

СТРУКТУРНА НАДІЙНІСТЬ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ БАГАТОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА З АСИНХРОННИМИ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ

У статті проведено порівняння структурної надійності різних варіантів структурних схем статичного перетворювача для тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з асинхронними тяговими двигунами.

В статье проведено сравнение структурной надежности различных вариантов структурных схем статического преобразователя для тягового привода перспективных многосистемных электровозов с асинхронными тяговыми двигателями.

In the article the structural reliability of different variants of structured schemes of the steady-state converter for traction drive of promising multi-system electric locomotives with asynchronous traction engines is compared.

Вступ

При сучасному рівні розвитку силової напівпровідникової техніки статичний перетворювач тягового приводу електровозу став його головною частиною, оскільки саме його параметри та показники визначають властивості тягового приводу в цілому, такі як діапазон регулювання, плавність, якісні показники у перехідному процесі та ін.

Аналіз сучасного стану тягового електрорухомого складу (ЕРС) та системи енергопостачання електрифікованих залізниць України [1 – 4] показав, що необхідна заміна тягового ЕРС на нові потужні електровози, побудовані з використанням сучасної елементної бази та керуючих систем. Але існуюча система 3 кВ тягового електропостачання лімітує підвищення потужності електровозів, тому слід перевести залізницю електрифіковані постійним струмом на систему 25 кВ 50 Гц, але це потребує значних коштів. Тому є доцільним підвищити напругу у системі 3 кВ постійного струму до 6, 12 або 24 кВ при одночасному введенні в експлуатацію нових потужних багатосистемних електровозів, що дозволить підвищити пропускну спроможність залізниць, електрифікованих постійним струмом [5, 6].

Під багатосистемним мається на увазі ЕРС, який зможе працювати як при постійному, так і при змінному струмах, при різних рівнях напруги у контактній мережі [7].

Існують різні варіанти схемної реалізації тягових статичних перетворювачів багатосистемних електровозів, аналіз яких дозволяє визначитись із загальною їх структурою [8].

Вибір раціональної структури, розробка

схем та конструкцій статичних перетворювачів для тягового приводу багатосистемних електровозів не можуть бути виконані в повному обсязі без оцінювання різних варіантів структурних схем, з точки зору структурної надійності схем.

Під структурною надійністю пристрою розуміємо його результуючу надійність при відомих структурній схемі та значеннях надійності елементів структурної схеми [9].

Мета роботи

Провести порівняльний аналіз можливих варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу для багатосистемного електрорухомого складу залізниць з асинхронними тяговими двигунами струму (АТД) з урахуванням вимог структурної надійності.

Матеріал і результати дослідження

Запропонована в роботі [5] структурна схема статичного перетворювача для електровоза подвійного живлення, який є окремим випадком багатосистемного електровоза, не враховує можливості підвищення напруги у контактній мережі постійного струму.

Враховуючи вищевикладене та аналізуючи схемні рішення статичних перетворювачів, які використовуються в інших галузях промисловості, пропонується наступна структурна схема тягового статичного перетворювача для багатосистемного електровозу з асинхронними тяговими двигунами (рис. 1).

Структурна схема (рис. 1) складається з двох контурів: мережевого та тягового (з тяговим двигуном змінного струму).

Перший контур призначено для перетворення електричної енергії з контактної мережі в напругу змінного струму підвищеної частоти,

яку знімаємо із вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти.

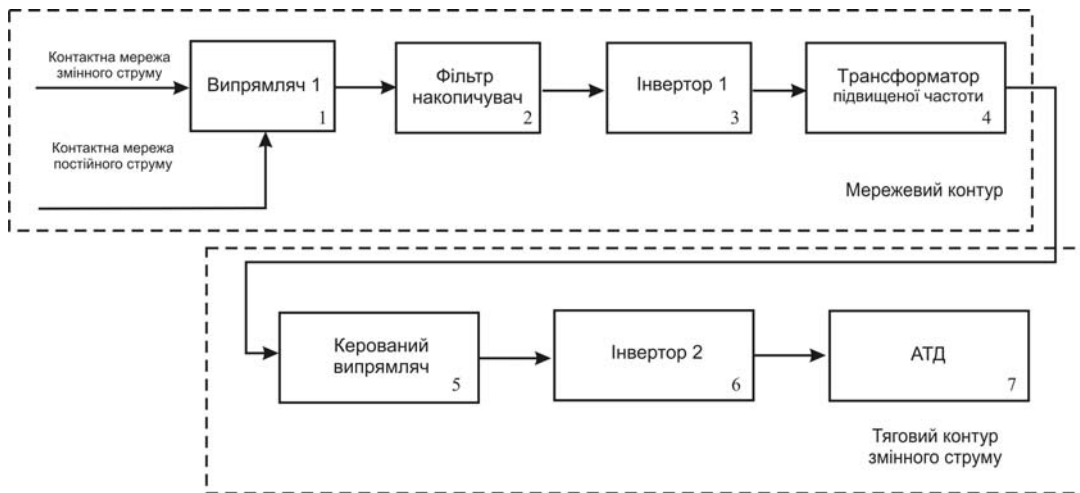


Рис. 1. Узагальнена структурна схема статичного перетворювача тягового приводу з асинхронними тяговими двигунами та ланкою підвищеної частоти

Первина обмотка підключена до виходу високовольтного інвертора 1, вхід якого підключено до виходу випрямляча 1 (керованого або некерованого) при змінному струмі у контактній мережі. При постійному струмі у контактній мережі випрямляч 1 може використовуватися як дільник напруги. Тяговий контур забезпечує перетворення електричної енергії в механічну на валу тягового двигуна.

