

УДК 621.316.726

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев
Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ БЕСТРАНСФОРМАТОРНОГО НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АМПЛИТУДЫ ЭТАЛОННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье представлены результаты имитационного моделирования бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты. В качестве результатов исследования приведены графики коэффициента нелинейных искажений и амплитуды выходного напряжения в зависимости от амплитуды эталонного напряжения. Показано, что качество выходного напряжения во многом определяется амплитудой эталонного напряжения.

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

V. G. Sugakov, N. S. Varlamov, Yu. S. Malyshev
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod

OUTPUT VOLTAGE QUALITY ASSESSMENT OF THE TRANSFORMERLESS CYCLOCONVERTER AT CHANGE OF AMPLITUDES OF THE REFERENCE VOLTAGE

The article presents the results of simulation modeling of a transformerless direct frequency converter. As the results of the study, the graphs of the nonlinear distortion coefficient and the amplitude of the output voltage depending on the amplitude of the reference voltage are given. It is shown that the quality of the output voltage is largely determined by the amplitude of the reference voltage.

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

В настоящее время одной из актуальных задач в области водного транспорта является разработка энергосберегающих решений. Двигатели внутреннего сгорания, работающие с постоянной частотой вращения, в составе судовой электростанции имеют повышенный удельный расход топлива и горюче-смазочных материалов при работе на долевых нагрузках [1].

Разработка технических решений судовых электростанций на основе дизель-генераторов переменной частоты вращения позволяет решить задачу сбережения энергетических ресурсов, поскольку данные системы позволяют перевести режим работы электростанции в наиболее экономичный по расходу топлива во всем диапазоне изменения нагрузок. Однако главной особенностью предложенных систем является изменение частоты напряжения на выходных клеммах генератора [2, 3].

Недостатком технических решений систем управления полупроводниковым преобразователем электрической энергии, которые разрабатываются для судовых электроэнергетических систем с постоянной частотой напряжения, является зависимость параметров выходного напряжения от изменения амплитуды и частоты напряжения источника электроэнергии [4].

Устранение указанных недостатков возможно путем применения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты (БТНПЧ), который формирует выходное напряжение с заданными параметрами напряжения и обеспечивает подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети вне зависимости от вариации ее параметров (амплитуды, частоты и формы кривой напряжения) [5].

При исследовании БТНПЧ установлено, что значение коэффициента нелинейных искажений напряжения K_U на выходе БТНПЧ не зависит от частоты эталонного напряжения [6] и во многом определяется моментом начала формирования выходного напряжения [7]. Так при синфазном формировании выходного напряжения с одной из синусоид входных напряжений и при равенстве амплитуды и частоты входных и заданных напряжений наблюдается минимальное значение K_U , которое может достигать 0,77% [7].

Целью данной работы является исследование влияния амплитуды заданного (эталонного) напряжения на качество выходного напряжения БТНПЧ. Исследование и анализ выходного напряжения $U_{вых}$ осуществляется в соответствии со структурной схемой, проиллюстрированной в работе [6].

Таблица 1 – Параметры имитационной модели БТНПЧ

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра	Единица измерения
Частота напряжения источника электроэнергии	f_1	50	Гц
Амплитуда линейного напряжения источника электроэнергии	$U_{1л}$	565,7	В
Амплитуда фазного напряжения источника электроэнергии	$U_{1ф}$	327	В
Мощность нагрузки на выходе БТНПЧ (при $\cos\varphi = 1$)	P_n	4	кВт
Заданное значение частоты выходного напряжения БТНПЧ	$f_{зад}$	50	Гц
Время начала формирования выходного напряжения БТНПЧ	$t_{нач}$	0,042	с

Коэффициент нелинейных искажений и спектральный состав сигнала вычислялся для десяти периодов выходного напряжения на основе быстрого преобразования Фурье. Результаты моделирования изображены на рис. 1 и 2.

