

УДК 629.423

ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Д-р техн. наук С. В. Панченко, канд. техн. наук В. В. Панченко, аспірант О. Г. Туренко

ANALYSIS OF EMERGENCY MODES OF TRACTION INDUCTION ELECTRIC DRIVE

Dr. Sc. (Tech.) S. Panchenko, PhD (Tech.) V. Panchenko, postgraduate student O. Turenko

DOI:<https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277955>



Анотація. Проведено дослідження електромагнітних процесів, що відбуваються при аварійних режимах роботи тягового асинхронного електропривода. Наведено результати імітаційного моделювання короткого замикання одного з силових ключів автономного інвертора напруги, зникнення напруги живлення. При імітаційному моделюванні встановлено, що проаналізовані режими спричиняють значні струмові перевантаження, коливання моменту і можуть призвести до виходу з ладу електропривода.

Ключові слова: тяговий асинхронний електропривод, автономний інвертор напруги, імітаційне моделювання, коротке замикання силового ключа, провали напруги.

Abstract. The operation process of the traction asynchronous electric drive of the rolling stock may be accompanied by the occurrence of emergency modes, which are characterized by current overloads and may lead to damaging power electric circuits or mechanical part of the electric drive. Therefore, studying electromagnetic processes that occur in emergency modes of operation is relevant, in particular, for developing systems aimed at diagnosing and protecting traction equipment. Ukrainian and foreign studies of emergency modes in an asynchronous electric drive were analyzed. The most frequent causes of emergency modes are failures in static converters, therefore it is advisable to conduct an analysis of electromagnetic processes specifically in autonomous inverters. Using Matlab/Simulink software environment a simulation model of the vector control system of the traction asynchronous electric drive with spatial vector pulse width modulation was developed, and the short-circuit modes of the power switch of the autonomous voltage inverter and the disappearance of the supply voltage were simulated. The oscillograms of electromagnetic processes in these modes were shown and compared with the nominal mode of operation. The simulation results show that the analyzed emergency modes, even with a short duration of less than

0.5 s, can lead to significant damage to the electric drive. Both cases lead to significant current overloads: in the case of a short circuit of the power switch, a three-fold excess of the phase current is observed, during recovery after a supply voltage failure, the phase currents increase to the starting level, as well as an almost instantaneous increase in the supply voltage on the input filter capacitor occurs. The Fourier analysis of the phase A current in the above emergency modes shows an increase in the coefficient of nonlinear distortions by 65 %, a decrease in the amplitude of the main harmonic to 60 %, and the appearance of a significant number of subharmonics. In the case of a short circuit, the amplitudes of the subharmonics even exceed the fundamental harmonic. In addition, the process of returning from the emergency mode to normal at the first moment of time was characterized by a reduced moment of resistance (20 % of the nominal), and then by an exit to the nominal parameters.

Keywords: traction asynchronous electric drive, autonomous voltage inverter, simulation modeling, short circuit of the power switch, voltage dips.

Вступ. Процес експлуатації тягового асинхронного електропривода (ТАЕП) рухомого складу може супроводжуватися виникненням аварійних режимів, що характеризуються струмовими перевантаженнями та можуть призвести до пошкоджень у силових електричних колах і механічній частині електропривода. Тому дослідження процесів, що виникають при аварійних режимах, є актуальним, зокрема для створення систем діагностування та захисту тягового обладнання. Математичне (імітаційне) моделювання є оптимальним методом дослідження аварійних режимів, оскільки проведення натурних експериментів на реальних ТАЕП ускладнене.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню процесів, що відбуваються при нестационарних режимах роботи (аварійних, неповнофазних тощо) асинхронного електропривода, присвячено велику кількість вітчизняних [1, 2, 5] і зарубіжних робіт [8, 9]. Аналіз існуючих досліджень показує, що найчастішими причинами аварійних режимів в асинхронному електроприводі є відмови в тяговому статичному перетворювачі. У роботі [3] були структуровані найбільш імовірні та небезпечні відмови. До них належать зовнішні та внутрішні короткі замикання в АІН, провали та відновлення напруги живлення та неповнофазні режими роботи АІН. Дослідження [6, 7] присвячені виявленню несправностей в АІН за допомогою штучних нейронних мереж. У

роботах [4, 10, 11] досліджуються неповнофазні режими роботи АІН.

