

## Моделирование трехтактного частотно-импульсного преобразователя

Дунаев Михаил Павлович, Саушкин Алексей Анатольевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, Иркутск, *mdunaev10@mail.ru*

**Аннотация.** В статье представлена функциональная схема трехтактного частотно-импульсного преобразователя (ЧИП). Разработаны имитационные модели трехтактного ЧИП и системы электропривода ЧИП-Д в среде Matlab/Simulink. Проведено моделирование трехтактного ЧИП и системы электропривода ЧИП-Д. Приведено сравнение результатов моделирования и расчета электромеханических характеристик системы электропривода ЧИП-Д. Показано, что построенная авторами математическая модель ЧИП-Д с достаточной точностью описывает статические режимы системы электропривода с трехтактным ЧИП.

**Ключевые слова:** частотно-импульсный преобразователь, инвертор, электропривод, моделирование

**Цитирование:** Дунаев М.П. Моделирование трехтактного частотно-импульсного преобразователя / М.П. Дунаев, А.А. Саушкин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 3(35). – С. 94-101. – DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.008.

**Введение.** В современных системах управляемого электропривода постоянного тока [1] частотно-импульсный преобразователь (ЧИП) наряду с управляемым выпрямителем и широтно-импульсным преобразователем входят в первую тройку применяемых управляемых преобразователей постоянного тока [2].

Как правило, сложный технический объект, а именно к таким относятся объекты электропривода, можно разбить на некоторое количество взаимосвязанных блоков, каждый из которых имеет самостоятельное значение. В этом случае математическое описание технического объекта может быть представлено в виде функциональной модели. Функциональная модель является графическим изображением объекта, в котором каждый блок (функциональный элемент) обозначается прямоугольником. Входы и выходы функциональных элементов соответственно отмечены входящими и исходящими стрелками, показывающими направление прохождения сигналов.

При разработке функциональной модели трехтактного частотно-импульсного преобразователя учитывались общепринятые допущения [3 - 8].

Функциональная схема ЧИП [2] представлена на рис. 1, где обозначено: *ВА* – вводной автоматический выключатель, *СТ* – силовой трансформатор, *В* – силовой выпрямитель, *СФ* – сглаживающий фильтр, *СС* – силовая схема преобразователя, *Н* – нагрузка преобразователя, *БП* – блок питания системы управления, *ЗГ* – задающий генератор импульсов, *УО* – управляющий орган, *РИ* – распределитель импульсов по каналам управления, *УФ* – усилитель-формирователь импульсов управления, *ГР* – устройство гальванической развязки,  $\sim U_c$  – напряжение питающей сети переменного тока,  $U_{вх}$  – входное напряжение силовой схемы преобразователя,  $U_{вых}$  – выходное напряжение преобразователя,  $U_{бп}$  – выходное напряжение блока питания,  $U_y$  – выходное напряжение управляющего органа,  $U_3$  – задающее напряжение.

