

УДК 621.3

EDN: LQMKZU

PACS: 07.50.Ek



**Моделирование неполнофазного режима работы
активного трёхфазного повышающего преобразователя с коррекцией
коэффициента мощности для генератора в составе летательного аппарата**

*А. Н. Варюхин, М. В. Гордин, А. В. Дутов, Я. Е. Жарков, А. Л. Козлов,
С. И. Мошкунов, В. Ю. Хомич*

Произведено численное моделирование переходных режимов работы трёхфазного повышающего выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности для генератора летательного аппарата. Посредством расчётной модели в программе LTSpice показано влияние сглаживающих конденсаторов нагрузки на функционирование устройства в переходных режимах работы.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, повышающий преобразователь, переходной режим, моделирование.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-86-91

Введение

Активные выпрямители (AC/DC конвертеры) нашли широкое применение в различных областях техники и электрофизики и используются, в частности, в установках для электрохимических преобразований, зарядных станциях, источниках бесперебойного питания, применяется в электропередаче на постоянном токе (HVDC), электроприводе, в установках индукционного нагрева, плазменных источниках питания и источниках питания для бортовой электроники и силовых авиационных установок [1–3]. Активные выпрямители

(выпрямители с принудительной коммутацией) построены на полупроводниковых коммутаторах с возможностью управляемого выключения, которые являются основными элементами формирования выходного напряжения. Это позволяет модулировать входные и выходные токи и напряжения, регулировать коэффициент мощности, реализовывать схемы выпрямителя с источником напряжения или тока, а также осуществлять в исходной схеме двунаправленную передачу мощности. К базовым схемам такого типа выпрямителей обычно относят выпрямители бустерного типа (*boost* или с источником напряжения) и пони-

Варюхин Антон Николаевич¹, зам. ген. директора, к.т.н.
Гордин Михаил Валерьевич², ректор, к.т.н.
Дутов Андрей Владимирович³, ген. директор, д.т.н.
Жарков Ярослав Евгеньевич⁴, м.н.с.
Козлов Андрей Львович¹, ген. директор.
Мошкунов Сергей Игоревич⁴, рук. направления, д.т.н., член-корр. РАН.

E-mail: serg-moshkunov@yandex.ru

Хомич Владислав Юрьевич⁴, научный руководитель, д.ф.-м.н., академик РАН.

¹ ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2.

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, улица 2-я Бауманская, 5, к. 1.

³ ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского».

Россия, 125319, Москва, ул. Викторенко, 7.

E-mail: info@nrczh.ru

⁴ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

Статья поступила в редакцию 6.03.2023

После доработки 17.03.2023

Принята к публикации 27.03.2023

© Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В.,
Жарков Я. Е., Козлов А. Л., Мошкунов С. И.,
Хомич В. Ю., 2023

жающего типа (*buck* или с источником тока) [3–7].

Управляемые выпрямители бустерного (*boost*) типа имеют в своей схеме шесть управляемых транзисторов в плечах, а также накопительный конденсатор большой емкости со стороны шины постоянного тока. Индуктивности фазных обмоток позволяют повысить выходное напряжение и уменьшить гармонические составляющие входного тока [5]. Управление выпрямителем осуществляется при помощи различных методов ШИМ исходя из поддержания заданного уровня напряжения шины постоянного тока, для чего используется контур с обратной связью. Напряжение сравнивается с эталонным значением, а сигнал ошибки, сгенерированный в результате этого сравнения, используется для переключения. ШИМ-регулятор может управлять не только активной, но и реактивной мощностью, позволяя выпрямителю этого типа корректировать коэффициент мощности. К другим достоинствам данного типа выпрямителей по сравнению с другими можно отнести меньшее количество используемых полупроводниковых устройств и пассивных компонентов, возможность работы в режиме непрерывной проводимости, а также возможность достижения коэффициента мощности χ свыше 0,99 и коэффициента искажений (THD) не более 5 % [9].

Описанные показатели делают активные выпрямители наиболее подходящими устройствами с точки зрения массоэнергетических показателей для авиационного применения из-за малого количества элементов в силовой части полупроводникового устройства при достижении высокого значения коэффициента мощности.

Одним из важных свойств, который необходимо учитывать при проектировании активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности для силовой установки ЛА, является быстрдействие активного выпрямителя и устойчивость работы в случае изменения параметров питания генератора от номинального режима работы. Скорость реагирования системы на возникающие в силовой цепи возмущения, исходящие от генератора,

зависят от параметров силовой цепи, оптимальный подбор которых является оптимизационной задачей, рассматриваемой в данной работе.