Визначення мети та завдання дослідження. Дослідження електромагнітних процесів при аварійних режимах у ТАЕП з векторною системою керування, а саме короткому замиканні силового ключа автономного інвертора напруги та зникненні напруги живлення.

Основна частина дослідження. Для дослідження обраних аварійних режимів було розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною ШІМ тяговим асинхронним електроприводом, силова частина якої складається з тягового асинхронного електродвигуна АД914, дворівневого інвертора, вхідного фільтра, блока регулювання напруги ланки постійного струму (рис. 1).

Для аналізу змін електромагнітних процесів, що протікають під час аварійних режимів, насамперед необхідно провести імітаційне моделювання системи ТАЕП у нормальному режимі роботи. Як порівнювані параметри було обрано частоту обертання, фазні струми, електромагнітний момент і напругу ланки постійного струму (рис. 2) і проведено Фур'є-аналіз струму фази А I_{sa} (рис. 3).

Процес імітаційного моделювання відбувався за таким алгоритмом:

1. Заряджання конденсатора вхідного фільтра до напруги 3000 В і підтримка його значення гальмівним чопером.

2. Пуск з моментом опору $0,5M_n$, а після виходу на номінальну частоту обертання – збільшення до номінального значення.

У результаті аналізу коефіцієнт спотворення фазного струму склав 26 %.

