

УДК 629.4.014

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.158.2015.63640>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ У
ТЯГОВОМУ АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ РУХОМОГО СКЛАДУ**

Канд. техн. наук С.І. Яцько, магістр Б.В. Паршин, асп. Я.В. Ващенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В
ТЯГОВОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Канд. техн. наук С.И. Яцько, магистр Б.В. Паршин, асп. Я.В. Ващенко

**INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES UNDER EMERGENCY
CONDITIONS IN ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC RAIL VEHICLE**

Cand. of techn. sciences S.I. Yatsko, master student B.V. Parshin, postgraduate Y.V. Vashchenko

Наведено результати досліджень електромагнітних процесів при виникненні аварійних режимів у тяговому асинхронному електроприводі. Описано аналітичні залежності перехідних процесів та результати імітаційного моделювання аварійних режимів. Визначено принципи можливих способів запобігання розвитку таких процесів.

Ключові слова: асинхронний електропривод, автономний інвертор напруги, короткі замикання, провал напруги, неповнофазні режими.

Приведены результаты исследований электромагнитных процессов при возникновении аварийных режимов в тяговом асинхронном электроприводе. Описаны аналитические зависимости переходных процессов и результаты имитационного моделирования аварийных режимов. Определены принципы возможных способов предотвращения развития таких процессов.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, автономный инвертор напряжения, короткие замыкания, провал напряжения, неполнофазные режимы.

It is considered investigation results of electromagnetic processes under emergency conditions in asynchronous traction electric rail vehicle. Analytical dependences and results of transient simulation in emergency operation are described. It defines the principles of possible ways to prevent the development of such processes.

Keywords: asynchronous drive, voltage source inverter, short circuit, voltage failure, unbalance mode.

Вступ. У процесі експлуатації в тяговому асинхронному електроприводі (ТАЕП) рухомого складу завжди можливі випадки виникнення аварійних режимів, які супроводжуються значними струмовими перевантаженнями та призводять до тяжких пошкоджень як в електричних силових колах, так і в механічній частині електропередачі [1,2].

Створення систем діагностування та захисту для запобігання виникненню аварійних режимів обумовлює необхідність досліджень процесів, що відбуваються при таких режимах.

Оскільки експериментальні дослідження стосовно до аварійних режимів на практиці виявляються малоефективними та обмеженими для використання [3], актуальними є дослідження електромагнітних процесів на основі математичних (імітаційних) моделей.

Аналіз публікацій. Питанням дослідження електромагнітних процесів в аварійних режимах присвячено багато робіт у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі [4,5]. На основі аналізу існуючих джерел можна зробити висновок, що зміни електромагнітних величин в аварійних режимах пов'язані:

1) із системою управління приводом та формою модуляції. Відповідні дослідження у вітчизняній літературі стосуються розгляду скалярних систем для тягового привода та промислових векторних [6,7]. У зв'язку з браком досвіду експлуатації, майже немає даних з аварійних режимів у тяговому приводі з векторним управлінням та прямим управлінням моментом;

2) робочою точкою. Як правило, для досліджень у тяговому приводі, з погляду на критичність, обирається робоча точка в біля резонансній зоні двигуна, номінальному режимі роботи або в точках зміни режимів [2,5,8];

3) параметрами тягового асинхронного двигуна. Основним у цьому випадку є вибір потужності двигуна: для моторвагонного рухомого складу та електровозів (наприклад, для АД906 (ДЕЛ-02) $P_H=240$ кВт) та АД914 (ДС-3) $P_H=1200$ кВт) [9];

4) значенням напруги шини постійного струму U_d . Від величини цієї напруги залежить здатність привода витримувати прикладений до нього момент навантаження. Цей параметр

тісно пов'язаний з межами діапазонів системи автоматичного керування (наприклад, 600-1500 В) [9,10]. Для ЕРС постійного струму зв'язок між напругою U_d та фазною напругою тягового двигуна U_l для інвертора напруги $U_d = 2,22 U_l$ [2];

5) параметрами ланки постійного струму (L_d , R_d). Від величини індуктивності згладжувального реактора L_d залежить розвиток аварійного процесу (чим більша L_d , тим повільніше наростає аварійний струм) [11].

6) типом несправності. Найбільш повну, з точки зору охоплення більшості різних та водночас типових несправностей (найбільш імовірних та найбільш небезпечних аварійних режимів) в асинхронному електроприводі, прийнято класифікацію, розглянуту в роботі [12]:

- зовнішні та внутрішні короткі замикання в автономному інверторі напруги (АІН) на стороні постійного та змінного струму;
- провали та відновлення напруги живлення АІН;
- неповновнофазні режими АІН.

Мета роботи. Уточнене визначення параметрів електромагнітних процесів при аварійних режимах у тяговому асинхронному електроприводі рухомого складу.

