

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-101-109
УДК 621.314.1

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДВУНАПРАВЛЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Б. А. Авдеев

*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Российская Федерация*

Одним из путей увеличения эффективности работы автономных подводных аппаратов является использование электроэнергетической системы постоянного тока. С помощью импульсного регулирования можно добиться стабильного напряжения на потребителях даже при значительных изменениях частоты вращения гребного винта, вызванных волнением, рельефом дна, течением, ветрами, сменой курса и т. д. Рассмотрены вопросы, касающиеся моделирования преобразователей постоянного напряжения для автономных подводных аппаратов. Определены мощности, передаваемые от источника постоянного напряжения к нагрузке. Проанализированы возможные пути регулирования мощности и напряжения на выходе преобразователя и доказано, что целесообразней всего производить регулировку мощности и напряжения с помощью фазового угла между инвертирующим и выпрямительным мостами. При угле, равном 90° , ток в импульсном трансформаторе по форме будет походить на синусоиду и при этом будет прост для кусочно-линейной аппроксимации, что облегчит определение передаваемой мощности за период. Представлены различные варианты выходного сигнала при изменении фазового угла открытия IGBT-транзисторов. Проиллюстрированы осциллограммы преобразователя постоянного напряжения переменного тока, форма тока в катушке индуктивности. На базе произведённых расчётов найдено аналитическое решение для определения передаваемой мощности. Двухнаправленный преобразователь постоянного тока на базе IGBT-транзисторов был смоделирован в пакете Simulink, в результате чего получены напряжение на катушке индуктивности, ток и напряжение на нагрузке в виде графической зависимости. Полученные зависимости полностью совпадают с проведёнными теоретическими расчётами.

Ключевые слова: преобразователь постоянного напряжения, автономный аппарат, катушка индуктивности, кусочно-линейная аппроксимация, мощность, Simulink.

Для цитирования: *Авдеев Б. А.* Расчет мощности двухнаправленного преобразователя постоянного напряжения автономных подводных аппаратов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 101–109. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-101-109.

Введение

Подводные аппараты могут применяться на недоступной для подводных лодок и водолазов глубине и предназначены для выполнения различных операций: для визуального исследования линий подводных коммуникаций, патрулирования, исследования морского дна, контроля биоресурсной базы, разработки подводных месторождений полезных ископаемых, сейсмозаведки и т. д. В процессе создания данных аппаратов одним из самых сложных достижений является обеспечение необходимой автономности при сохранении малых массогабаритных показателей и экономических затрат на изготовление и работу. Необходимо учитывать, что для внедрения любого технологического решения необходим предыдущий анализ производительности системы, который приведёт к успешному применению и гарантированной экономии [1].

В процессе передачи и преобразования электроэнергии из аккумуляторных батарей к двигателю происходит большое количество преобразований электроэнергии, что приводит к потерям. В условиях автономности аппарата, при невозможности поступления питания извне, остро ставится вопрос, касающийся целесообразной трансформации электроэнергии. В качестве одного из путей решения предлагается использование судовой сети, работающей на постоянном токе, которая обладает преимуществами перед сетью переменного тока [2]. Стабильного напряжения на потребителях даже при значительных изменениях частоты вращения гребного винта, вызванных волнением, рельефом дна, течением, ветрами, сменой курса и т. д., можно добиться с помощью импульсного регулирования [3, 4]. В системе «аккумуляторные батареи – потребитель» преобразователь постоянного напряжения имеет важное значение для улучшения переходных характеристик системы и обеспечения оптимального выравнивания нагрузки.

Целью данного исследования является расчёт передаваемой мощности, необходимой для дальнейшего моделирования электрической сети автономного аппарата.

Материалы и результаты исследования

Преобразователь постоянного напряжения служит для питания нагрузки постоянным напряжением, отличающимся по величине от напряжения источника. Преобразователь постоянного напряжения основан на использовании импульсных методов регулирования постоянного напряжения.

Структурная схема и принцип работы современных преобразователей аналогичен импульсным выпрямительным модулям, построенным с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Двухнаправленный преобразователь также может использоваться для хранения энергии в энергосистеме. Существуют различные виды двухнаправленных преобразователей постоянной мощности [5, 6]. Рассмотрим одну из самых распространённых двухнаправленных схем преобразователя.