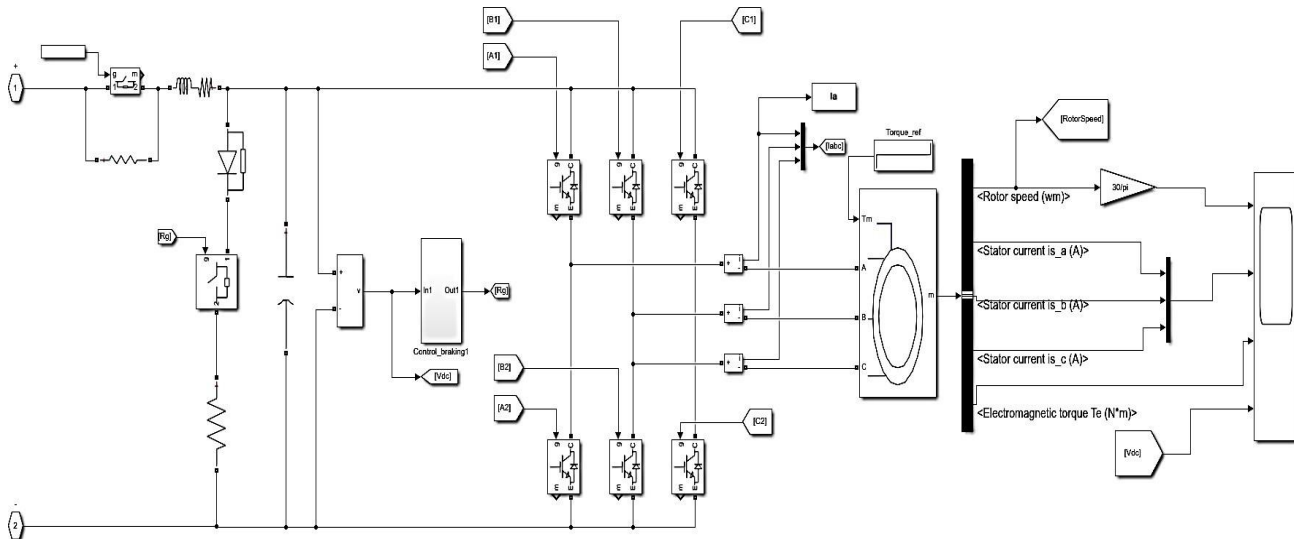


Рис. 1. Силова частина системи ТАЕП