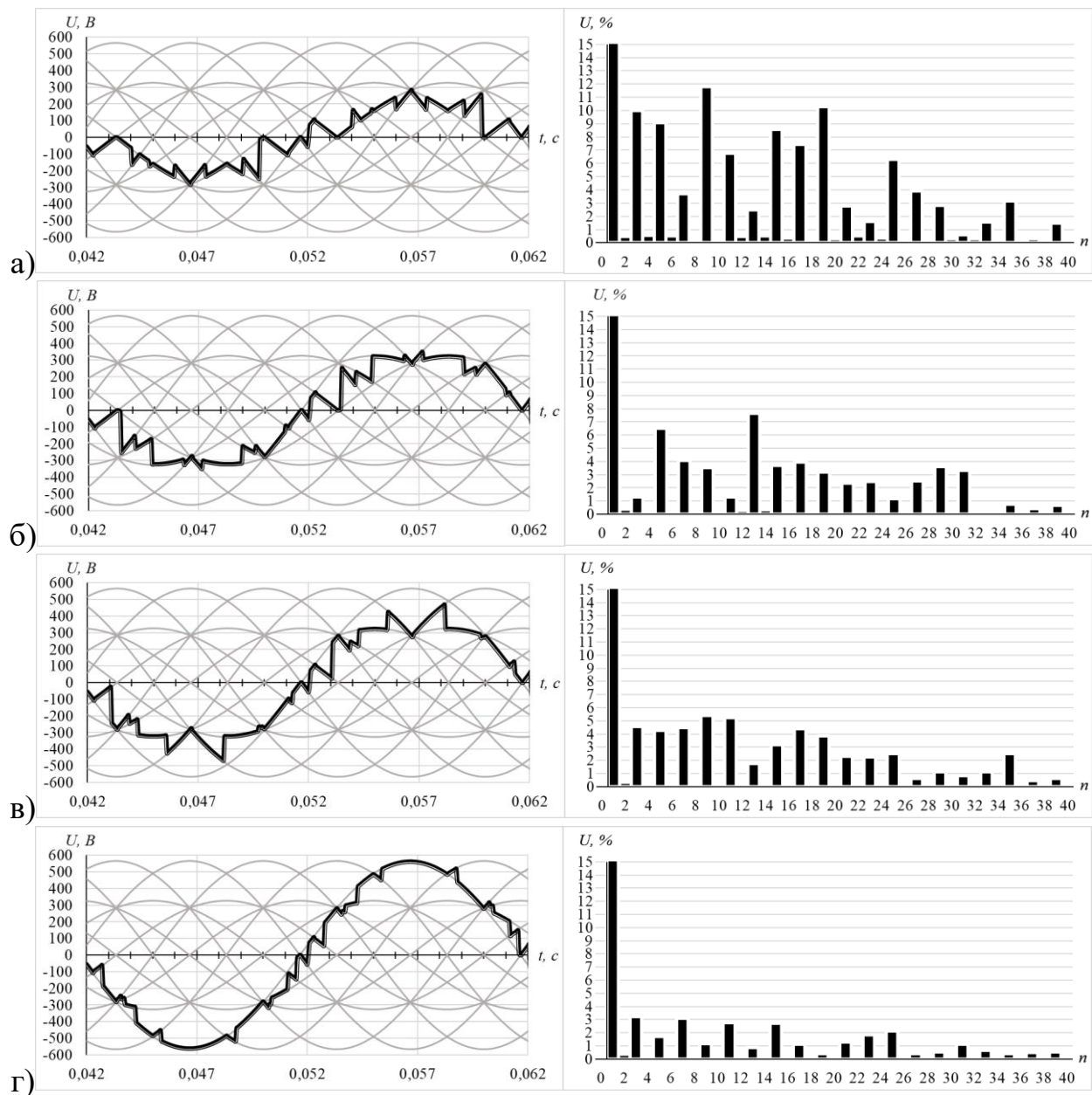


Рисунок 1 – Результаты имитационного моделирования БТНПЧ для амплитуды заданного напряжения 212,1 В (а), 327 В (б), 424,26 В (в) и 565,7 В (г)

В первом случае, когда $U_{зад} < U_{1\phi}$ (рис. 1, а), амплитуда выходного напряжения $U_{вых}$ составляет 209,7 В, а K_U – 31,72%. Максимальные значения гармонических составляющих напряжения наблюдается на третьей, пятой, девятой, одиннадцатой, пятнадцатой, семнадцатой, девятнадцатой и двадцать третьей гармониках. При этом, амплитуда этих гармоник превышает 5% от амплитуды основной гармоники.

