

Мощный импульсный повышающий преобразователь на нитрид-галлиевых транзисторах

© Е.А. Шершунова¹, С.И. Мошкун¹, В.Ю. Хомич¹, А.А. Иголкин²

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, 191186 Санкт-Петербург, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, 443086 Самара, Россия

E-mail: eshershunova@ieeras.ru

Поступила в Редакцию 28 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 16 июля 2025 г.

Принята к публикации 23 июля 2025 г.

Разработан и успешно протестирован модуль силового импульсного повышающего преобразователя напряжения постоянного тока с напряжением на выходе 130 В мощностью 3 кВт с рабочей частотой 100 кГц на нитрид-галлиевых полевых транзисторах. Проведен расчет мощности потерь на элементах силового преобразователя, согласно которому основным механизмом потерь является нагрев кристалла вследствие проводимости. При работе на максимальную мощность экспериментально получен КПД преобразователя 98.5%, что хорошо совпадает с расчетом.

Ключевые слова: преобразователь напряжения, летательные аппараты, нитрид-галлиевые транзисторы, потери мощности.

DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61471.7906

Для увеличения грузоподъемности и дальности полетов легкомоторных летательных аппаратов предполагается использование распределенной гибридной силовой установки, в которой подразумевается использование электрической энергии как от электрохимических источников тока, таких как аккумуляторная батарея и топливные элементы, так и от генератора с приводом от двигателя внутреннего сгорания [1–3].

В данной работе приводятся результаты разработки мощного импульсного повышающего преобразователя для топливного элемента. Особенностью преобразователя является так называемая синхронная схема с двумя управляемыми коммутирующими элементами и использование в качестве них силовых широкозонных транзисторов с высокой подвижностью носителей на основе нитрида галлия.

В качестве топливного элемента рассматривается элемент, рабочее напряжение которого в оптимальном режиме 90 В. Однако выходное напряжение топливного элемента сильно меняется в зависимости от тока и от времени [4,5], поэтому в рамках работы был разработан и создан повышающий преобразователь с напряжением на входе от 90 до 130 В и на выходе 130 В — оптимальном напряжении на шине для используемого электромотора.

Принцип работы повышающего преобразователя и фото его силовой платы показаны на рис. 1. В отличие от традиционной схемы вместо диода Шоттки используется еще один МОП-транзистор. Синхронная схема позволяет увеличить коэффициент полезного действия (КПД) за счет уменьшения потерь на верхнем коммутирующем элементе. Кроме того, синхронная схема способствует более устойчивому управлению преобразователем за счет отсутствия режима прерывистого тока [6].

Напряжение на выходе V_o формируется в течение двух фаз, когда транзистор Q_2 проводит, а Q_1 — нет, и наоборот. Когда транзистор Q_2 находится в проводящем состоянии, энергия накапливается в дросселе L . Когда Q_1 замкнут, запасенная в дросселе энергия передается в конденсатор C_o и нагрузку R_l . Время открытия и закрытия транзисторов определяется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), где напряжение на выходе определяется коэффициентом заполнения D , который при пренебрежении потерями можно выразить как $D = 1 - V_{in}/V_o = (V_o - V_{in})/V_o$.

Так, выходное напряжение V_o при входном V_{in} будет получено при нахождении в открытом состоянии ключа Q_2 в течение $D \cdot T$, а ключа Q_1 — в течение $(1 - D) \cdot T$ соответственно, где T — период импульсов.

Входной ток, ток через дроссель L , определяется как $I_{in} = I_o/(1 - D)$, при этом пиковый ток определяется пульсациями $\Delta I = I_{in}k$, которые берутся равными от 20 до 40% от среднего значения тока, т.е. $k = 0.3$. $I_p = I + \Delta I/2$ — пиковый ток. Индуктивность дросселя можно найти по формуле $L = V_{in} \cdot D \cdot T/\Delta I$. Для сглаживания выходного напряжения в схеме необходим конденсатор, рассчитать значение емкости которого можно по формуле $C_o = I_oDT/\Delta V_o$, где пульсации $\Delta V_o/2$ приняты равными $\leq 2\%$ от напряжения на выходе преобразователя.

