

УДК 621.316.726

**Варламов Никита Сергеевич**<sup>1</sup>, аспирант

e-mail: varlamov\_nikita@mail.ru

**Сугаков Валерий Геннадьевич**<sup>1</sup>, профессор, д.т.н.

e-mail: elektrikasp@mail.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

## БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЙ НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

*Аннотация.* В статье рассмотрен бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты, обеспечивающий повышенную надежность за счет уменьшения количества силовых электронных ключей. Данное устройство может быть использовано для питания частотно-управляемых электроприводов переменного и постоянного тока в судовых электроэнергетических системах с нестабильными параметрами электрической сети.

*Ключевые слова:* непосредственный преобразователь частоты, судовая электроэнергетическая система, нестабильность частоты напряжения.

В настоящее время полупроводниковые преобразователи электрической энергии широко используются в электротехнических системах объектов водного транспорта. Особенности работы преобразователей тесно связаны не только с типом электрооборудования (системы зарядки аккумуляторов, системы автоматического регулирования напряжения, грузоподъемные и подруливающие механизмы, гребные электроустановки), но и с параметрами электрической энергии [1].

Нестабильность параметров электрической энергии влияет на выходные координаты преобразователя [2], что приводит к негативным последствиям: уменьшению производительности исполнительных механизмов, сокращению срока службы электрических машин, сбоям в работе систем управления и т.д. [3].

Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты (БНПЧ) [4] разработан с целью поддержания заданного выходного напряжения в электроэнергетических системах с нестабильными параметрами электрической энергии.

Недостатком данного преобразователя является наличие двадцати восьми силовых электронных ключей, что снижает надежность преобразователя и увеличивает массогабаритные показатели. Устранение данного недостатка БНПЧ обеспечивается уменьшением количества силовых электронных ключей до двенадцати [5] и достигается следующим образом (рис. 1).

Источник питания для БНПЧ имеет трехфазную систему напряжений с выведенной нулевой точкой, что позволяет иметь шесть фазных напряжений  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$ ,  $U_{C0}$ ,  $U_{0A}$ ,  $U_{0B}$ ,  $U_{0C}$  и шесть линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ,  $U_{BA}$ ,  $U_{CB}$ ,  $U_{AC}$ , из которых можно создать систему двенадцати напряжений, имеющих фазовый сдвиг  $30^\circ$  эл. (рис. 2).

В общем виде входные напряжения БНПЧ  $u_{ex1} \dots u_{ex12}$  принимают следующий вид:

$$u_{exn} = k \cdot U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - (n-1) \frac{\pi}{m}\right) + \sum_{l=1}^{\infty} U_{ulm} \cdot \sin(\omega_{ul} - \varphi_{ul}), \quad (1)$$

$$\text{где } k = \begin{cases} 1 & , \text{ при } n = 1, 3, 5, \dots, 2a + 1 \\ \sqrt{3} & , \text{ при } n = 2, 4, 6, \dots, 2a \end{cases}, a = 0, 1, \dots, p; n - \text{ номер кривой}$$

входного напряжения,  $m$  – количество фаз сети,  $U_m$  – амплитуда напряжения основной гармоники,  $\omega$  – частота основной гармоники,  $U_{ulm}$  – амплитуда высшей гармоники,  $\omega_{ul}$  – частота высшей гармоники,  $\varphi_{ul}$  – фаза высшей гармоники,  $l$  – номер высшей гармоники.

БНПЧ повышенной надежности содержит систему управления А0, обеспечивающая формирование импульсов управления на основе заданного напряжения и двенадцати входных напряжений, и коммутатор, состоящий из двенадцати модулей силовых электронных ключей А1.1...А1.12, дроссель L1, конденсатор C1 и выходные клеммы OUT1 и OUT2. Каждый модуль силового ключа А1 состоит из четырех силовых диодов VD1...VD4, IGBT-ключа VT1, драйвера А2 на основе элементов HCPL-3161, DCV010515DP и IXDD414PI.

