

## УДК 621.38

В. М. ЛЯШУК – к. т. н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, elpostz@i.ua

І. Ю. ПАВЛЮКОВ – магістр, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, elpostz@i.ua

# ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ З ЖИВЛЕННЯМ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ ЧЕРЕЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧ 6/3 КВ

## Вступ

**Постановка проблеми.** В даний час підвищення енергетичної ефективності електрифікованих ліній в умовах реформування залізничного транспорту є однією з найважливіших проблем.

**Мета.** Збільшення обсягу перевезень по залізницях диктує необхідність нарощування їх проїзної здатності. Для цього здійснюються заходи щодо збільшення швидкості руху та вагових норм поїздів, створюються нові електровози більшої потужності, розробляються способи посилення електропостачання тяги постійного струму.

**Аналіз науково-технічних досліджень.** Стаття присвячена питанню використання методу перетворення напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти для перетворення напруги рівня 6,6 кВ в напругу 3,3 кВ для живлення електричного транспорту, наводиться опис і принцип роботи перетворювача напруги.

Живлення електричних кіл електрифікованого транспорту здійснюється від повітряної контактної мережі постійного струму напругою 3,3 кВ. Номінальна напруга на виході тягової підстанції становить 6,6 кВ  $\pm$  0,5 кВ.

**Результат.** Проведені вимірювання напруги холостого ходу на тягових підстанціях на ділянці П'ятихатки – Нижньодніпровськ-Вузол на Придніпровський залізниці показали, що в реальності воно піднімається до 3.8 кВ. Така підвищена напруга негативно позначається на дорогому комутаційному і перетворювальному електроус-

таткуванню 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.

## Способи реконструкції системи тягового електропостачання постійного струму

Нерідко провізну спроможність діючих ділянок, електрифікованих на постійному струмі 3,0 кВ, обмежують пристрої електропостачання. Які основні варіанти посилення, що застосовуються на практиці? Це - будівництво пунктів паралельного з'єднання, застосування потужних дванадцятипульсових перетворювальних агрегатів, збільшення перерізу контактної підвіски і введення пристроїв регулювання напруги на тягових підстанціях (рис. 1).

На довгих міжпідстанційних зонах вантажозавантажених ділянок, збільшення перетину контактної мережі не дає потрібного ефекту. Навіть введення автоматичного регулювання (аж до максимального напруги на тягових підстанціях 3700 В) на зонах протяжністю понад 25 кілометрів не забезпечує номінальної (3000 В) напруги на електровозах. У ряді випадків не рятує положення і впровадження системи регулювання напруги.

Варіант посилення системи електропостачання 3,0 кВ представляє собою пункт перетворення підвищеної напруги ППН-6. На сусідній тяговій підстанції додатково встановлюється спеціальний перетворювальний агрегат з вихідною напругою постійного струму 6,6 кВ, далі напруга по проводах 2А-185 передається на фідерну зону до місця установки ППН-6. Провід 2А-185 підвішується до, окремо розташованих, опор контактної мережі.

Перетворювальний агрегат з боку змінного струму підключається до РУ-10 або ВРП-35 кВ, а з боку постійного струму - до РУ-6,6 кВ через роз'єднувачі і швидкодіючий автомат на 6,6 кВ з установкою індивідуальних фільтр-пристроїв і реактора в відсмоктуючому рейковому колі.

Можлива інша схема отримання напруги 6,6 кВ постійного струму. На сусідній тяговій підстанції до одного з перетворювальних агрегатів підключається послідовно інший такий же агрегат з організацією окремого РУ 6,6 кВ.

Основні техніко-енергетичні параметри пристрою посилення ППН-6:

- вхідна напруга  $U_1$  постійного струму (максимальне) 6,6 кВ;
- вхідний струм  $I_1$  постійного струму 1000 А;
- вихідна потужність номінальна  $P_{дн}=6000$  кВт;
- випрямлений струм номінальний  $I_{дн}=1\ 685$  А;
- вихідна напруга стабілізована  $U_d=3560$  В;
- втрати потужності  $P=120$  кВт.