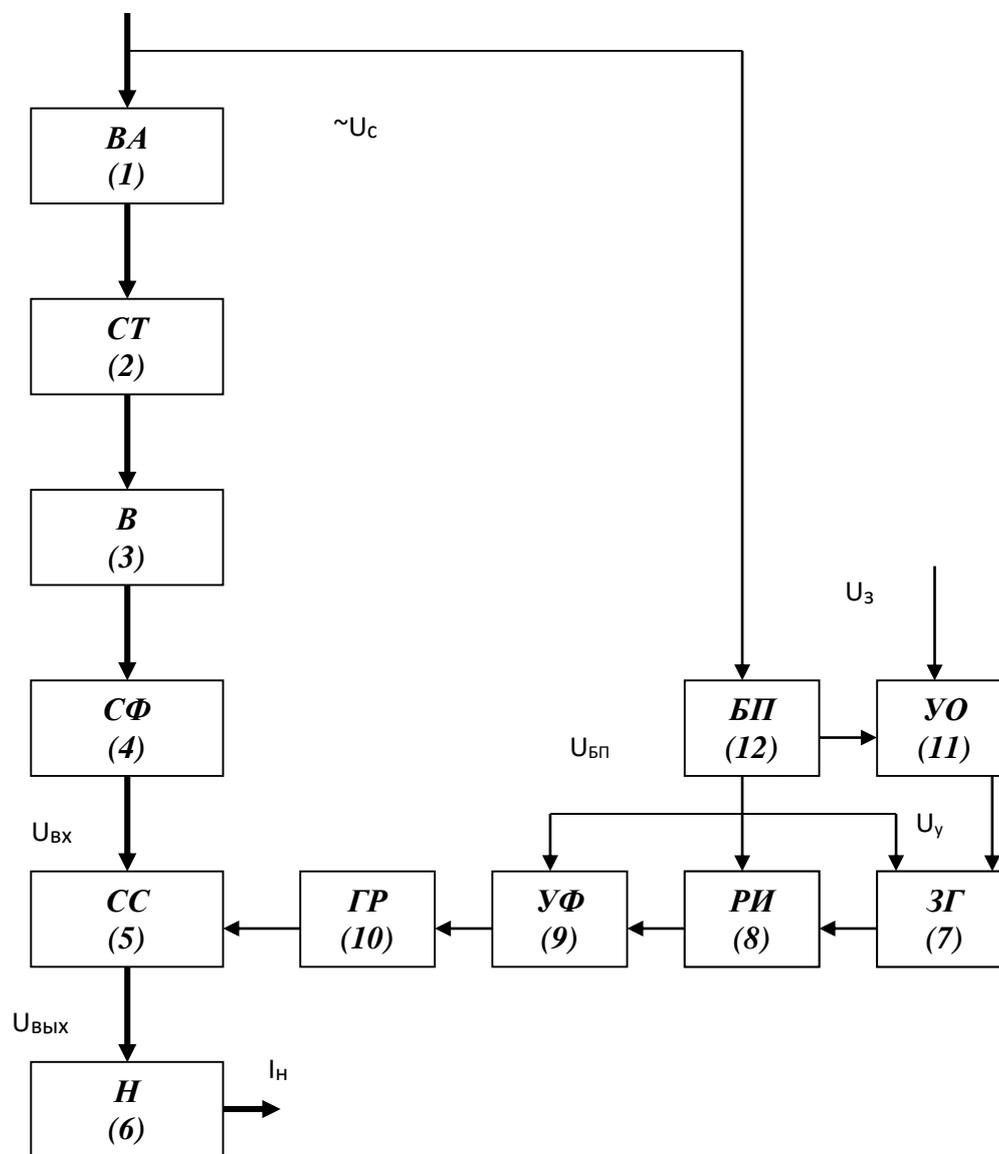
В качестве математической модели ЧИП при исследовании динамических режимов его работы можно использовать передаточную функцию [2]

$$W_{ЧИП}(p) = \frac{U_{ВЫХ}(p)}{U_y(p)} = K_{ЧИП} * e^{-p\tau} ,$$

где  $U_{ВЫХ}$  – среднее выходное напряжение ЧИП;  $U_y$  – напряжение управления ЧИП;  $K_{ЧИП}$  – коэффициент усиления ЧИП;  $\tau$  – время запаздывания реакции силовой части ЧИП на изменение сигнала управления  $U_y$ .

Однако для более точного расчета характеристик ЧИП предпочтительнее использовать имитационное моделирование схемы ЧИП.

**Моделирование схемы трехтактного частотно-импульсного преобразователя.** Рассмотрим частотно-импульсный преобразователь с резонансным инвертором [9], схема которого изображена на рис. 2.

