

2. An order of switching gates of semiconductor pulse converter and modes for optimal control of traction electrotechnical complex of trolleybus have been determined.

3. In the mode of acceleration and deceleration at low speed of traction electrotechnical complex of trolleybus there is ineffective operation.

#### References

1. Bakurov A. R. Reduce the power consumption power drive electrical transport. – Kazan : KGEU, 2005. – 256 p.
2. Koriahyna E.E., Koskyn O.A. Electric equipment of trams and trolleybuses. – Moscow : Transport, 1982. – 296 p.
3. Bohdan N.V. Trolleybus. The theory, design, calculation. – Minsk : Uradzhaj, 1999. – 346 p.
4. Patent № 2322751. MPK H02P7/298, H02P3/14, B60L9/12, B60L7/10. Control device of traction drive / Hlushenkov V.A., Fylyn Iu.Y., Khmarskyi V.N, 20.04.2008, № 11.
5. Patent № 83778. MPK (2013.01), H02P 7/00. Device for regulation traction drive with saving energy / Kurys L.V., Losina K.I., Byalobrzheski O.V., 26.11.2012, № 22.
6. Patent № 2005125490/11 MPK B60L 15/08. Traction drive / Maznev AS., Evstafev A.M., 20.01.2007, № 2.
7. Losina K.I. Energy efficiency control of electrical complex of trolleybus // Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modeliuвання ta optymizatsii, March 28–29, 2012. – Kremenchuk, KrNU, 2012. – P. 237-239.
8. Sinchuk O.M., Lutvuns'kuj L.B., Fedorchenko K.I. The development of energy-efficient algorithm for optimal control of traction motor vehicle // Zbirnyk naukovykh prats XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Problemy enerhoresursozberezhennia v elektrotekhnichnykh systemakh. Nauka, osvita i praktyka. – Kremenchuk, KDU, 2010. – P. 18-21.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Сінчуком О.М.*

УДК 629.423.1

*Т.Ю. Сухоніс, Ю.О. Миколаєнко, О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук*

*(Україна, м. Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)*

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПОЗАШТАТНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ІНВЕРТОР – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДВОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА**

**Вступ.** Тяговий електротехнічний комплекс електровозів із системою напівпровідниковий перетворювач – асинхронний двигун є одним із перспективних, незважаючи на розвиток електровозобудування [3]. Надійність цих комплексів визначається, насамперед, нормальним функціонуванням інверторного перетворювача та асинхронного тягового двигуна. Прикладом електровозів з використанням таких технічних рішень можуть бути магістральні двосистемні електровози ЕП10, ЕП20. Будь-який тяговий комплекс має позаштатні режими роботи з подальшим можливим переростанням їх в аварійні у разі помилкового спрацювання елементів системи керування, виходу з ладу окремих силових блоків, електричних кіл та елементів [5]. Системи керування, цими електровозами мають широкі функціональні можливості [2], однак вони не мають вузлів ідентифікації позаштатної ситуації. Тому функціонування тягового електротехнічного комплексу електровоза не може бути якісним без рішення задачі оцінки нештатних ситуацій з поточним чи подальшим їх аналізом. Отже, актуальною задачею є дослідження параметрів режиму роботи силової схеми тягового електротехнічного комплексу електровоза у позаштатних ситуаціях.

**Мета роботи.** Аналіз структури тягового електротехнічного комплексу двосистемного електровоза, розробка моделі комплексу та дослідження режимів роботи у позаштатних ситуаціях.

**Матеріал та результати досліджень.** На початку розвитку електрифікації вітчизняної залізниці на електрорухомому складі використовувались тягові комплекси виключно постійного струму, які мають свої переваги (простота регулювання швидкості та обертового моменту тягового двигуна, робота з перевантаженням тощо). З часом їх почали замінювати на більш перспективні системи зі змінним струмом. Хоча наразі системи змінного струму прийняті як основні, системи з постійним струмом також продовжують використовувати [1]. Обидві системи об'єднують за допомогою станцій стикування, де відбувається заміна локомотивів постійного та змінного струму. Для виключення цих операцій та прискорення процесу використовують двосистемні електровози. Сучасний рівень напівпровідникової техніки дозволяє раціонально та ефективно реалізувати схемні рішення обох систем на певній апаратній базі.