При $U_{зад} \approx U_{1\Phi}$ (рис. 1, б) $U_{вых} = 328,6 \text{ В}$, а $K_U = 18,57\%$. Максимальные значения гармонических составляющих наблюдаются на пятой и тринадцатой гармонике и составляют соответственно 6,53% и 7,63% от амплитуды основной гармоники.

В третьем случае, когда амплитуда заданного напряжения находится в диапазоне $U_{1\Phi} < U_{зад} < U_{1Л}$ (рис. 1, в) $U_{вых}$ составляет 389,7 В, а $K_U = 18,44\%$. При этом максимальные значения амплитуды гармонических составляющих не превышает 5% за исключением девятой (5,42%) и одиннадцатой (5,23%) гармоники.

В случае $U_{зад} \approx U_{1Л}$ (рис. 1, г) $U_{вых} = 553,8 \text{ В}$, а $K_U = 11,01\%$. Максимальное значение амплитуды гармонических составляющих наблюдается на третьей гармонике и оставляет 3,09% от амплитуды основной гармоники.

При этом во всех случаях амплитуда четных гармоник не превышает 0,5%, что связано с равенством заданной частоты напряжения $f_{зад}$ и частоты напряжения источника электроэнергии f_1 , что более подробно отражено в работах [6] и [7].

Результаты исследования зависимости коэффициента нелинейных искажения K_U и величины амплитуды напряжения $U_{вых}$ на выходе БТНПЧ при изменении амплитуды заданного напряжения $U_{зад}$ изображено на рис. 2.

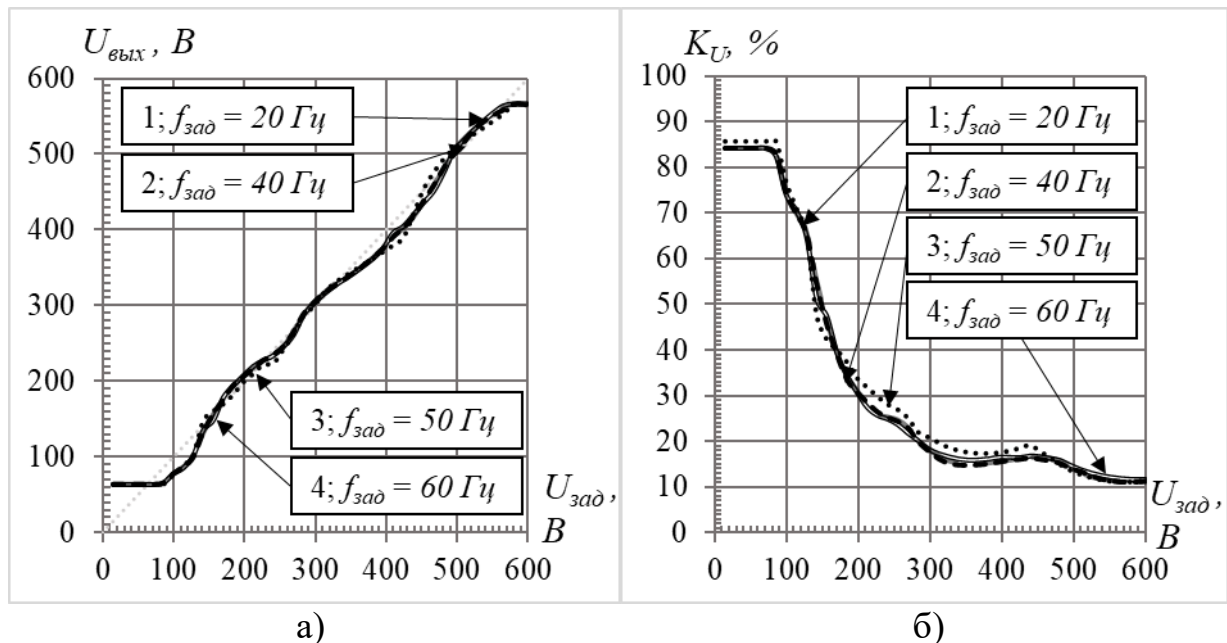


Рисунок 2 – Результаты имитационного моделирования БТНПЧ при изменении амплитуды заданного напряжения:

а – график зависимости амплитуды выходного напряжения;

б – график изменения коэффициента нелинейных искажения

На основании результатов моделирования (рис. 2) можно сделать вывод, что БТНПЧ позволяет сформировать выходное напряжения в диапазоне значений $0,11 \cdot U_{1Л} \leq U_{вых} < U_{1Л}$ амплитуды линейного напряжения, при этом зависимость $U_{вых}(U_{зад})$ в этом диапазоне имеет практически линейный характер.