Преобразователь состоит из гальванически развязанных двух цепей, подключённых через высокочастотный трансформатор TV . Обе цепи собраны из IGBT-транзисторов $S1-S4$ и $S5-S8$ и представляют классический H-мост, который коммутируется импульсами с системы управления. Для сглаживания тока в первой цепи (инвертирующей) применяется катушка индуктивности L и конденсаторы $C1$ и $C2$ для сглаживания пульсаций напряжения в обеих цепях. Питание осуществляется от аккумуляторной батареи GB . Выходное напряжение таких преобразователей характеризуется последовательностью импульсов прямоугольной формы с длительностью DT и паузой $T(1 - D)$, амплитуда которых близка к напряжению питания. Требуемое качество выходного напряжения с точки зрения пульсаций достигается включением сглаживающего фильтра между выходом преобразователя и нагрузкой [5–8]. Высокочастотный трансформатор служит для гальванической развязки и может потребоваться в тех случаях, где отношение напряжения между входным и выходным напряжениями превышает определённый предел. В противном случае устройства должны одновременно выдерживать как высокое напряжение, так и высокий ток, что неэкономично. Он также обеспечивает дополнительную степень свободы по сравнению с базовой схемой путём введения коэффициента трансформации трансформатора (рис. 1).

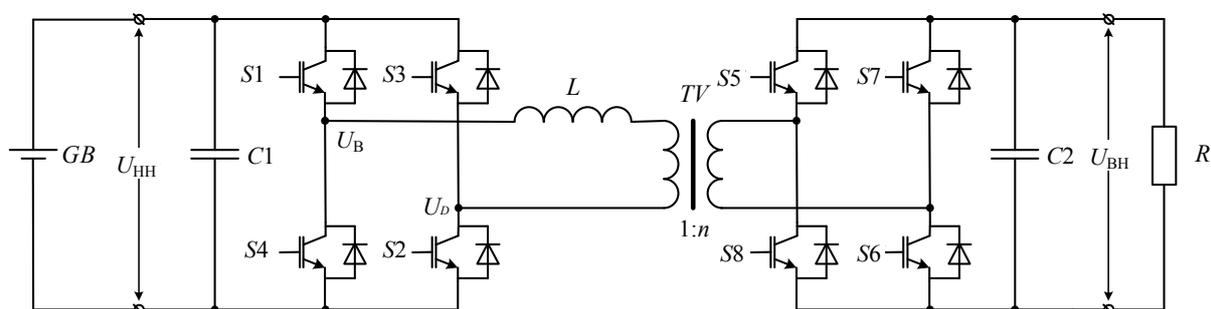


Рис. 1. Схема двухнаправленного преобразователя и синхронизация сигналов ШИМ

Осуществление работы двухнаправленного преобразователя постоянного напряжения будем рассматривать при следующих допущениях:

- 1) пренебрегаются все потери;
- 2) рассматриваются идеальные источники питания;

3) величины вторичной (выпрямляющей) цепи рассматриваются в первичной (инвертирующей) цепи.

В эквивалентной модели, которая объясняет работу преобразователя, инвертор заменён на источник напряжения $U_{И}(t)$, а выпрямитель – на источник напряжения $U_{В}(t)$, между которыми последовательно подключена индуктивность L (рис. 2).

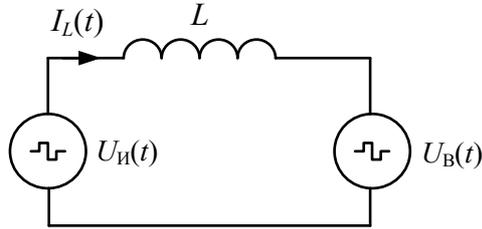


Рис. 2. Эквивалентная модель преобразователя постоянного тока

В схемах первичных или вторичных H-мостов возможны три различные уровня напряжения в зависимости от уровня напряжения входных и выходных источников напряжения соответственно. Следовательно, источник напряжения, представляющий входной мост, определяется четырьмя состояниями:

$$U_{И}(t) = \begin{cases} +U_{вх} & \text{(состояние I),} \\ 0 & \text{(состояния II, III),} \\ -U_{вх} & \text{(состояние IV).} \end{cases}$$

Эти состояния соответствуют состояниям переключателей, представленных в таблице.