Розробка і впровадження біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) вважається одним з найважливіших за останнє десятиліття досягнень науково-технічного прогресу в області силових напівпровідникових перетворювальних приладів. Їх поява не могла не відбитися на розвитку електрообладнання залізничного рухомого складу. Особливо значущим є можливість створення на базі транзисторів

IGBT перетворювальних установок для електровозів і тягових підстанцій, здатних працювати з живленням від найбільш поширених в даний час на залізницях різних країн систем тягового електропостачання постійного струму 3 кВ.

Схема імпульсного перетворювача постійного струму ППН-6 може мати вигляд, якщо керовані тиристори (GTO) замінити IGBT транзисторами (рис. 2).

### Основні переваги технології IGBT

До появи транзисторів IGBT найбільш прогресивними серед силових напівпровідникових приладів були закриваємі тиристори (GTO). Однак IGBT мають ряд переваг в порівнянні з GTO, що дозволяють створити на їх базі перетворювачі, при тій же вихідній потужності, відрізняються меншою вартістю, габаритами і масою, підвищеною економічністю і надійністю.

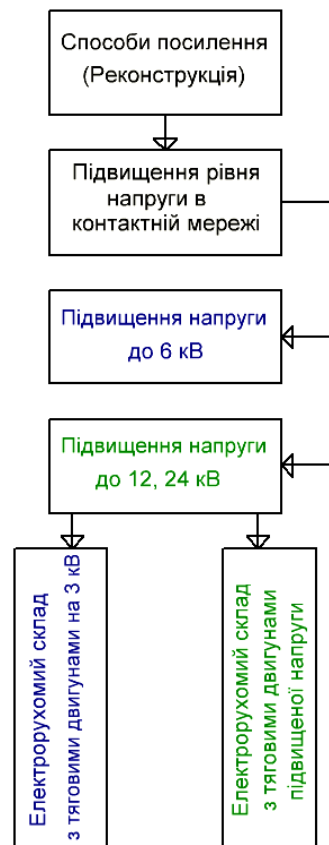


Рис. 1. Способи посилення тягової мережі постійного струму

Застосування IGBT усуває необхідність в снабберних колах і, понижуючих величину,  $dI / dt$  реакторах, завдяки чому істотно спрощується схема, зменшується число її елементів і, отже, вартість, маса і габарити перетворювальної установки в порівнянні зі схемою на тиристорах GTO. Крім того, з використанням електрично ізольованих транзисторів IGBT значно полегшується монтаж, оскільки їх можна безпосередньо монтувати на радіатори-теплообмінники системи охолодження. Це скорочує витрати часу на заміну компонентів, а стандартизація плат і кріплення здешевлює конструкцію і сприяє продовженню терміну служби.

З усуненням потужних снабберних ланцюгів і завдяки властивим малим комутаційним втратам IGBT, знижуються загальні втрати в перетворювачі, отже, підвищується його економічність. Надійність також підвищується за рахунок зменшення числа елементів в схемі. Крім того, в схемах управління перетворювачів на базі IGBT забезпечується більш повний захист від стрибків струму і перенапруги, чим суттєво

знижується ризик відмов і пошкоджень. Все це зменшує також загальні витрати в розрахунку на весь термін служби.

### Розвиток технології

Спочатку на ринку з'явилися транзистори IGBT, розраховані на застосування в діапазоні напруги до 1,2 кВ, потім до 1,7 кВ. Це робило їх найбільшою мірою застосовуваними для електрорухомого складу, що працює від систем електропостачання постійного струму напругою 0,75 і 1,5 кВ з дво- і тривірневим перетворенням відповідно. Коли ж стали доступними IGBT на 3,3 кВ, їх можна було застосувати на електрорухомому складі, що працює від системи електропостачання постійного струму напругою 3 кВ з тривірневим перетворенням.

В даний час промислово випускаються транзистори IGBT на 5,2 кВ та (в дослідному порядку) на 6,5 кВ. Із застосуванням цих приладів стає можливим забезпечити високий ступінь спрощення силові схеми перетворювачів постійного струму 6 / 3кВ.