Модель трёхфазного преобразователя в программе *Ltspice*

На рис. 1 приведена модель корректора мощности в программе *LTSpice*. Модель включает группу электрических элементов генератора с эквивалентной индуктивностью, представленных на схеме источниками синусоидального сигнала *SINE* с элементами индуктивностей L_{1-3} ; коммутаторы фаз (элементы переключателей, управляемых напряжением), показанных на модельной схеме S1, S3, S2, S5, и S7, S8; сглаживающие конденсаторы нагрузки *CldL*, включенное в цепь по схеме Латура; паразитные индуктивности и сопротивления контактов *DC* шины нагрузки L_w и R_w .

Цепи управления корректором коэффициента мощности на модельной схеме представлены отдельными блоками «Цепь обратной связи по току», «Цепь обратной связи по напряжению», а также «Источники питания и опорных сигналов». Цепь обратной связи по току состоит из программируемых источников напряжения, преобразующих токовый сигнал фаз в ослабленный сигнал напряжения с коэффициентом преобразования 0,02 В/А, который поступает на фазосдвигающее устройство, представленное операционным множителем с фазосдвигающим устройством с постоянной времени контура обратной связи, равной 120 мкс.

Цепь обратной связи по напряжению состоит из активного делителя напряжения, снижающего уровень сигнала напряжения нагрузки до диапазона функционирования операционного множителя, осуществляющего обратную связь по напряжению посредством сравнения сигнала с делителя с заданным опорным уровнем. Данный сигнал цепи обратной связи также поступает в цепь обратной связи по току, тем самым масштабируя его и регулируя значение тока фазы.