В залежності від рівня напруги у контактній мережі, кількості тягових двигунів та якого типу силовий модуль тягового перетворювача реалізується (відповідно класифікації, запропонованої в [7]), структурна схема наведена на рис. 1 може видозмінюватися.

Вихідними даними для порівняльного аналізу перетворювальних структур тягового приводу багатосистемних електровозів з асинхронними тяговими двигунами у даній роботі є:

1. Напруга у контактній мережі постійного струму 3 кВ та підвищена до рівня 6, 12 або 24 кВ.
2. Напруга у контактній мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц.
3. Кількість асинхронних тягових електродвигунів – чотири.

Враховуючи вихідні дані, проведемо порівняльний аналіз наступних варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з 4 АТД (табл. 1).

Розглянемо, яким чином можливо реалізувати кожен з варіантів, вказаних у табл. 1, та визначимось, які варіанти доцільно розглядати у подальших дослідженнях.

В якості реалізації першого варіанту (відповідно до табл. 1) можливо використовувати наступну розгорнуту структурну схему (рис. 2),

при цьому реалізується силовий модуль перетворювача типу М1 (на кожен тяговий двигун окремий перетворювач), відповідно до прийнятої у [7] кваліфікації.

Таблиця 1

Варіанти побудови статичного перетворювача тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з 4 АТД

| Варіант побудови | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|---|---|---|---|
| 3 кВ | √ | √ | √ | √ |
| 6 кВ | | √ | | |
| 12 кВ | | | √ | |
| 24 кВ | | | | √ |
| 25 кВ 50 Гц | √ | √ | √ | √ |

На рис. 2 прийняті наступні скорочення: ПР – перемикач режимів (25 кВ 50 Гц або 3 кВ постійного струму); МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр накопичувач; МІ – інвертор мережевого контуру; ТПЧ – трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрямляч тягового контуру; ТІ – тяговий інвертор; АТД – асинхронний тяговий двигун змінного струму.

В режимі «3 кВ» ПР підключає МВ1...МВ4 паралельно до контактної мережі, а в режимі «25 кВ 50 Гц» – послідовно, тобто підключені у режимі дільника напруги контактної мережі.

При цьому на вході кожного МВ діє напруга, яка дорівнює: $\frac{U_{KM}}{4} = \frac{25}{4} = 6,25$ кВ змінного струму, а у режимі «3 кВ» діє 3 кВ постійного струму.

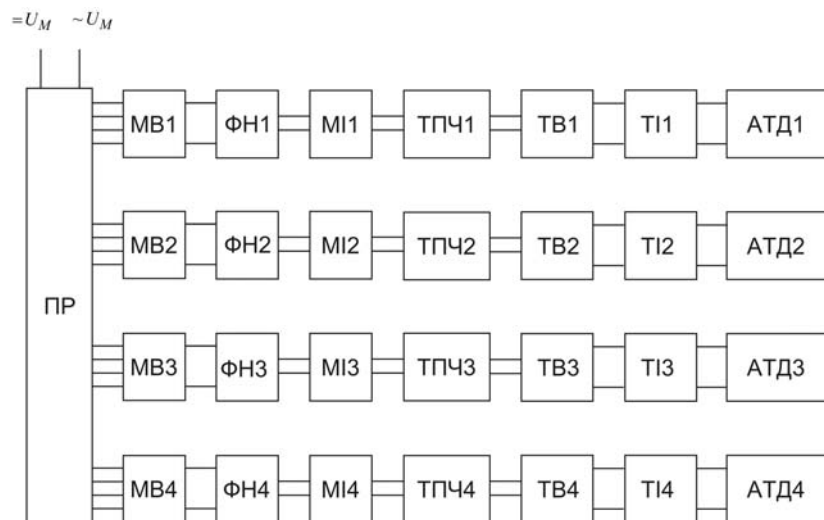


Рис. 2. Розгорнута структура тягового перетворювача: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 4 АТД у разі реалізації модулями М1

