

## **Частина III. ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.314.57

*Д.С. Білухін, канд. техн. наук*

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак В. Лазаряна)*

### **ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ РЕМОНТІ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Вступ.** На цей час зростання вартості електричної енергії для підприємств залізниці значно впливає на вартість ремонту електровозів. Підприємства постійно впроваджують нові технології та пристрої, які дозволяють виконати деяку економію енергетичних ресурсів. Це і нові системи освітлення цехів, заміна електромашинних перетворювачів в стендах взаємного навантаження на статичні, в основі яких лежить сучасна напівпровідникова елементна база та ін. Щодо енергозбереження при випробуваннях тягових електричних двигунів постійного струму, то в цьому напрямку досягнуті значні результати. Але ж сучасна цінова політика на електричну енергію вимагає проведення дослідів по економії і при випробуваннях допоміжних електричних машин.

Випробування допоміжних машин призначені для перевірки технічних характеристик електричної машини, якості її ремонту, придатності для експлуатації, а також на відповідність вимогам правил з ремонту. Їх виконують на спеціальних станціях для випробувань в локомотивних депо, які обладнанні спеціалізованими стендами та пристроями, необхідними для кваліфікованого проведення комплексу випробувань. Значною частиною по споживанню електричної енергії при випробуваннях допоміжних електричних машин є випробування машини протягом години номінальним струмом. Виключити з випробувань цей момент не можливо, оскільки він є необхідним для визначення нагріву елементів електричної машини.

**Результати дослідів.** Згідно з ГОСТ 2582-81 “Машины электрические вращающиеся тяговые” не існує чіткої вказівки до вибору методів випробування електричних машин постійного та пульсуючого струму на нагрів, а лише умови випробувань. Взагалі відомо три методи випробування електричних машин: метод безпосереднього навантаження з використанням схем взаємного навантаження або схем повернення енергії, посередній метод та метод без віддачі енергії зовні [1]. При випробуваннях електричних машин постійного струму використовують метод взаємного навантаження для тягових двигунів та метод без віддачі енергії зовні для допоміжних генераторів. Останнє полягає в тому, що навантаженням генераторів є реостати, які з'єднані послідовно з якорем генератора та створюють номінальний струм [2]. Схема достатньо проста, але ж на цей час не економічна. Привід компресора випробується створенням протитиску, тому в даному досліді не розглядається. Одним зі шляхів економії електричної енергії при випробуваннях генераторів є заміна реостатного навантаження на взаємне навантаження або розробка схем повернення енергії. Розглянемо можливі шляхи такої економії.

Основним магістральним електровозом постійного струму на залізницях України ще й досі залишається електровоз ВЛ8. На цьому електровозі в кожній секції знаходиться привід компресора НБ-431А, привід відцентрового вентилятора НБ-430А з генератором керування ДК-405К та перетворювач НБ-429А (на деяких електровозах НБ-436А). Електричні двигуни НБ-431А дозволяють використовувати при випробуваннях метод взаємного навантаження, а для інших це ускладнюється конструктивним виконанням цих машин. Конструктивною особливістю машин НБ-430А та НБ-429А є розташування на одному валу як приводного двигуна, так і генератора постійного струму. Звичайно при випробуваннях навантаженням генератора є набір реостатів, які протягом години розсіюють електричну енергію навколо.

Виходом з цієї ситуації може бути розроблення класичного веденого мережею інвертора. Завжди є живлення станції від трифазної мережі промислової частоти, в яку можна віддавати енергію. Розроблення системи керування для підтримки номінального значення струму генератора та елементної бази для неї на цей час розвитку науки і техніки не є складним завданням.

Слід визначити економічну доцільність такого пристрою. Наприклад у локомотивному депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці знаходиться в експлуатації близько 100 електровозів ВЛ8. Програмою ремонтів передбачається ремонт 5 електровозів з подальшим випробуванням допоміжних машин у місяць. До цього можна додати 2 електровози які ремонтуються позапланово, та ще 22 комплекти вказаних агрегатів для яких виконуються приймальні випробування після ремонту на заводі. Усього передбачено 190 комплектів машин НБ-430А та НБ-429А протягом року. При використанні веденого інвертора до мережі можна повернути до 5 тис. кВт-год електричної енергії. Попередні розрахунки вартості інвертора

із системою керування засвідчили, що система може бути окуплена за два роки, а при подальшому зростанні вартості енергоносіїв і раніше. Так, згідно з Постановою НКРЕ України від 21.10.2011 р. №2025 про введення з 01.11.2011 року нових роздрібних тарифів промислові та привітряні до них споживачі 1 класу напруги мають ставку 664,7 грн за 1 МВт-год, 2-го класу напруги – 874,8 грн за 1 МВт-год. Таким чином, при діючих тарифах можлива економія коштів складатиме більше 4,4 тис. грн на рік.