На рис. 1 наведено схеми силових кіл двосистемного електровоза при живленні його від мережі постійного та змінного струму. При розробці силових схем багатосистемних електровозів завжди намагаються як найбільше використовувати основне тягове обладнання з метою оптимізації масогабаритних показників та вартості комплексу необхідних електричних апаратів.

Ключовими елементами, що визначають побудову силової схеми (рис. 1) тягового електротехнічного комплексу, є силові напівпровідникові пристрої перетворювача (випрямляч (В) та інвертор (I<sub>н</sub>)) Для оптимальної роботи перетворювачів використовують специфічні схеми з'єднання електричних машин (М) (подвійна зірка на електровозі ЕП10) [2].

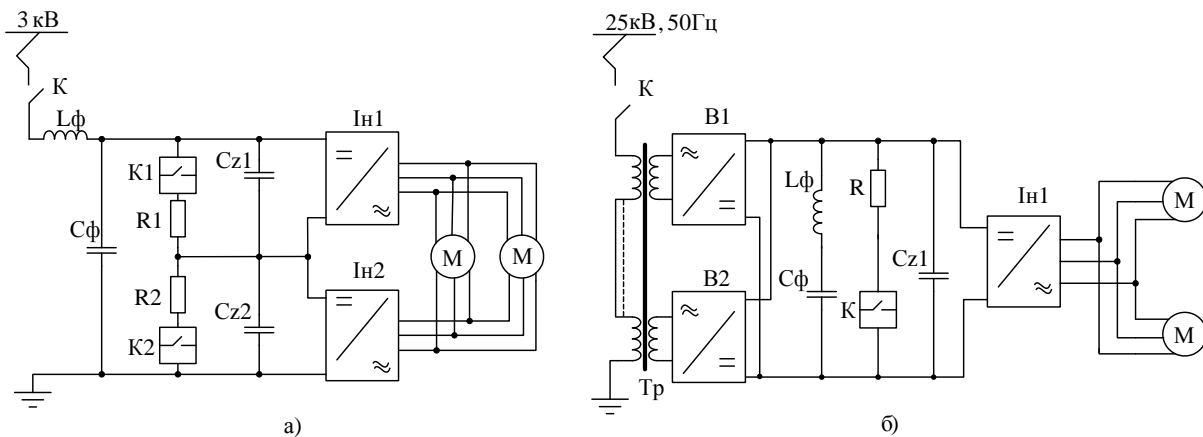


Рис. 1. Конфігурація схем тягового перетворювача при роботі електровоза від системи тягового енергопостачання постійного (а) та змінного (б) струму

Особливість такої схеми полягає в тому, що тягові двигуни мають дві ізольовані одна від одної фазні напівобмотки статора. При живленні від тягової мережі постійного струму схема перетворювача не має вхідного імпульсного регулятора. Тому при роботі із напругою мережі, яка може досягати 4000 В, два інвертори включають послідовно. При цьому кожний з інверторів живить по одній з напівобмоток двох тягових двигунів, що дає змогу контролювати та регулювати рівень напруги на обмотках двигуна.

Напівпровідниковий тяговий перетворювач сконпоновано таким чином, що залежно від потреб відповідними вимикачами реалізується схема з'єднань: мостовий автономний інвертор, мостовий однофазний випрямляч, мостовий мережевий інвертор. Разом з цим додатковими вимикачами перекомутуються гілки кіл фільтрів. Перемикання схеми тягового перетворювача здійснюється комплектом встановлених у ньому системних перемикачів. Але, як видно з рис. 1, для реалізації таких конфігурацій необхідно також перемикати обмотки тягових двигунів зі схеми з'єднання з двома «напівзірками» на «повну зірку». Таке схемне рішення дозволяє, з одного боку, досягти раціонального використання напівпровідникових елементів, а з іншого боку, в позаштатних випадках призвести до некоректної роботи комплексу в цілому.

