

УДК 621.396.41

А.И. Бартенев, В.Д. Семенов

Разработка и исследование прямоходового преобразователя напряжения для аппаратуры радиосвязи

Работа посвящена особенностям разработки высокочастотного прямоходового преобразователя напряжения для аппаратуры радиосвязи. Рассмотрены основные способы реализации активного ограничения коммутационных перенапряжений при применении планарных трансформаторов и высокой частоте преобразования. При компьютерном моделировании обнаружены недостатки известных способов реализации активного клампа с управлением от обмотки трансформатора и предложены способы их устранения и уменьшения их влияния. Макетирование предложенных решений подтвердило их работоспособность и эффективность.

Ключевые слова: прямоходовой преобразователь, преобразователь для аппаратуры радиосвязи, активный кламп, планарный трансформатор, коммутационные перенапряжения, энергетическая эффективность.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-28-1-127-133

Интенсивно развивающиеся системы радиосвязи и телекоммуникаций являются катализатором развития всех смежных направлений радиоэлектронной промышленности. Согласно данным карт возобновляемой энергетики (Renewable Energy Map, Remap), подготовленных Международным агентством по возобновляемой энергетике (International Renewable Energy Agency, IRENA), к 2050 г. электричество станет главным источником энергии, увеличив свою долю в мировом энергетическом балансе с 19 до 49%. С этой точки зрения развитие аппаратуры радиосвязи в направлении снижения энергопотребления с одновременным увеличением передаваемого трафика является актуальным. Увеличение передаваемого трафика в условиях ограниченного частотного ресурса требует повышения спектральной эффективности.

Одним из основных способов повышения спектральной эффективности является повышение индекса квадратурной модуляции, что совместно с требованием высокой линейности усилителя мощности и стабильности опорных генераторов и синтезаторов частот требует высокого качества электропитания и низкой шумовой обстановки в целом.

С целью исключения рисков попадания основной гармоники импульсных преобразователей в шумовую полосу генераторов и синтезаторов частот рабочие частоты преобразователей стремятся вывести за пределы полосы петлевых фильтров (100–400 кГц) фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генераторов, управляемых напряжением (ГУН) [1].

К аппаратуре радиосвязи применяются внутриотраслевые стандарты, в соответствии с которыми определен входной диапазон рабочего напряжения питания с номиналом 24, 48 и 60 В, что соответствует 2, 4 и 5 АКБ в буферном режиме [2]. В части промышленных радиопомех требования диктует ГОСТ 30429–96 [3]. В настоящее время энергетически высокоэффективными преобразователями для телекоммуникационной аппаратуры с номинальной выходной мощностью около 50 Вт считаются преобразователи, которые обладают КПД порядка от 0,9 до 0,92, однако излучаемые ими радиопомехи имеют высокий

уровень, что требует применения сложных фильтров импульсных радиопомех и экранирования. Основными причинами формирования импульсных радиопомех в импульсных преобразователях являются пульсирующие ток и напряжение, являющиеся следствием коммутации транзисторов.

Процесс коммутации транзисторов сопровождается высокой скоростью изменения тока di/dt и напряжения du/dt , что приводит к коммутационным колебаниям и перенапряжениям, амплитудные и частотные характеристики которых определяются паразитными индуктивностями трансформаторов и емкостями сток-исток силовых транзисторов [4].

Ограничение коммутационных перенапряжений в импульсных преобразователях является вынужденной мерой и направлено на их снижение до приемлемого уровня. Применение пассивных демпфирующих цепей приводит к дополнительным потерям мощности и снижению КПД, причем с ростом частоты коммутации увеличивается и мощность потерь. Повышение рабочей частоты и повторяемости параметров коммутационных перенапряжений преобразователей (при их серийном производстве) требует применения современных и перспективных схемотехнических решений, таких как планарный трансформатор [5] и активное ограничение коммутационных перенапряжений (активный кламп) [6].