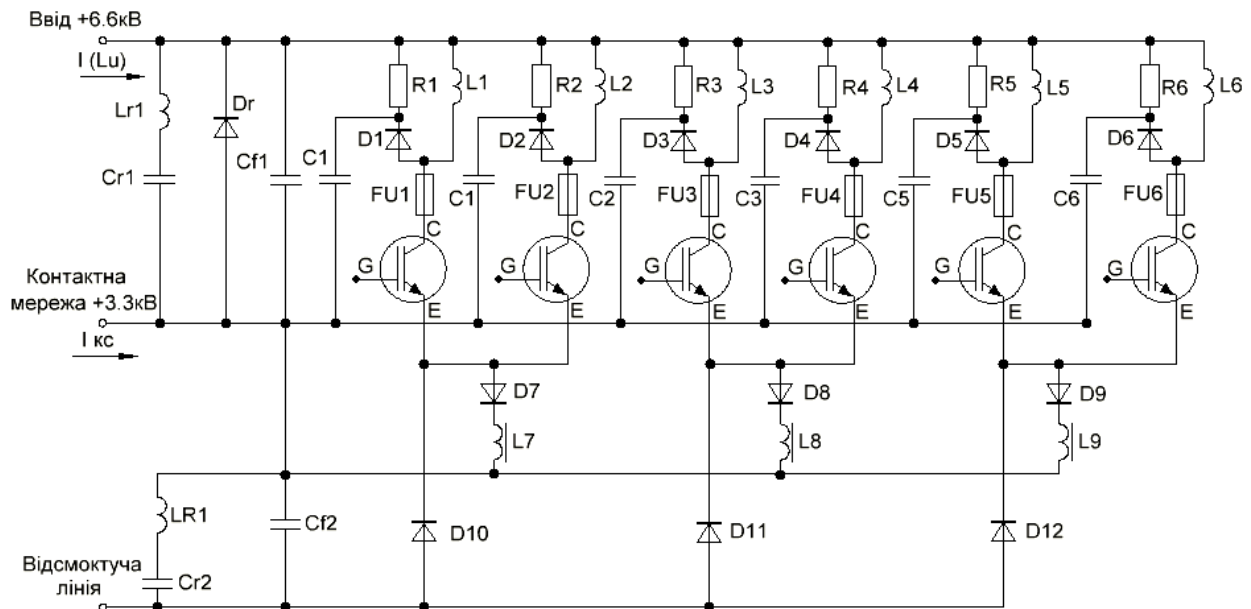


Рис. 2. Схема імпульсного перетворювача постійного струму

Електронний захист перетворювального устаткування з управління IGBT-транзисторів побудований з використанням широкосмугових вимірювальних датчиків струму в кожному з шести каналів. Можливі короткі замикання в високовольтному обладнанні відключаються спеціальними швидкодіючими запобіжниками, включеними послідовно з кожним з силових транзисторних ключів. Зникнення вхідної напруги може призвести до появи неприпустимих напружень зворотного знаку на IGBT-транзисторах. Для блокування зворотної напруги використовуються шунтуючі діоди, що з'єднують контактну мережу 3,3 кВ із вхідною мережею підвищеної напруги. При коротких замиканнях на виході перетворювача відключається швидкодіючий вимикач і одночасно блокуються імпульси управління IGBT-транзисторів. При внутрішніх коротких замиканнях імпульси управління також блокуються і одночасно видається команда на вимикання напруги вхідної мережі. Для цієї ж мети послідовно з кожним з IGBT-транзистором включений швидкодіючий запобіжник. Для підвищення швидкодії зняття шкідливого впливу перевантажень з напівпровідникових приладів використовується швидкодіючий короткозамикач, що з'єднує вхідну мережу з тяговою рейкою. Він включається по команді електронних захистів мікроконтролера. При цьому одночасно на тягову рейку замикається і контактна мережа 3,3 кВ через шунтуючі діоди. Перевантаження приладів у всіх аварійних ситуаціях при цьому легко блокуються електронним управлінням транзисторів. При розробці конструкції перетворювача використовувався досвід створення IGCT-тиристорного інвертора для частотно-регульованого електроприводу з вихідною напругою 6 кВ і потужністю 5 МВт.