Результати досліджень. Особливостями системи ТАЕП в аварійних станах є малі часи протікання електромагнітних та механічних процесів, значні величини ударних струмів та моментів, низький рівень напруги в проміжній ланці при коротких замиканнях та ін.

Відмови в автономних інверторах є найбільш частою причиною аварійних режимів в ТАЕП, тому доцільним є аналіз електромагнітних процесів саме в АІН, як найбільш критичному до таких режимів.

У процесі перетворення енергії АІН працює із заданою частотою перемикачів у двох станах напівпровідникових ключів (відкритому і закритому) з кінцевим числом топологій – зв'язків, з яких 8 – можна віднести для нормального функціонування, а інші (248) – до порушень у роботі (аварійних режимів).

Можна виділити три групи комбінацій стану АІН при різних поєднаннях вихідних полюсів із вхідними (рис. 1) [12, 13].

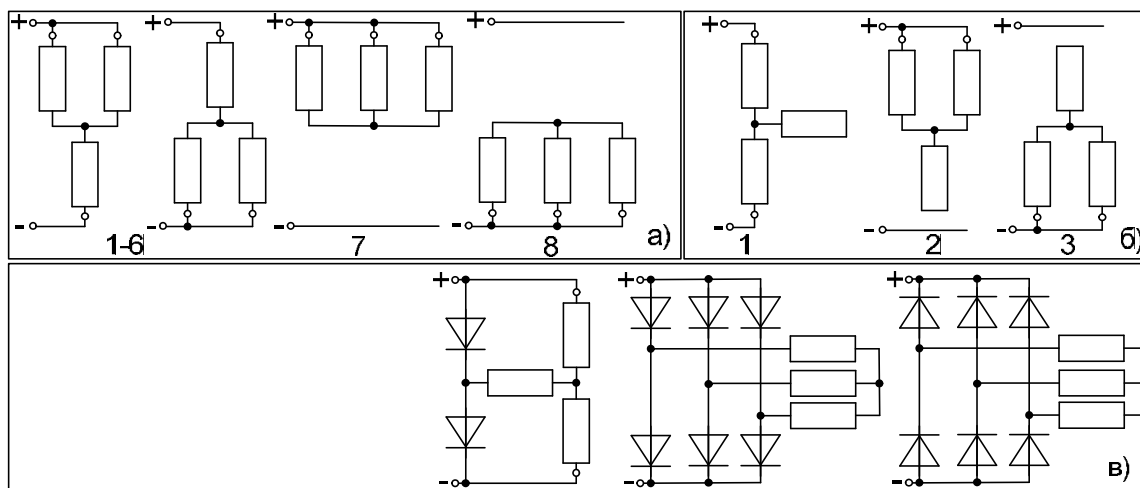


Рис. 1. Групи комбінацій стану схеми АІН: а – нормальні режими; б – неповнофазні режими; в – наскрізні КЗ по колах АІН

Загалом можна класифікувати аварійні режими коротких замикань на внутрішні і зовнішні короткі замикання (КЗ) в АІН. Під внутрішнім КЗ в автономному інверторі мається на увазі аварійний режим, що виникає після виходу з ладу одного із силових ключів інвертора (наскрізного КЗ фази інвертора через пробій транзистора) або внаслідок надходження на силові ключі інвертора «помилкових» (хибних) відкриваючих керувальних імпульсів. Під зовнішніми КЗ надалі маються на увазі закорочення «+» та «-»

вхідного живлення інвертора або двофазного (трифазного) замикання між собою вихідних фаз автономного інвертора.

У ситуації, що розглядається, режим внутрішнього КЗ виникає одночасно з надходженням на силовий ключ -А чергового відкриваючого імпульсу управління за умови, що раніше відкритий ключ +А при цьому не заклався (симетричне КЗ). Описаному режиму внутрішнього КЗ відповідає розрахункова еквівалентна електрична схема, показана на рис. 2 [5,12].

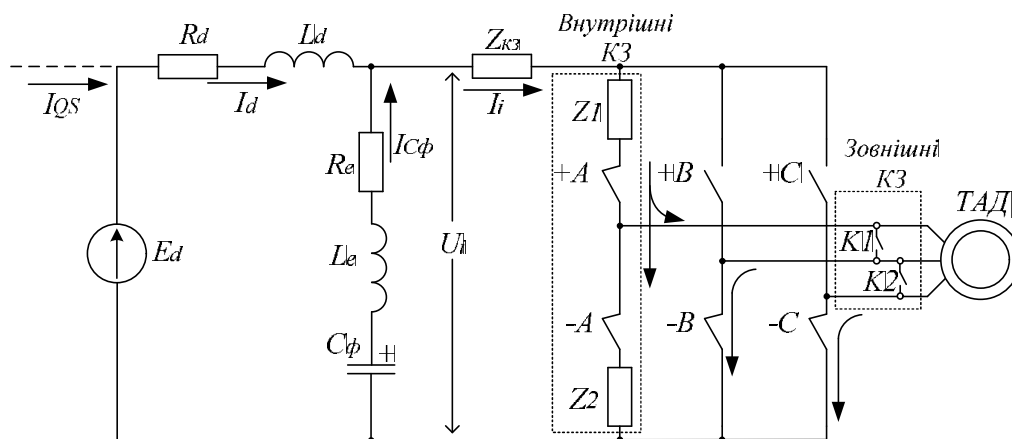


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема для режиму внутрішнього КЗ