Состояние ключей и напряжения на зажимах моста

Состояние	Ключи S1 и S2	Ключи S3 и S4	$U_{В}$	U_{D}	$U_{вых}$
I	1	0	$+U_{вх}/2$	$-U_{вх}/2$	$+U_{вх}$
II	0	0	$-U_{вх}/2$	$-U_{вх}/2$	0
III	1	1	$+U_{вх}/2$	$+U_{вх}/2$	0
IV	0	1	$-U_{вх}/2$	$+U_{вх}/2$	$-U_{вх}$

Источник напряжения, представляющий выходной мост, определяется аналогичным способом:

$$U_{В}(t) = \begin{cases} +U_{вых} & \text{(состояние I),} \\ 0 & \text{(состояния II, III),} \\ -U_{вых} & \text{(состояние IV).} \end{cases}$$

Напряжения $U_{И}(t)$ и $U_{В}(t)$ создают напряжение $U_L(t)$ на индуктивности:

$$U_L(t) = U_{И}(t) - U_{В}(t).$$

В связи с тем, что контур замкнутый, из-за возникшего напряжения $U_L(t)$ по контуру будет проходить ток $I_L(t)$:

$$I_L(t) = I_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t U_L(t) dt,$$

где $I_L(t_0)$ – ток в момент времени t_0 , А.

Источники напряжения $U_{И}(t)$ и $U_{В}(t)$ генерируют или получают соответствующие мгновенные мощности:

$$P_{И}(t) = U_{И}(t)I_L(t); \quad P_{В}(t) = U_{В}(t)I_L(t).$$

При этом средняя мощность в течение одного цикла переключения T вычисляется для цепи инвертирования и выпрямления следующим образом [9, 10]:

$$P_{И} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_{И}(t) dt; \quad P_{В} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_{В}(t) dt.$$

Согласно балансу мощностей можно записать равенство: $P_{И} = P_{В}$.

Уровень мощности преобразователя постоянного напряжения обычно настраивается с использованием одного или нескольких из четырёх параметров управления:

- фазовым углом θ между напряжениями переменного тока $U_{И}(t)$ и $U_{В}(t)$;
- фазовым углом диагонали инвертирующего или выпрямляющего моста;
- рабочим циклом D переменного напряжения на инвертирующем или выпрямляющем мостах;
- частотой переключения.

Модуляция фазового сдвига управляет преобразователем постоянного напряжения с постоянной частотой коммутации с максимальными рабочими циклами $D_1 = D_2 = 0,5$, при этом изменяется только фазовый сдвиг между инверторным и выпрямительным мостами для управления передаваемой мощностью. С помощью этих управляющих сигналов напряжение на инверторном мосту имеет два уровня: $+U_{ВХ}$ и $-U_{ВХ}$. И аналогичным образом напряжение на выпрямительном мосту имеет два уровня: $+U_{ВЫХ}$ и $-U_{ВЫХ}$. При установившемся режиме напряжения $U_{И}(t)$, $U_{В}(t)$ и ток $I_L(t)$ повторяют каждый полупериод с обратными знаками. Импульсы на одну ветвь моста представляют собой пару сигналов квадратной волны с рабочим циклом, равным 0,5, которые смещены на 180° относительно друг друга.

Применяя эти импульсы модуляции к инвертирующему и выпрямительному мостам с фазовым сдвигом на 90° между импульсами, на выходах каждого моста генерируются два напряжения переменного тока в форме меандра. При данном угле между выпрямительным и инверторным мостами наблюдается наибольшая передаваемая мощность. При уменьшении угла θ будет происходить уменьшение уровня напряжения на выходе и, соответственно, передаваемой мощности через преобразователь. Как можно заметить, средние значения $U_{И}(t)$ и $U_{В}(t)$ при установившемся режиме равны нулю для избегания насыщения трансформатора. На рис. 3 приведены осциллограммы преобразователя.