Однак слід визначитися з питанням доцільності розробки єдиного перетворювача для декількох типів машин, які відрізняються за своїми основними технічними характеристиками, що наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики генераторів електровоза ВЛ8

| Показник                 | Тип генератора |         |         |
|--------------------------|----------------|---------|---------|
|                          | ДК-405К        | НБ-429А | НБ-436А |
| Потужність, кВт          | 4,5            | 22,2    | 30,4    |
| Напруга на колекторі, В  | 50             | 37      | 38      |
| Струм якоря, А           | 90             | 600     | 800     |
| Частота обертання, об/хв | 875            | 1200    | 1200    |

З таблиці 1 можна зробити висновок про суттєвий розбіг струмів якорів генераторів, що впливає на неповне використання тиристорів інвертора у випадку випробувань генераторів ДК-405К. Та, на перший погляд, це призводить до збільшення кута випередження тиристорів інвертора за рахунок розбіжності напруг на колекторі генераторів. Тому виконаємо порівняльний аналіз для вибору кінцевого варіанта перетворювача – для трьох типів генераторів чи для двох більш потужних.

Оскільки живлення випробувальної станції депо – трифазне, то для аналізу за базову вибираємо мостову трифазну схему веденого інвертора. Номінальний струм інвертора приймаємо таким, що дорівнює номінальному струму якоря генератора ( $I_{\text{ном}} = I_{\text{яном}}$ ). Першим для порівняння приймаємо варіант з двома більш потужними генераторами типів НБ-429А та НБ-436А.

Розрахунок основних параметрів інвертора виконуємо за методиками та рекомендаціями, які викладені в роботах [3, 4].

Струм вентиляного плеча

$$I_V = I_{\text{ном}} / 3 \quad (1)$$

Для генераторів НБ-429А та НБ-436А цей струм складатиме 200 та 266 А відповідно, що вимагає вибір тиристорів плеча за найбільшим значенням.

Діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора при з'єднанні зіркою в режимі випрямляча

$$U_{2B} = U_{\text{дно}} / 2,34 \quad (2)$$

де  $U_{\text{дно}}$  – номінальна напруга на колекторі генератора. Виходячи з незначної розбіжності цих напруг (37 та 38 В), фазна напруга для вторинної обмотки трансформатора в режимі випрямлення для генератора НБ-429А складе  $U'_{2B} = 15,8$  В, а для генератора НБ-436А –  $U''_{2B} = 16,24$  В.

Коефіцієнт підвищення напруги при переході в режим інвертування для випробувань генератора НБ-436А приймаємо  $K_i = 1,15$  [4], а для генератора НБ-429А

$$K'_i = K_i \cdot U''_{2B} / U'_{2B} \quad (3)$$

Завдяки тому, що номінальна напруга колектора генератора НБ-429А декілька менша, то коефіцієнт підвищення напруги збільшується до  $K'_i = 1,18$ , що в подальшому впливає на енергетичні показники пристрою.

Кут випередження інвертора

$$b = \arccos\left(\frac{1}{K'_i}\right) \quad (4)$$

для генераторів, що розглядаються, складатиме 32,2 та 29,6 електричних градусів (ел.град).

Діюче значення напруги вентиляної обмотки трансформатора при роботі інвертора

$$U_{2I} = K_i U_{2B}. \quad (5)$$

Діюче значення напруги вентиляної обмотки трансформатора при роботі інвертора для генераторів, що розглядаються, складає 18,6 В, що є не стандартним і вимагає окремої розробки трансформатора.

Середнє значення вхідної напруги інвертора при умовному холостому ході ( $b = 0$ )

$$U_{I0(b=0)} = 2,34U_{2I} = 43,6 \text{ В}. \quad (6)$$

Середнє значення вхідної напруги інвертора

$$U_{I0} = 2,34U_{2I} \cos b. \quad (7)$$

Для генератора НБ-429А  $U_{I0} = 37$  В, для генератора НБ-436А  $U_{I0} = 38$  В.

Максимальна зворотна напруга вентиляного плеча

$$U_{b \max} = \sqrt{6}U_{I0(b=0)} = 107 \text{ В}. \quad (8)$$

Коефіцієнт потужності інвертора

$$k_{II} = n \cdot \cos\left(b - \frac{g}{2}\right), \quad (9)$$

де  $n$  – коефіцієнт викривлення струму мережною обмоткою трансформатора; для трьохфазної мостової схеми випрямлення  $n = 0,955$ ;  $g$  – кут комутації.