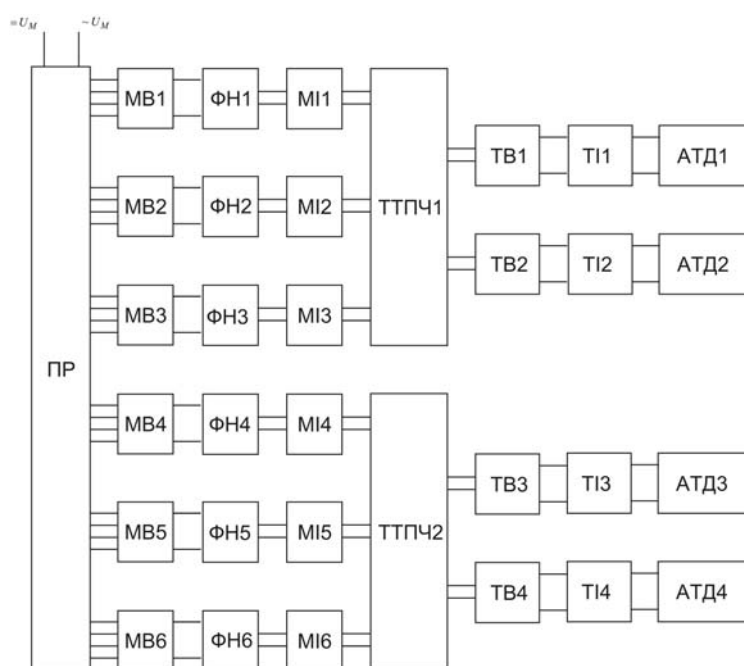


Рис. 3. Структура тягового перетворювача 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 4 АТД у разі реалізації модулями М2

В наведеній схемі на рис.2 використовується однофазні тяговий трансформатор та тяговий випрямляч.

Загальновідомо, що для однофазних мостових випрямлячів встановлена потужність трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) дорівнює $S_{т1фм} = 1,23P_d$, а для трифазного мостового випрямляча $S_{т3фм} = 1,05P_d$, де P_d – потужність навантаження. Тобто доцільне використання трифазних систем. Реалізувати збільшення числа фаз перетворювача можливо за рахунок з'єднання в трифазну систему вторинних обмоток ТПЧ, при одночасній реалізації зсуву напруг первинних

обмоток на 120 ел. градусів, тоді схема, наведена на рис. 2, перетвориться до вигляду, наведеному на рис. 3.

Порівняно зі структурною схемою, наведеною на рис. 2, структура рис. 3 має збільшену кількість елементів мережевого контуру (додано 5-та та 6-та ланки МВ-ФН-МІ).

У схемі, наведеній на рис. 3, інвертори МІ1...МІ6 працюють зі зсувом по фазі один до одного, тобто реалізується принцип багатofазного перетворювача, що, як загальновідомо, дозволяє покращити енергетичні показники перетворювача в цілому.

Крім того, така будова також дозволяє реалізувати модулі М3 та М6 при шести тягових двигунах,

тобто така структурна схема є уніфікованою.

Порівнявши структурні схеми на рис. 2 та рис. 3, неважко зробити висновок, що основними функціональними вузлами, які «відповідають» за роботу з контактною мережею, є ПР та МВ. Саме поєднання цих елементів, в залежності від напруги у контактній мережі, визначає структуру перетворювача в цілому.

Різні варіанти ввімкнення МВ дозволяють забезпечувати роботу перетворювача при різній напрузі у контактній мережі.

В залежності від режиму роботи (з'єднання) перемикача режимів є можливими наступні схеми ввімкнення мережевих випрямлячів при чотирьох АТД у разі реалізації модулями М1 та М2 (рис. 4).

Використовуючи наведені на рис. 4 варіанти з'єднання мережевих випрямлячів, нескладно визначити значення напруги контактної мережі, яка прикладена до кожного з МВ відповідно до виразу: $U_{МВ} = \frac{U_{км}}{a}$, де $U_{км}$ – напруга у контактній мережі; a – кількість послідовно з'єднаних МВ, до яких приложена напруга контактної мережі.

На рис. 5 наведено графік зміни напруги на кожному МВ при різних схемах ввімкнення МВ та різній напрузі у контактній мережі.

Відповідно до залежностей, наведених на рис. 5, варіант «є» рис. 4 (послідовно 3 МВ), який дозволяє одразу реалізувати структурну схему, наведену на рис. 3, підтверджує доцільність використання силового модуля М2, ніж модуля М1, який напряму реалізується варіантом «а» рис. 4 (послідовно 1 МВ), оскільки в режимі 25 кВ 50 Гц, напруга на МВ буде в три рази меншою, тобто $\frac{25}{3} = 8,33$ кВ (при шести МВ, з'єднаних в дві групи по три послідовно).

Але це означає, що для кожного силового модуля є тільки один варіант ввімкнення МВ, так для реалізації модуля М2 можливо використати як варіант «д» за рис. 4, так й інші допустимі схеми. Рівень напруги визначає клас приладів, які будуть використовувати у складі МВ.