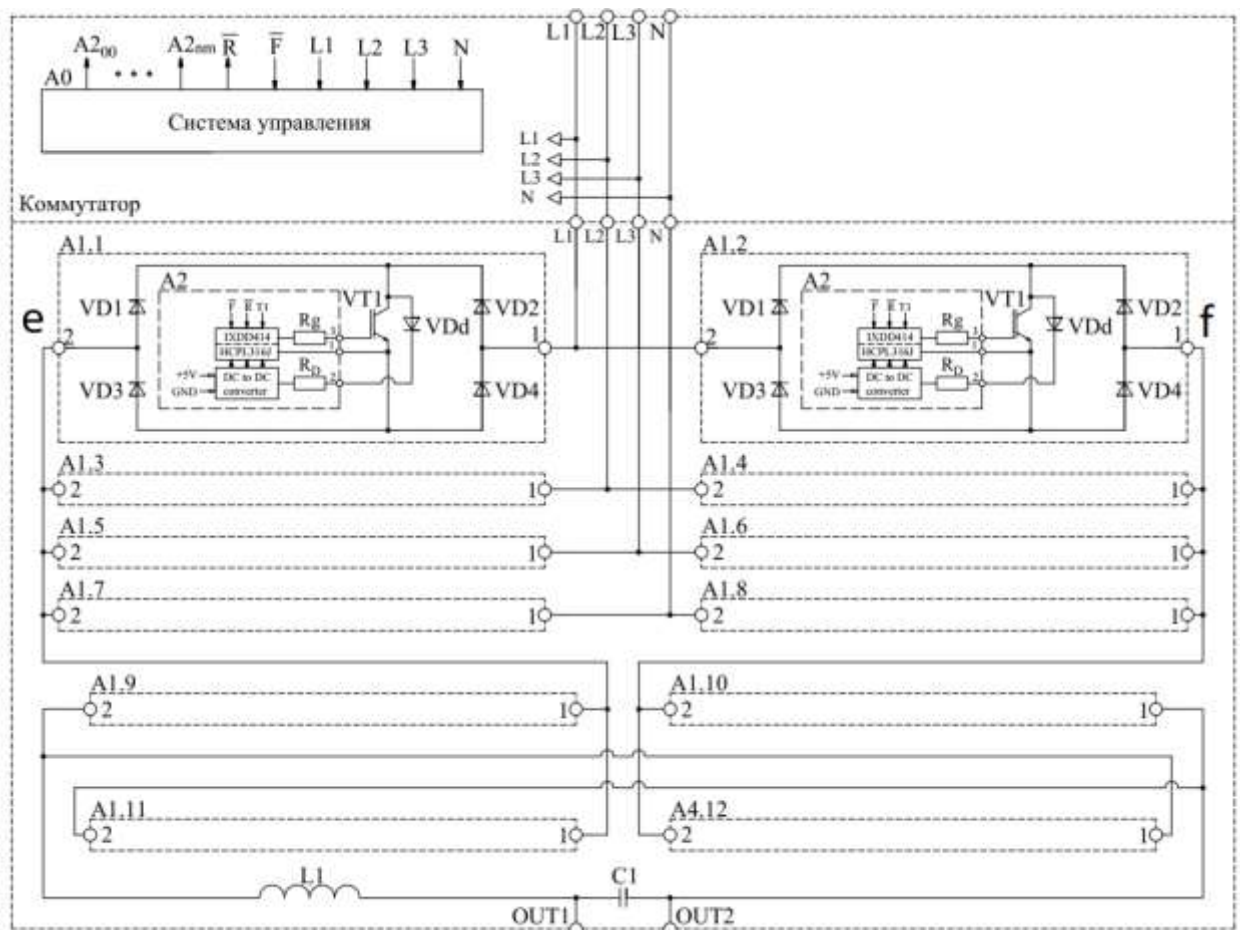


Рисунок 1 – Схема бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты повышенной надежности

Выходное напряжение  $u_e$  БНПЧ определяется на основе поиска наиболее подходящего входного напряжения относительно эталонного напряжения:

$$u_e = \begin{cases} u_{exn} & , \text{ если } |u_{exn} - |u_{\text{э}}|| = \min(u_{ex1 \dots ex12} - |u_{\text{э}}|) \\ 0 & , \text{ если } |u_{exn} - |u_{\text{э}}|| \neq \min(u_{ex1 \dots ex12} - |u_{\text{э}}|) \end{cases} \quad (2)$$

где  $u_{\varepsilon} = U_{m\varepsilon} \cdot \sin(\omega_{\varepsilon} \cdot t - \varphi_{\varepsilon})$  - эталонный сигнал;  $\omega_{\varepsilon}$  - частота

эталонного сигнала,  $\varphi_{\varepsilon}$  - фаза эталонного сигнала.

На основе выражения (2) формирование выходного напряжения БНПЧ происходит следующим образом (рис. 2). При включении БНПЧ в момент времени  $t_0$  для формирования выходного напряжения  $u_{\varepsilon}$ , имеющего меньшую частоту и амплитуду, чем питающее напряжение, появляется сигналы A2<sub>11</sub> и A2<sub>18</sub>, которые поступают на управляющие входы модулей электронных ключей A1.1 и A1.8 коммутатора. К шинам e и f подключается напряжение  $U_1$ , которое подается на зажимы нагрузки OUT1 и OUT2 через открытые ключи модулей A1.9 и A1.10.