Іншою з причин щодо виникнення позаштатних режимів роботи може бути відсутність постійного контакту у колі живлення контактний провід – струмоприймач електровоза. Відрив пантографу від мережі живлення є випадковим і непрогнозованим явищем, що залежить від технічного стану пантографу та контактної мережі. Такі нестабільні режими впливають на працездатність та надійність роботи усього тягового електротехнічного комплексу, викликаючи зміну та перерозподіл напруг, струмів, швидкості та споживаної потужності [2–4].

Також при роботі тягового рухомого складу не виключені перешкоди в системі керування, які призводять до помилкових комутацій напівпровідникових вентилів у плечах перетворювачів, що еквівалентно коротким замиканням між фазами двигунів. Це може призвести до переходу позаштатної ситуації в аварійну, значного збільшення струмів, перенапруг, у результаті чого деякі елементи або навіть вся система втрачає працездатність.

Магістральний двосистемний електровоз складається з трьох подібних візків з відповідними тяговими комплексами. Зважаючи на ідентичність кожного тягового кола розроблена модель (рис. 2), яка включає в себе лише один візок, та, відповідно, містить два тягові двигуни.

Модель складена з типових напівпровідникових та електричних елементів та включає: джерело живлення (ДЖ); контактну мережу (КМ); вимірювач потужності (ВП); блок задачі сигналу управління (БЗ); блок формування сигналів (БФ); блок широтно-імпульсного модулятора (БШІМ); датчики струму та напруги (ДС, ДН); трансформатор (Т); діодний випрямляч (ДВ); тяговий перетворювач (ТП); вимірювач напруги та струму (В); асинхронні двигуни (АД1, АД2); осцилографи для дослідження параметрів електричних сигналів (Ос1-Ос4).

Блоки БЗ, БФ та БШІМ у сукупності утворюють систему керування інверторами. У БЗ формується сигнал для задачі управління швидкістю асинхронних двигунів з певною амплітудою та частотою. Блок БФ розраховує сигнали управління за фазними напругами:

$$\begin{aligned}
 u_A(t) &= A \cdot \sin(\omega t) \\
 u_B(t) &= A \cdot \sin((\omega t) - 2\pi / 3) \\
 u_C(t) &= A \cdot \sin((\omega t) + 2\pi / 3)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $A = k\omega$  – амплітуда напруги;  $\omega$  – кутова частота напруги ( $\omega = 2\pi f$ );  $k$  – коефіцієнт періодичності;  $t$  – поточний час.