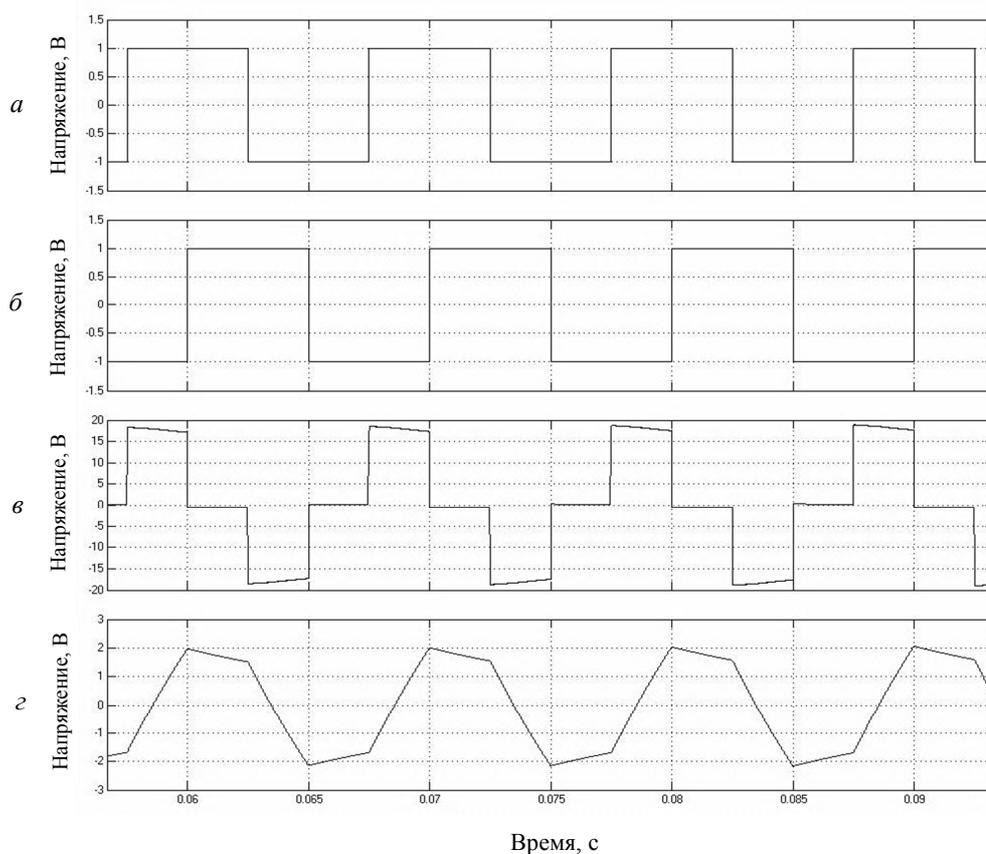


Рис. 3. Осциллограммы преобразователя постоянного напряжения:
 а – напряжение переменного тока на выходе инвертирующего моста;
 б – напряжение переменного тока на входе выпрямительного моста;
 в – напряжение на катушке индуктивности L ; г – ток через катушку индуктивности L

Таким образом, для получения аналитического выражения для определения мощности за период необходимо определить ток $I_L(t)$. Составление кусочно-линейной аппроксимации тока $I_L(t)$, состоящей из четырёх участков, не составляет особого труда. Форма тока в катушке индуктивности представлена на рис. 4.

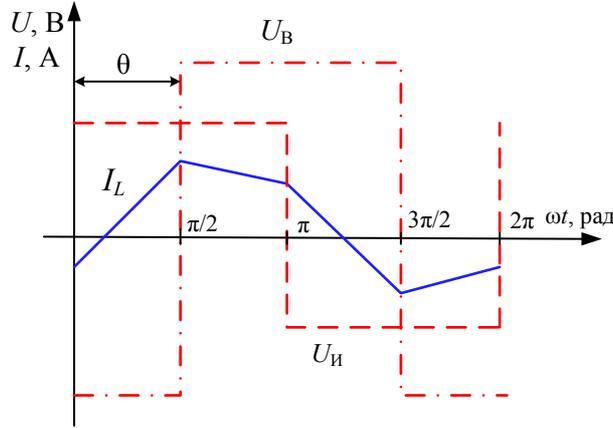


Рис. 4. Форма тока при катушке индуктивности

Ток в катушке можно описать следующим уравнением:

