



УДК 621.316.722.3

**Сугаков Валерий Геннадьевич**, профессор, д.т.н., профессор кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

**Варламов Никита Сергеевич**, аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

«Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### АНАЛИЗ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ БЕСТРАНСФОРМАТОРНОГО НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА

*Аннотация. Статья посвящена имитационному моделированию бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты. Приведен спектральный анализ выходного напряжения при изменении частоты эталонного сигнала. Показано, что изменение частоты выходного напряжения практически не влияет на изменение коэффициента нелинейных искажений.*

*Ключевые слова: преобразователь частоты, судовая электроэнергетическая система, коэффициент нелинейных искажений, моделирование.*

Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) нашли достаточно широкое применение на объектах водного транспорта, в особенности, для регулирования скорости вращения вала синхронных электродвигателей большой мощности, а также в низкоскоростных электроприводах исполнительных механизмов [1]. Известные НПЧ отличаются схемой соединения вентиляей, количеством фаз входа и выхода, способами управления вентиляльными группами, формой управляющего сигнала и типом коммутации вентиляей [2, 3]. Однако НПЧ, выполненные по схеме с нулевым выводом, не могут обеспечить выходное напряжение высокого качества в трехфазных системах электроснабжения.

Для повышения качества выходного напряжения НПЧ используются специальные трансформаторы и преобразователи, выполненные по мостовой схеме. Выходное напряжение 6-пульсного и 12-пульсного НПЧ [4] проиллюстрированы на рис. 1, а, б. Их недостатком является зависимость выходного напряжения от вариации параметров напряжения, что характерно для судовой электроэнергетической системы.

В связи с этим разработан бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты (БТНПЧ), формирование выходного напряжения которого обеспечивается за счет подключения выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети вне зависимости от вариации её параметров (амплитуды, частоты и формы кривой напряжения) [5, 6]. Выходное напряжение БТНПЧ (рис. 1, в) формируется из трехфазной системы напряжения с выведенной нулевой точкой. Такая

система позволяет создать систему двенадцати напряжений, имеющих фазовый сдвиг  $30^\circ$ , без использования согласующих трансформаторов.