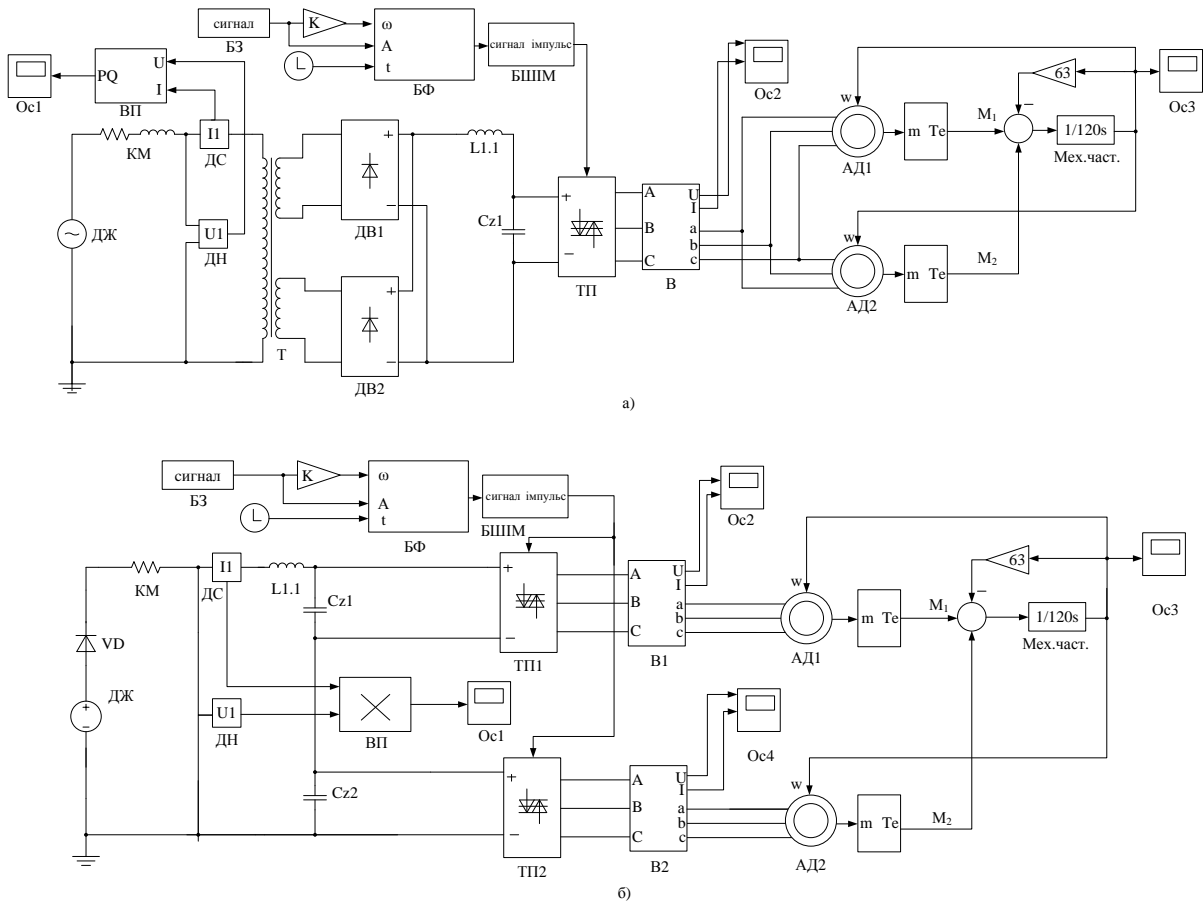


Рис. 2. Моделі силової схеми тягового електротехнічного комплексу двосистемного електровоза при живленні змінного (а) та постійного (б) струму

Сформовані блоком БШМ сигнали модулюються та надходять до інверторів ТП у вигляді імпульсів керування для управління тяговими двигунами АД1 та АД2.

Блок ВП виконує контроль споживаної потужності змінного або постійного струму за значеннями напруги та струму контактної мережі. При роботі системи від мережі змінного струму (рис. 2, а) активна та реактивна потужності розраховуються за такими формулами:

$$P = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (u(t) \cdot i(t)) dt$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (u(t) \cdot i(t - T/4)) dt$$
(2)

де  $T$  – період формування сигналу при основній частоті 50 Гц;  $u$  та  $i$  – миттєві значення напруги та струму відповідно, що подаються на вхід блока ВП.