Управление повышающим преобразователем реализовано по пиковому току нижнего ключа посредством двойной петли обратной связи по току и по напряжению [7,8]. Ток через транзистор Q_2 служит сигналом обратной связи по току, а напряжение на выходе — сигналом обратной связи по напряжению. Сигнал по току снимается с резистивного датчика R_s суммарным

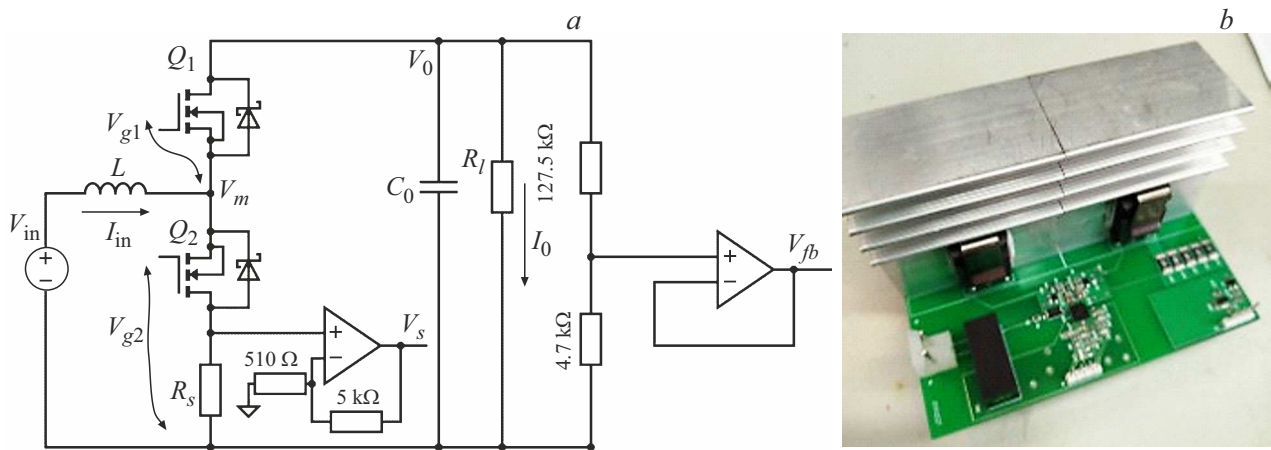


Рис. 1. Импульсный синхронный повышающий преобразователь напряжения постоянного тока: *a* — принцип работы, *b* — фотография силовой платы модуля на 3 кВт.

Параметры преобразователя напряжения

Параметр	Значение
Входное напряжение V_{in} , В	90–130
Выходное напряжение V_o , В	130
Частота импульсов f , кГц	100
Ток через дроссель I_{in} , А	33
Выходной ток I_o , А	23
Индуктивность дросселя L , мкГн	40
Емкость выходного конденсатора C_o , мкФ	14

сопротивлением 10 мОм, включенного последовательно с транзистором Q_2 . Для дальнейшей обработки сигнал с датчика тока усиливается в 10 раз (V_s). Сигнал по напряжению V_{fb} снимается с делителя выходного напряжения. Сигнал ошибки по напряжению является входным сигналом ШИМ-модулятора, куда также приходит сигнал с датчика тока. Сформированный ШИМ-сигнал идет на драйвер транзисторов. Двухканальный изолированный мощный драйвер UCC21225 формирует на выходе два сигнала управления транзисторами V_{g1} и V_{g2} с задержкой относительно друг друга (десятки сотни нс) по сигналу Disable. В схеме управления предусмотрен режим плавного включения и защита от ложного срабатывания.

В таблице приведены рассчитанные параметры преобразователя напряжения.

Полупроводниковыми ключами служили нитрид-галлиевые транзисторы фирмы Nexperia GAN041-650WSB. Выходная емкость была набрана силовыми пленочными конденсаторами Suntan по 680 нФ, 400 В. Силовой дроссель был выполнен на П-образном ферритовом сердечнике с зазором отечественного производства. Было намотано 9 витков медного эмальпровода ПЭТВ-2 диаметром 2 мм при воздушном зазоре в сердечнике 1 мм. Измеренная индуктивность дросселя составила 42 мкГн, а ток его насыщения — 48 А.