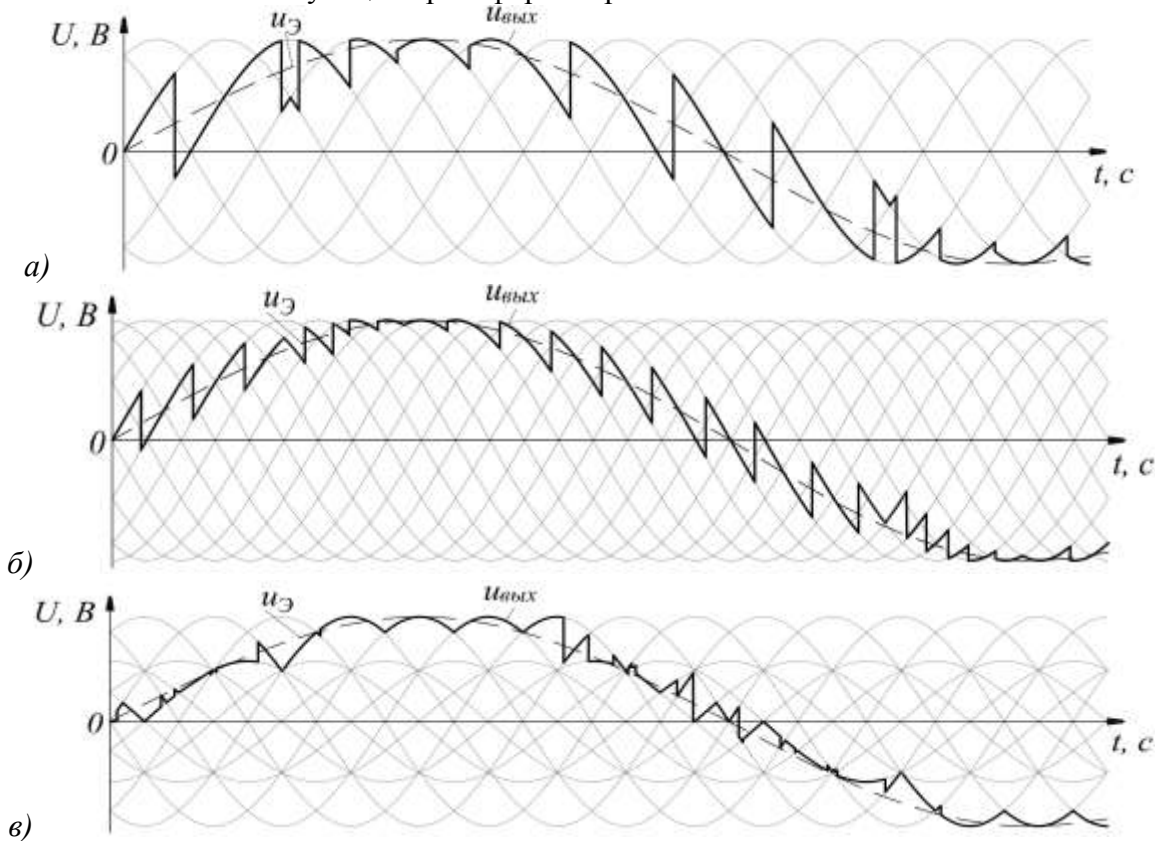


Рис. 1. Временные диаграмма выходного напряжения НППЧ:  
а – 6-пульсного; б – 12-пульсного; в – БТНППЧ

Целью данной работы является исследование влияния изменения частоты эталонного сигнала  $u_э$  на спектральный состав напряжения с выхода БТНППЧ. Исследование и анализ выходного напряжения  $U_{вых}$  осуществляется в соответствии с структурной схемой модели, которая изображена на рис. 2.

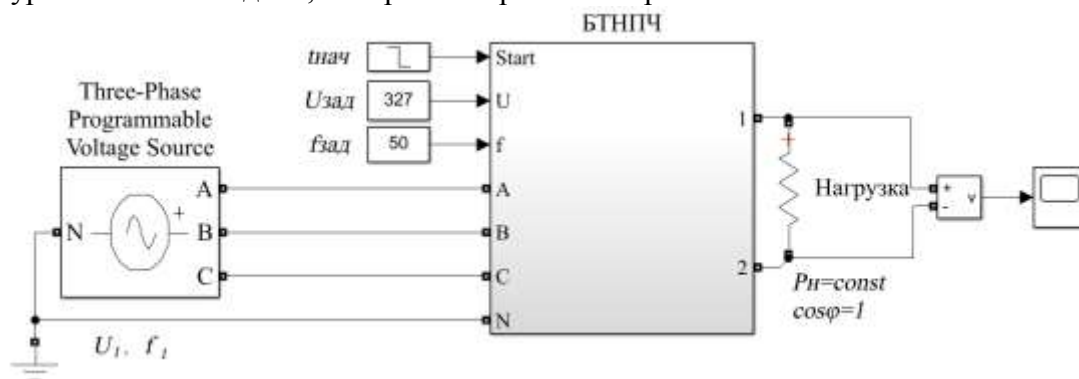


Рис. 2. Структурная схема модели БТНППЧ

Исследование проводилось при следующих неизменных параметрах модели: частота напряжения источника электроэнергии  $f_1=50 \text{ Гц}$ ; амплитуда линейного напряжения синусоидальной формы  $U_1=565,7\text{В}$ ; мощность нагрузки  $P_n=4 \text{ кВт}$ ,  $\cos\varphi=1$ ; заданное значение амплитуды выходного напряжения БТНППЧ  $U_{зад}=327 \text{ В}$ ; время начала формирования выходного напряжения  $t_{нач}=0,042 \text{ с}$ .

Результаты моделирования влияния изображены на рис. 3 и рис. 4. Коэффициент нелинейных искажений и спектральный состав сигнала вычислялся для десяти периодов выходного напряжения на основе быстрого преобразования Фурье (*FFT Analysis*).