При роботі системи від мережі постійного струму (рис. 2, б) величину споживаної потужності розраховуються як

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$
(3)

Параметри елементів розраховані за методикою, викладеною в роботі [6] та мають такі числові значення: джерело живлення змінного струму  $U_{ном} = 25\text{кВ}$ ,  $f_{ном} = 50\text{Гц}$ ; постійного струму  $U_{ном} = 3\text{кВ}$ ; контактна мережа змінного струму  $z = 1,25 + j0,008\text{Ом}$  та постійного струму  $z = 0,925\text{Ом}$ ; фільтр в колі постійного струму  $C = 0,055\text{Ф}$  та  $L = 0,00011\text{Гн}$ ; двигуни (АД1, АД2) типу НТА-1200 з номінальними параметрами  $U_{ном} = 2183\text{В}$ ,  $I_{ном} = 385\text{А}$ ,  $P_{ном} = 1200\text{кВт}$ ,  $\eta = 95,7\%$  та з параметрами схеми заміщення

$r_r = 0,037 \text{ Ом}$ ,  $r_s = 0,057 \text{ Ом}$ ,  $L_r = 4,11 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$ ,  $L_s = 4,11 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$ . Припускаючи жорсткий механічний зв'язок між електричними машинами та зважаючи на те, що рухомі маси зведені до валу двигуна, момент інерції з урахуванням на одну вісь згідно з роботою [5]  $J = 120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Для дослідження особливостей протікання нештатних режимів при живленні від контактної мережі змінного та постійного струму було проведено серію експериментів за таких умов:

- помилкове спрацювання тиристора, що еквівалентно короткому замиканню двох фаз двигуна (КЗ АД) (інтервал 0,9 – 0,94 с);
- помилкове неспрацювання тиристора, що еквівалентно обриву однієї фази двигуна (неробочий хід – НХ АД) (інтервал 0,9 – 1,2 с);
- відрив пантографа електровоза (ВП) (інтервал 0,9 до 1,2 с);
- помилкове спрацювання тиристора, що еквівалентно замиканню однієї фази перетворювача з "мінусом" ланки постійного струму (КЗ ТП) (інтервал 0,9 – 0,94 с).

На рис. 3 та 4 наведені часові залежності контрольованих в моделях електричних та енергетичних параметрів режиму. Аналізуючи вказані часові залежності, необхідно виявити схожості та відмінності між ними, тобто ознаки, які дозволять установити відповідність процесу – явищу, яке його викликало в системах моніторингу та діагностики електротранспорту. У разі роботи електротехнічного комплексу за схемами, як на рис. 1, б, рис. 2, а та умов ситуації «КЗ АД» або «КЗ ТП» зміна контрольованих параметрів ідентична. При цьому виникає значне зниження швидкості та зростання струму, але процес зростання струму залежно від місця виникнення ситуації відносно розташування вимірювальних пристроїв має різний характер.