Активный кламп является наиболее перспективным и эффективным решением при ограничении коммутационных перенапряжений, не снижающим энергетическую эффективность импульсных преобразователей [7–11]. В однотактных преобразователях это достигается за счёт квазирезонансного режима переключения силового транзистора инвертора в широком диапазоне входных и выходных параметров, в результате чего снижается тепловыделение и повышается КПД преобразователя [6].

Применение активного клампа во вторичной цепи однотактных преобразователей малой мощности не получило широкого распространения вследствие незначительного улучшения КПД, повышения стоимости изделия и его усложнения. Однако исследование активного клампа во вторичной цепи с

целью реализации высокоэффективных преобразователей с низким уровнем импульсных радиопомех в комбинации с современными и перспективными схемотехническими решениями является актуальной задачей для силовой электроники.

Постановка задач и выбор методов решения

При разработке приёмопередающего устройства, входящего в состав возимого комплекса аппаратуры радиосвязи, определены основные требования к изолированному преобразователю напряжения: напряжение входное номинальное 48 В; диапазон изменения входного напряжения от 36 до 72 В; напряжение выходное номинальное 10 В; мощность выходная номинальная 50 Вт; мощность выходная максимальная не менее 60 Вт; рабочая частота номинальная 500 кГц; КПД не менее 0,92 при номинальных параметрах и не менее 0,90 при номинальной нагрузке во всём рабочем диапазоне входного напряжения.

Для реализации преобразователя с заданными характеристиками двухтактные схемы преобразователей, на наш взгляд, избыточны. Из однотактных изолированных преобразователей наибольшей простотой в реализации обладает схема обратноходового преобразователя. Однако обратноходовой преобразователь имеет недостаток в виде удвоенного уровня импульсного тока через вторичную обмотку трансформатора и выпрямитель, что негативно сказывается как на уровне пульсаций выходного напряжения, так и на уровне излучаемых радиопомех [6].

Прямоходовой преобразователь с активным клампом [6] (рис. 1, а) имеет несколько более сложную схему реализации силовой части, но при этом ток дросселя во вторичной цепи имеет непрерывную форму, что косвенно свидетельствует о меньшем уровне поля радиопомех.

Заданная высокая частота работы преобразователя с высокими требованиями к КПД, ЭМС и повторяемости при серийном производстве также требует применения планарного трансформатора, синхронного выпрямителя и активного клампа не только в первичной цепи, но и во вторичной [12–15]. При этом параметры паразитных индуктивностей определяются не только индуктивностями рассеяния обмоток трансформатора, но зависят от особенностей трассировки печатной платы, что приводит к тому, что при моделировании они могут быть оценены только ориентировочно. Способ реализации управления синхронным выпрямителем от силовой обмотки трансформатора обосновывается низкими активными потерями в режиме непрерывного тока и простотой реализации.

Выбор схемы реализации активного клампа во вторичной цепи высокочастотного прямоходового преобразователя имеет наибольший практический интерес ввиду малой длительности рабочего цикла преобразователя, низкой индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и высокой частоты резонансного контура, образованного индуктивностью рассеяния вторичной обмотки трансформатора и ёмкостями сток-исток транзисторов синхронного

выпрямителя. Вследствие низкой индуктивности рассеяния обмоток трансформатора скорости нарастания тока di/dt в силовых цепях крайне высоки, поэтому формируемые сигналы управления активным клампом не должны приводить к появлению импульсных токов высокой частоты, ухудшающих электромагнитную совместимость.