Тому в подальших дослідженнях приймаємо наступне: напруга на вході МВ за будь-якої номінальної напруги у контактній мережі не повинна перевищувати 10 кВ. Таким чином, при підвищеній напрузі в контактній мережі 24 кВ постійного та 25 кВ 50 Гц змінного струмів розглядати структурні схеми з одним та двома МВ як з'єднані послідовно у подальших дослідженнях не будемо. Те ж саме приймаємо відносно до схеми з одним послідовним МВ при підвищеній напрузі у контактній мережі 12 кВ.

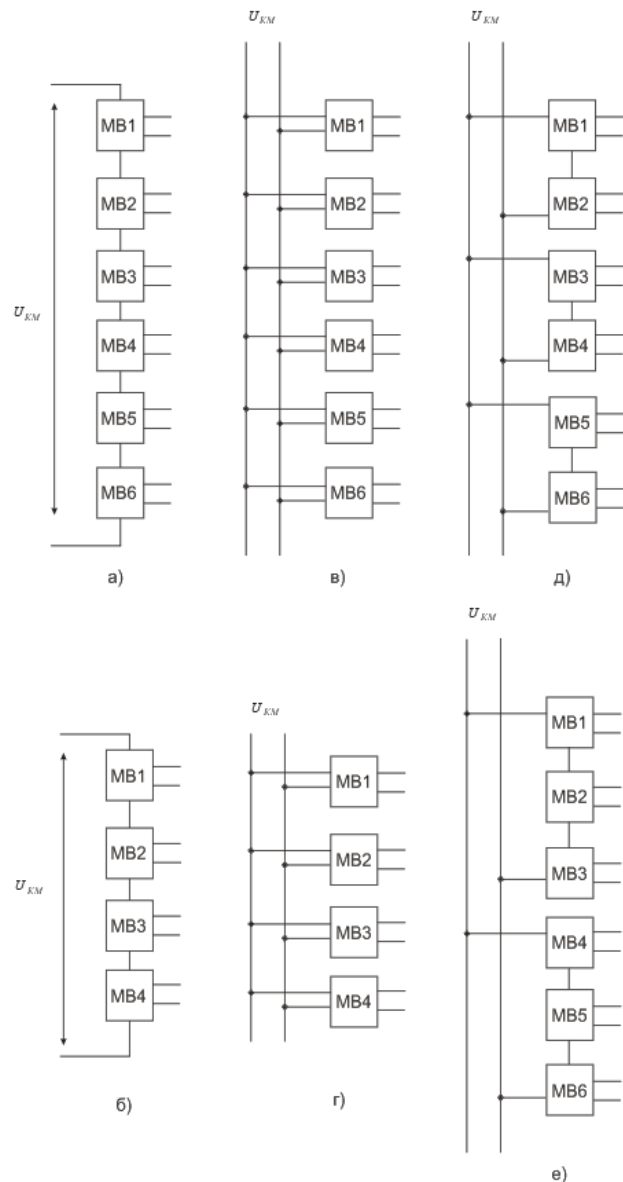


Рис. 4. Схеми ввімкнення мережевих випрямлячів при чотирьох АТД

Для порівняння наведених структурних схем, які реалізують різні варіанти побудови статичних перетворювачів тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів, є доцільним провести порівняння структурної надійності цих варіантів.

Представимо розгорнуту структуру тягового перетворювача «25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму» при 4 АТД у разі реалізації модулями М1 при ввімкненні МВ за варіантом «б» в режимі 25 кВ 50 Гц на рис. 6 та у режимі «3 кВ» (варіантом «г» рис. 4) на рис. 7 для дослідження структурної надійності.

Імовірність безвідмовної роботи перетворювача, структурна схема якого наведена на рис. 6, визначається, враховуючи послідовне, паралельне та послідовно-паралельне з'єднання

елементів структурної, як [9]:

$$P_{\Sigma}(t) = P_I(t)P_{II}(t),$$

де $P_I(t)$ – імовірність безвідмовної роботи послідовно з'єднаних елементів структурної схеми ПР-МВ1...МВ4 (група I на рис. 6):

$$P_I(t) = P_{ПР}(t)P_{МВ}(t)^4;$$

$P_{II}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи паралельно-послідовно з'єднаних елементів структурної схеми ФН-МІ-ТПЧ-ТВ-ТІ-АТД (група III в групі II):

$$P_{II}(t) = 1 - (1 - P_{III}(t))^4;$$

$$P_{III}(t) = P_{ФН1}(t)P_{МІ1}(t)P_{ТПЧ1}(t) \times \\ \times P_{ТВ1}(t)P_{ТІ1}(t)P_{АТД1}(t).$$