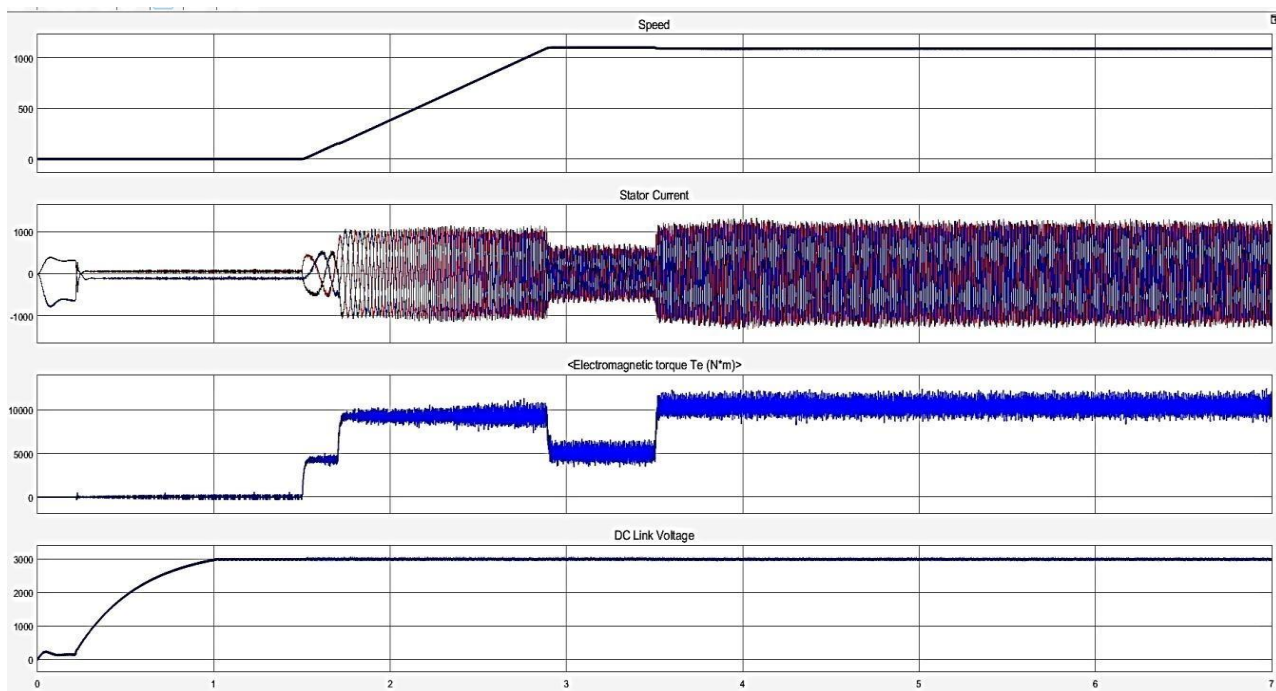
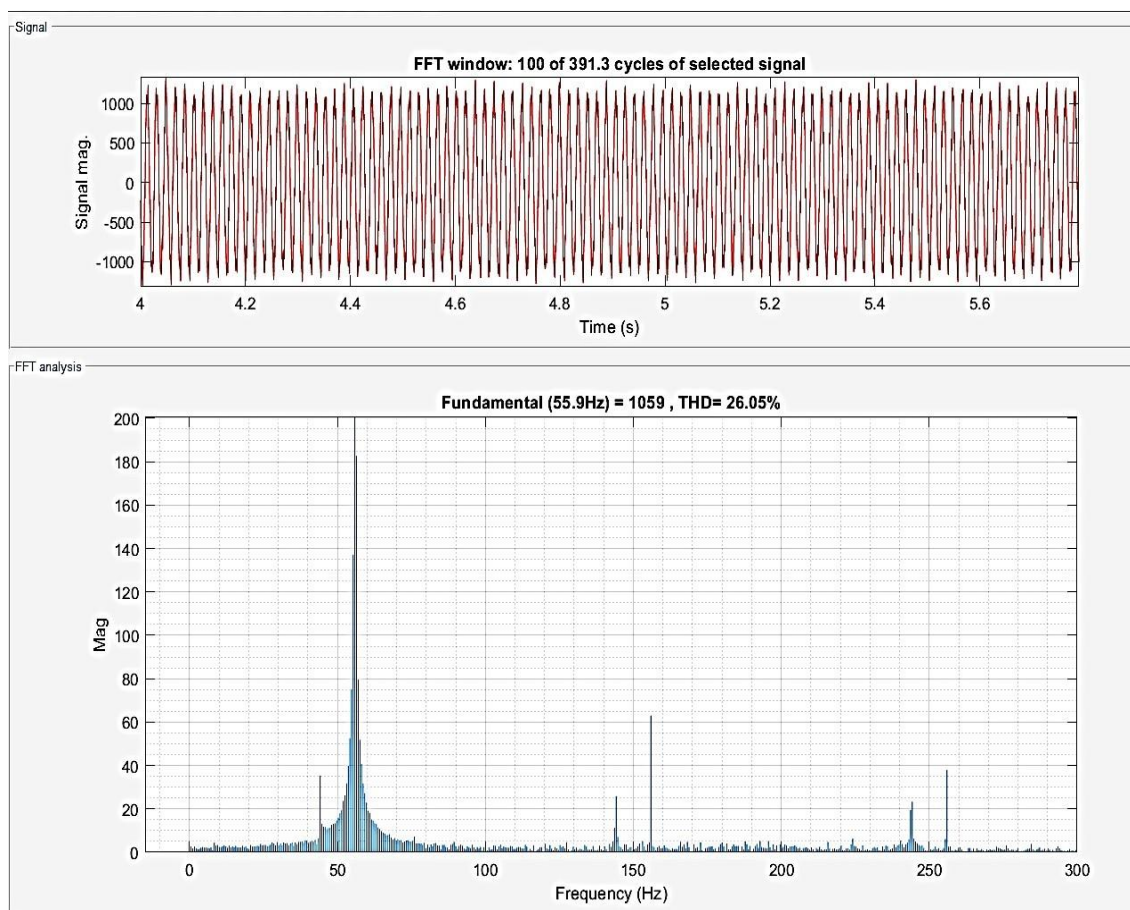