Конструкція перетворювача також побудована з використанням організованих повітряних каналів для охолодження напівпровідникових приладів. Конденсаторні батареї і шинні з'єднання між приладами

виконані з мінімізацією індуктивності контурів струмових ланцюгів при комутації для забезпечення зниження перенапруги на напівпровідникових приладах. Для зниження перенапруги при комутації використовується також і високочастотний LRD-контур, виконаний відповідно до рекомендацій розробників IGCT-тиристорів.

Якщо «струмові» причини відмови дають час на прийняття рішення про захист, то перенапруга такого часу не представляє, оскільки для транзистора досить декілька наносекунд, щоб вийти з ладу, а за такий час жодний захист підключитися не встигне. Тому з перенапруженням слід боротися превентивними заходами. Існує два основних способи боротьби: активний і пасивний. Активний передбачає таке управління транзистором, при якому мінімізуються викиди напруги; сюди відноситься і плавне вимикання. Активний захист, як правило, підключається в міру необхідності, а значить, не веде до збільшення динамічних втрат в штатному режимі роботи, але поступається своєю швидкістю і простотою реалізації захисту - пасивному. Пасивний захист, на відміну від активного, включен завжди, незалежно від того, потрібна вона в даний момент чи ні. Даний захист реалізується двома способами: зниження  $dU/dt$  і обмеженнями. До першого належать різного роду снаббери, до другого – обмежувачі і варистори. Далі по порядку.

**Пасивний захист: снаббери.** Снаббер в найпростішому випадку – просто конденсатор. І, як показує практика, RC- і RCD-снаббери не володіють якими-небудь істотними перевагами в порівнянні з одиночним конденсатором. До конденсатора, у свою чергу, пред'являється ряд вимог: він повинен бути встановлений якомога ближче до силових виводів колектору і емітеру транзисторного модуля; якщо поставити його «десь» на шині, ефективність буде значно менше. Свого часу проводився експеримент: при конденсаторі, встановленому всередині модуля, при напрузі живлення 550 В і роботі інвертора на навантаження

5,5 кВт спостерігалися викиди амплітудою до 650 В; коли конденсатор був встановлений всього лише на шині живлення, викиди збільшилися майже до 800 В. Зрозуміло, конденсатор той же, режими ті ж. Крім того, дуже бажано, щоб конденсатор не прикручувався, а паявся, так як кріплення притисканням також значно знижує ефективність снаббера. Його ефективність падає ще й в тому випадку, якщо конденсатори набрані послідовно (через збільшення паразитного активного опору) або паралельно, оскільки три конденсатора по 0,1 мкФ не еквівалентні одному на 0,33 мкФ; оптимальний варіант - установка одиночного конденсатора.

**Пасивний захист: обмежувачі і варистори.** Другий різновид пасивного захисту: обмеження. Якщо сенс снаббера полягає в зниженні  $dU / dt$  і, тим самим, в зменшенні пікової амплітуди викиду напруги, то сенс обмеження – в «обрізанні» напруги на встановленому рівні. Для цих цілей використовуються або обмежувачі напруги, або варистори. Останні не знайшли широкого застосування для транзисторів через низьку швидкодію, а ось обмежувачі використовуються дуже широко. Рекомендації по установці обмежувачів аналогічні рекомендаціям для снабберів. Їх можна набирати послідовно (але не паралельно), причому такий спосіб зручний не тільки для підбору необхідної напруги, але і для збільшення максимальної потужності. Наприклад, чотири обмежувача на 1,5 кВт і 200 В будуть в два рази потужніші, ніж два таких же обмежувача на 400 В, хоча їх номінальна пробивна напруга залишиться такою ж. Номінальну пробивну напругу обмежувача слід вибирати виходячи з того ж правила, що воно повинна бути на 30 % вище номінальної напруги живлення і на 30 % нижче гранично допустимої напруги «колектор-емітер» транзистора. Відхилення від цієї точки в ту чи іншу сторону залежить від того, що критичніше: або перегрів обмежувачів (а з цього впливає збільшення габаритів), або ризик пробою силового транзистора.