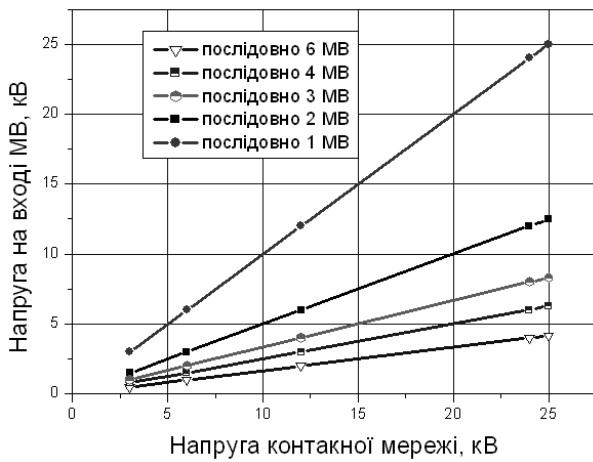


Рис. 5. Напруга на кожному МВ при різних схемах ввімкнення МВ та різній напрузі у контактній мережі

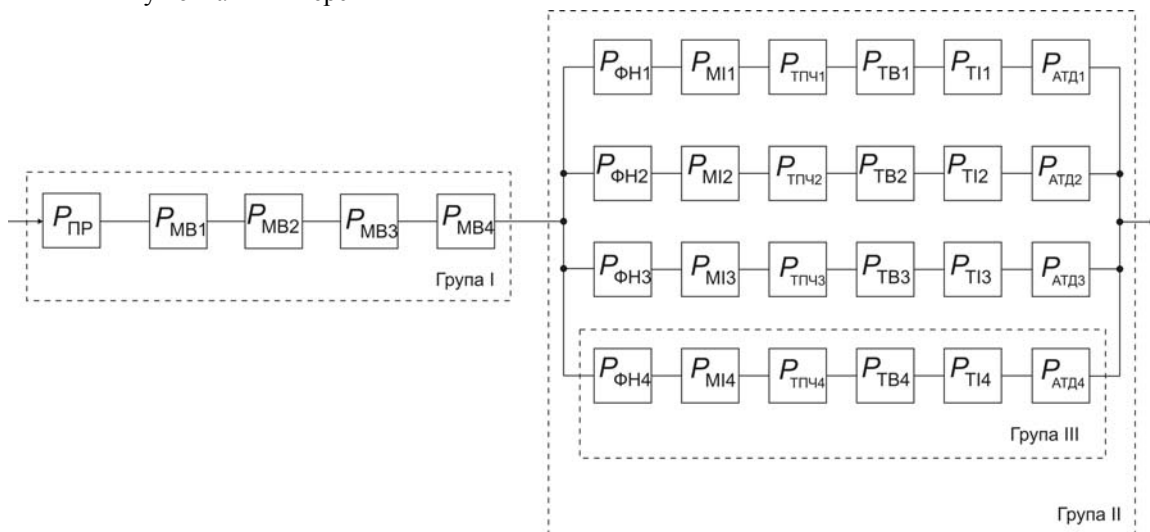


Рис. 6. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача «25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму» при 4 АТД у разі реалізації модулями М1 в режимі «25 кВ 50 Гц»

При визначенні $P_{III}(t)$ приймаємо, що в кожній групі елементів ФН-МІ-ТПЧ-ТВ-ТІ-АТД (група III) використовуються ідентичні елементи.

На практиці, враховуючи, що перетворювач пройшов період припрацювання, потік відмов є елементарним та старіння елементів відсутнє, для визначення імовірності безвідмовної роботи можливо використовувати експоненціальний закон розподілення, тобто [11]:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

де λ – інтенсивність відмов функціонального вузла, або елемента перетворювача.

Враховуючи специфічні умови експлуатації рухомого складу залізниць, експоненціальний закон розподілення імовірності безвідмовної роботи апаратури рухомого складу визначається як

$$P(t) = e^{-k_a \lambda t},$$

де $k_a = 70$ – коефіцієнт враховуючий специфічні умови експлуатації апаратури на русомому складі залізниць [11].

Для порівняння структурної надійності перетворювача у цілому та порівняння різних варіантів його структурної побудови приймаємо, що всі елементи є рівно надійними. Такий підхід дозволить визначити, яким чином впливає на структурну надійність перетворювача не окремі функціональні вузли, а їх поєднання.

Приймаємо інтенсивність відмов всіх функціональних вузлів $\lambda_F = 0,031 \cdot 10^{-5}$ год.⁻¹ (це значення інтенсивності відмов забезпечить період наробітку на відмову, пропорційний 7 рокам експлуатації електровоза).