Рис. 2. Результати моделювання нормального режиму роботи ТАЕП

Рис. 3. Фур'є-аналіз струму I_{sa} нормального режиму роботи ТАЕП

Внутрішні та зовнішні короткі замикання в АІН є одними з найнебезпечніших аварійних режимів роботи асинхронного електропривода, оскільки можуть викликати не тільки пошкодження в електричних колах, але й механічне руйнування двигуна, редуктора та виконавчого органу. Під внутрішнім коротким замиканням розуміють вихід з ладу одного з силових ключів АІН, або внаслідок надходження хибного сигналу керування на силовий ключ. Під зовнішнім коротким замиканням розуміють двофазне або трифазне замикання між собою вихідних фаз АІН.

Внутрішнє коротке замикання в моделі було реалізовано шляхом подачі хибного сигналу керування на закриття силового транзистора протягом 0,2 с. Результати моделювання електромагнітних процесів для цього випадку показані на рис. 4 та 5.

Наведені осцилограми показують, що режим короткого замикання силового ключа характеризується малим часом протікання електромагнітних процесів і призводить до швидкого падіння частоти обертання, значних пульсацій моменту, пікового трикратного струмового перевантаження та появи субгармонік, амплітуди деяких навіть перевищують основну.

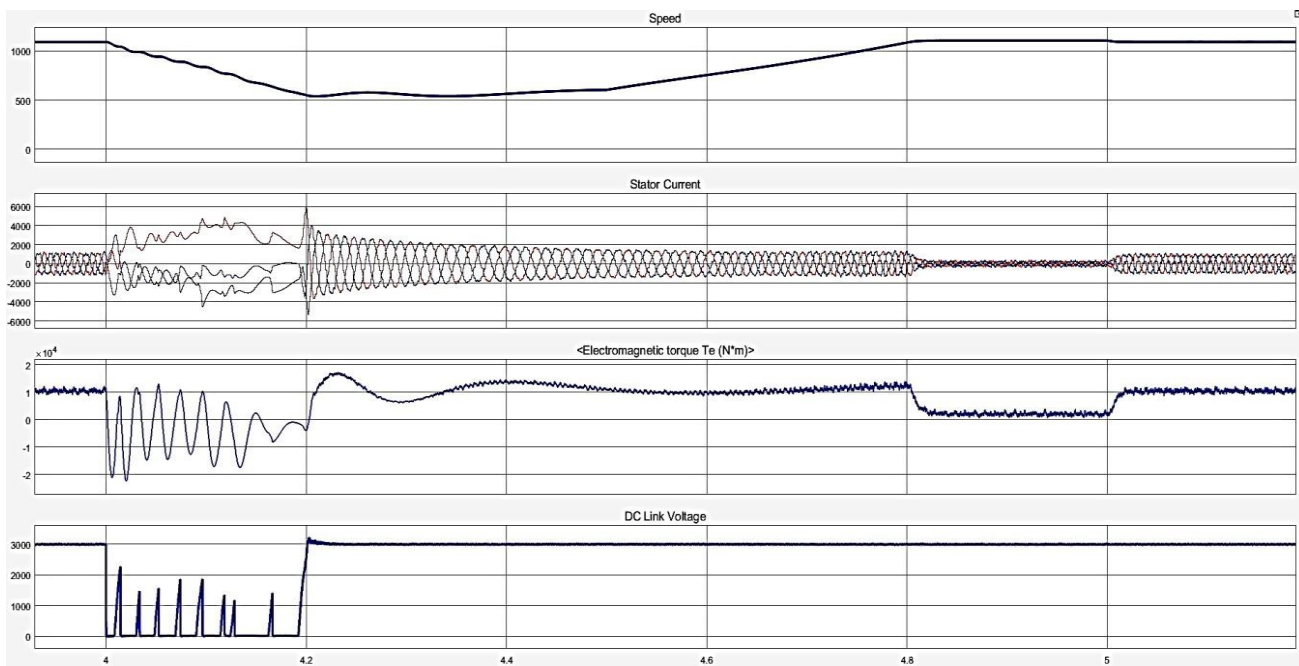


Рис. 4. Результати моделювання ТАЕП при короткому замиканні силового транзистора АІН