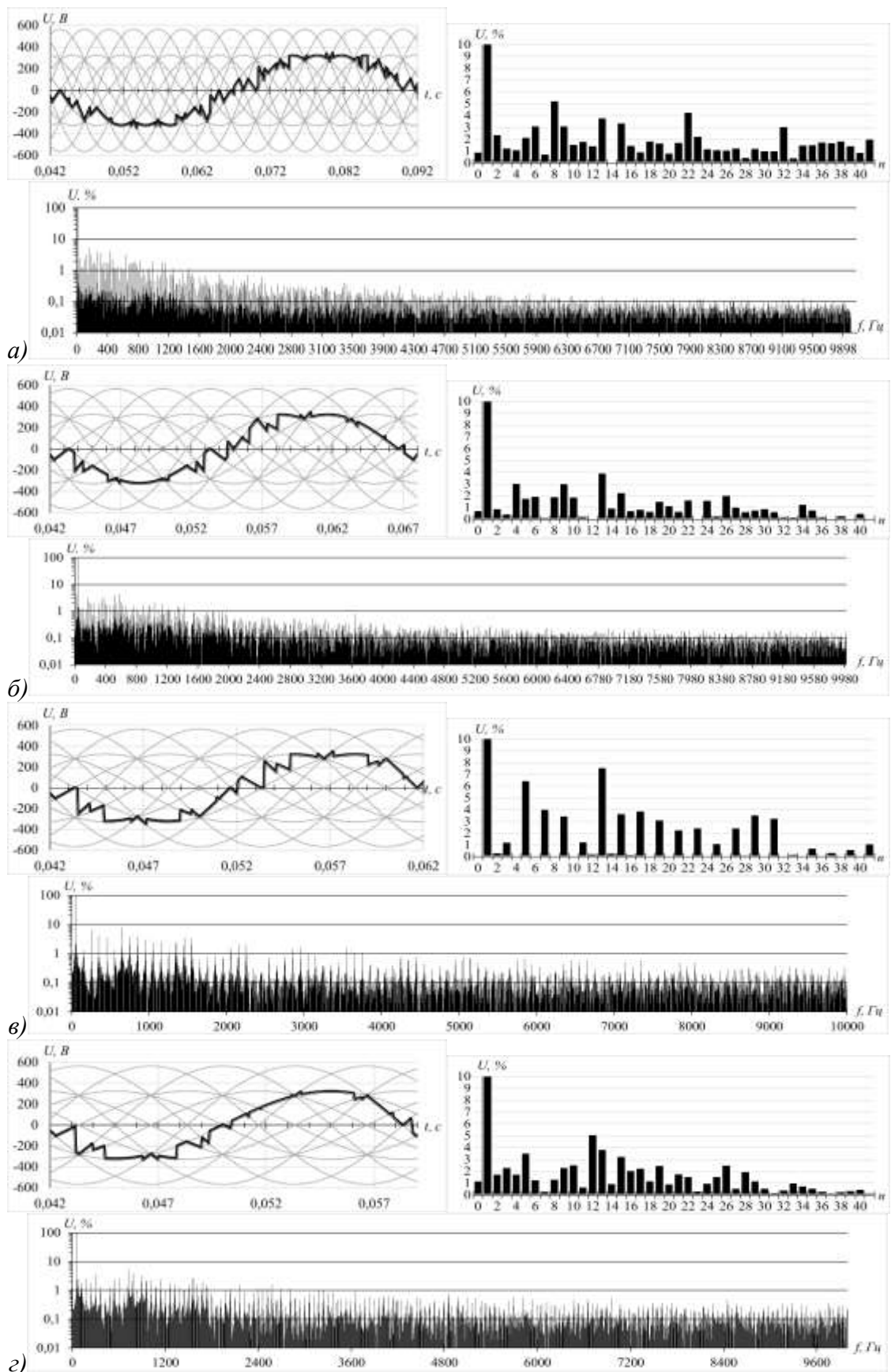


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования БТПЧ при частоте эталонного сигнала  $f_{зад}$  20 Гц (а), 40 Гц (б), 50 Гц (в) и 60 Гц (г)

Из результатов гармонического анализа следует, что при  $f_{зад} \neq f_1$  (рис. 2, а, б, г) в выходном напряжении БТПЧ присутствуют четные и нечетные гармоники, максимальная величина которых не превышает 5 % от амплитуды основной гармоники.