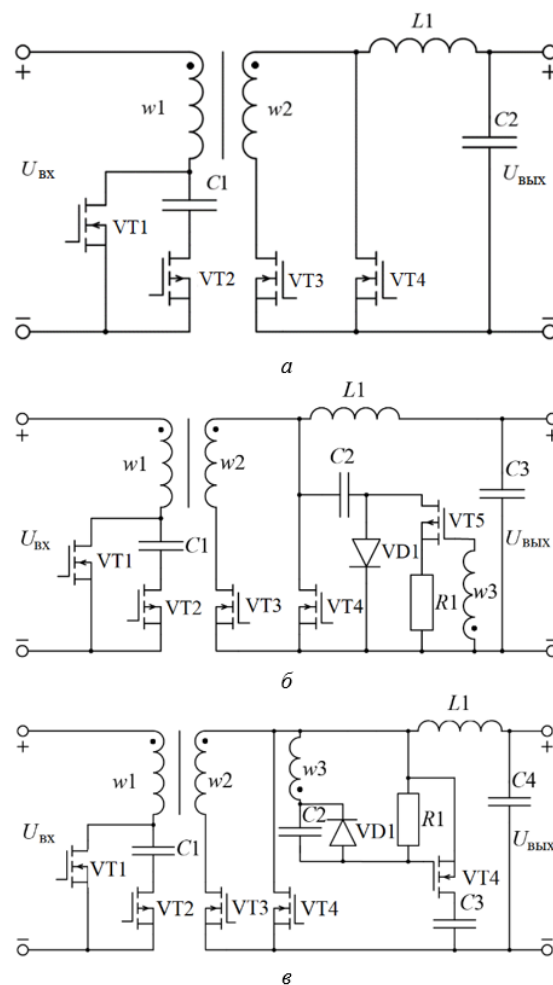


Рис. 1. Прямоходовой преобразователь с активным клампом: а – в первичной цепи и синхронным выпрямителем; во вторичной цепи на транзисторах: б – *p*-типа; в – *n*-типа

Применение схемы активного ограничения коммутационных перенапряжений во вторичной цепи прямоходового преобразователя на основе транзистора *p*-типа (см. рис. 1, б) [12–15] при крайне высоких частотах и малых индуктивностях рассеяния вторичной обмотки трансформатора ограничено сравнительно низким быстродействием транзистора *p*-типа и, несомненно, требует улучшения.

Реализация активного клампа на транзисторах *n*-типа вследствие большего быстродействия транзисторов, более широкой номенклатуры и компактных размеров выглядит более перспективно. При применении прямого управления транзистором активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя от обмотки трансформатора (см. рис. 1, в) воз-

никают сложности, заключающиеся в оптимальности выбора количества витков обмотки управления w_3 .

Одно из предлагаемых решений заключается во введении в цепь управления транзистора активного клампа VT5 проходного конденсатора C2, который является составной частью емкостного делителя напряжения, образованного ёмкостью сток-исток этого транзистора. С целью исключения положительного смещения нулевого рабочего уровня параллельно проходному конденсатору включается диод VD1, направленный анодом к затвору транзистора. Для реализации защитного интервала, который формируется сигналом управления транзистором активного клампа VT4 и обеспечивает его запираание до начала спада напряжения сток-исток, применен резистор R1, который включен между затвором и истоком транзистора активного клампа VT5 [16]. Описанное техническое решение по реализации активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем [16] ориентировано на импульсные преобразователи сравнительно низкой частоты на основе трансформатора, обмотки которого выполненымоточным проводом.

Применение описанного подхода для ограничения рабочего времени транзистора при реализации высокочастотного преобразователя с широким диапазоном входного напряжения затруднено коротким интервалом рабочего цикла, особенно при высоком входном напряжении, где длительность рабочего такта составляет порядка 0,5 мкс.

Компьютерное моделирование

Построение имитационной модели преобразователя и исследование коммутационных процессов и энергетических характеристик произведено в среде моделирования LTspice. Имитационная модель прямоходового преобразователя с активным клампом во вторичной цепи, управление которым реализовано от дополнительной обмотки силового трансформатора, построенная в соответствии с рис. 1, в и [16], исследовалась при следующих параметрах: VT1, VT5 типа Si3437DV, VT2 типа BSZ520N15NS3, VT3, VT4 типа BSZ065N06LS5, C1 = 3 нФ, C2 = 10 нФ, C3 = 0,3 мкФ, VD1 типа BAT46WJ, R1 = 1 кОм. Трансформатор с обмотками w_1 , w_2 , w_3 .