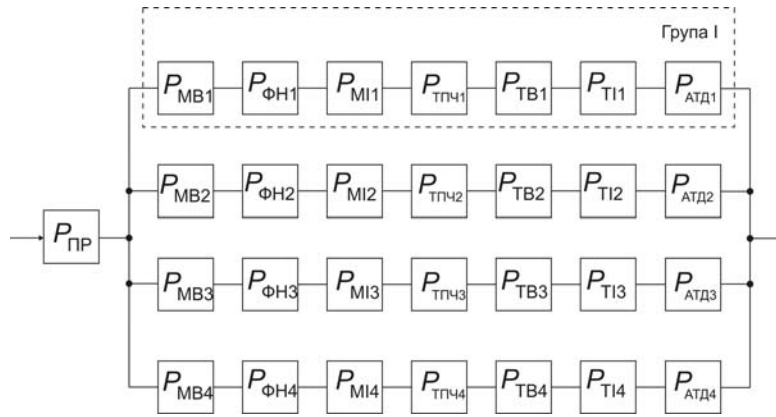


Рис. 7. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача «25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму» при 4 АТД у разі реалізації модулями М1 в режимі «3 кВ»

Тому в подальших дослідженнях імовірність безвідмовної роботи будь-якого з функціональних вузлів визначаємо як:

$$P_F(t) = e^{-k_a \lambda_F t} = e^{-2,17 \cdot 10^{-5} t}$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи перетворювача зі структурною схеми, наведеної на рис. 7, буде визначатися як:

$$P_{\Sigma}(t) = P_F(t) P_1(t),$$

де $P_1(t)$ – імовірність безвідмовної роботи послідовно з'єднаних елементів структурної схеми МВ1...АТД1 (група I на рис. 7):

$$P_1(t) = 1 - (1 - P_F(t))^4$$

Враховуючи це, імовірність безвідмовної роботи перетворювача зі структурною схеми, наведеної на рис. 7, буде визначатися за виразом:

$$P_{\Sigma}(t) = P_F(t) \left(1 - (1 - P_F(t))^4 \right)$$

На рис. 8 наведені графіки розподілення імовірності безвідмовної роботи для структурних схем, наведених на рис. 6 та 7.

Як бачимо з наведених на рис. 8 графіків, більш доцільним є використання для перетворювачів перспективних багатосистемних електровозів з 4 АТД структурної схеми, наведеної на рис. 7, в якій виключено послідовне з'єднання мережевих випрямлячів.

Щодо кількісної оцінки, то приймаємо наступне: в якості порівняльного критерію пропонується використовувати значення часу, за який рівень імовірності безвідмовної роботи досягне значення 0,95.

У разі реалізації статичного перетворювача з 4 АТД силовими модулями М2, у відповідності до рис. 3, враховуючи залежності, наведені на рис. 5, доцільно використовувати з'єднання

МВ відповідно варіанту «е» рис. 4 в режимі 3 кВ постійного струму та варіант «а» рис. 4 в режимі 25 кВ 50 Гц змінного струму.

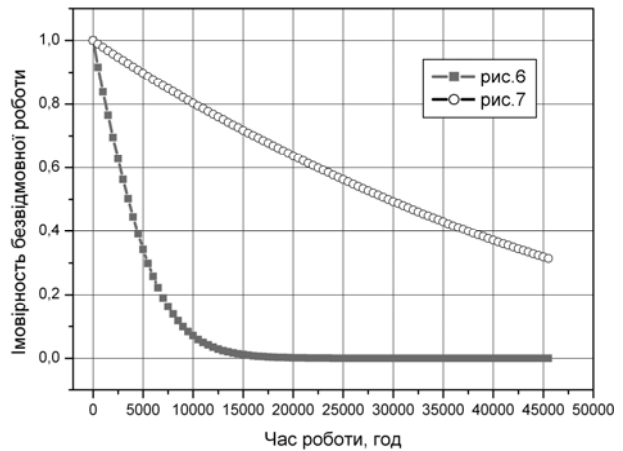


Рис. 8. Графік розподілення імовірності безвідмовної роботи для структурних схем, наведених на рис. 6 та 7

Так, для структурної схеми, наведеної на рис. 6, такий час дорівнює 290 год., а для структурної схеми, наведеної на рис. 7, – 2355 год., тобто є більшим у $\frac{2355}{290} = 8,12$ рази.

Тоді для визначення структурної надійності будемо використовувати структурні схеми, наведені на рис. 9 (режим 3 кВ) та рис.10 (режим 25 кВ 50 Гц).

Враховуючи вищенаведену методику розрахунків, імовірність безвідмовної роботи перетворювача зі структурною схеми, наведеної на рис. 9, буде визначатися як

$$P_{\Sigma}(t) = P_F(t) \left(1 - (1 - P_{IV}(t))^2 \right),$$

де $P_{IV}(t) = P_{III}(t) P_{II}(t) P_F(t) P_1(t)$;