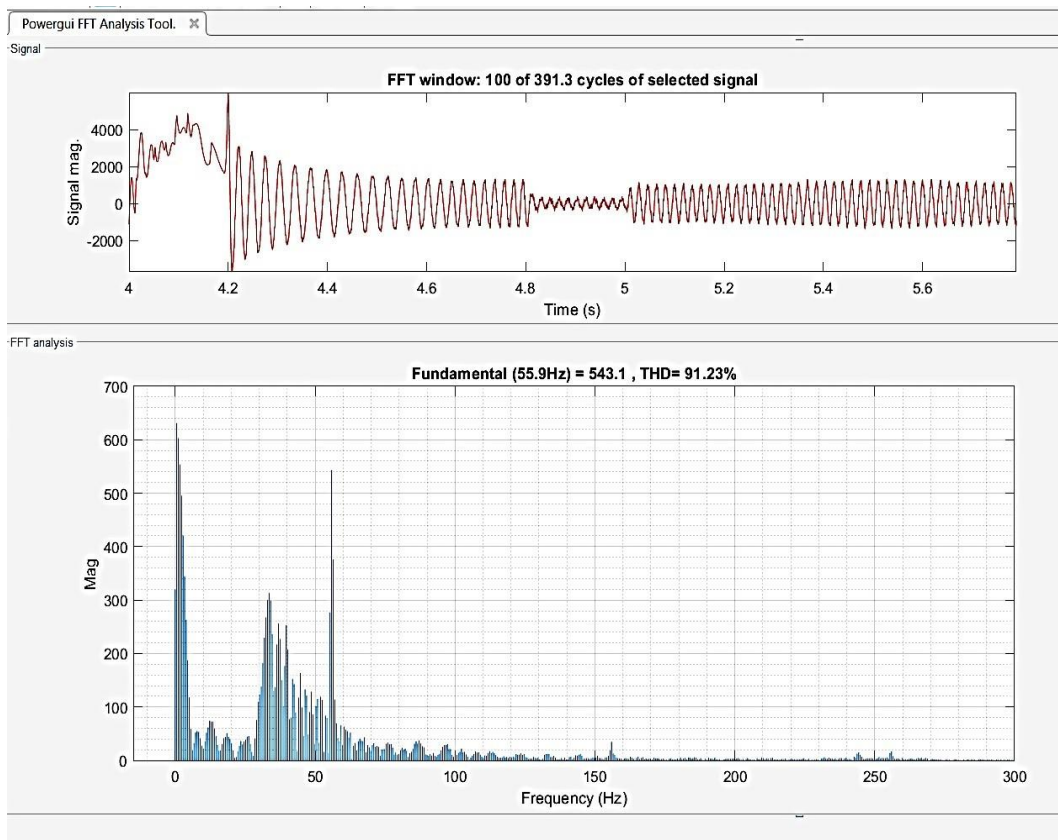


Рис. 5. Фур'є-аналіз струму I_{sa} при короткому замиканні силового транзистора АІН

Під провалами напруги розуміють короточасне часткове зниження, або повну втрату його діючого значення. При падінні напруги в асинхронному двигуні відбувається зниження його електромагнітного моменту залежно від тривалості падіння напруги. Найгіршим випадком провалу напруги є

стрибокподібне падіння напруги до нуля, що трапляється при відриві струмоприймача від контактної мережі. При цьому відбувається розряд конденсатора фільтра через силові ключі на двигун [1]. Результати моделювання електромагнітних процесів у ТАЕП при зникненні напруги живлення показані на рис. 6 та 7.