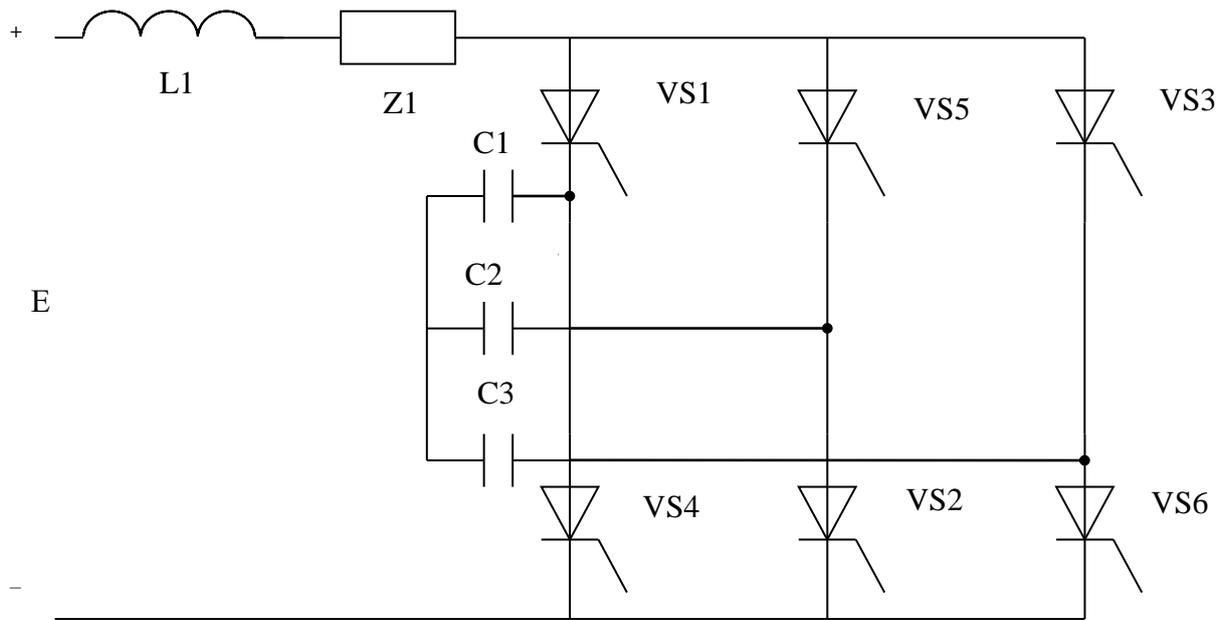


**Рис. 1.** Функциональная схема ЧИП

Резонансный инвертор имеет: трехфазный мост из тиристоров VS1, VS2, VS3, VS4, VS1, VS2; коммутирующие конденсаторы C1, C2, C3; коммутирующий дроссель L1; источник питания E; нагрузку Z1.

Инвертор работает в трехтактном режиме на нагрузку Z1. Для замыкания тока нагрузки во время закрытого состояния тиристоров она может быть шунтирована диодом VD1.

Устройство работает следующим образом. Попарно импульсами управления открываются тиристоры VS1, VS2; VS3, VS4; VS5, VS6 и т.д. Происходит перезаряд коммутирующих конденсаторов по колебательному закону в контуре, содержащем коммутирующий дроссель L1, нагрузку Z1, и соответствующую пару тиристоров (VS1, VS2 или VS3, VS4 или VS5, VS6).



**Рис. 2.** ЧИП с резонансным инвертором

В установившемся режиме работы инвертора напряжение на коммутирующих конденсаторах является знакопеременным и периодическим во времени. В нагрузке Z1 протекает ток, частота которого втрое превышает частоту включения пар тиристор.

На рис. 3 представлена имитационная модель трехфазного ЧИП в среде Matlab/Simulink [10-13], работающего на активную нагрузку.

С помощью модели, изображенной на рис. 3, были определены осциллограммы напряжений и токов на элементах виртуальной модели. Данные осциллограммы представлены на рис. 4.

Зависимость среднего напряжения на нагрузке  $U_{н\text{ ср}}$  от частоты следования импульсов выходного напряжения ЧИП  $f$  (регулирующая характеристика ЧИП) описывается формулой [2]:

$$U_{н\text{ ср}} = S \cdot U_n = K_f \cdot U_n, \quad (1)$$

где  $S$  – скважность импульсов выходного напряжения ЧИП,

$K_f$  – коэффициент передачи ЧИП,

$U_n$  – напряжение источника питания ЧИП.

Уравнение электромеханической характеристики электропривода по системе ЧИП – Д в режиме непрерывных токов в относительных единицах будет иметь вид:

$$\Omega^* = S - I_{ср} / I_k, \quad (2)$$

где  $\Omega^*$  – относительное значение частоты вращения двигателя,  $\Omega^* = \Omega / \Omega_0$ ;

$\Omega$  – текущее значение частоты вращения двигателя,

$\Omega_0$  – значение частоты вращения двигателя при идеальном холостом ходе,  $\Omega_0 = U_n / c$ ;

$I_{ср}$  – средний ток якоря двигателя;

$I_k$  – ток короткого замыкания,  $I_k = U_n / (R_n + R_я)$ ;

$R_n$  – внутреннее сопротивление ЧИП;

$R_я$  – сопротивление якоря двигателя.