Якщо припустити, що опори Z_1 і Z_2 дорівнюють нулю, то ємність вхідного фільтра

буде розряджатися через повний опір короткого замикання Z_{k3} і асинхронний двигун.

Математична модель у режимі внутрішнього КЗ описується співвідношеннями:

для перетворювача частоти:

$$\left. \begin{aligned} E_d - R_d I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} &= U_i = 0, \\ U_{C\phi}(0) - \frac{1}{C} \int_0^t I_{C\phi} dt - L \frac{dI_{C\phi}}{dt} &= U_i = 0, \\ I_i &= I_d + I_{C\phi}, \\ \overline{U}_s &= \frac{2}{3} U_i e^{j\theta_U} = 0 \end{aligned} \right\}$$

для короткозамкнутого АД:

$$\left. \begin{aligned} \overline{U}_s = 0 &= R_s \bar{I}_s + L_\sigma \frac{d\bar{I}_s}{dt} + k \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt}, \\ L_m \bar{I}_s &= \bar{\Psi}_r + T \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - j z \omega T \bar{\Psi}_r, \\ M &= \frac{3}{2} z k \Psi_r I_s \sin(\theta_l - \theta_{\Psi_r}), \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \right\}$$

Струм короткого замикання, що протікає через ключ -А (через транзистори аварійної фази), в режимі внутрішнього КЗ буде визначатися сумою струмів: випрямленого струму I_d , розряду конденсатора фільтра $I_{C\phi}$ та ударного струму ТАД I_A :

$$I_{\text{кз}} = I_d + I_{C\phi} + I_A.$$

Указані три струми виражаються приблизно аналітично через закон Ома з урахуванням початкових значень на момент аварії та відповідних опорів нелінійних елементів [2].

Відповідні значення струмів утворюють значний ударний від'ємний електромагнітний

момент двигуна, який можна записати як множення коефіцієнта на векторний добуток пари векторів потокозчеплень:

$$M_e = \frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{L_m}{L_r} \cdot (\bar{\Psi}_s \times \bar{\Psi}_r).$$

Виникнення ударного гальмівного моменту при КЗ пояснюється зміною взаємного положення векторів потокозчеплення шляхом випередження вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ вектора потокозчеплення статора $\bar{\Psi}_s$, а, отже, переходу двигуна в генераторний режим роботи (рис. 3) [3-5].

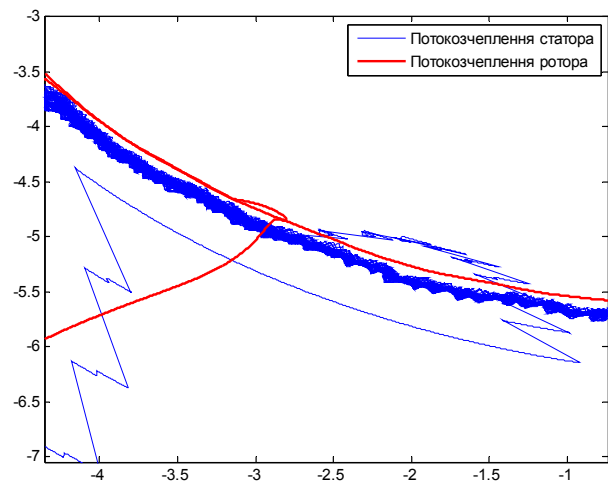
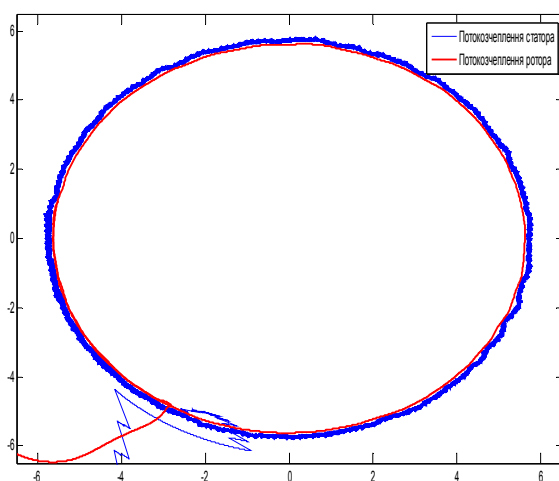