Индуктивности обмоток трансформатора и коэффициент связи между ними рассчитывались в зависимости от конструкции планарного трансформатора и рабочей частоты 200 кГц. Входное напряжение $U_{вх}$ изменялось в пределах от 36 до 72 В с номинальным напряжением 48 В. При частоте до 300 кГц и моточном трансформаторе с индуктивностями ($L_{w1} = 192$ мкГн, $L_{w2} = 48$ мкГн, $L_{w3} = 3$ мкГн) и коэффициенте связи между обмотками, равном 0,996, разработанная имитационная модель показывала результаты, адекватные результатам, приведенным в [16]. Однако при повышении рабочей частоты до 500 кГц и снижении индуктивностей обмоток трансформатора до соответствующих расчётных величин ($L_{w1} = 128$ мкГн, $L_{w2} = 32$ мкГн, $L_{w3} = 2$ мкГн), а также при повышении коэффициента связи до ожидаемой величины (0,998),

характерной для планарного трансформатора, в преобразователе возникли сквозные токи неприемлемой величины (рис. 2, з).

При этом осциллограммы напряжения сток-исток на транзисторе VT1 (см. рис. 2, а) и VT4 (см. рис. 2, б) имели ожидаемую форму, близкую к прямоугольной с низким уровнем «звона» и коммутационных перенапряжений. Формируемый сигнал управления транзистором VT5 (типа IRLML2060) (см. рис. 2, в) не превышает допустимую амплитуду (± 16 В).

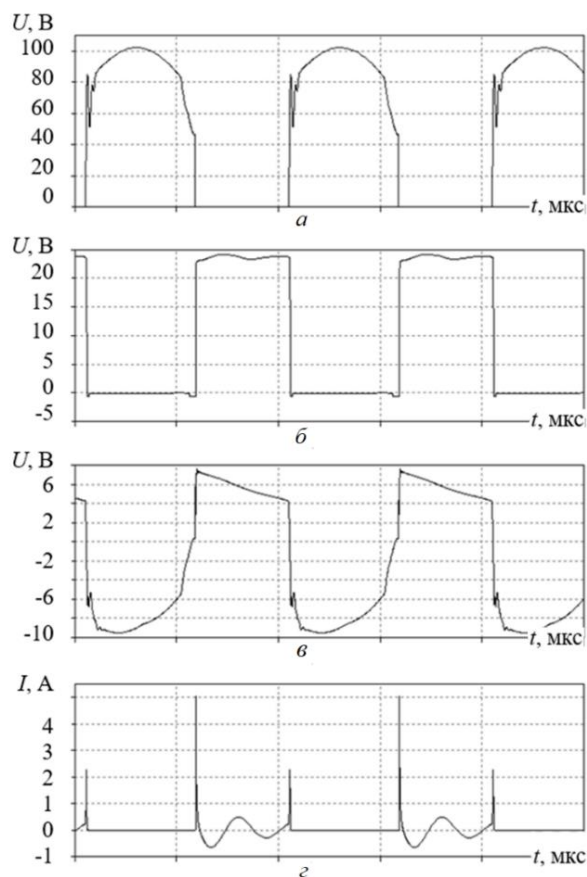


Рис. 2. Результаты моделирования: а – напряжение сток-исток силового транзистора VT1; б – напряжение сток-исток транзистора VT4 синхронного выпрямителя; в – напряжение затвор-исток транзистора активного клампа; з – ток сток-исток транзистора VT5 активного клампа при входном напряжении 48 В

Упомянутые сквозные токи наблюдаются на фронте нарастания и спада импульсов напряжения на транзисторе синхронного выпрямителя. На интервале нарастания напряжения сток-исток транзистора синхронного выпрямителя наблюдается ток, возникающий вследствие преждевременного открытия транзистора активного клампа за счёт нарастания управляющего сигнала во время протекания квазирезонансного процесса. Протекание сквозного тока при спадающем фронте является недостатком непосредственного способа управления от обмотки трансформатора, усиливающимся вследствие низких индуктивностей рассеяния, увеличивающих скорость нарастания тока и напряжения.