На основании методики, описанной в статье [8] для оптимизации схемы и конструкции, был проведен расчет потерь модуля и его КПД (η) в зависимости от напряжения на входе для двух случаев: а) с одним транзистором в плече (рис. 2, а), б) с двумя транзисторами в плече в параллель (рис. 2, б).

Основные потери в преобразователе P_{los} обусловлены потерями на транзисторах, потерями на проводимость P_{cond} , обусловленными сопротивлением открытого канала R_{DSon} , переключательными потерями P_{sw} , обусловленными выходной емкостью транзистора C_{oss} и наличием времени обратного восстановления диода t_{rr} . Мощность также рассеивается в дросселе, что связано с нагревом намоточного провода, потерями в сердечнике и потерями за счет уменьшения эффективной площади провода вследствие скин-эффекта, и в конденсаторах. Согласно расчету, суммарные потери в индукторе составляют не больше 8.3 Вт, а потери в выходных конденсаторах — 0.2% от общей мощности.

Полученные цифры говорят о том, что основной вклад в потерю мощности вносят потери на проводимость транзисторов, которые определяются током через транзистор и его сопротивлением канала R_{DSon} , которое растет с температурой кристалла. Таким образом, способствовать увеличению эффективности может не только обеспечение хорошего теплоотвода, но и соединение нескольких транзисторов в параллель (рис. 2, б).

Исходя их мощности потерь на одном транзисторе $P_1 \leq 25$ Вт, допустимой температуры кристалла $T_j = 125^\circ\text{C}$ и температуры окружающей среды $T_a = 40^\circ\text{C}$, зная тепловые сопротивления между кристаллом и корпусом R_{jc} , между корпусом и радиатором R_{cs} , определив тепловое сопротивление между кристаллом и воздухом R_{ja} по формуле $R_{ja} = (T_j - T_a)/P_1$, найдем нужное тепловое сопротивление радиатора R_{sa} как $R_{sa} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cs}$ [9]. После подстановки получим $R_{sa} = 2.3^\circ\text{C}/\text{Вт}$, допустимую разницу температур между радиатором и воздухом 57.5°C . При принудительном