Рис. 3. Годограф потокозчеплень при наскрізному пробії ключа VT1

Зовнішні КЗ в ТАЕП можуть бути двох можливих різновидів:

1) двофазне зовнішнє КЗ (наприклад, між вихідними фазами A і B інвертора) за наявності перемички $K1$. При цьому вказане КЗ призводить, очевидно, до подальшого одночасного внутрішнього КЗ в інверторі по колу: «+» інвертора - відкритий ключ (+ A) - перемичка $K1$ - відкритий ключ (- B) - «-» інвертора;

2) аналогічно, трифазне зовнішнє КЗ інвертора в схемі на рис. 2, призводить до внутрішнього КЗ по колу: «+» інвертора - відкритий ключ (+ A) - перемичка $K1$ - паралельного між собою підключення: відкритий ключ (- B) і коло з послідовно з'єднаних перемички $K2$ і ключа (- C) - «-» інвертора.

На рис. 4 наведено змодельовані характерні електромагнітні процеси для аварійних режимів зовнішніх КЗ в ТАЕП.

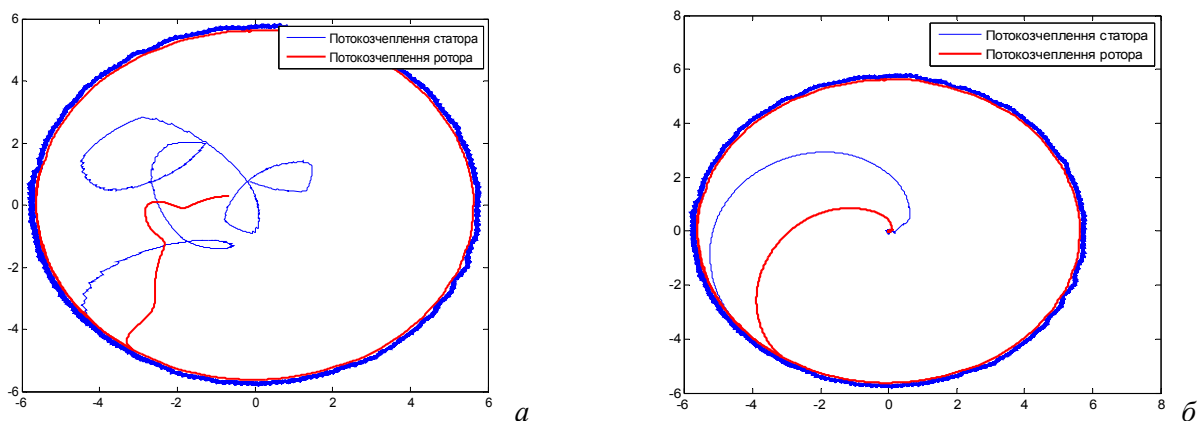


Рис. 4. Годографи потокозчеплень при 2-фазному (а) та 3-фазному (б) зовнішніх КЗ

Завдання автоматичного захисту ТАЕП в аварійних режимах КЗ полягає, по-перше, у забезпеченні неприпустимості наростання струму силових ключів понад його встановлене максимально допустиме значення і, по-друге, в одночасному обмеженні статорного струму АД. Для того, щоб в аварійних режимах внутрішнього і зовнішнього КЗ зберегти справними всі силові ключі, необхідно їх примусово закрити не пізніше часу t_{max} .

Забезпечення надійної та безаварійної роботи ТАЕП при короткочасних (зазвичай тривалістю 1-3 с) раптових глибоких зниженнях живильної напруги, або так званих «провалах» напруги, потребує реалізації певних алгоритмів автоматичного управління або захисту електропривода [4].

При падінні напруги в асинхронному двигуні відбувається різке зменшення крутного моменту в залежності від величини і тривалості падіння напруги та інерції обертових мас. Якщо створюваний двигуном крутний момент стає меншим від моменту опору, двигун зупиняється («перекидання двигуна»).

Перетворювачі частоти зазвичай переходять у стан аварії, коли падіння напруги перевищує 15 %.

Найгіршим випадком зазначеного провалу є стрибкоподібна зміна мережевої напруги від поточного значення до нуля, що відбувається, як правило, при відриві струмоприймача від проводу контактної мережі. При цьому через відкриті в цей момент часу силові ключі АІН відбувається розряд конденсатора фільтра C_ϕ на тяговий двигун. Напруга конденсатора U_K у свою чергу однозначно визначає поточне значення модуля створюваного узагальненого вектора вихідної напруги трифазного АІН:

$$U_s = \frac{2}{3} \cdot U_{C_\phi}.$$

Розглядуваному режиму провалу до нуля та відновленню напруги відповідають розрахункові еквівалентні схеми, показані на рис. 5.