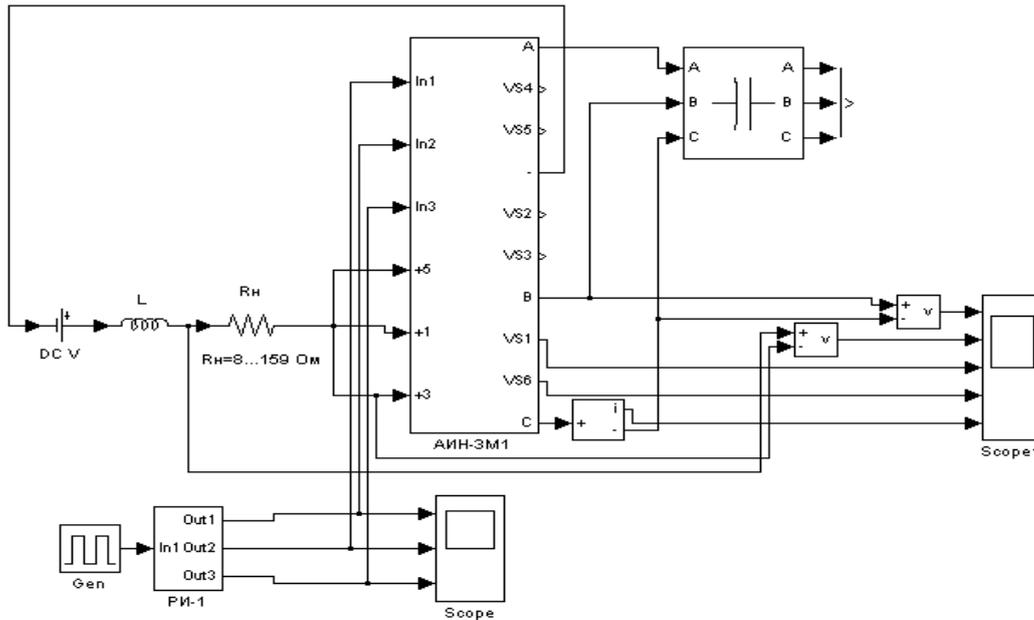


Рис. 3. Имитационная модель трехфазного ЧИП при работе на активную нагрузку

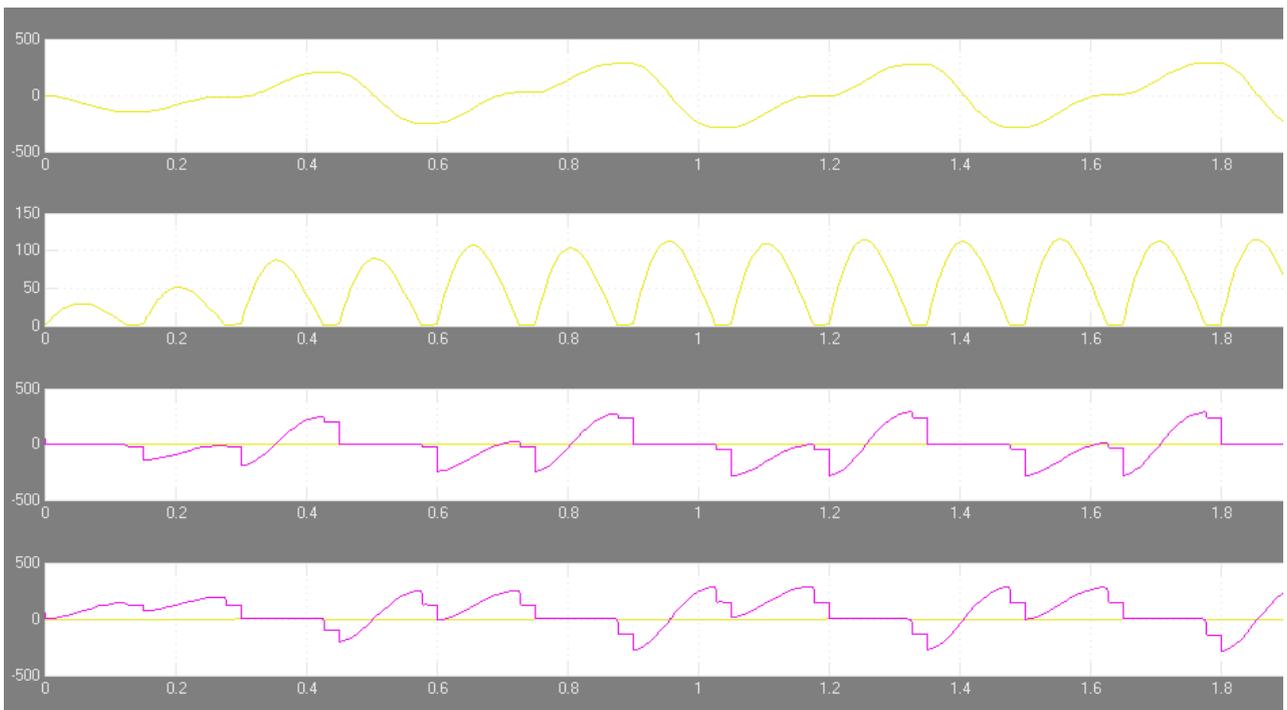


Рис. 4. Осциллограммы, снятые с датчиков модели трехфазного ЧИП при работе на активную нагрузку

Модель системы ЧИП-Д приведена на рис. 5 и предназначена для изучения статических и динамических характеристик электропривода с последовательным ЧИП с резонансной коммутацией.