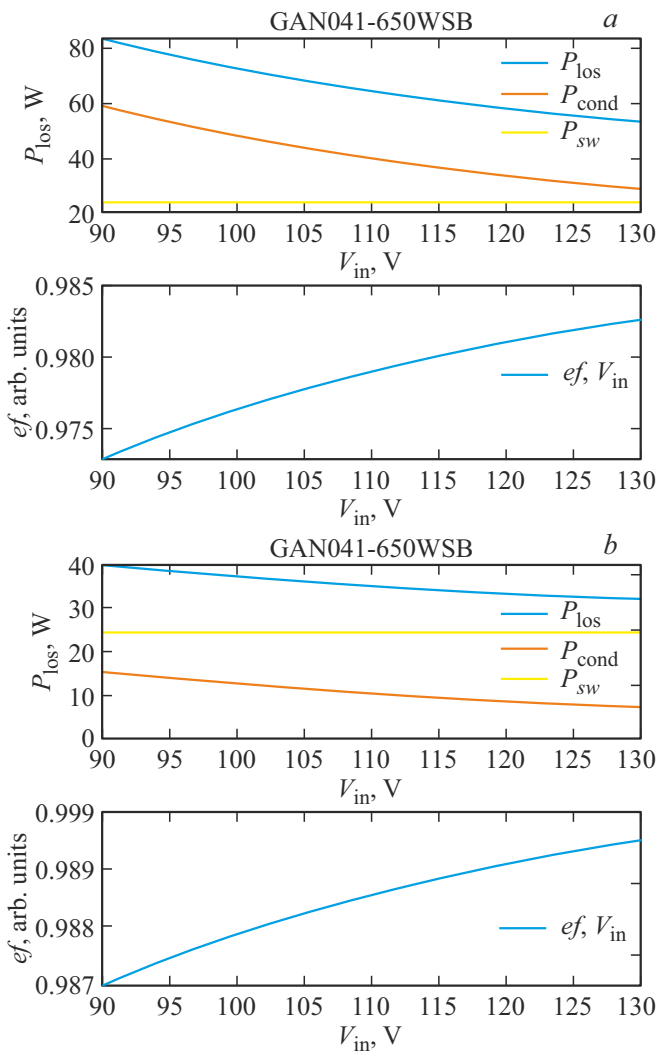


Рис. 2. Рассчитанная мощность потерь в транзисторах P_{los} и КПД преобразователя ef при 1 транзисторе в плече (а) и при 2 параллельных транзисторах в плече (б) при температуре кристалла, равной 100°C .

вентиляционном охлаждении эта цифра может быть увеличена. Этим требованиям удовлетворяет радиатор марки Fisher S514-50 с тепловым сопротивлением $3.5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ при принудительном обдуве со скоростью 4 м/с , что вносит поправочный коэффициент 0.6 [10].

Созданный модуль был протестирован в различных режимах. В ходе тестирования с помощью токовых шунтов 75ШСМ на 75 А с коэффициентом 1 А/мВ измерялся ток от источника I_{in} , ток через нагрузку I_o , мультиметрами Fluke 17B+ измерялись входные и выходные напряжения. С помощью цифрового осциллографа Rigol MS08104 снимались осциллограммы на затворах транзисторов V_{g1} , V_{g2} , сигнал с датчика тока V_s , отображающий ток через транзистор Q_2 , напряжение в средней точке V_m , сигналы V_{in} и V_o .

На рис. 3 показаны типичные осциллограммы напряжений и сигнала с датчика тока V_s при напряжении на входе преобразователя 90 В . Было установлено, что

преобразователь стабильно работает вне зависимости от нагрузки, температура корпуса транзистора не превышает 60°C при его работе на максимальную мощность. Тем не менее пульсации выходного напряжения несколько больше от рассчитанных, что, по-видимому, обусловлено изменением ESR конденсаторов вследствие работы на высокой частоте при больших импульсных токах.

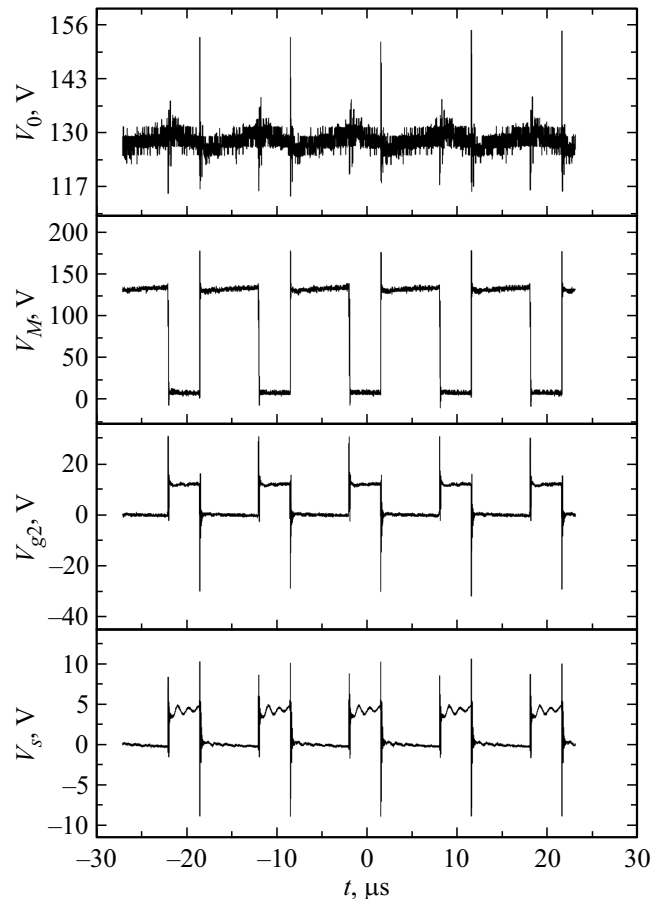


Рис. 3. Осциллограммы напряжений при работе на полную мощность 3 кВт при $V_{in} = 90\text{ В}$: V_o — напряжение на выходе, V_m — напряжение в средней точке, V_{g2} — напряжение на затворе Q_2 , V_s — сигнал с датчика тока (10 А/В).