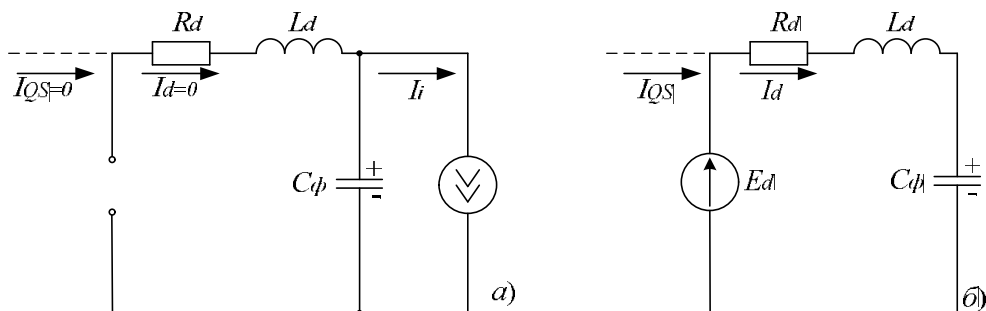


Рис. 5. Розрахункові еквівалентні схеми при провалі (а) та при відновленні напруги (б)

Електромагнітний процес при відновленні напруги описується як

$$E_d = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t I_d dt + U_{C\phi}(0).$$

де $U_{C\phi}(0) \geq 0$ – початкове значення напруги на конденсаторі фільтра C_ϕ (наявне в момент часу відновлення мережевої напруги); t –

поточний час, що відраховується від моменту часу відновлення мережевої напруги.

При відновленні після провалу напруги живлення спостерігається підвищення вхідного струму інвертора I_i та фазних струмів I_A, I_B, I_C до рівня пускових, прирощення моменту M_e , а також значне миттєве зростання напруги на конденсаторі фільтра C_ϕ .

Як ілюстрації до описаного вище, на рис. 6 показано електромагнітні процеси при провалі та відновленні мережевої напруги.