$$P_{III}(t) = P_F(t)^3; P_{II}(t) = 1 - (1 - P_F(t))^2$$

$$P_1(t) = 1 - (1 - P_F(t))^3$$

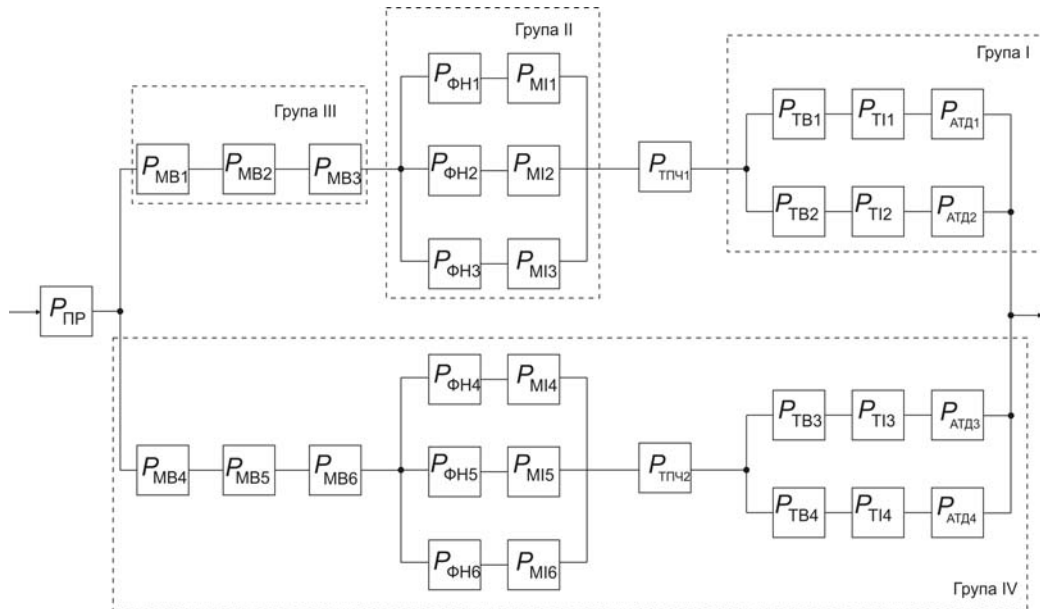


Рис. 9. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача «25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму» при 4 АТД у разі реалізації модулями М2 (за рис. 3) в режимі «3 кВ»

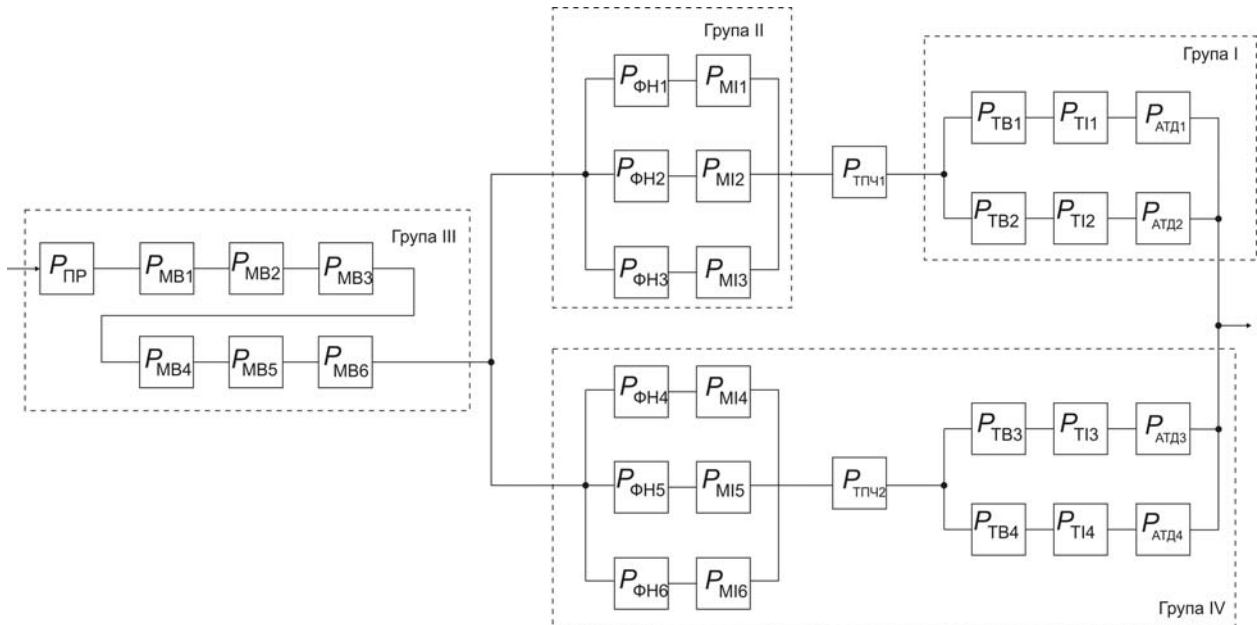


Рис. 10. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача «25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму» при 4 АТД у разі реалізації модулями М2 (за рис. 3) в режимі «25 кВ 50 Гц»

Для структурної схеми, наведеної на рис. 10, імовірність безвідмовної роботи перетворювача буде визначатися як:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{III}(t) \left(1 - (1 - P_{IV}(t))^2 \right),$$

де $P_{III}(t) = P_F(t)^5$; $P_{IV}(t) = P_{II}(t) P_F(t) P_I(t)$;

$$P_{II}(t) = 1 - (1 - P_F(t))^3$$
; $P_I(t) = 1 - (1 - P_F(t))^3$.

