілізації напруги в контактній мережі є однією з важливих проблем, які на сьогодні успішно вирішуються в тягових мережах міського електротранспорту при незначних струмах навантаження. Тому створення перетворювачів (стабілізаторів) напруги з великими струмовими навантаженнями є суттєвою проблемою.

У статті розглядається питання використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту, наводиться опис і принцип роботи стабілізатора напруги. Внаслідок використання приладів з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами становиться особливо кращим при розробці інверторів. У цьому випадку необхідне число силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з користуванням IGBT і діодів у вигляді окремих елементів.

Ключові слова: Стабілізації напруги постійного струму, тягова підстанція електричного транспорту, стабілізатор напруги, автотрансформатор, IGBT транзистор.

УДК 621.38

В. М. ЛЯШУК, М. М. ГРУДЗУР (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: lyashuk52@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ Л – В ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ 3,3 КВ

В настоящее время уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети электрифицированных железных дорог путем стабилизации напряжения в контактной сети является одной из важных проблем, которые сегодня успешно решаются в тяговых сетях городского электротранспорта при незначительных токах

© Ляшук В. М., Грудзур М. М., 2014

навантаження. Тому створення преобразователів (стабілізаторів) напруги з великими токовими навантаженнями є суттєвою проблемою.

В статті розглядається питання використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням звена високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту, приводиться опис роботи стабілізатора напруги. Внаслідок використання пристроїв з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами стає особливо переважним при розробці інверторів. В цьому випадку необхідна кількість силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з використанням IGBT і діодів у вигляді окремих елементів.

Ключові слова: стабілізації напруги постійного струму, тягова підстанція електричного транспорту, стабілізатор напруги, автотрансформатор, IGBT транзистор.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андриєнко П. Д.*

UDC 621.38

V. M. LYASHUK, M. M. HRUDZUR (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazarian Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010 tel.: (056) 793-19-11, e-mail: lyashuk52@gmail.com

RESEARCH PERFORMANCE POWER SUPPLY SYSTEMS AT THE DISTANCE $L - V$ AT VOLTAGE STABILIZATION 3,3 KV

Currently, reduction of electricity losses in traction network of electrified railways by stabilizing the voltage in the contact network is one of the important problems that are successfully solved in urban electric traction networks at low currents *navantazhennya*. Besides creating converters (stabilizers) voltage high current loads is a significant problem.

The article discusses the use of the method of stabilizing the DC voltage level using high frequency electric transport traction substations, a description and the PRINCIPLE of the voltage regulator. Due to the use of devices with built-in high-speed reverse diode is particularly advantageous in the development of inverters. In this case, the required number of power semiconductor components are reduced by 50 % as compared with the IGBT and the diodes in the form of individual elements.

Keywords: DC voltage stabilization, traction substation electric transport, voltage stabilization, autotransformer, IGBT transistor.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*