В состав модели входят: источник постоянного напряжения (V1); силовая часть (тиристоры T1 – T6); задающий генератор (f); распределитель импульсов управления (R1 – R2); устройство задания нагрузки (L); осциллограф (Scope); двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (DC Machine).

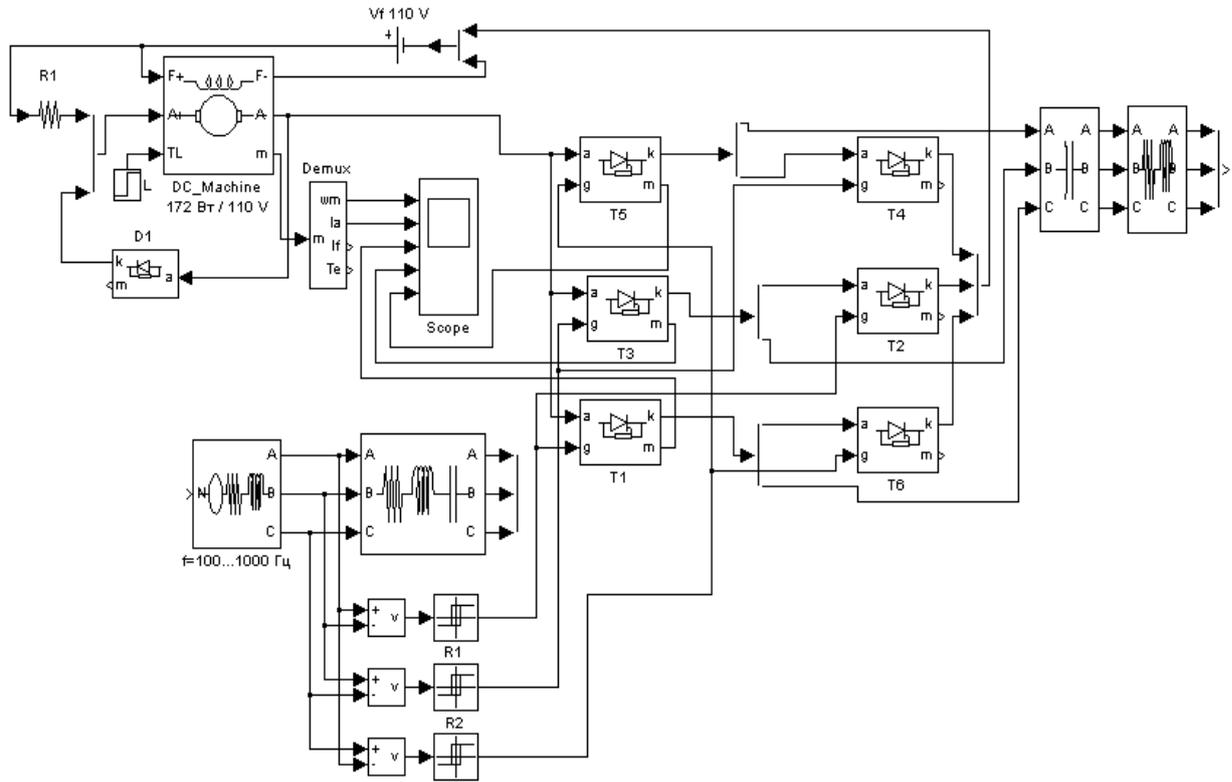


Рис. 5. Модель системы ЧИП-Д

Электромеханические характеристики системы ЧИП-Д представлены на рис. 6.