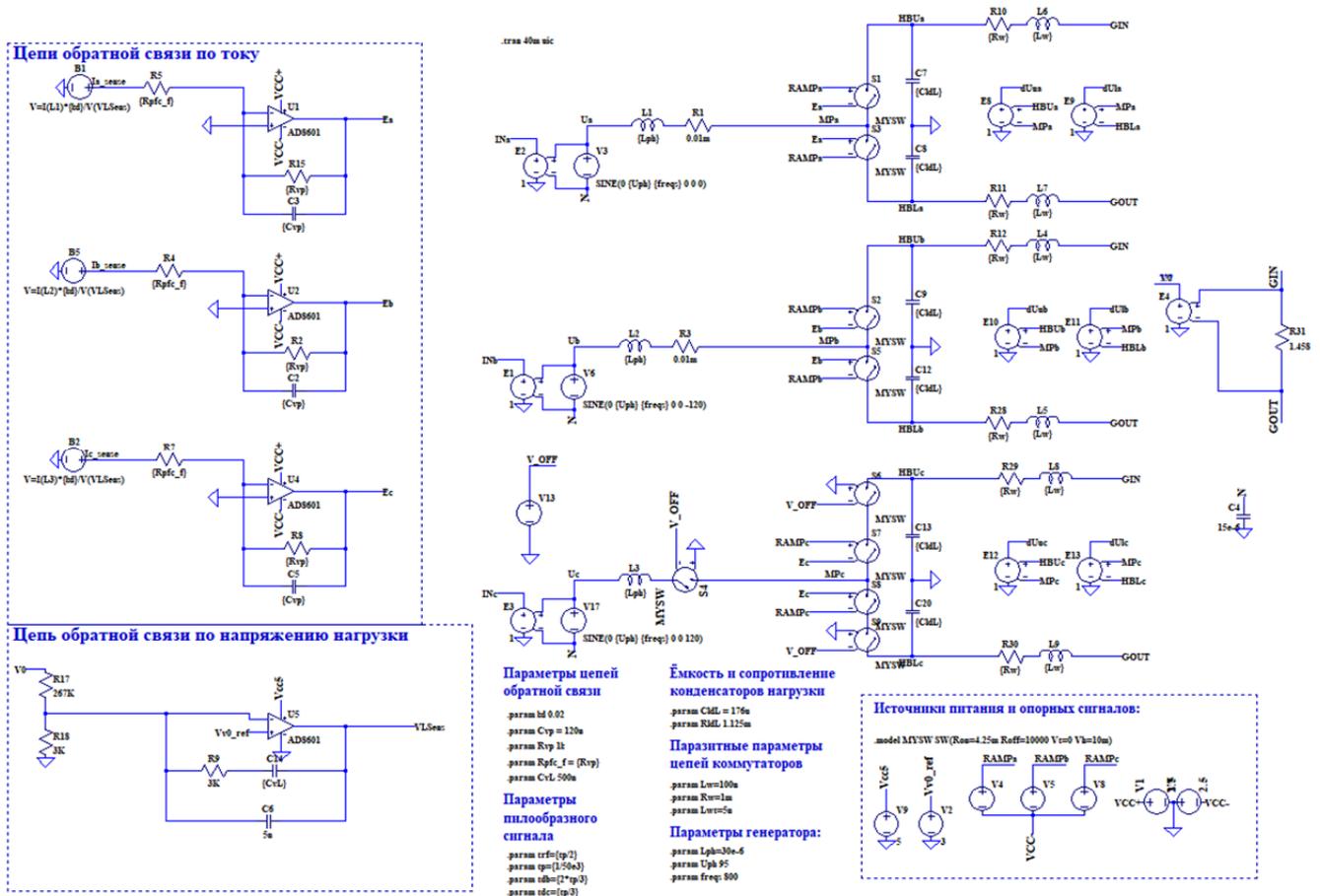


Рис. 1. Модель корректора мощности в программе LTSpice в режиме обрыва фазы

Для проведения численного моделирования в случае возникновения перемежающегося обрыва фазы, расчётная модель в программе LTSpice (рис. 1) была дополнена переключателями в фазе C (S4, S6, S9), назначение которых – имитировать отключение фазы и прекращение работы коммутатора. На логические выходы управляемых переключателей S4, S6, S9 подаётся меандр с параметрами импульса: период 10 мс, скважностью 50 %, временная задержка 10 мс. После отделения источника фазы и коммутаторов от другой части схемы, сглаживающие конденсаторы остаются подключёнными к нагрузке.

Дальнейшее моделирование производилось для генератора со средним значением индуктивности 30 мкГн, выходным диапазоном напряжений 67 В и электрической частотой, равной 800 Гц. Частота ШИМ – 50 кГц. Расчётная нагрузка преобразователя – 50 кВт при уровне напряжения питания на нагрузке, равной 270 В.

Результаты

Результаты параметрического исследования влияния ёмкости сглаживающих конденсаторов на параметры качества приведены на рис. 2, расчётные осциллограммы при ёмкости равной 150 нФ приведены на рис. 3.

Из приведённых зависимостей видно, что увеличение ёмкости сглаживающих конденсаторов положительно сказывается на параметры качества при работе в режиме обрыва одной фазы.

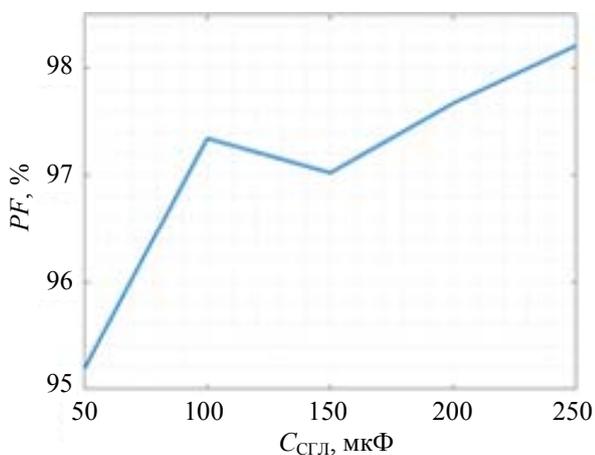
Исключением является случай ёмкости равной 100 мкФ, при которой в цепи возникает резонансный контур «ёмкость сглаживающих конденсаторов – фазная индуктивность» с частотой равной 1600 Гц (вторая гармоника). Возникновение данного резонансного контура проявляется в увеличении коэффициент мощности совместно с резким падением значения постоянного напряжения на нагрузке.

Также из приведённых зависимостей видно, что увеличение ёмкости сглаживающих

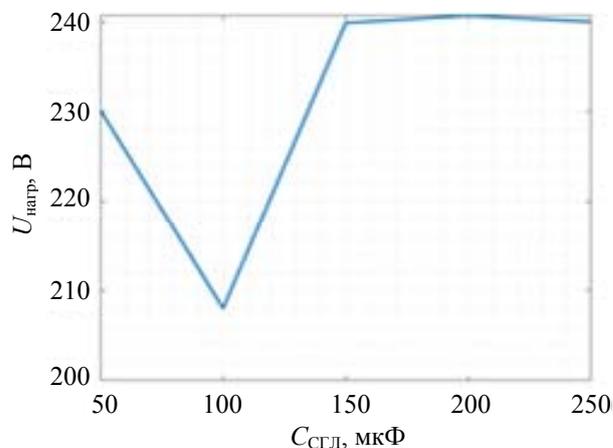
щих конденсаторов свыше 150–175 мкФ не является целесообразным с точки зрения массо-мощностных показателей: из представленных зависимостей видно, что при значении ёмкости сглаживающих конденсаторов, равной 150 мкФ, действующее напряжение на нагрузке не изменяется при увеличении значения сглаживающей ёмкости. Совместно с отсутствием зависимости постоянного напряжения на нагрузке, наблюдается также и изменение характеров зависимости коэффициента мощности и пульсации напряжения на нагрузке: изменение коэффициента мощности при возрастании ёмкости сглаживающих кон-