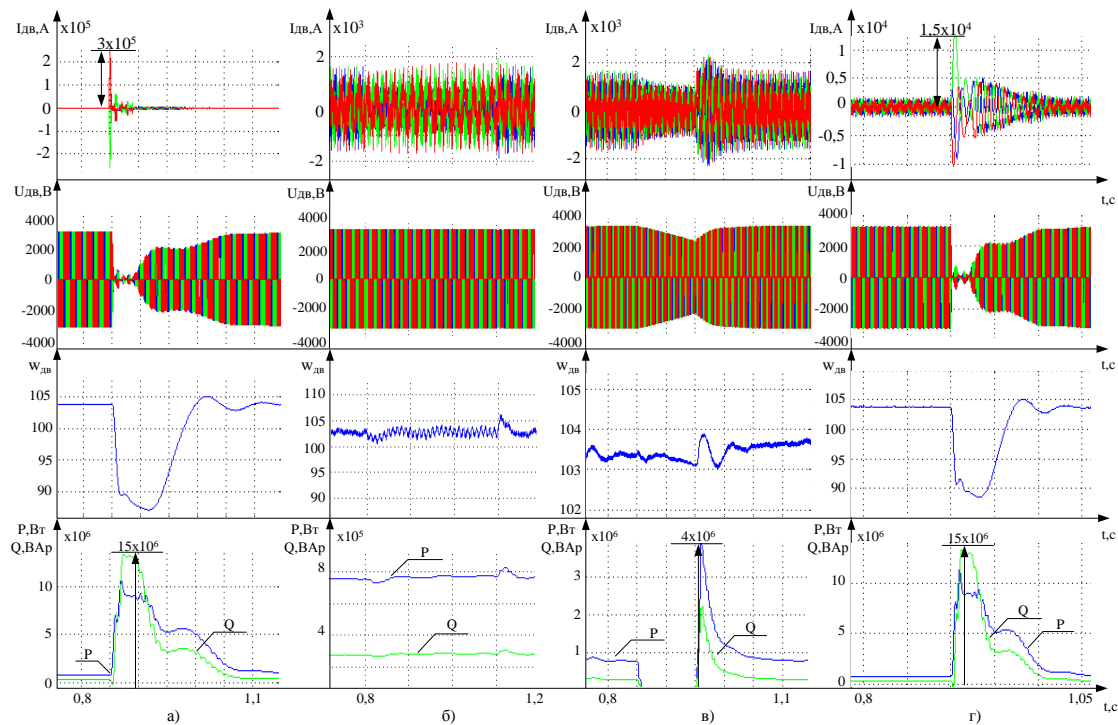


Рис. 3. Часові залежності параметрів тягового комплексу електровоза за умов живлення від мережі змінного струму під час: а – КЗ АД; б - НХ АД; в - ВП та з - КЗ ТП

У ситуації «КЗ АД» потік енергії, яка передається струмом, спрямований від перетворювача до асинхронного двигуна і реєструється вимірювальним елементом (рис. 3, а) з амплітудою 300 кА. У ситуації «КЗ ТП» потік енергії, спрямований через вимірювальний пристрій, з боку асинхронного двигуна (генераторний режим) та струм, який реєструє вимірювальний елемент, складають 15 кА. Виникнення тієї або іншої ситуації призведе до спрацювання відповідних пристроїв захисту, яким оснащений реальний електротехнічний комплекс. Таким чином, ознакою, яка відрізняє вказані ситуації, є саме амплітуда струму.

Ситуація «НХ АД» супроводжується зникненням струму в одній із фаз двигуна, що викликає незначні зміни струму в інших фазах двигуна та в споживаній з мережі потужності. При цьому виникають високочастотні коливання в часовій залежності графіка швидкості машин. Ці коливання викликані несиметрією магнітного поля двигуна, що у свою чергу призводить до механічних вібрацій ротора та візка в цілому. Таким чином, ознакою ситуації «НХ АД» можуть бути високочастотні коливання швидкості та відсутність струму у вимірювальному елементі.