С целью устранения обнаруженных недостатков нами была предложена корректировка схемы, включающая введение ограничения тока заряда затвора с целью задержки момента открытия транзистора (резистор $R1$ последовательно с конденсатором $C2$), а для ускорения процесса запираания транзистора активного клампа и ограничения его сквозного тока введена отрицательная обратная связь с помощью сопротивления $R3$ (рис. 3). Для достижения минимальной и достаточной задержки открытия транзистора VT5, исключающей протекание сквозного тока, была определена величина резистора $R1 = 50$ Ом. Величина наименьших потерь и достаточный уровень отрицательной обратной связи обеспечивались при $R3 = 0,5$ Ом.

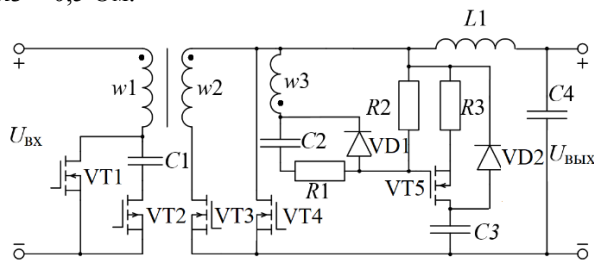


Рис. 3. Прямоходовой преобразователь со скорректированной цепью активного клампа на транзисторе n -типа во вторичной цепи

В результате модернизации и изменения схемы управления активным клампом был не только снижен уровень «звона» при отключении транзистора VT1 (рис. 4, *а*), устранен сквозной ток на нарастающем фронте и приблизительно в 2 раза снижен уровень сквозного тока на спадающем фронте через канал сток-исток транзистора VT5 и конденсатора $C3$ (см. рис. 4, *з*), но и попутно получен небольшой (около 1%) прирост КПД, что подтверждает эффективность предложенной схемы.

Напряжения на транзисторе VT4 (см. рис. 4, *б*) имеют форму, близкую к прямоугольной, без коммутационных перенапряжений. Формируемый сигнал управления транзистором VT5 (см. рис. 4, *в*) не превышает допустимую амплитуду (± 16 В). Добротность резонансного контура цепи активного клампа (см. рис. 4, *в*) снижена вследствие введения активного сопротивления $R3$ и затухает за один период.

Экспериментальная проверка результатов моделирования

Макет разрабатываемого преобразователя был реализован на основе серийного образца преобразователя с рабочей частотой 300 кГц, активный кламп во вторичной цепи которого выполнен на транзисторе p -типа [15]. Схема управления реализована на ШИМ-контроллере LM5025MTC с двумя интегрированными драйверами для основного транзистора и транзистора активного клампа. Используемые силовой транзистор VT1 типа BSZ520N15NS3 и транзистор активного клампа VT2 типа Si3437DV рассчитаны на рабочее напряжение сток-исток не более 115 В из предельных 150 В. Синхронный выпрямитель реализован на транзисторах VT3, VT4 типа

CSD18563Q5A с максимальным напряжением сток-исток 60 В и сопротивлением открытого канала сток-исток 5,7 мОм. Трансформатор реализован на сердечнике типа ELP18 в конфигурации E+I из материала N49.