денсаторов с 50 до 150 мкФ составляет 1,8 % в то время как для диапазона 150–250 мкФ оно составило 1,1 %. Аналогичное изменение также испытывает и коэффициент пульсации напряжения на нагрузке – изменение данной величины в рассматриваемых диапазонах составила 55 % и 20 % соответственно.

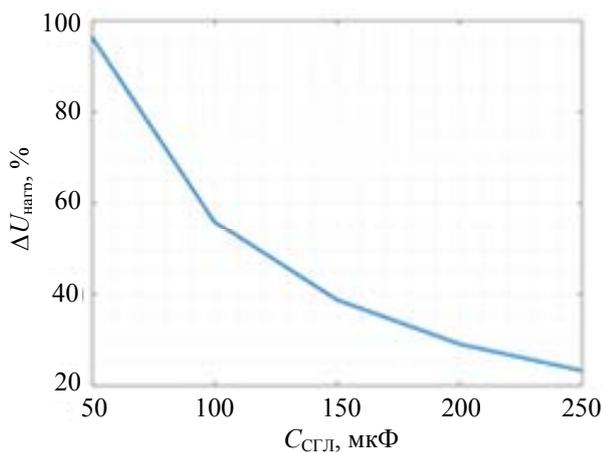
Параметры качества ККМ (корректор коэффициента мощности) в случае ёмкости сглаживающих конденсаторов, равной 175 мкФ, составляют: коэффициент мощности 97,3 %, действующее напряжение на нагрузке – 240 В, коэффициент пульсации напряжения на нагрузке – 34 %.



а)



б)



в)

Рис. 2. Коэффициент мощности (а), действующее напряжение на нагрузке (б) и коэффициент пульсации в зависимости от ёмкости сглаживающего конденсатора фазы

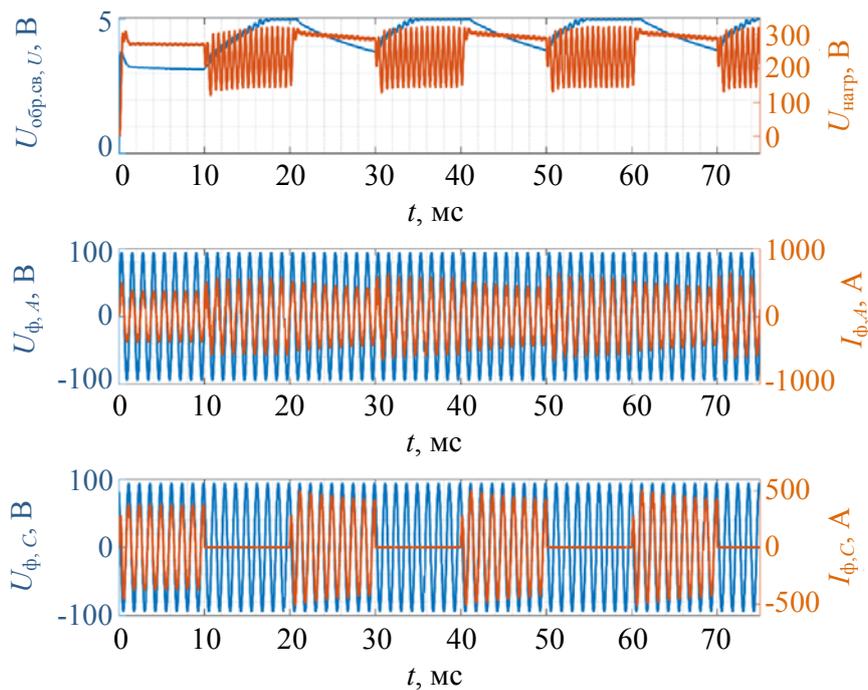


Рис. 3. Расчётные осциллограммы фазных токов и напряжений, напряжение на нагрузке в периодическом неполнофазном режиме при ёмкости сглаживающих конденсаторов 150 мкФ

Заключение

В работе произведено моделирование повышающего преобразователя с коррекцией коэффициента мощности в неполнофазном режиме (режим обрыва одной фазы генератора). Результаты моделирования работы показывают, что ёмкость сглаживающих конденсаторов нагрузки повышающего преобразователя имеет оптимальное значение, превышение которого не приводит к существенному улучшению качества работы корректора коэффициента мощности при линейном увеличении массы повышающего преобразователя, являющимся один из наиболее важных показателей в случае применения повышающего преобразователя в качестве источника питания DC шины летательного аппарата.

