

Д.О. Кулагін, канд. техн. наук

### АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

*Наведено результати дослідження енергетичних потоків, що циркулюють крізь тяговий перетворювач частоти. Отримані результати можливо використовувати при синтезі та розробці систем автоматичного керування тягових електропередач для типових транспортних та вантажопідійомних, а також загальнопромислових систем електроприводів.*

**Ключові слова:** система автоматичного керування, тяговий інвертор, тягова електропередача, рекуперація.

Д.А. Кулагин, канд. техн. наук

### АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ТЯГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

*Приведены результаты исследования энергетических потоков, циркулирующих сквозь тяговый преобразователь частоты. Полученные результаты можно использовать при синтезе и разработке систем автоматического управления тяговых электропередач для типовых транспортных и грузоподъемных, а также общепромышленных систем электроприводов.*

**Ключевые слова:** система автоматического управления, тяговый инвертор, тяговая электропередача, рекуперация.

Kulagin D.O., Ph.D.

### ANALYSIS OF ENERGY FLOWS TRACTION FREQUENCY CONVERTER

*Results of research of energy flows circulating through the traction Converter of frequency. The results obtained can be used in the synthesis and development of systems of automated control of traction power for a typical transport and load-lifting, and General industrial systems of electric drives.*

**Key words:** automatic control system, traction inverter, traction transmission, recuperation.

**Вступ.** В системі тягової електропередачі тяговий перетворювач може виконувати роль джерела напруги або струму. Надання тяговому перетворювачу властивостей, близьких до властивостей ідеальних джерел напруги (струму) забезпечується введенням до внутрішніх контурів регулювання зворотних зв'язків за напругою або струмом перетворювача. При цьому якість перетворення параметрів електричної енергії можна оцінювати здатністю тягового перетворювача відтворювати зміну керуючих впливів з мінімальними викривленнями [1-3]. При побудові структур та систем регулювання тяговими перетворювачами частоти необхідно врахувати особливості електромагнітних перехідних процесів, характер яких визначається режимом, в якому працює тяговий перетворювач [4-6]. Тому такі дослідження є актуальними.

**Мета роботи** – дослідження енергетичних потоків, що циркулюють крізь тяговий перетворювач частоти.

**Матеріал дослідження.** На холостому ході асинхронний двигун споживає струм, що умовно розділяється в теорії електричних

машин [7] на реактивну складову, яка визначається, в основному, струмом намагнічування і активну складову, яка визначається моментом холостого ходу та втратами в двигуні. Реактивна складова в системі автономний інвертор напруги – асинхронний двигун замикається по контуру: ємність фільтра перетворювача і обмотки двигуна, або, у відповідності до обраної схеми заміщення, по контуру намагнічування. При цьому активна складова струму протікає через випрямляч. Окрім того, випрямляч забезпечує підзарядку конденсатора фільтра, компенсуючи втрати від протікання через фільтр реактивної складової струму та струмів витоку. Тобто, через випрямляч протікає сумарний струм, що визначається навантаженням та втратами в перетворювачі. В генераторному режимі асинхронного двигуна змінюється напрямок активної складової струму, що визначає наступні режими при гальмуванні, які визначаються швидкістю зміни частоти інвертора (ковзання двигуна), величиною махових мас та статичного моменту на валу двигуна:

- енергія, що накопичена в роторі двигуна та елементах тягової електропередачі, в процесі гальмування повністю розсіюється в

активних опорах обмоток двигуна та елементах тягового перетворювача без перевищення значень струмів та напруг понад припустимі;

- енергія, що накопичена в роторі двигуна та елементах тягової електропередачі, повертається до джерела живлення, викликаючи збільшення напруги на конденсаторі фільтра та струмів через ключі тягового інвертора напруги понад припустимі значення [8].

Перший режим є характерним для випадку повільної зміни частоти статора при значному статичному моменті, приведеному до вала двигуна [9]. Другий режим, як правило, аварійний та потребує прийняття спеціальних заходів для попередження виходу з ладу елементів схеми. Даний режим виникає при значних махових масах та швидкій зміні частоти інвертора, що викликає різке збільшення ковзання [10]. Активна складова струму статора, що є пропорційною ковзанню, збільшує заряд конденсатора фільтра, що призводить до насичення двигуна і подальшого зростання реактивної складової струму статора. При рекуперації в тяговій системі на основі автономного інвертора напруги можна виділити чотири характерних фази, що показано на рис. 1. В даному випадку будемо вважати, що зміна ковзання відбувається стрибком в момент часу  $t_1$ . При цьому, активна складова струму статора (струму тягового інвертора)  $i_a$  змінює знак. Тоді конденсатор фільтра, ємністю  $C_\phi$ , заряджається спадним струмом випрямляча  $i_d$  та струмом інвертора  $i_a$ . В більшості випадків частиною участі випрямляча в підзарядці конденсатора для практичних розрахунків можна знехтувати з огляду на те, що час спадання струму від моменту часу  $t_1$  до моменту часу  $t_2$  є значно меншим часу безструмової паузи від моменту часу  $t_2$  до моменту часу  $t_3$ . На ділянці від моменту часу  $t_2$  до моменту часу  $t_3$  конденсатор заряджається струмом тягового інвертора. При цьому вважаємо, що ковзання двигуна є незмінним, тоді струм підзарядки конденсатора є постійною величиною. Впливом пульсацій струму, що викликані обміном реактивною енергією між обмотками тягового асинхронного двигуна та конденсатором,

на величину напруги на конденсаторі нехтуємо з огляду на їх малість.