Также во всех случаях наблюдаются гармоники не кратные основной частоте эталонного сигнала.

При  $f_{зад} = 20 \text{ Гц}$  (рис. 2, а) максимальная амплитуда гармоники наблюдается на 8-ой гармонике и составляет 5,12% от амплитуды основной гармоники, коэффициент нелинейных искажений равен  $K_U = 15,15\%$ . Амплитуды гармоник, частота которых больше 1600 Гц, составляют менее 1% от амплитуды основной гармоники, а при частоте больше 5000 Гц – менее 0,1%.

При  $f_{зад} = 40 \text{ Гц}$  (рис. 2, б) аналогичен предыдущему случаю. Однако максимальная амплитуда, значение которой составляет 3,98% от амплитуды основной гармоники, наблюдается на 13-ой гармонике.

В случае, когда  $f_{зад} = f_l = 50 \text{ Гц}$  (рис. 2, в) в выходном напряжении отсутствуют четные гармоники, также значение  $K_U = 18,48\%$  (данный случай иллюстрирует формирование выходного напряжения не синфазно с одним из фазных напряжений источника электроэнергии). Максимальные амплитуды гармоник зафиксированы на 5-ой (6,53%) и 13-ой (7,63%) гармониках.

Когда частота выходного напряжения больше напряжения сети  $f_{зад} = 60 \text{ Гц}$  (рис. 2, г), значение  $K_U = 16,7\%$ . Максимальная амплитуда наблюдалась на 12-ой гармонике (5,14% от амплитуды основной гармоники). Амплитуды гармоник, частота которых больше 3000 Гц, составляет менее 1% от амплитуды основной гармоники.

Результаты исследования зависимости коэффициента нелинейных искажения  $K_U$  от частоты эталонного сигнала  $f_{зад}$  при различной амплитуде задающего напряжения  $U_{зад}$  изображено на рис. 4. Время начала формирования выходного напряжения  $t_{нач} = 0,042 \text{ с}$ .