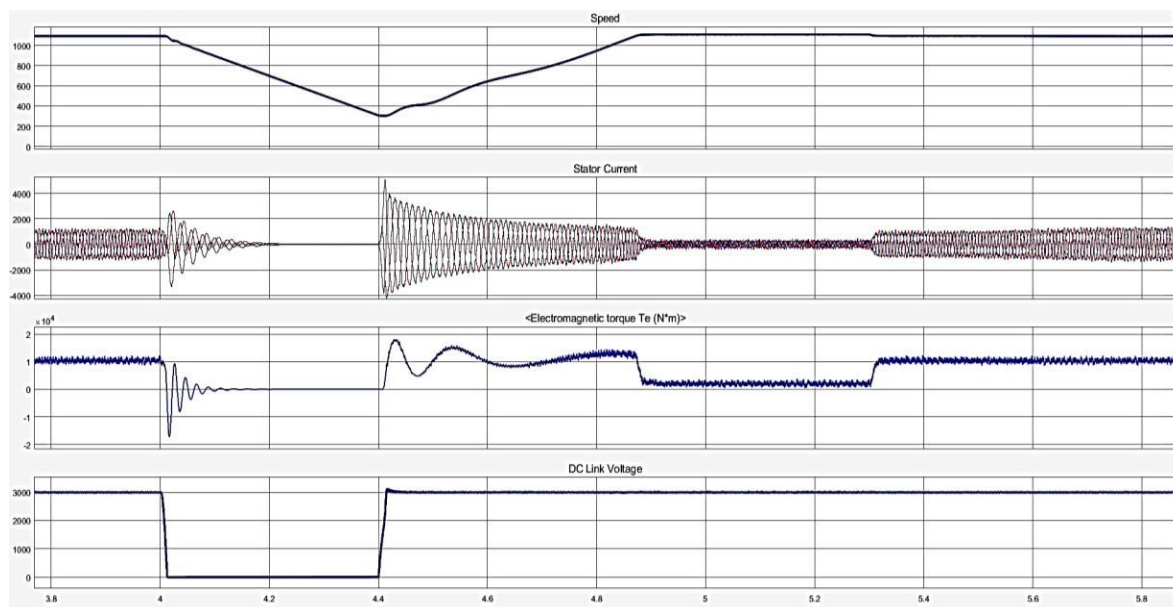


Рис. 6. Результати моделювання ТАЕП при зникненні напруги живлення

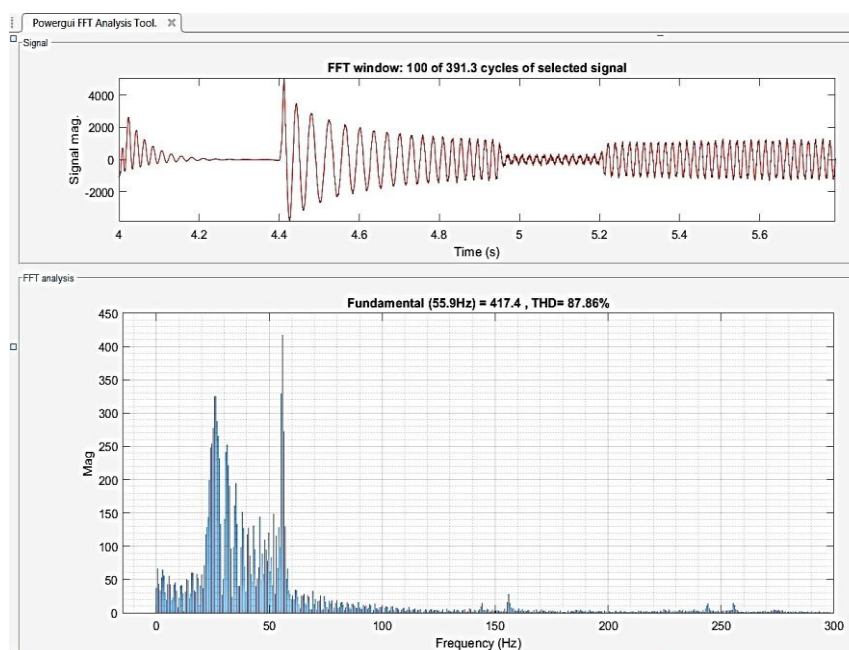


Рис. 7. Фур'є-аналіз струму I_{sa} при зникненні напруги живлення

Як видно з результатів, при зникненні напруги живлення відбувається різке зниження електромагнітного моменту, що призводить до «перекидання двигуна», а при відновленні напруги живлення – підвищення фазних струмів до рівня пускових, швидке підвищення напруги на конденсаторі фільтра. Фур'є-аналіз фазного струму з моменту зникнення напруги живлення і до повернення до номінального режиму показує зменшення амплітуди основної гармоніки на 60 %, появу значної кількості субгармонік з амплітудами, що не перевищують амплітуду основної.