$$I_L = \begin{cases} I_0 + \frac{U_{\text{И}} + U_{\text{В}}}{L} t & (\text{состояние I}), \\ I_1 - \frac{U_{\text{В}} - U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{\theta T}{2\pi} \right) & (\text{состояние II}), \\ I_{\text{II}} - \frac{U_{\text{В}} + U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{T}{2} \right) & (\text{состояние III}), \\ I_{\text{III}} + \frac{U_{\text{В}} - U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{T}{2} - \frac{\theta T}{2\pi} \right) & (\text{состояние IV}), \end{cases} \quad (1)$$

где I_0 – начальное значение тока, А; $I_1, I_{\text{II}}, I_{\text{III}}$ – значения токов при углах θ, π и $\pi + \theta$ соответственно.

Поскольку время фазового сдвига t_0 и напряжения питания $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ в установившемся режиме остаются неизменными в течение первого полупериода (состояния I, II) и во втором полупериоде (состояния III, IV), для расчёта тока можно учитывать только первый полупериод, интервалы I и II. Уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$I_L = \begin{cases} I_0 + \frac{U_{\text{В}} + U_{\text{И}}}{L} t & (\text{состояние I}), \\ I_1 - \frac{U_{\text{В}} - U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{\theta T}{2\pi} \right) & (\text{состояние II}), \\ -I_0 - \frac{U_{\text{В}} + U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{T}{2} \right) & (\text{состояние III}), \\ -I_{\text{III}} - \frac{U_{\text{В}} - U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{T}{2} - \frac{\theta T}{2\pi} \right) & (\text{состояние IV}). \end{cases}$$

В установившемся режиме состояния I_{II} и I_{III} являются зеркальными отображениями состояний I и II, конечное значение тока в конце периода должно совпадать с начальным значением тока I_0 . Таким образом,

$$I_0 = -I_{\text{III}} - \frac{U_{\text{В}} - U_{\text{И}}}{L} \left(t - \frac{T}{2} - \frac{\theta T}{2\pi} \right).$$

Подставим вместо I_{III} величину тока в состоянии I_0 и получим уравнение

$$I_0 = -I_0 + \frac{U_B + U_{II}}{L} \left(t - \frac{T}{2} \right) - \frac{U_B - U_{II}}{L} \left(t - \frac{T}{2} - \frac{\theta T}{2\pi} \right). \quad (2)$$

Решив несложное уравнение (2) относительно I_0 при $t = T$, можно получить

$$I_0 = \frac{U_B}{L} \frac{\theta T}{2\pi} + \frac{U_{II} - U_B}{4L} T.$$

С учётом напряжения на катушке индуктивности можно записать следующее выражение для передаваемой мощности за период:

$$P = \begin{cases} I_0 (U_{II} + U_B) \frac{\theta T}{2\pi} + \int_0^{\frac{\theta T}{2\pi}} \frac{(U_{II} + U_B)^2}{L} dt, \\ I_I (U_{II} - U_B) \left(\frac{T}{2} - \frac{\theta T}{2\pi} \right) - \int_{\frac{\theta T}{2\pi}}^{\frac{T}{2}} \frac{(U_{II} - U_B)^2}{L} dt + \frac{(U_{II} - U_B)^2}{L} \frac{\theta T}{2\pi}, \\ I_{II} (U_{II} + U_B) \frac{\theta T}{2\pi} - \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2} + \frac{\theta T}{2\pi}} \frac{(U_{II} + U_B)^2}{L} dt - \frac{(U_{II} + U_B)^2}{L} \frac{T}{2}, \\ I_{III} (U_{II} - U_B) \left(\frac{T}{2} - \frac{\theta T}{2\pi} \right) + \int_{\frac{T}{2} + \frac{\theta T}{2\pi}}^T \frac{(U_{II} - U_B)^2}{L} dt - \frac{(U_{II} - U_B)^2}{L} \left(\frac{T}{2} + \frac{\theta T}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (3)$$

В качестве практической реализации рассмотрим модель преобразователя постоянного напряжения, выполненного в пакете Simulink. Имитационная модель представлена на рис. 5, напряжение на индукторе, ток через трансформатор и напряжение на нагрузке – на рис. 6.