На рис. 11 наведено графіки розподілення імовірності безвідмовної роботи для структурних схем, наведених на рис. 9 та 10.

Таким чином, за порівняльним показником «час досягнення імовірністю безвідмовної роботи рівня 0,95», структурні схеми, наведені на рис. 6 та рис. 10, є майже однаковими. Це пояснюється наявністю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів МВ.

За наявності обмеження з боку величини напруги на вході мережевих випрямлячів доцільно використовувати послідовно-паралельне з'єднання МВ, що дозволяє підвищити рівень імовірності безвідмовної роботи перетворювача.

Так, час, за який рівень імовірності безвідмовної роботи досягне значення 0,95 для струк-

турної схеми, наведеної на рис. 9 (з послідовно-паралельними МВ), дорівнює 1535 год., а для структурної схеми, наведеної на рис. 10 (з послідовними МВ), – 335 год., тобто є більшим в $1535/335 = 4,58$ рази.

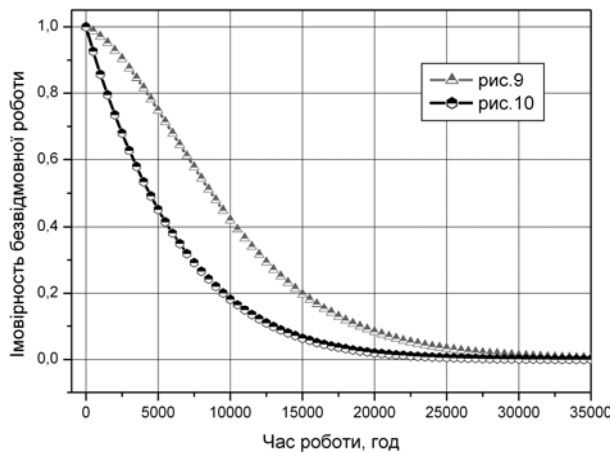


Рис. 11. Графік розподілення імовірності безвідмовної роботи для структурних схем, наведених на рис. 9 та 10

Загальні висновки

Порівняльний аналіз структурної надійності різних варіантів побудови статичних перетворювачів для багатосистемного електровоза з 4 АТД показав, що доцільно при побудові перетворювача не використовувати послідовне з'єднання мережевих випрямлячів МВ.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Федюшин, Ю. М. К проблеме обновления подвижного состава железных дорог Украины. [Текст] / Ю. М. Федюшин, Ю. Е. Пашенко, В. И. Букин // Заліз. трансп. України. – 2001. – № 2. – С. 7-10.
2. Кірпа, Г. М. Основні напрямки поліпшення стану Українських залізниць у сучасних умовах [Текст] / Г. М. Кірпа // Заліз. трансп. України. – 2001. – № 4. – С. 2-6.
3. Дудка, Н. В. Напрямки розвитку локомотивного господарства України. [Текст] / Н. В. Дудка // Заліз. трансп. України. – 2001. – № 4. – С. 16-18.

4. Корниенко, В. В. Существующие и перспективные технологии электроснабжения железных дорог [Текст] / В. В. Корниенко, Г. А. Доманская // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 4. – С. 3-6.
5. Бадер, М. П. Концептуальные решения по нетрадиционным системам тягового электроснабжения и электромагнитной совместимости [Текст] / М. П. Бадер // Материали 2-ой Межд. науч.-практ. конф. «Електрифікація залізнодорожного транспорту “Транселектро-2008”». – Д.: ДИИТ, 2008. – С. 26.
6. Феоктистов, В. П. Нужны многосистемные электровозы [Текст] / В. П. Феоктистов, В. В. Литовченко, О. Б. Баранцев // Локомотив. – 2002. – № 1. – С. 4-5.
7. Муха, А. М. Обґрунтування вибору потужності тягового перетворювача багатосистемних електровозів [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 61-67.
8. Литовченко, В. В. Современные многосистемные электровозы [Текст] / В. В. Литовченко, О. Б. Баранцев // Локомотив. – 2000. – № 10. – С. 44-48.
9. Преснухин, Л. Н. Конструирование электронных вычислительных машин и систем [Текст] / Л. Н. Преснухин, В. А. Шахнов. – М.: Высш. шк., 1986. – 512 с.
10. Дубинець, Л. В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення [Текст] / Л. В. Дубинець, Г. М. Чілікін, А. М. Муха // Зб. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту (технічні науки). Тематичний вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 356-357.
11. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники: в 2 т. [Текст] / под ред. Б. Х. Кривицкого, В. Н. Дулина. – М.: Энергия, 1977. – Т. 1. – 504 с.
12. Якушев, А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения [Текст] / А. И. Якушев. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 312 с.

Надійшла до редколегії 19.03.2009.

Прийнята до друку 09.04.2009.