Висновки. У роботі досліджено аварійні режими, які можуть виникати в ТАЕП з тяговим електродвигуном АД914, і виконано порівняння з номінальним режимом роботи. Результати імітаційного моделювання показують, що проаналізовані аварійні режими навіть при короткочасній

тривалості (0,2 с при короткому замиканні та 0,4 с при зникненні напруги живлення) здатні призвести до значних пошкоджень і спричинити зупинку електродвигуна. Обидва випадки призводять до кратних струмових перевантажень, збільшення спотворень фазного струму до 65 %, появи субгармонік з високими амплітудами (у випадку короткого замикання навіть вище основної гармоніки) і значних пульсацій електромагнітного моменту. Крім того, повернення з аварійного режиму до нормального на номінальні характеристики відбувалось при моменті, який складав 20 % номінального. Результати підтверджуються осцилограмами електромагнітних процесів в аварійних режимах роботи і в подальшому можуть бути використані при розробленні елементів захисту такої системи електропривода.

Список використаних джерел

1. Яцько С. І. Система моніторингу стану асинхронного тягового електропривода рухомого складу. *Автоматизовані системи електричного транспорту: збірник наукових праць Укр.ДУЗТ*. 2015. № 153. С. 79-84. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64135>.
2. Калінов А. П., Ухань Ж. І., Урдин І. В. Метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2009. № 4 (57). С. 98-101.
3. Метельский В. П. Эффективные алгоритмы управления в аварийных режимах частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами с автономными инверторами напряжения. *Электротехника та електроенергетика*. 2005. № 1. С. 54-58.
4. Метельский В. П., Лохматов А. Г. Исследование, анализ и идентификация неполнофазных режимов инвертора в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе. *Электротехника та електроенергетика*. 2006. № 2. С. 12-19.
5. Лохматов А. Г. Имитационная модель асинхронного электропривода с АИН-ШИМ для исследования коротких замыканий в автономном инверторе. *Электротехника і електроенергетика*. 2007. № 1. С. 37-43.
6. Abid M., Laribi S. S., Al-asgar Z. S. and Larbi M. Artificial Neural Network Approach Assessment of Short-Circuit Fault Detection in a Three Phase Inverter. *2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN)*. 2021. P. 1-5. doi:10.1109/ICOTEN52080.2021.9493498.
7. Jun L., Junnian W., Wenxin Y., Zhenheng W., Guang'an Z. Open-circuit fault diagnosis of traction inverter based on improved convolutional neural network. *Journal of Physics. Conference Series*. 2020. Vol. 1633. doi:10.1088/1742-6596/1633/1/012099.
8. Ahmad N. S., Abdullah A. R., Bahari N. Open and Short Circuit Switches Fault Detection of Voltage Source Inverter Using Spectrogram. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 190-199. DOI:10.11142/jicems.2014.3.2.190.

9. Ubale M. R., Dhumale R. B., Lokhande S. D. Open switch fault diagnosis in three phase inverter using diagnostic variable method. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. P. 636–640. URL: <https://doi.org/10.15623/IJRET.2013.0212108>.
 10. Elsayed M. E., Hamad M. S. and Ashour H. A. Open-Phase Fault-Tolerant Control Approach for EV PMSM based on Four-Leg VSI. *2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. 2022. P. 1-7. doi: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021774.
 11. Yang S.-C., Chen G.-R. and Jian D.-R. On-Line Stator Open-Phase Fault Detection and Tolerant Control for Permanent Magnet Machines Using the Neutral Point Voltage. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 1073–1082. doi:10.1109/ACCESS.2017.2651113.
-

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Тел.: +380994886100.

E-mail: panchenko074@ukr.net.

Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Туренко Олександр Геннадійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7592-7455.

Тел.: +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Tel.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.

Panchenko Vladyslav, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Tel.: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Turenko Oleksandr, postgraduate student, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7592-7455.

Tel.: +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Статтю прийнято 17.03.2023 р.