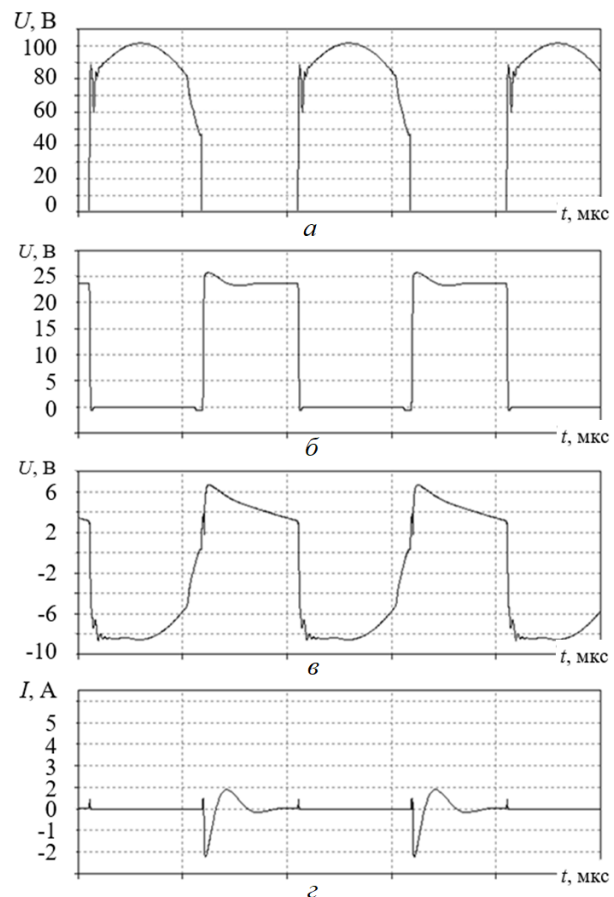


Рис. 4. Результаты моделирования преобразователя со скорректированной цепью активного клампа: *а* – напряжение сток-исток силового транзистора; *б* – напряжение сток-исток транзистора синхронного выпрямителя; *в* – напряжение затвор-исток транзистора активного клампа; *з* – ток сток-исток транзистора активного клампа при входном напряжении 48 В

Для изготовления экспериментального макета (рис. 5) были выполнены необходимые доработки: увеличена рабочая частота до 500 кГц, модернизирована цепь управления активного клампа в соответствии с рис. 3, заменён транзистор активного клампа.

На изготовленном экспериментальном макете были исследованы динамические процессы коммутации транзисторов синхронного выпрямителя и энергетические характеристики. На осциллограмме (рис. 6), полученной при входном напряжении 48 В, уровень коммутационных перенапряжений на транзисторе VT4 не превышает 3 В. Результаты, полученные при компьютерном моделировании (см. рис. 4, *б*) и на макете (см. рис. 6), качественно одинаковы.

Экспериментальное исследование энергетических характеристик макета преобразователя проведено при мощностях нагрузки 30, 40, 60 Вт, а его ре-

зультаты представлены на рис. 7. Видно, что достигнуты показатели КПД более 93%, что доказывает хорошее соответствие экспериментального макета основным техническим требованиям.

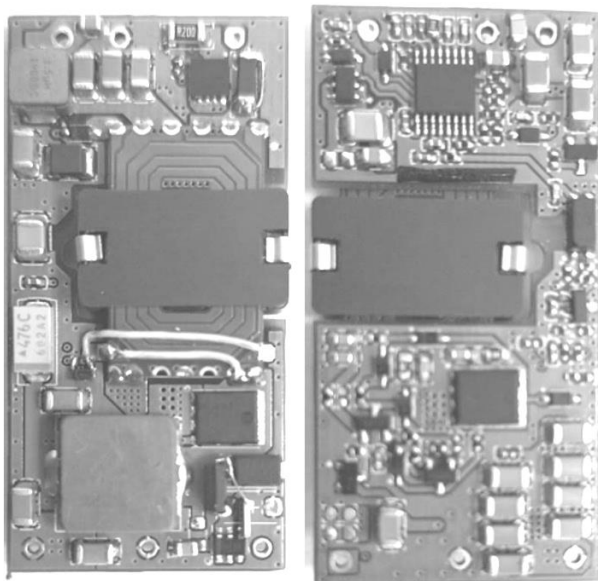


Рис. 5. Макет преобразователя

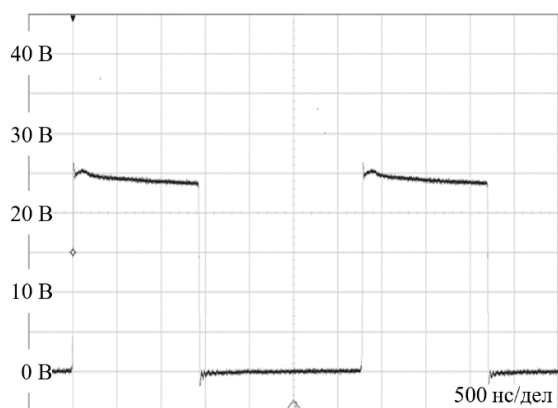


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на выпрямителе с активным клампом при входном напряжении 48 В