В момент времени  $t_1$  управляющие сигналы от системы управления поступают на управляющие входы модулей электронных ключей A1.2 и A1.5 коммутатора, подключающие к выходу напряжение  $U_8$ . Далее в момент времени  $t_2$  коммутатор подключает к выходу напряжение  $U_2$ ; в момент времени  $t_3$  - напряжение  $U_9$ ; в момент времени  $t_4$  - напряжение  $U_{10}$ ; в момент времени  $t_5$  - напряжение  $U_{11}$ ; в момент времени  $t_6$  - напряжение  $U_3$ ; в момент времени  $t_7$  - напряжение  $U_{10}$ ; в момент времени  $t_8$  - напряжение  $U_3$ ; в момент времени  $t_9$  - напряжение  $U_8$ ; в момент времени  $t_{10}$  - напряжение  $U_3$ ; в момент времени  $t_{11}$  - напряжение  $U_9$ ; в момент времени  $t_{12}$  - напряжение  $U_4$ ; в момент времени  $t_{13}$  - напряжение  $U_{10}$ . В момент времени  $t_{14}$  завершается формирование положительной полуволны выходного напряжения. Формирование отрицательной полуволны выходного напряжения происходит через открытые ключи модулей A1.11 и A1.12.

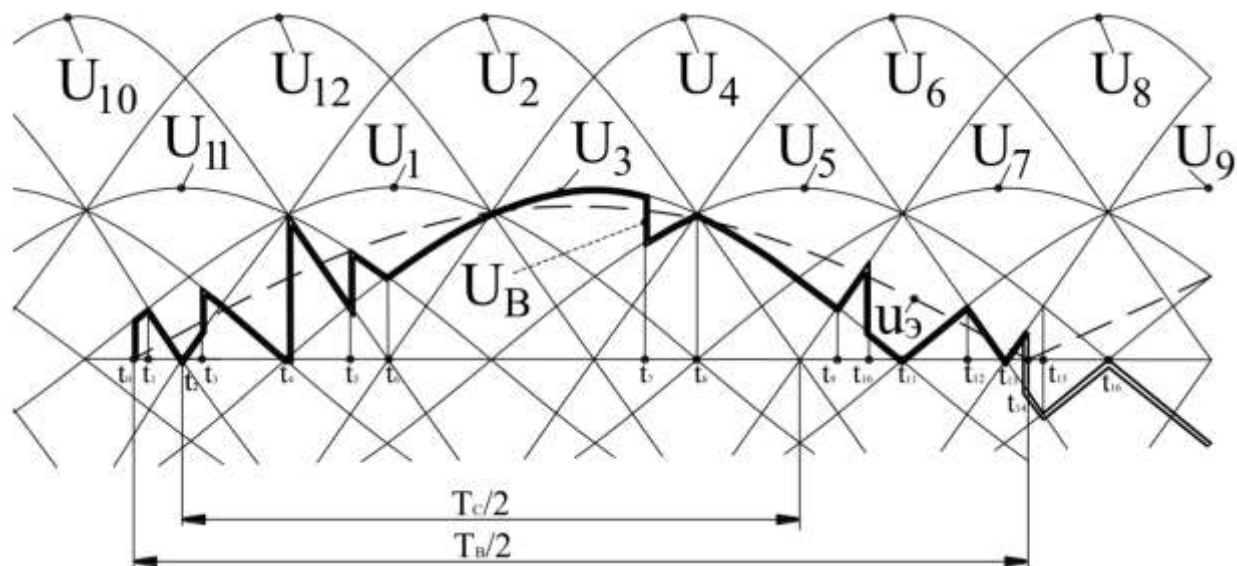


Рисунок 2 – Временная диаграмма выходного напряжения

Таким образом, на выходе преобразователя формируется переменное напряжение с заданной частотой и амплитудой. В то же время коммутатор вместо двадцати восьми силовых электронных ключей содержит двенадцать ключей, что повышает надежность устройства.

#### Список литературы:

1. Дмитриев, Б.Ф. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник по курсу «Полупроводниковые преобразователи» / Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенкий, А.И. Черевко, М.М. Музыка; Сев. федер. ун-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Архангельск; САФУ, 2015. С. 443-515

2. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

3. Анисимов, Я.Ф. Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановка / Я.Ф. Анисимов. — Ленинград: Судостроение, 1973. — 227 с.

4. Пат. 2691968, Рос. Федерация, МПК H02M 5/27. Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2018123270; Заявл. 26.06.2018; Оpubл. 19.06.2019.

5. Пат. 2787121 Российская Федерация, МПК H02M 5/27. Непосредственный преобразователь частоты бестрансформаторный / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Малышев Ю.С.; — № 2022120275; Заявл. 22.07.2022; Оpubл. 29.12.2022; Бюл.№ 1

## **DIRECT CURRENT WITH A TRANSFORMER-FREE DIRECT FREQUENCY CONVERTER WITH INCREASED RELIABILITY**

N. S. Varlamov, V. G. Sugakov

*Abstract.* The article considers a transformer-free direct frequency converter that provides increased reliability by reducing the number of power electronic switches. This device can be used to power frequency-controlled AC and DC electric drives in ship power systems with unstable electrical parameters.

*Keywords:* cycloconverters, ship power system, voltage frequency instability.