Для рассматриваемого повышающего преобразователя, разрабатываемого для электромагнитического генератора со средним значением индуктивности 30 мкГн, выходным напряжением 67 В и электрической частотой, равной 800 Гц, произведён выбор ёмкости сглаживающих конденсаторов нагрузки – 175 мкФ; значение которых обеспечивает параметры качества повышающего преобразователя с ККМ (корректор коэффициента мощно-

сти): коэффициент мощности 97,3 %, действующее напряжение на нагрузке – 240 В (при 270 В в полнофазном режиме), коэффициент пульсации напряжения на нагрузке – 34 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Захарченко В. С. и др. / Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 6. С. 121–129. DOI: 10.1134/S0002331019060128. EDN: CKLPKD
2. Мошкунев С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. / Письма в журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 15(153). С. 22–24. DOI: 10.21883/PJTF.2020.15.49743.18139. EDN: VGCCBE
3. Singh B. et al. / IEEE Trans. Power Electron. 2008. Vol. 23. № 1. P. 260–281.
4. Rashid M. H. Power Electronics Handbook. – Elsevier, 2018. P. 233–273.
5. Kouzou A. Power Factor Correction Circuits. – Elsevier Inc. 2018. Iss. 4. P. 529–569.
6. Rodriguez J. R. et al. / IEEE Trans. Ind. Electron. 2005. Vol. 52. № 1. P. 5–22.
7. Siwakoti Y. P., Forouzesh M., Ha Pham N. Control of Power Electronic Converters and Systems. – Elsevier. 2018. P. 3–29.
8. Safayatullah M. et al. / IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 40753–40793.
9. Mallik A., Ding W., Khaligh A. / IEEE Trans. Veh. Technol. 2017. Vol. 66. № 4. P. 2942–2951.

Numerical simulation of open-phase operation of an active three-phase boost converter with power factor correction for an aircraft electric generator

A. N. Varyukhin¹, M. V. Gordin², A. V. Dutov³, Ya. E. Zharkov⁴,
A. L. Kozlov¹, S. I. Moshkunov⁴ and V. Yu. Khomich⁴

¹ FSUE “CIAM named after P. I. Baranov”

2 Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russia

³ Moscow Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

“Bauman Moscow State Technical University”

5/1 Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

³ National research center «Institute named after N. E. Zhukovsky»

7 Viktorenko st., Moscow, 125319, Russia

⁴ Institute for Electrophysics and Electric Power RAS

18 Dvortsovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia

E-mail: serg-moshkunov@yandex.ru

Received 6.03.2023; revised 17.03.2023; accepted 27.03.2023

Numerical simulation of transient operation modes of an Active Three-Phase Boost Converter with Power Factor Correction was performed. Using the numerical model in the LTSpice program, the effect of reducing load capacitor voltage ripple on the transient operation of the device is shown.

Keywords: power factor corrector, boost converter, transient mode, numerical simulation.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-86-91

REFERENCES

1. Varyukhin A. N., Gordin M. V. and Zakharchenko V. S., Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy, № 6, 121–129 (2019). DOI: 10.1134/S0002331019060128.
2. Moshkunov S. I., Khomich V. Y. and Shershunova E. A., Technical Physics Letters **46** (8), 749–751 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020080106. EDN JWTT0B
3. Singh B. et al., IEEE Trans. Power Electron **23** (1), 260–281 (2008).
4. Rashid M. H., Power Electronics Handbook. Elsevier, 2018, pp. 233–273.
5. Kouzou A., Power Factor Correction Circuits. Elsevier Inc., 2018, Iss. 4, pp. 529–569.
6. Rodriguez J. R. et al., IEEE Trans. Ind. Electron. **52** (1), 5–22 (2005).
7. Siwakoti Y. P., Forouzesha M. and Ha Pham N., Control of Power Electronic Converters and Systems. Elsevier, 2018, pp. 3–29.
8. Safayatullah M. et al., IEEE Access. **10**, 40753–40793 (2022).
9. Mallik A., Ding W. and Khaligh A., IEEE Trans. Veh. Technol. **66** (4), 2942–2951 (2017).