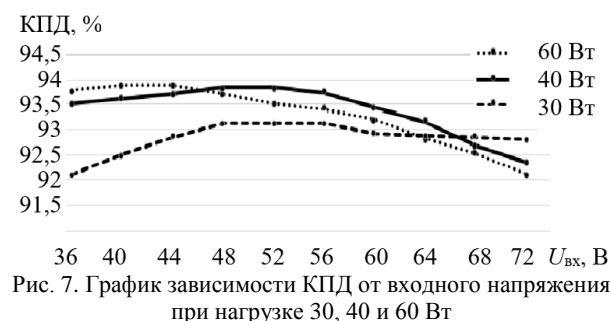


Рис. 7. График зависимости КПД от входного напряжения при нагрузке 30, 40 и 60 Вт

Заключение

Исследована схема прямоходового преобразователя с активным клампом в первичной цепи и синхронным выпрямителем, предназначенная для питания аппаратуры радиосвязи и использованная при применении комбинации следующих новых схемотехнических решений:

- планарного трансформатора для повышения частоты и повторяемости параметров и характеристик преобразователя при серийном производстве;
- активного клампа во вторичной цепи с управлением от дополнительной обмотки трансформатора для ограничения коммутационных колебаний и перенапряжений на силовых транзисторах без снижения энергетической эффективности и улучшения ЭМС.

Исследования, проведенные на разработанной имитационной модели выбранного преобразователя, выявили, что известные схемотехнические решения по реализации активного клампа во вторичной цепи с управлением от дополнительной обмотки трансформатора не позволяют поднять частоту преобразования без значительного снижения энергетической эффективности.

Предложенная модернизация схемотехнического решения по реализации активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя с применением транзисторов *n*-типа позволила устранить или уменьшить коммутационные перенапряжения и достигнуть прироста КПД более 1%.

Результаты исследования энергетических характеристик преобразователя на изготовленном макете экспериментально подтвердили способность преобразователя выполнить все заявленные технические требования.

По результатам испытания изготовленного макета преобразователя аппаратуры радиосвязи сделаны выводы о пригодности и работоспособности предложенного схемотехнического решения в составе аппаратуры радиосвязи и запущена работа по его внедрению в производство.

Литература

1. Усов А. Синтезатор частот на основе ФАПЧ // Электронные компоненты. – 2017. – № 12. – С. 50–53.
2. Белоусов О.А. Электропитание систем радиосвязи: учеб. пособие / О.А. Белоусов, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов: ТГТУ, 2016. – 85 с.
3. ГОСТ 30429–96. Совместимость технических средств электромагнитная. – Введ. 1998. – М.: Госстандарт России, 1998. – 31 с.
4. Taranovich S. How to Reduce EMI in Switching Power Supplies // Electronic Design. – 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/whitepaper/21171453/electronic-design-how-to-reduce-emi-in-switching-power-supplies>, свободный (дата обращения: 08.05.2024).
5. Верхулевский К. Планарные трансформаторы Rayton Planar Magnetics для малогабаритных высоконадежных применений // Силовая электроника. – 2015. – № 4. – С. 9–13.
6. King B. Incorporating active-clamp technology to maximize efficiency in flyback and forward designs / B. King, D. Strasser // Power Supply Design Seminar. – 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/234/slup262.pdf, свободный (дата обращения: 14.11.2024).
7. Ghaderloo R.A. A high frequency active clamp forward converter with coreless transformer / R.A. Ghaderloo, A.P. Sirat, A. Shoulaie // 2023 North American Power Symposium (NAPS). – IEEE. – 2023. – P. 1–6.