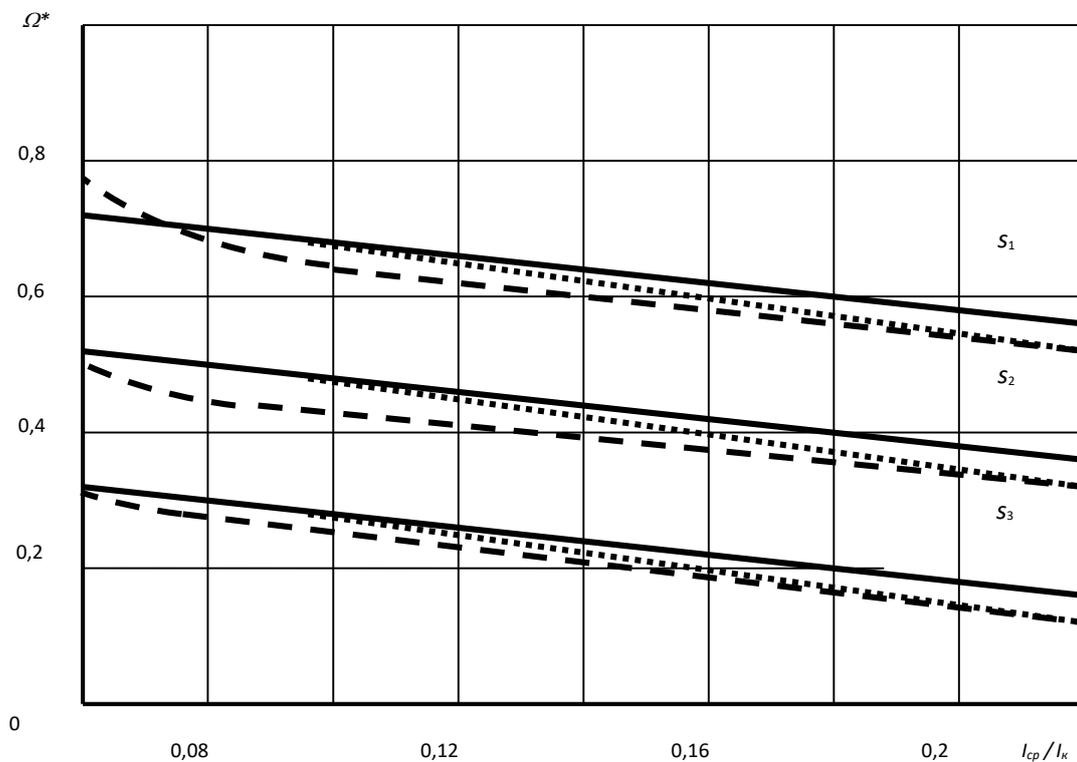


Рис. 6. Электромеханические характеристики системы ЧИП-Д

Расчетные электромеханические характеристики системы ЧИП-Д, построенные по выражению (2), показаны на рис. 6 сплошными линиями. Смоделированные электромеханические характеристики системы ЧИП-Д, полученные с помощью модели рис. 5, показаны на рис.

6 точками. Экспериментальные электромеханические характеристики системы ЧИП-Д [14] показаны на рис. 6 пунктиром. Параметры скважности на рис. 6 соответствуют следующим числовым значениям:  $s_1=0,73$ ;  $s_2=0,55$ ;  $s_3=0,36$ .

Характеристики рис. 6 представлены только в зоне непрерывных токов, так как из-за значительной частоты следования импульсов выходного напряжения ЧИП ( $f_{\text{макс}}=900$  Гц) экспериментальное определение электромеханических характеристик системы ЧИП-Д в зоне прерывистых токов оказалось затруднительным.