При $0 \leq U_{зад} < 0,11 \cdot U_{1Л}$ (рис. 2, а), на выходе БТНПЧ формируется напряжение $U_{вых}$, амплитуда которой $0,11 \cdot U_{1Л}$. В этом случае наблюдается максимальное значение K_U , равное 84%. В диапазоне значений $0,11 \cdot U_{1Л} < U_{зад} < 0,58 \cdot U_{1Л} (U_{1Ф})$ напряжение на выходе БТНПЧ характеризуется высоким коэффициентом нелинейных искажений, который находится в диапазоне от 84% до 18 %.

В режиме работы, когда $U_{1Ф} \leq U_{зад} \leq U_{1Л}$ (рис. 1, в–г), происходит значительное снижение гармонических искажений, при этом K_U находится в диапазоне от 19% до 11%. По мере увеличения значения $U_{зад}$ происходит уменьшение значения K_U до 11% при $U_{зад} \geq U_{1Л}$, однако амплитуда выходного напряжения $U_{вых}$ не превышает амплитуды линейного напряжения $U_{1Л}$ источника электроэнергии (рис. 1, г).

При этом, как видно из рис. 2, изменение частоты заданного напряжения $f_{зад}$ (характеристики 1 – 4) практически не оказывает влияния на формирование выходного напряжения.

Таким образом, на основе результатов имитационного моделирования установлено, что амплитуда выходного напряжения $U_{вых}$ изменяется в соответствии с заданным значением в диапазоне $0,11 \cdot U_{1Л} \leq U_{зад} < U_{1Л}$. Качество выходного напряжения во многом определяется амплитудой эталонного напряжения $U_{зад}$ и моментом начала формирования выходного напряжения $t_{нач}$ [7]. Так минимальные значения K_U наблюдается при $U_{1Ф} \leq U_{зад} \leq U_{1Л}$.

Результаты исследований показали, что БТНПЧ обеспечивает подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети, что позволяет сформировать выходное напряжение в соответствии с заданными параметрами амплитуды и частоты напряжения вне зависимости от вариации параметров напряжения источника электроэнергии.

Список литературы

1. Герасимов, А. Дизель-генераторные электростанции. Работа при переменной частоте вращения дизеля / А. Герасимов, К. Толмачев, К. Уткин // Internet журнал «Новости электротехники» - 2005. - №4(34). <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/>
2. Григорьев, А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2014. – №6(28). – С. 39-43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43
3. Хватов, О.С. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вестник ИГЭУ. – 2010. - № 2. - С. 53-57.
4. Анисимов, Я.Ф. Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Ленинград: Судостроение, 1973. – 227 с.

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; Опубл. 19.06.2019; Бюл. № 17.

6. Сугаков, В.Г. Анализ выходного напряжения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты при изменении частоты эталонного сигнала / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов // Н. Новгород ВГАВТ труды 22-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2020». Труды конгресса. ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2020. С. 1 – 4.

7. Сугаков В.Г. Особенности формирования выходного напряжения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. статей. — Н.Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева, 2020. С. 36 – 40. DOI: 10.46960/39255930_2020_36

Сведения об авторах

Сугаков Валерий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта», Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, e-mail: elektrikasp@mail.ru

Варламов Никита Сергеевич – аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта», Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, e-mail: varlamov_nikita@mail.ru

Малышев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта», Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, e-mail: elektrikasp@mail.ru

About the authors

Sugakov Valerij Gennad'evich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport, Volga State University of Water Transport, Nizhnii Novgorod, e-mail: elektrikasp@mail.ru

Varlamov Nikita Sergeevich – Postgraduate student, Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport, Volga State University of Water Transport, Nizhnii Novgorod, e-mail: varlamov_nikita@mail.ru

Malyshev Yuriy Sergeevich – Ph.D. in Technical Sciences, Associate professor, Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport, Volga State University of Water Transport, Nizhnii Novgorod, e-mail: elektrikasp@mail.ru