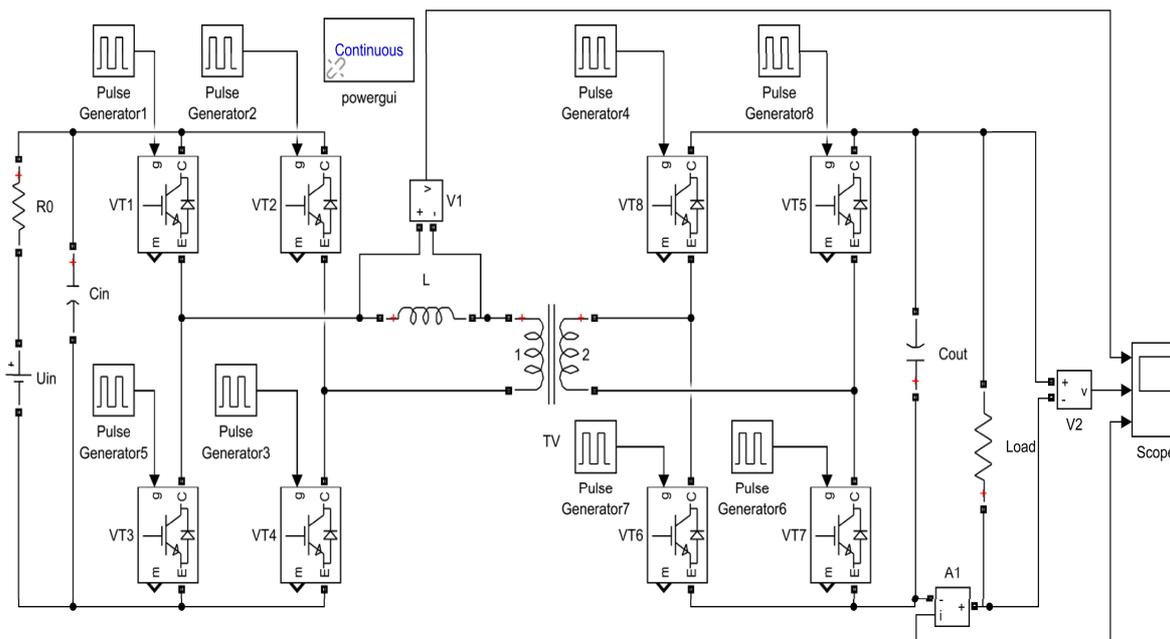


Рис. 5. Модель преобразователя постоянного тока, выполненного в пакете Simulink

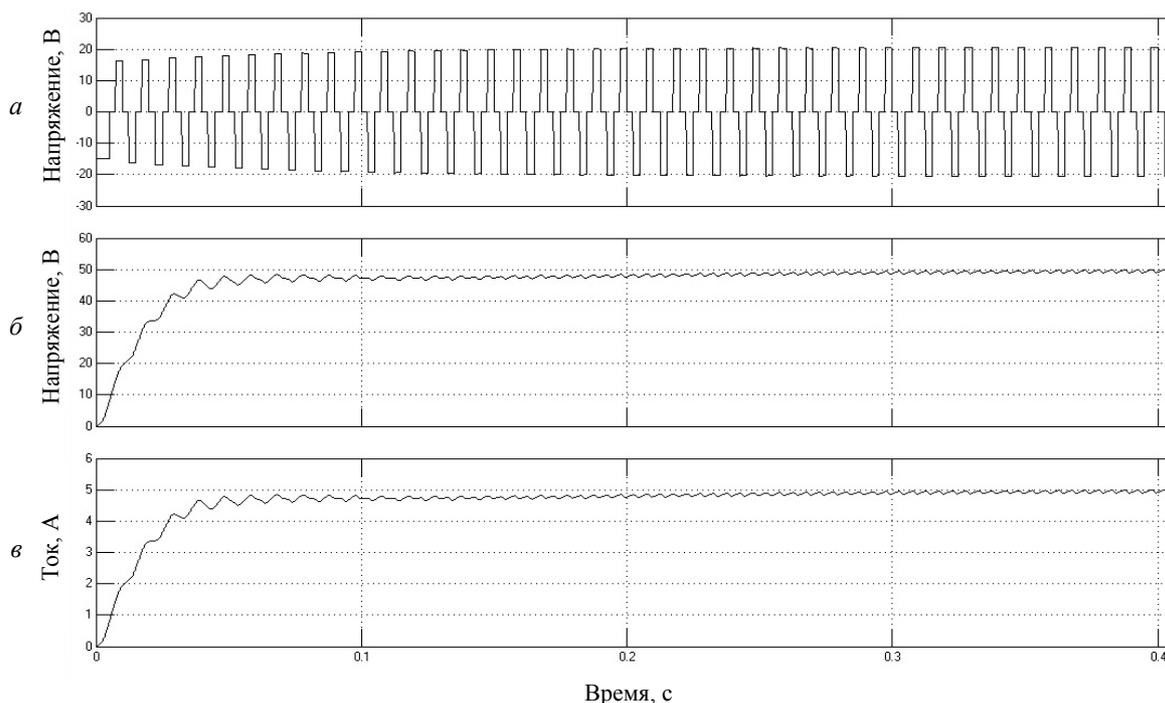


Рис. 6. Результаты моделирования двунаправленного преобразователя постоянного напряжения: *a* – напряжение на индукторе; *б* – напряжение на нагрузке; *в* – ток нагрузки

Таким образом, осциллограммы тока, приведённые на рис. 6, полностью совпадают с проводимыми теоретическими расчётами, соответствующими формуле (3).

Заключение

В результате анализа силового преобразователя постоянного напряжения для автономного подводного аппарата постоянного напряжения были найдены мощности, передаваемые от источника к нагрузке за период. Определено, что для передачи максимальной мощности фазовый угол между инвертирующим и выпрямительным мостами должен составлять 90° , чтобы ток в трансформаторе походил на синусоиду и при этом был прост для обработки. В этом случае кривую тока легко представить в виде кусочно-линейной аппроксимации. Симуляция двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в пакете Simulink подтвердила теоретические расчёты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarigiannidis A., Patsios C., Pittaras A., Kladas A. Geometry optimization of synchronous machines used on ship shaft generator systems // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 792. P. 245–250.
2. Schoyen H., Sow H. A. Decision making tool concerning retrofit of shaft generator frequency converter // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 109. P. 103–112.
3. Sokolova E. The study of the possibility of using innovative technologies for saving engineering 3D objects // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/43/mateconf_icmtmte2017_03008/mateconf_icmtmte2017_03008.html (дата обращения: 20.12.2018). DOI: 10.1051/mateconf/201712903008.