У методиці, яка вибрана для розрахунку, кут випередження інвертора вибирається виходячи з коефіцієнта підвищення напруги в режимі інвертування. У такому випадку єдиним шляхом для підвищення коефіцієнта потужності є збільшення кута комутації. З одного боку, це дає збільшення коефіцієнта потужності, а з іншого, втрати потужності в елементах схеми інвертора під час комутації. Останнім можна знехтувати, оскільки вся енергія, яка вироблюється генераторами під час випробувань втрачається на реліктах. З іншого боку, зменшення кута випередження інвертора може бути досягнуто використанням більш швидкодіючих тиристорів, оскільки мінімальний кут визначається за формулою

$$b_{\min} \geq g_{\max} + d_0 + t, \quad (10)$$

де  $g_{\max}$  – кут комутації при максимальному робочому струмі інвертора, а в даному випадку він може бути фіксованим, оскільки умови до випробувань генератора не змінні;  $t$  – кут запасу, який приймається 5 – 10 ел. град при частоті мережі  $f = 50$  Гц;  $d_0$  – час вимкнення тиристора в кутових одиницях

$$d_0 = t_q 360f, \quad (11)$$

де  $t_q$  – час вимкнення тиристора.

У даному випадку можливо використання швидкодіючих тиристорів типу ТБ143-320-6 з часом вимкнення 50 мкс [5], що дає  $d_0 = 0,9$  ° ел.. Виходячи з виразу (10) при прийнятому  $b = 32,2$  ел. град для генератора НБ-429А кут комутації може знаходитися в межах 21,3–26,3 ел. град. Хоча величина надто велика, тому що звичайно кут комутації введеного інвертора  $g_{\max} \leq 10-12$  ел. град [6], але це дає широкі можливості при проектуванні трансформатора для інвертора та приєднанні перетворювача до мережі живлення з будь-якими параметрам потужності короткого замикання, оскільки на величину кута комутації, насамперед, значно впливають такі параметри, як напруга короткого замкнення трансформатора перетворювача та потужність короткого замикання мережі.

Виходячи з основного рівняння комутації для трифазного мостового інвертора

$$\cos(b-g) - \cos b = \frac{4fI_{\text{ном}}L_a}{\sqrt{6}U_{2I}} \quad (12)$$

визначимо припустиму зведену анодну індуктивність, при якій задовольняються визначені раніше параметри:

$$L_a = \frac{\sqrt{6}U_{2I}(\cos(b-g) - \cos b)}{4fI_{\text{ном}}} \quad (13)$$

Так, для інвертора з генератором НБ-429А припустима зведена анодна індуктивність  $L_a = 51 - 56$  мкГн.

Результати розрахунку за другим варіантом, коли інвертор використовується для випробувань трьох генераторів, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні параметри інвертора

| Параметр  | Тип генератора |         |         |
|---|----------------|---------|---------|
|   | ДК-405К        | НБ-429А | НБ-436А |
| Струм інвертора, А  | 90             | 600     | 800     |
| Струм вентильного плеча, А  | 30             | 200     | 266,6   |
| Діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора при випрямленні, В | 21,4           | 15,8    | 16,2    |
| Коефіцієнт підвищення напруги при переході в режим інвертування                   | 1,15           | 1,55    | 1,51    |
| Кут випередження інвертора, ел. град  | 29,6           | 50      | 48,5    |
| Діюче значення напруги вентильної обмотки трансформатора при роботі інвертора, В  | 24,5           |         |         |
| Середнє значення вхідної напруги інвертора при умовному холостому ході, В         | 57,4           |         |         |
| Середнє значення вхідної напруги інвертора, В                                     | 50             | 37      | 38      |
| Максимальна зворотна напруга вентильного плеча, В                                 | 141            |         |         |

**Висновок.** Результати розрахунків за виразами (1 – 9) показали, що для післяремонтних випробувань генераторів НБ-429А та НБ-436А електровоза ВЛ8 треба розробити єдиний інвертор. Крім того, такий інвертор може бути використаний у подальшому для випробувань генераторів електровозів ВЛ10 та ВЛ11М, тому що вони укомплектовані генераторами НБ-436А. Для генераторів типу ДК-405К можна залишити існуючу методику випробувань або проектувати окремий інвертор, оскільки використання єдиного інвертора не виправдане енергетичними показниками системи, а саме: при випробуваннях більш потужних генераторів суттєво зменшується коефіцієнт потужності веденого інвертора, а потужність що віддається у мережу незначна.

#### Список літератури

1. ГОСТ 11828 – 86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Государственный комитет по стандартам СССР. Москва, 1986 – 42 с.
2. Красковская, С. Н. Текущий ремонт и техническое обслуживание электровозов постоянного тока [Текст] / С. Н. Красковская, Э. Э. Ридель, Р. Г. Черепашенец. – М.: Транспорт, 1989. – 408 с.
3. Засорин С. Н. и др. Электронная и ионная техника. – М.: Транспорт, 1969. – 376 с.
4. Куликов П. Б., Низов А. С., Штин А. Н. Электронная и преобразовательная техника. – М.: ВЗИИТ, 1989. – 41 с.
5. Партала, О. Н. Радиокомпоненты и материалы [Текст]: справочник / О.Н. Партала– К.: Радиоаматор, М.: КУБК-а, 1998, – 720 с.
6. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

*Рекомендовано до друку проф. Костіним М.О.*