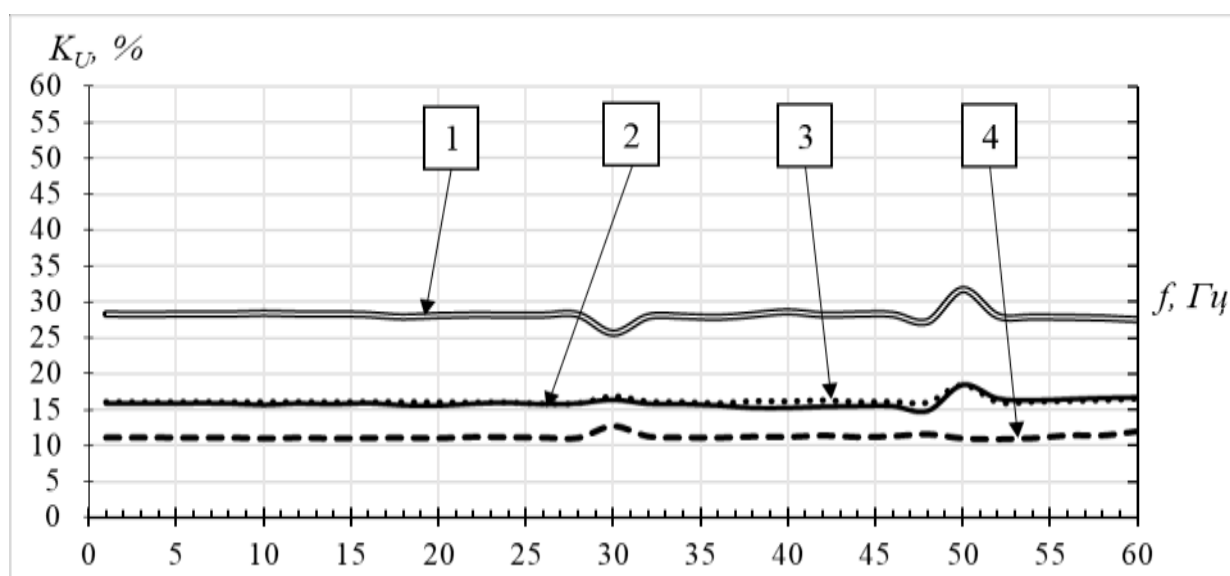


Рис. 4. Зависимость значения коэффициента нелинейных искажений от частоты эталонного сигнала:

- 1 – амплитуда  $U_{зад} < U_{\phi}$  (212,1 В); 2 – амплитуда  $U_{зад} \approx U_{\phi}$  (327 В);  
3 – амплитуда  $U_{\phi} < U_{зад} < U_l$  (424,26 В); 4 – амплитуда  $U_{зад} \approx U_l$  (565,7 В);

Как видно из рис. 4, диапазон значений  $K_U$  при  $U_{\phi} \leq U_{зад} < U_l$  составляет от 15% до 16%, при этом увеличение значения коэффициента  $K_U$  наблюдается при  $f_{зад} = f_l = 50 \text{ Гц}$ . Минимальные значения  $K_U$  наблюдаются при амплитуде  $U_{зад} \approx U_l$ . В случае если  $U_{зад} < U_{\phi}$ , значение  $K_U$  находится в диапазоне значений от 25% до 33%.

Значение  $K_U$  практически постоянно при  $1 \text{ Гц} \leq f_{зад} < 60 \text{ Гц}$ . Однако при  $f_{зад} = 30 \text{ Гц}$  или  $f_{зад} = 50 \text{ Гц}$  наблюдается изменение значения коэффициента, что связано с моментом начала формирования выходного напряжения ( $t_{нач} = 0,042 \text{ с}$ ) относительно одной из синусоид входного напряжения.

Таким образом, на основе результатов имитационного моделирования установлено, что значение коэффициента нелинейных искажений напряжения с выхода БТНПЧ

практически не зависит от частоты эталонного напряжения  $f_{зад}$ . При этом минимальные значения  $K_U$  наблюдается при  $U_\phi \leq U_{зад} \leq U_L$ . При  $U_{зад} \leq U_\phi$  происходит значительное увеличение  $K_U$  до 33%.

#### Список литературы:

1. Mukund R. Patel Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy / Mukund R. Patel. — CRC Press, 2012. — 379 p.
2. Руденко В.С., Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. — М.: Высш. школа, 1980. — 424 с.
3. Бурков А.Т., Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. — М.: Транспорт, 1999. — 464 с.
4. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / edited by Muhammad H. Rashid. — 3rd ed. — Elsevier Inc., 2011. — 1390 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3.
5. Пат. 2691968 Российская Федерация, МПК H02M 5/27. Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; — № 2018123270; Заявл. 26.06.2018; Оpubл. 19.06.2019; Бюл. № 17.
6. Варламов, Н.С. Разработка бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты / Н.С. Варламов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать шестая Междунар. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12-13 марта 2020 г., Москва): Тез. Докл. — М.: ООО «Центра полиграфических услуг «Радуга», 2020. — С. 382

### ANALYSIS OF THE OUTPUT VOLTAGE OF THE TRANSFORMERLESS CYCLOCONVERTER AT CHANGE OF FREQUENCY OF THE REFERENCE SIGNAL

Valerij G. Sugakov, Nikita S. Varlamov

*Keywords: cycloconverters, ship electric power system, total harmonic distortion, modeling.*

*Annotation. The article is devoted to simulation of a transformerless cycloconverter. A spectral analysis of the output voltage with a change in the frequency of the reference signal is presented. It is shown that the change in the frequency of the output voltage practically does not influence the change in the coefficient of nonlinear distortion.*