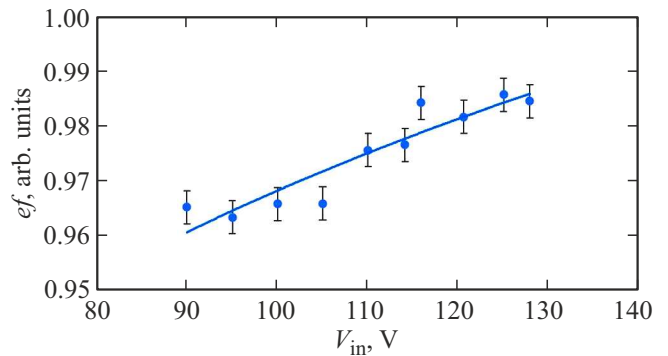


Рис. 4. Экспериментально полученный КПД модуля преобразователя на 3 кВт в зависимости от напряжения на его входе V_{in} (по 1 транзистору в плече).

Как видно из рис. 4, экспериментально полученный КПД преобразователя при его работе на максимальную мощность в зависимости от входного напряжения близок по значениям к рассчитанному (рис. 2, а).

Созданный 3 кВт модуль компактен, имеет высокий КПД, который может быть улучшен путем параллельного соединения по 2 транзистора в плече, имеет стабилизацию по току и напряжению. Соединение нескольких таких модулей позволит создавать преобразователи мощностью в десятки киловатт с высоким КПД и высоким отношением мощности к массе, что важно при использовании на борту аэрокосмических аппаратов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 075-15-2024-558.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B.J. Brelje, J.R. Martins. *Progr. Aerospace Sci.*, **104**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.06.004
- [2] T. Lei, Z. Min, Q. Gao, L. Song, X. Zhang. *Energies*, **15**(11), 4109 (2022). DOI: 10.3390/en15114109
- [3] M.A. Rendón, R.C.D. Sánchez, M.J. Gallo, A.H. Anzai. *J. Control, Automation and Electrical Systems*, **32**(5), 1244 (2021). DOI: 10.1007/s40313-021-00740-x
- [4] А.А. Бельмесов, Л.В. Шмыглева, А.А. Баранов, А.В. Левченко. *Успехи химии*, **93**(6), 6 (2024). DOI: 10.59761/RCR5121
- [5] A.A. Ferreira, J.A. Pomilio, G. Spiazzi, Silva L de Araujo. *IEEE Trans. Power Electron.*, **23**(1), 107 (2008). DOI: 10.1109/TPEL.2007.911799
- [6] *Understanding Boost Power Stages in Switch Mode, Application Report* (Texas Instruments, March 1999).
- [7] С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова. *Письма ЖТФ*, **46**(15), 22 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.15.49743.18139
- [8] А.Н. Варюхин, М.В. Гордин, А.В. Дутов, С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова. *Прикл. физика*, **1**, 75 (2021). DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-75-81
- [9] А. Колпаков. *Компоненты и технологии*, **18**, 46 (2002).
- [10] С.Л. Корякин-Черняк, О.Н. Партала, Ю.Н. Давиденко, В.Я. Володин. *Электротехнический справочник* (СПб., Наука и техника, 2009) с. 456.

Редактор Г.А. Оганесян

Pulse Power Boost Converter on Gallium Nitride Transistors

E.A. Shershunova¹, S.I. Moshkunov¹, V.Yu. Khomich¹, A.A. Igoikin²

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences, 191186 St. Petersburg, Russia

² Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 443086 Samara, Russia

Abstract A module of a pulse power boost DC/DC voltage converter with an output voltage of 130 V, a power of 3 kW and an operating frequency of 100 kHz on field-effect transistors based on gallium nitride has been developed and successfully tested. The power loss calculation on the elements of the power converter has been performed. The main mechanism of losses due to the heating of the crystal in the conduction state was revealed. The efficiency of the converter operating at maximum power was experimentally obtained to be 98.5%, which coincided well with the calculation.