ритів), або ризик пробою силового транзистора.

Радує той факт, що нарешті-то з'явилися малоіндуктивні потужні високовольтні обмежувачі спеціального призначення, що значно спрощує проектування силових пристроїв.

Однак обмежувачі мають мінус, що їх швидкодія не ідеальна; як правило, затримка їх спрацьовування становить від одного до декількох десятків наносекунд. І часом це дуже багато. Сучасним транзисторам цілком під силу створити тривалість виключення в 20-30 нс, а це означає, що, наприклад, при живленні 600 В і обмежувачі на 800 В тривалість наростання напруги від 800 до 1200 В (пробою для транзистора) становитиме менше 10 нс; обмежувач не встигне відкритися, як силовий транзистор вже вийде з ладу. Отже, тривалість виключення транзистора повинна складати не менше 50 нс, а краще 100 нс. Тому якщо не «підготувати» схему шляхом зниження  $dU / dt$ , то толку від обмежувачів не буде. Знизити  $dU / dt$  можна або тим же самим снаббером, або шляхом затягування виключення керуючого імпульсу. Тоді і тільки тоді обмежувач зможе захистити силовий транзистор.

## Висновки

Таким чином, зробивши відповідні дослідження ефективність тягового електропостачання безпосередньо залежить від перетворювачів напруги, а саме від якості електроенергії, яка подається безпосередньо на електрорухомий склад залізниці.

Вирішення цієї проблеми повинне базуватися на проведенні переоснащення господарства електропостачання та його модернізації.

Розроблена схема імпульсного перетворювача постійного струму ППН-6 на IGBT транзисторах з напругою на вході 6 кВ і номінальним входним струмом 1 кА, який повинен бути використаний на тягових підстанціях для підвищення напруги контакт-

ної мережі. Запропоновано використати транзистори IGBT на 5,2 кВ та (в дослідному порядку) на 6,5 кВ. Із застосуванням цих приладів стає можливим забезпечити високий ступінь спрощення силові схеми перетворювачів постійного струму 6 / 3 кВ.

Оцінені способи захисту схем, побудованих на IGBT транзисторах.

Проведені вимірювання напруги холостого ходу на тягових підстанціях на ділянці П'ятихатки – Нижньодніпровськ-Вузол на Придніпровській залізниці показали, що в реальності воно піднімається до 3.8 кВ. Така підвищена напруга негативно позначається на дорогому комутаційному і перетворювальному електроустаткуванню 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.

#### Бібліографічний список

1. Краус, Л. А. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Л. А. Краус и др.– Москва: Энергия, 1980. - 288 с.
2. Шапиро, С. В. Резольвента Лагранжа и ее применение в электромеханике [Текст] /

С. В. Шапиро. – Москва: Энергоатомиздат, 2008. – 156 с.

3. Вдовин, С. С. Проектирование импульсных трансформаторов [Текст] / С.С. Вдовин – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинград отделение, 1991. – 208 с.
4. Дьяконов, В. П. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах [Текст] / В. П. Дьяконов и др.– М. СОЛОН-Р . – 2002. – 512 с.
5. Колпаков, А. MELCOSIM? IPOSIM? EMISEL? О выборе и замене модулей IGBT [Текст] / А. Колпаков. – Силовая электроника. 2005. – №1.– С. 43-48.
6. Болтовский, Б. И., OrCAD. Моделирование «Поваренная книга» [Текст] / Б. И. Болтовский, Г. И. Таназлы. – Москва: Солонпресс, – 2005. – 200 с.

**Ключові слова:** електрична тяга постійного струму, транзистор IGBT, імпульсний силовий перетворювач.

**Ключевые слова:** электрическая тяга постоянного тока, транзистор IGBT, импульсный силовой преобразователь.

**Keywords:** d.c. tractive supply system, transistor IGBT, pulse power converter.

#### Рецензенти:

проф., д.т.н., А. Б. Бойник,  
проф., д.т.н., А. М. Афанасов.

Надійшла до редколегії 14.05.2018.

Прийнята до друку 28.05.2018.