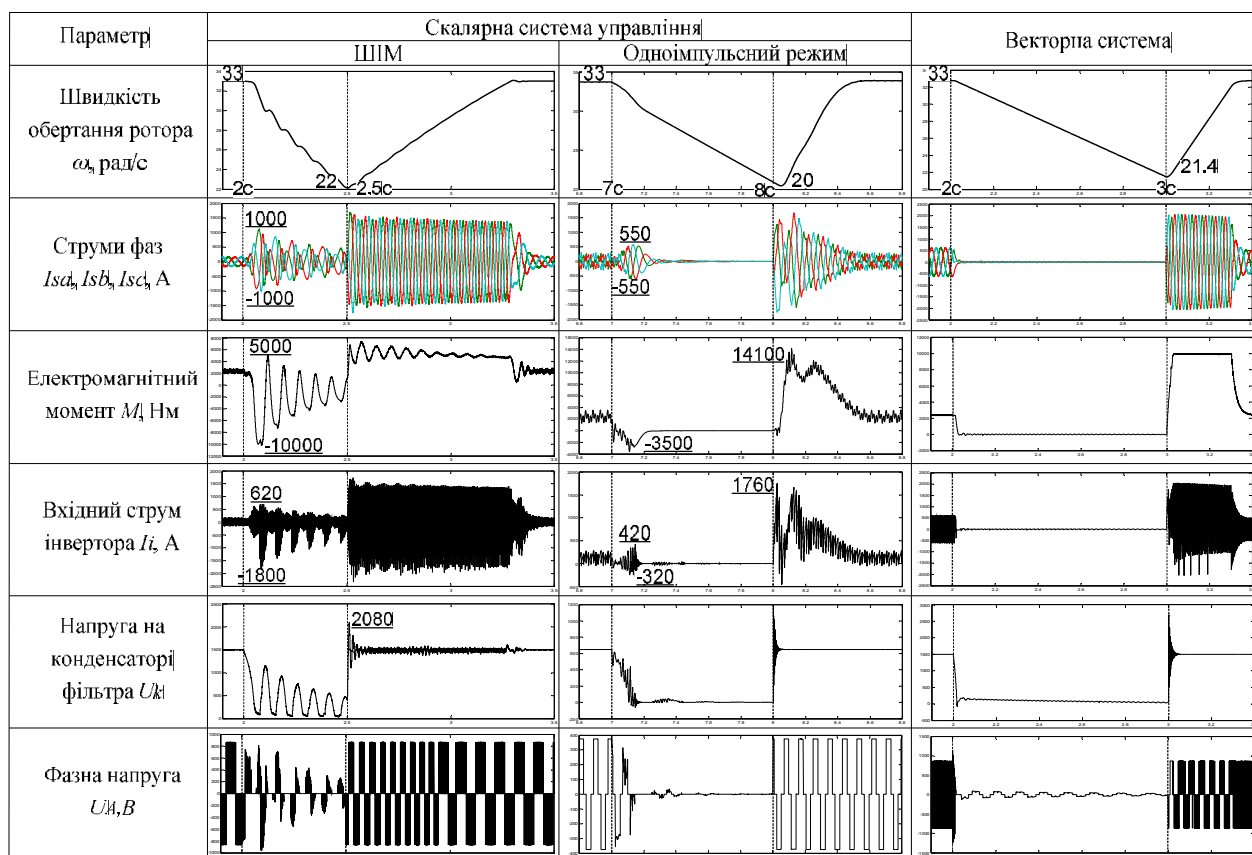


Рис. 6. Електромагнітні процеси в ТАЕП при провалі і відновленні напруги

Виходячи з електромагнітних процесів, що відбуваються при провалі і відновленні напруги, в цих режимах необхідні засоби для зменшення стрибків струмів через силові ключі АІН та зниження перенапруги на конденсаторі фільтра при відновленні напруги.

Вирішення відповідних задач можливе як за допомогою системи керування (наприклад комбінування різних способів модуляції [10]), так і методами діагностики [12]. При цьому необхідне також розроблення алгоритму прийняття рішення щодо відключення асинхронного електропривода, а також автоматичного повторного вмикання (АПВ) при відновленні напруги.

Неповнофазні режими інвертора в ТАЕП включають обриви вихідних фаз інвертора (фаз статора ТАД), або зникнення імпульсів управління на одному або декількох силових ключах автономного інвертора. Такі режими виникають на практиці через несправності в системі керування інвертором, пошкодження у драйверах або спрацьовування одного з власних захистів самого драйвера.

Електрична схема з позначеннями ключів, використаних при подальших дослідженнях, наведена на рис. 7.

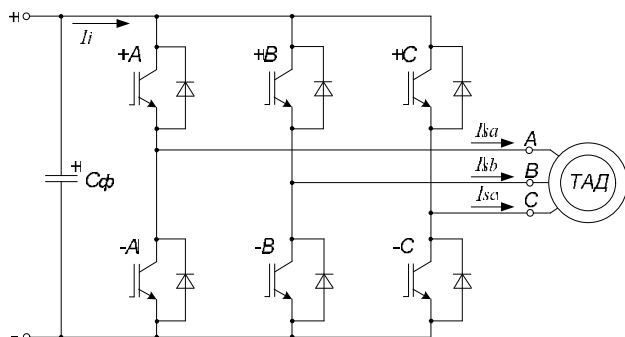


Рис. 7. Електрична схема АІН-ТАД з позначеннями ключів

Незважаючи на різноманіття можливих варіантів неповнофазних режимів інвертора, за ідентичністю характеру протікання електромагнітних процесів їх можна об'єднати в такі шість варіантів при зникненні імпульсів управління: +A; +A,-A; +A,-B; +A,+B; +A,-A,+B; +A,+B,+C.

Очевидно, що неповнофазні режими, які виникають при зникненні імпульсів управління на двох силових ключах (наприклад, +A,-A),

що перебувають в одній фазі інвертора, ідентичні режиму обриву однієї зі статорних обмоток (відповідно фази A) ТАД.

При неповнофазних режимах інвертора з'являються нові можливі варіанти підключення статорних обмоток ТАД (рис. 1, б), що характеризуються двофазним підключенням двигуна до різномісних або до одного з полюсів інвертора відповідно (1 – з підключенням двох статорних обмоток АД до різних полюсів інвертора і знеструмленій третій фазі; 2,3 – з замиканням між собою двох статорних обмоток АД і знеструмленій третій фазі (міжфазні КЗ)). При таких варіантах підключення статорних обмоток АД одна із статорних обмоток двигуна перебуває в знеструмленому стані. Тому в моменти, коли ця обмотка має бути в провідному стані, струм цієї фази буде являти собою «зрізану» синусоїду (втрата черговості додаткових напівхвиль струму фази).

Оскільки для всіх неповнофазних режимів інвертора характерна наявність інтервалів часу, при яких одна із статорних обмоток ТАД знеструмлена, а дві інші з'єднані послідовно, то на цих інтервалах часу дві вихідних фазних напруги інвертора рівні між собою за амплітудою (відповідно $0,5U_{\kappa}$ або нулю), а третя фазна напруга дорівнює нулю. Отже, при неповнофазних режимах створюється інше, ніж у повнофазних значення модуля узагальненого вектора вихідної напруги інвертора:

$$U_s = \begin{cases} \left\{ \frac{2}{3} \left[\frac{U_{\kappa}^2}{4} + \frac{U_{\kappa}^2}{4} + (0)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = \frac{U_{\kappa}}{\sqrt{3}} \\ \left\{ \frac{2}{3} [(0)^2 + (0)^2 + (0)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} = 0. \end{cases}$$

Режим пропуску імпульсів управління не викликає значних перевантажень по струму, однак незбалансований розподіл струмів інвертора призводить до додаткового нагріву для плеча фази.