Сравнивая представленные на рис. 6 расчетные, модельные и экспериментальные характеристики, можно увидеть, что погрешность электромеханических характеристик, полученных при помощи математического моделирования при режимах, близких к номинальному, не превышает 8%.

Таким образом, построенные в среде MATLAB математические модели системы ЧИП-Д с достаточной точностью описывают статические режимы ЧИП с резонансным инвертором.

**Заключение.** Представлена функциональная схема трехтактного частотно-импульсного преобразователя (ЧИП). Разработаны имитационные модели трехтактного ЧИП и системы электропривода ЧИП-Д в среде Matlab/Simulink. Проведено моделирование трехтактного ЧИП и системы электропривода ЧИП-Д. Приведено сравнение результатов моделирования и расчета электромеханических характеристик системы электропривода ЧИП-Д. Показано, что построенная в среде MATLAB математическая модель ЧИП-Д с достаточной точностью описывает статические режимы системы электропривода с трехтактным ЧИП.

#### Список источников

1. Кругликов О.В. Разработка, производство и применение энергоэффективных электрических машин и приводов / О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров, С.В. Пискунов // Электротехника, 2015. – № 3. – С. 4-8.
2. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами / М.П. Дунаев. – Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2004. – 103 с.
3. Дунаев М.П. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Электротехнические системы и комплексы, 2021. – № 2(51). – С. 45-51.
4. Дунаев М.П. Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Электротехнические системы и комплексы, 2021. – № 4(53). – С. 50-55.
5. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Energy characteristics the autonomous voltage inverter with the pulse-frequency modulation. International scientific conference “FarEastCon” 6-9 October 2020, Far Eastern federal university, Vladivostok.
6. Sharifov B., Gulyamov K., Yunusov R., Dovudov S. et al. The mathematical model of pulse width modulation frequency converter. Proceedings of the 2021 Ural-Siberian smart energy conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 November 2021, Novosibirsk, 2021, pp. 81-84.
7. Dovudov S.U., Dunaev M.P., Zhiravetska A. et al. Analysis and comparison of energy indices of dc-dc pulse converters. Przegląd Elektrotechniczny, 2022, vol. 98, no 6, pp. 99-103.
8. Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Вестник ИрГТУ, 2020. – №2. – С. 345-355.
9. Дунаев М.П., Марковец Ю.С. Однофазный последовательный инвертор / Патент на полезную модель №74018, БИ № 21, 2008.
10. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + SIMULINK 5/6. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
11. Дунаев М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 2(18). – С.134-143.
12. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Simulation of losses in autonomous inverter circuits with pulse-width and pulse-frequency modulation. Computational Technologies, 2022, vol. 27, no 5, pp. 5-13.
13. Марковец Ю.С. Виртуальная модель для исследования электропривода с последовательным ЧИП с резонансной коммутацией / Ю.С. Марковец / Вестник ИрГТУ, 2007. – №1-2. – С. 49-50.

14. Дунаев М.П. Характеристики системы электропривода постоянного тока с резонансным инвертором / М.П. Дунаев, Ю.С. Марковец / Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири / Мат. всеросс. науч.-практ. конф. Иркутск, ИрГТУ, 2005. – С.163-166.

*Дунаев Михаил Павлович. Доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, Author ID: 315898, ORCID: 0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.*

*Саушкин Алексей Анатольевич. Аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, ORCID: 0000-0001-5600-4615, dsu\_1991@mail.ru, 664074, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.*

UDC 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.008

## Modeling of a three-stroke frequency-pulse converter

Mikhail P. Dunaev, Aleksei A. Saushkin

National research Irkutsk state technical university,  
Russia, Irkutsk, *mdunaev10@mail.ru*

**Abstract.** The article presents a functional diagram of the tree-takt pulse-frequency converter (PFC). Imitation models of tree-takt pulse-frequency converter and PFC-DCM electric drive system in the Matlab/Simulink environment have been developed. Modeling of tree-takt pulse-frequency converter and electric drive system is given. A comparison of the results of modeling and calculation electromechanical characteristics of PFC-DCM electric drive system is given. It is shown that the mathematical model of CHIP-D constructed by the authors describes with sufficient accuracy the static modes of an electric drive system with a three-stroke CHIP.