4. Авдеев Б. А. Расчёт индуктивности для двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в автономных подводных аппаратах // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология*. 2018. № 4. С. 107–114. DOI:10.24143/2073-1574-2018-4-107-114.
5. Sokolova E. A., Aslanov G. A., Sokolov A. A. Modern approach to storing 3d geometry of objects in machine engineering industry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. P. 177. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012036.
6. Авдеев Б. А. Расчёт потерь двунаправленного преобразователя постоянного напряжения судовой электростанции постоянного тока // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2018. № 6. С. 24–26. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-6-24-26.

7. Lai J. S., Nelson D. J. Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95. P. 766–777.
8. Иванов А. В., Немировский А. Е. Силовая электроника. Выпрямители: учеб. пособие. Вологда: Изд-во ВоГУ, 2015. 119 с.
9. Токарев Л. Н. Судовая электротехника и электромеханика. СПб.: Береста, 2006. 320 с.
10. Chung Y., Liu W., Schoder K., Cartes D. A. Integration of a bi-directional DC-DC converter model into a real-time system simulation of a shipboard medium voltage DC system // Electric Power Systems Research. 2011. Vol. 81. P. 1051–1059.

Статья поступила в редакцию 23.12.2018

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Авдеев Борис Александрович – Россия, 298309, Керчь; Керченский государственный морской технологический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; dirigeant@mail.ru.