Слід зазначити, що при аналізі неповнофазних режимів інвертора в обов'язковому порядку слід урахувати нелінійність кривої намагнічування ТАД. Це дає змогу більш точно оцінювати значення струмів, які в цьому випадку будуть значно більшими (рис. 8).

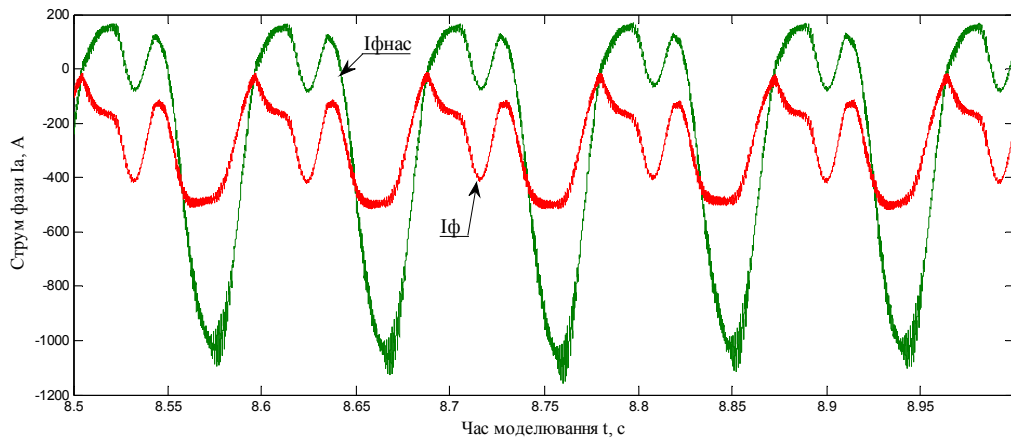


Рис. 8. Фазний струм з урахуванням нелінійності кривої намагнічування ТАД (при несправності пропуску імпульсів управління)

За допомогою розробленої імітаційної моделі ТАЕП досліджені зазначені неповнофазні режими для електродвигуна АД906, що працює в стаціонарному режимі з номінальним навантаженням (рис. 9).

Висновки. Розгляд процесів при аварійних режимах тягового асинхронного

електропривода дов змогу виконати аналітичне описання та встановити характерний вигляд осцилограм електромагнітних параметрів. Наведені дослідження дають змогу визначати діагностичні ознаки, що можуть бути використані при розробленні систем захисту обладнання з таким типом привода.