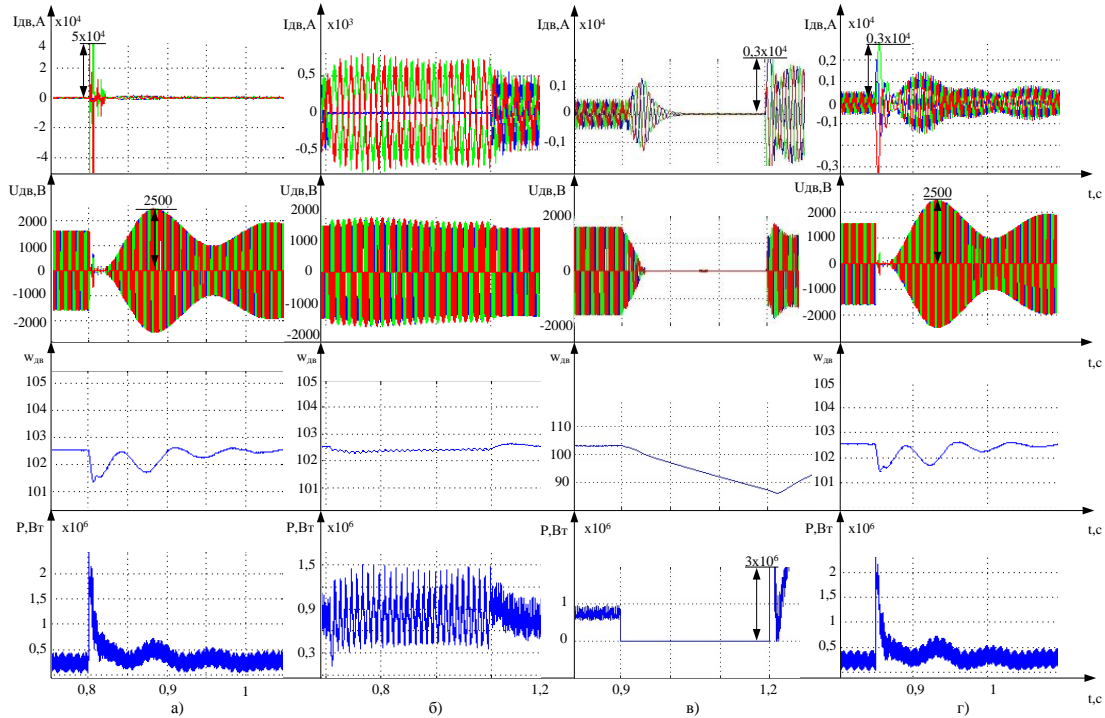


Рис. 4. Часові залежності параметрів тягового комплексу електровоза за умов живлення віз мережі постійного струму під час КЗ АД а); НХ АД б); ВП в) та КЗ ТП г)

Ситуація «ВП» супроводжується зменшенням до нуля споживаної потужності, незначними коливаннями швидкості, зменшенням амплітуди напруги та струму. Це зумовлено запасом енергії, який мають конденсаторні елементи, що входять до складу фільтра. Зникнення ситуації викликає зарядження накопичувачів, що супроводжується різким збільшенням потоку споживаної потужності, зростанням амплітуди напруги та струму без значних перебільшень.

Ситуації «КЗ АД» та «КЗ ТП» у разі роботи комплексу від мережі постійного струму мають ознаки загальні із визначеними для аналогічних ситуацій на рис. 3, а саме: неприпустимі збільшення струмів, зниження швидкості обертання. Але у той самий час їм властиві деякі відмінності у постситуативному проміжку часу. По-перше, зниження швидкості не настільки значне, як видно на рис. 3, а, г; по-друге, схема з'єднання елементів фільтра та живлення електродвигунів від окремих перетворювачів призводить до перерозподілу напруги на конденсаторах та коливальній її зміні, що відбивається на напрузі двигуна, яка у момент часу 0,95 с (рис. 4, а, г) досягає значення  $1,67U_{ном}$ . Таке збільшення напруги неважливе для елементів фільтра який розрахований на напругу мережі, але може бути аварійно небезпечним для двигунів та напівпровідників перетворювача. Таким чином, ознаками, які відрізняють ситуації «КЗ АД» та «КЗ ТП» у разі роботи комплексу від мережі постійного струму, є збільшення напруги в колах двигуна та перетворювача.

Ситуація «НХ АД» має загальні ознаки з відповідною ситуацією при живленні комплексу від мережі змінного струму, але окрім цього має відмінності, які полягають у наступному: по-перше, зникнення струму в одній із фаз викликає збільшення струму в інших; по-друге, збільшується напруга на всіх обмотках двигуна; по-третє, частота коливань швидкості вища, ніж відповідних коливань, та розглянуті на рис. 3, б; по-четверте, цей процес викликає значні коливання потужності, яка споживається з мережі. Таким чином, ознаками, що відрізняють ситуацію «НХ АД» у разі роботи комплексу від мережі постійного струму, є більша частота коливань швидкості та збільшення величин напруг та струмів працюючих обмоток двигуна.

Незважаючи на схему з'єднання елементів комплексу та наявність накопичувачів, ситуація «ВП» у зазначеному проміжку часу її існування, живленні комплексу від мережі постійного струму має незначні коливання швидкості в діапазоні від 102 до 88 рад/с; споживана потужність, амплітуди напруги та струму різко знижуються до нуля в момент відриву пантографа та знову поновлюються до номінальних значень при підключенні пантографа до контактної мережі.