**Keywords:** frequency-impulse converter, inverter, electric drive, simulation

### References

1. Kruglikov O.V., Makarov L.N., Piskunov S.V. Razrabotka, proizvodstvo i primeneniye energoeffektivnykh elektricheskikh mashin i privodov [Development, production and application of energy efficient electrical machines and drives]. Elektrotehnika [Electrical Engineering], 2015, no. 3, pp. 4-8.
2. Dunaev M.P. Rezonansnyye invertory dlya upravleniya elektroprivodami [Resonant inverters controlling electric drives]. Irkutsk. IrGTU [Irkutsk state technical university], 2004, 103 p.
3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye poter' moshchnosti v preobrazovatele chastoty [Simulation of losses in frequency converter]. Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы [Electrical systems and complexes], 2021, no. 2(51), pp. 45-51.
4. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Sravneniye energoeffektivnosti skhem avtonomnykh inverterov napryazheniya s sinusoidal'noy shirotno-impul'snoy i chastotno-impul'snoy modulyatsiyey [Comparison of Energy efficiency of autonomous voltage inverters with sine wave pulse width and pulse frequency modulation circuits]. Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы [Electrical systems and complexes], 2021, no. 4(53), pp. 50-55.
5. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Energy characteristics the autonomous voltage inverter with the pulse-frequency modulation. International scientific conference "FarEastCon" 6-9 October 2020, Far Eastern federal university, Vladivostok.
6. Sharifov B., Gulyamov K., Yunusov R., Dovudov S. et al. The mathematical model of pulse width modulation frequency converter. Proceedings of the 2021 Ural-Siberian smart energy conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13-15 November 2021, Novosibirsk, 2021, pp. 81-84.
7. Dovudov S.U., Dunaev M.P., Zhiravetska A. et al. Analysis and comparison of energy indices of dc-dc pulse converters. Przegląd Elektrotechniczny, 2022, vol. 98, no 6, pp. 99-103.
8. Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analiz energeticheskikh pokazateley impul'snykh preobrazovateley [Analysis of energy indicators of pulse converters]. Vestnik IrGTU [ISTU Bulletin], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355.
9. Dunayev M.P., Markovets U. Odnofaznii posledovatel'nii inverter [Single-phase series inverter]. Patent na poleznuy model [Patent for utility model], no. 74018, BI no. 21, 2008.
10. Diakonov V.P. MATLAB 6.5 SP1/7 + SIMULINK 5/6. Osnovi primeneniya [Basics of application]. M. SOLON-Press, 2005, 800 p.

11. Dunayev M.P., Dovudov S.U Modelirovaniye odnofaznogo dvukhurovnevoogo avtonomnogo invertora napryazheniya s chastotno-impul'snoy modulyatsiyey [Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2 (18), pp. 134-143.
12. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Simulation of losses in autonomous inverter circuits with pulse-width and pulse-frequency modulation. Computational Technologies, 2022, vol. 27, no 5, pp. 5-13.
13. Markovets U.S. Virtualnaia model dlia issledovaniya elektroprivoda s posledovatelnim CHIP s rezonansnoi kommutatsiei. [Virtual model for studying an electric drive with a sequential CHIP with resonant switching] Vestnik IrGTU [Bulletin of Irkutsk state technical university], 2007, no. 1-2, pp. 49-50.
14. Dunaev M.P., Markovets U.S. Harakteristiki sistemi elektroprivoda postoiannogo toka s rezonansnim [Characteristics of a DC electric drive system with a resonant inverter]. Povishenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviakh Sibiri, Mat. Vserossiiskoi nauch.-prakt. Konf. Irkutsk, IrGTU [Increasing the efficiency of production and use of electric power in Siberia. Proc. All-Russian scientific-practical. conf. Irkutsk, IrSTU], 2005, pp.163-166.

**Dunaev Mikhail Pavlovich.** Doctor of technical sciences, professor, Irkutsk national research technical university, Author ID: 315898, ORCID: 0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

**Saushkin Aleksei Anatolyevich.** Graduate student, Irkutsk national research technical university, ORCID: 0000-0001-5600-4615, leha-34714@inbox.ru, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; одобрена после рецензирования 16.07.2024; принята к публикации 10.10.2024.

The article was submitted 06/21/2024; approved after reviewing 07/16/2024; accepted for publication 10/10/2024.