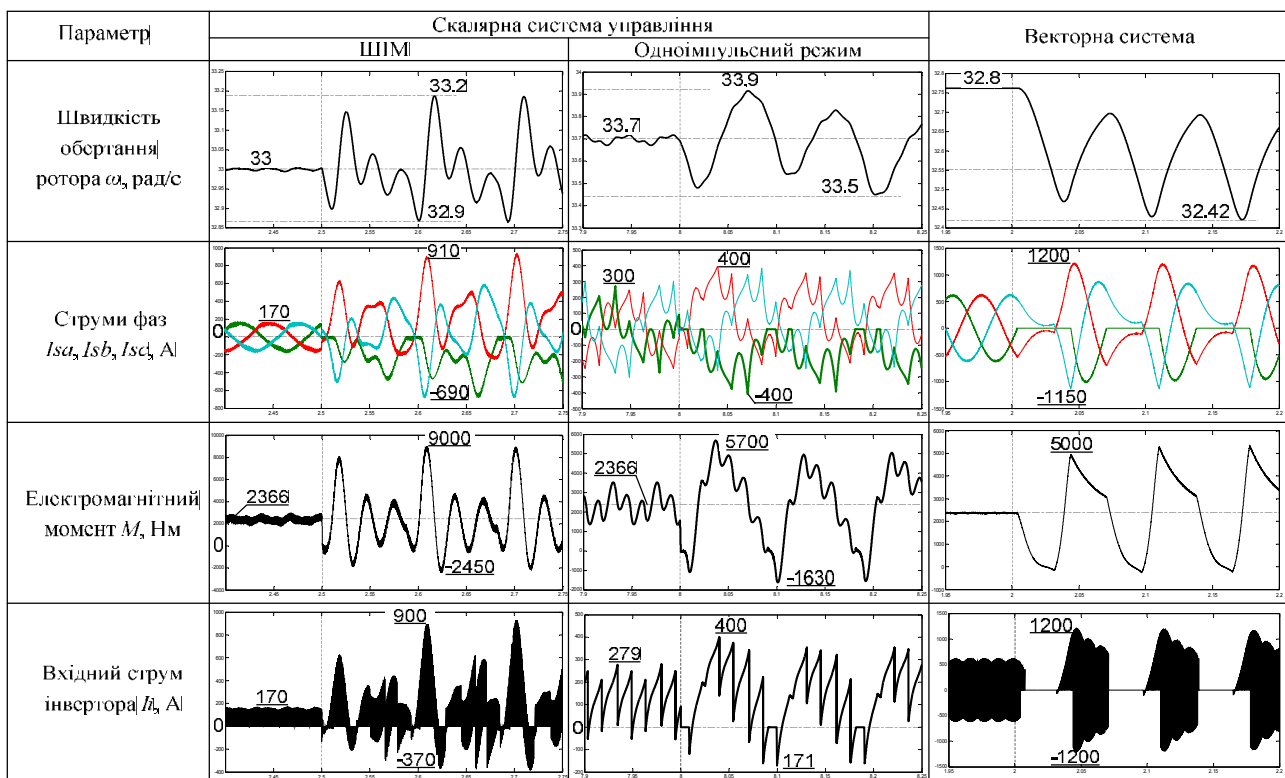


Рис. 9. Електромагнітні процеси, відповідні зникненню імпульсу управління на ключі + А інвертора

Список використаних джерел

1. Электропередачи тепловозов на переменном-постоянном токе [Текст] / И.К. Колесник, Т.Ф. Кузнецов, В.И. Липовка [и др.]. – М.: Транспорт, 1978. – 149 с.
2. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
3. Лашко, Ю.В. Концепция построения интеллектуальных защит асинхронных двигателей [Текст] / Ю.В. Лашко, А.П. Черный // Сб. науч. трудов Кременчугского ГПИ. – Кременчуг: КГПУ. – 2001. – Вып. 1(10). – С. 221-226.
4. Калінов, А.П. Метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора [Текст] / А.П. Калінов, Ж.І. Ухань, І.В. Урдін // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 4/2009(57). – С. 98-101.
5. Retier, N. Etude des defauts dans les associations onduleur – machine asynchrone. Exemple d'une chaine de traction / These pour obtenir le grade de docteur de l'institut national polytechnique de Grenoble. – 1997. – 202 p.
6. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов [Текст] / А.Д. Степанов, В.И. Андерс, В.А. Пречисский, Ю.И. Гусевский. – М.: Транспорт, 1982. – 254 с.
7. Мельников, В.О. Поліпшення енергетичних показників електропривода з векторним керуванням при несиметрії обмоток асинхронного двигуна [Текст]: дис. ... на здобуття канд. техн. наук 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи / В.О. Мельников. – Кременчук, 2013. – 205 с.
8. Метельский, В.П. Ударный момент асинхронного двигателя в частотно-регулируемом электроприводе при коротких замыканиях [Текст] / В.П. Метельский, А.Г. Лохматов // Вісник КДПУ. – 2007. – Вип. 3/(44), ч. 1. – С. 40-43.
9. Кулагін, Д.О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів [Текст]: монографія / Д.О. Кулагін. – Бердянськ: ФОП Ткачук О.В., 2014. – 154 с.
10. Покровский, С.В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 [Текст] / С.В. Покровский. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.
11. Чиженко, И.М. Основы преобразовательной техники [Текст] / И.М. Чиженко, В.С. Руденко, В.И. Сенько. – М.: Высш. шк., 1974. – 430 с.
12. Метельский, В.П. Эффективные алгоритмы управления в аварийных режимах частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами с автономными инверторами напряжения [Текст] / В.П. Метельский, А.Г. Лохматов // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – № 1. – С. 54-58.
13. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст] / Г.Г. Соколовский. – М.: Academia, 2006. – 265 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор А.П. Фалендиш

Яцько Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (050) 907-16-58, E-mail: si_yatsko@mail.ru.
Паршин Борис Валерійович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: xxborissxx@gmail.com.

Вашченко Ярослав Васильович, аспірант, кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (050) 728-21-92, E-mail: yar17680@gmail.com.

Yatsko Sergiy Ivanovitch, cand. of techn. sciences, docent chair of the automated systems of electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, contact tel.: (050) 907-16-58, E-mail: si_yatsko@mail.ru.
Parshin Boris Valerijovych, master student, Ukrainian State University of Railway Transport, E-mail: xxborissxx@gmail.com.

Vashchenko Yaroslav Vasylovych, postgraduate, chair of the automated systems of electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, contact tel.: (050) 728-21-92. E-mail: yar17680@gmail.com.

Наукова праця здана до друку 25.09.2015 р.