CALCULATION OF THE POWER OF A TWO-DIRECTIONAL DC/DC CONVERTER FOR AUTONOMOUS UNDERWATER APPARATUS

B. A. Avdeyev

*Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russian Federation*

Abstract. One of the ways to increase the efficiency of autonomous underwater vehicles is to use a DC electric power system. With the help of impulse control it is possible to achieve a stable voltage on consumers even with significant changes in the speed of the propeller rotation caused by waves, bottom relief, current, winds, course change, etc. Issues related to the simulation of DC-DC converters for autonomous underwater vehicles have been considered. The powers supplied from a DC power source to loading have been found. Possible ways of regulating the power and voltage at the output of the pre-driver are analyzed and performing the power and voltage adjustment by means of the phase angle to the inverting and rectifying bridges is proved to be expedient. At an angle of 90°, the current in the pulse transformer looks like a sinusoid in shape, and at the same time it is simple for piecewise linear approximation, which in turn makes it easy to determine the transmitted power over a period. Various variants of an output signal are presented under changing a phase angle of opening of IGBT-transistors. There have been illustrated oscillograms of the AC-DC converter and of the current type in the inductor. According to the calculations, the analytical solution was found to determine the transmitted power. A bi-directional DC converter was modeled using a Simulink package, which resulted in a voltage on the inductor and voltage on the load as a graphic dependence. The obtained dependences completely coincide with the theoretical analysis.

Key words: DC converter, autonomous apparatus, inductor, piecewise linear approximation, power, Simulink.

For citation: Avdeyev B. A. Calculation of the power of a two-directional dc/dc converter for autonomous underwater apparatus. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;2:101-109. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-101-109.

REFERENCES

1. Sarigiannidis A., Patsios C., Pittaras A., Kladas A. Geometry optimization of synchronous machines used on ship shaft generator systems. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 792, pp. 245-250.
2. Schoyen H., Sow H. A. Decision making tool concerning retrofit of shaft generator frequency converter. *Ocean Engineering*, 2015, vol. 109, pp. 103-112.

3. Sokolova E. The study of the possibility of using innovative technologies for saving engineering 3D objects. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/43/mateconf_icmtmte2017_03008/mateconf_icmtmte2017_03008.html (accessed: 20.12.2018). DOI: 10.1051/mateconf/201712903008.
4. Avdeev B. A. Raschet induktivnosti dlia dvunapravlenno preobrazovatelja postoiannogo napriazheniia v avtonomnykh podvodnykh apparatakh [Calculating inductivity for two-directional DC-DC converter in autonomous submersibles]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2018, no. 4, pp. 107-114. DOI:10.24143/2073-1574-2018-4-107-114.
5. Sokolova E. A., Aslanov G. A., Sokolov A. A. Modern approach to storing 3d geometry of objects in machine engineering industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. P. 177. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012036.
6. Avdeev B. A. Raschet poter' dvunapravlenno preobrazovatelja postoiannogo napriazheniia sudovoi elektrostantsii postoiannogo toka [Analysis of losses of two-directional DC-DC converter of the ship DC power unit]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2018, no. 6, pp. 24-26. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-6-24-26.
7. Lai J. S., Nelson D. J. Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 95, pp. 766-777.
8. Ivanov A. V., Nemirovskii A. E. *Silovaiia elektronika. Vypriamiteli: uchebnoe posobie* [Power electronics. Rectifiers: teaching guide]. Vologda, Izd-vo VoGU, 2015. 119 p.
9. Tokarev L. N. *Sudovaiia elektrotekhnika i elektromekhanika* [Ship electrotechnology and electromechanics]. Saint-Petersburg, Beresta Publ., 2006. 320 p.
10. Chung Y., Liu W., Schoder K., Cartes D. A. Integration of a bi-directional DC-DC converter model into a real-time system simulation of a shipboard medium voltage DC system. *Electric Power Systems Research*, 2011, vol. 81, pp. 1051-1059.

The article submitted to the editors 23.12.2018

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Avdeyev Boris Aleksandrovich – Russia, 298309, Kerch; Kerch State Maritime Technological University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ship Electrical Equipment and Automation of Production; dirigeant@mail.ru.