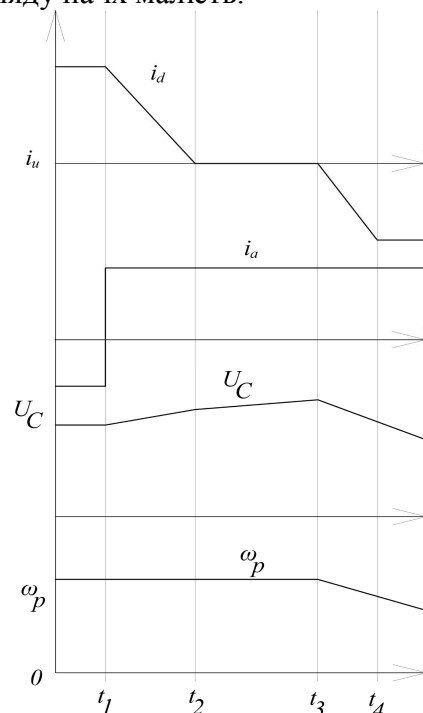


Рис. 1. Виділення характерних ділянок роботи тягової електропередачі в процесі рекуперації енергії

На ділянці від моменту часу  $t_3$  до моменту часу  $t_4$  вмикається тяговий інвертор і починається рекуперація енергії.

**Висновки.** 1. Досліджено енергетичні потоки, що циркулюють крізь тяговий перетворювач частоти.

2. Отримані результати можливо використовувати при синтезі та розробці систем автоматичного керування тягових електропередач для типових транспортних та вантажопідйомних, а також загальнопромислових систем електроприводів.

### Список використаної літератури

1. Аранчий Г. В. Тиристорные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов [Текст] / Аранчий Г. В., Жемеров Г. Г., Эпштейн И. И. – М. : Энергия, 1968. – 128 С.

2. Башарин А. В. Управление электроприводами [Текст] / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 С.

3. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электроприводами [Текст] /

Булгаков А. А. – М. : Энергоиздат. – 1982. – 216 С.

4. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія [Текст] / Д. О. Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 С.

5. Кулагін Д. О. Спосіб апроксимації кривої намагнічування тягового асинхронного двигуна [Текст] / Кулагін Д. О. // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2013. – №2. – С. 66-70.

6. Рудаков В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением [Текст] / Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А. – Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение. – 1987. – 136 С.

7. Слежановский О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями [Текст] / Слежановский О. В. [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 С.

8. Столяров И. М. Электромеханические преобразователи [Текст] / И. М. Столяров, В. В. Рудаков. – Л. : ЛГИ им. Г.В. Плеханова, 1978. – 462 С.

9. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе [Текст] / [А. Я. Бернштейн и др.] ; Под ред. Р. С. Сарбатова. – М. : Энергия, 1980. – 328 С.

10. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Шрейнер Р. Т. – Екатеринбург : Изд-во УРО РАН, 2000. – 654 С.

### References

1. Aranchii G. V. Tiristornye preobrazovateli chastoty dlya reguliruemyykh elektroprivodov [Thyristor frequency converters for speed drives], Moscow, *Energiya*, (1968), 128 p. (In Russian)

2. Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovskii G. G. Upravlenie elektroprivodami [Control of electrical drives], Leningrad, *Energoizdat. Leningr. otd-nie*, (1982), 392 p. (In Russian)

3. Bulgakov A. A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnyimi elektroprivodami [Frequency control of asynchronous electric drives], Moscow, *Energoizdat*, (1982), 216 p. (In Russian)

4. Kulagin D. O. Proektuvannya sistem keruvannya tyagovimi elektroperedachami mo-

torvagonnikh poyizdiv : monografiya [Designing of control systems of traction electrical transmission EMU-trains], Berdyans'k, *FO-P Tkachuk O. V.*, (2014), 154 p. (In Ukrainian)

5. Kulagin D. O. Sposib aproksimatsiyi krivoyi namagnichuvannya tyagovogo asinkhronnogo dviguna [Method of approximation of a curve of magnetization asynchronous traction motor] *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, (2013), no. 2, pp. 66-70. (In Ukrainian)

6. Rudakov V. V., Stolyarov I. M., Dartau V. A. Asinkhronnye elektroprivody s vektornym upravleniem [Asynchronous electric drives with vector control], Leningrad, *Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie*, (1987), 136 p. (In Russian)

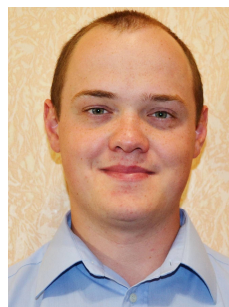
7. Slezhanovskii O. V. Sistemy podchinnenogo regulirovaniya elektroprivodov peremennogo toka s ventil'nymi preobrazovatel'nyimi [Century System of slave control of AC drives with valve converters] Moscow, *Energoatomizdat*, (1983), 256 p. (In Russian)

8. Stolyarov I. M., Rudakov V. V. Elektromekhanicheskie preobrazovateli [Electromechanical converters], Leningrad, *LGI im. G.V. Plekhanova*, (1978), 462 p. (In Russian)

9. Bernshtein A. Ya., Tiristornye preobrazovateli chastoty v elektroprivode [Thyristor frequency converters in the drive], Moscow, *Energiya*, (1980), 328 p. (In Russian)

10. Shreiner R. T. Matematicheskoe modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatel'nyimi chastoty [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters], Ekaterinburg, *Izd-vo URO RAN*, (2000), 654 p. (In Russian)

Отримано



Кулагін Дмитро Олександрович,  
канд. техн. наук, доцент,  
кафедри «Електропостачання промислових підприємств» Запорізького національного технічного університету, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, e-mail: nemix123@rambler.ru