**Висновки.** На основі аналізу структури тягового електротехнічного комплексу рудникового електровоза із живленням від мереж змінного або постійного струму розроблено моделі, які використано як

інструмент для оцінки електроенергетичних процесів під час виникнення визначених позаштатних ситуацій.

Аналіз електричних параметрів у часі при виникненні нештатних ситуацій й та після їх усунення дозволив виявити ознаки, які вирізняють кожен з них незважаючи на аналогію їх розвитку при живленні електротехнічного комплексу від мережі змінного і постійного струмів.

Виявлені під час досліджень ознаки нештатних ситуацій в елементах тягового електротехнічного комплексу можуть бути використані під час розробки систем діагностики, моніторингу або контролю режимів комплексу.

### Список літератури

1. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
2. Система управления и диагностики электровоза ЭП10/ Под ред. С.В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356с.
3. Анализ технического состояния электровозного парка на сети железных дорог России за 1999 г. МПС РФ, Департамент локомотивной тяги, 2000.
4. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрических железных дорог. / Б.Н.
5. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336с.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288с.: ил.

*Рекомендовано до друку к-том техн. наук, доц. Беитою О.С.*

УДК 621.313.323

**О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук, Д.В. Слободенюк**

*Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Робота синхронного двигуна (СД) екскаватора ЕКГ-8І характеризується тривалим режимом роботи з навантаженням, що змінюється безсистемно, через різні проміжки часу [1]. Такий режим роботи при значних накидах навантаження синхронного двигуна без автоматичного регулювання збудження викликає хитання ротора та коливання активного і реактивного струмів двигуна, зниження віддачі реактивної потужності СД у мережу. Хитання ротора та коливання активного струму негативно впливають на стійкість синхронного двигуна і технологічного обладнання, знижується їх надійність, збільшуються втрати електроенергії. Крім того, коливання активного і реактивного струмів викликають відхилення напруги мережі за амплітудою та фазою. Таким чином компенсуюча можливість синхронного двигуна в повній мірі не використовується. Основним методом підвищення динамічної та статичної стійкості синхронних двигунів у перехідних режимах є застосування автоматичних регуляторів збудження.

Автоматичне регулювання збудження дозволяє значно підвищити техніко-економічні показники роботи потужних екскаваторних двигунів та живильної мережі, повною мірою використовувати властивість якості синхронного двигуна – можливість регулювання реактивної потужності [2].

Сучасною тенденцією розвитку систем збудження для синхронних машин є широке застосування швидкодіючих напівпровідникових перетворювачів. Але, незважаючи на їх високу швидкодію, інерційність контуру збудження не дозволяє моментально встановлювати необхідне значення струму збудження в перехідних режимах.

Значний прогрес у перетворювальній техніці пов'язаний зі створенням силових напівпровідникових вентилів у поєднанні з ємнісними накопичувачами енергії. Високі електричні параметри, малі габарити і маса, простота конструкції та обслуговування, висока експлуатаційна надійність дозволяють широко використовувати їх у схемах збудження СД [3]. До недоліків можна віднести: наявність додаткових резисторів в колі збудження, що призводить до втрат електроенергії; використання в схемі напівкерованих тиристорів, які не спроможні запиратись керуючим електродом, а також їх низька робоча частота.

Таким чином, мета роботи – синтез системи та напівпровідникового пристрою збудження синхронного двигуна з ємнісним накопичувачем.

На автоматичні регулятори та системи збудження (АРЗ) синхронних машин покладають такі функції:

- забезпечення підтримання потрібного рівня напруги на затискачах машин або реактивної потужності в сталому режимі системи;
- підвищення статичної та динамічної стійкості при збуреннях в електроенергетичній системі;