8. Lee D.W. A high-power-density active-clamp converter with integrated planar transformer / D.W. Lee, J.H. Lim, D.I. Lee, H.S. Youn // *Energies*. – 2022. – № 15. – 5609 p.

9. Gupta S. Analysis of resonant PWM active-clamp Cuk DC/DC converter / S. Gupta, S.K. Mazumder // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. – IEEE. – 2023. – P. 2170–2176.

10. Zhu B. Buck-based active-clamp circuit for current-fed isolated DC-DC converters / B. Zhu, H. Wang, Y. Zhang, S. Chen // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2021. – Vol. 37, No. 4. – P. 4337–4345.

11. Tran T.N.T. Development of Active-Clamp Flyback Converter for Improving Light Load Efficiency / T.N.T. Tran, H.Y. Xu, J.M. Wang // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2024. – Vol. 12, No. 3. – P. 2456–2469.

12. Бартенев А.И. Анализ эффективности применения активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем / А.И. Бартенев, Н.С. Легостаев // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020», 13–30 мая 2020 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 175–178.

13. Бартенев А.И. Исследование помехоэмиссии прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом во вторичной цепи / А.И. Бартенев, Н.С. Легостаев // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020», 13–30 мая 2020 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 178–180.

14. Бартенев А.И. Пути повышения энергетической эффективности обратногоходового преобразователя / А.И. Бартенев, В.Д. Семенов, Н.С. Легостаев // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 180–183.

15. Патент № 2743574 Российская Федерация, МПК H 02 M 3/335 (2006.01). Прямоходовой преобразователь с синхронным выпрямлением и активным ограничением перенапряжений: № 2020129889: заявл. 10.09.2020: опубл.: 20.02.2021 / Бартенев А.И., Бартенев Д.И., Суслев А.Г. – 12 с.

16. Xiong Y., Ke Z., Zhang A.J. Active snubber for synchronous rectifier. Patent US, No. 6 771 521, 2004. – 18 с.

Bartenev A.I., Semenov V.D.

Development and study of a forward power converter for radio communication systems

The work is devoted to the features of developing circuit solutions for a high-frequency power converter for a radio communication system. The authors analyze the features of application and operation that require a specific approach to converter design and define the main technical requirements. The main methods to implement an active clamp are considered. When constructing and studying computer models, the shortcomings of known methods for implementing an active clamp with control from a transformer winding were discovered and the methods to eliminate them and to reduce their impact were proposed. The proposed solutions were modeled and their operability and efficiency were confirmed.

Keywords: forward converter, converter for radio communication equipment, active clamp, planar transformer, switching stress voltage, energy efficiency.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-28-1-127-133

References

1. Usov A., Frequency synthesizer based on PLL. *Electronic Components*, 2017, no. 12, pp. 50–53. (in Russ.).

2. Belousov O. A., Muromtsev D.U.: Electropitanie system radiosvazi. Tambov, Tambov State Technical University Publishing, 2016, 85 p. (in Russ.).

3. GOST 30429–96. *Electromagnetic compatibility of technical equipment*. Introduction 1998. Moscow, Gosstandart of Russia, 1998, 31 p. (in Russ.).

4. Taranovich S. How to Reduce EMI in Switching Power Supplies. Available at: <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/whitepaper/21171453/electronic-design-how-to-reduce-emi-in-switching-power-supplies>, free (accessed: November 14, 2024).

5. Planar transformers for small-sized highly reliable applications // *Power Electronics*, 2015, no. 4. pp. 9–13 (in Russ.).

6. King B., Strasser D. Incorporating active-clamp technology to maximize efficiency in flyback and forward designs. / *Power Supply Design Seminar*. 2010, 23 p. Available at: https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/234/slup262.pdf, free (accessed: November 14, 2024).

7. Ghaderloo R. A., Sirat A. P., Shoulaie A. A high frequency active clamp forward converter with coreless transformer // *2023 North American Power Symposium (NAPS)*, 2023, pp. 1–6.

8. Lee D.W., Lim J.H., Lee D.I., Youn H.S. A high-power-density active-clamp converter with integrated planar transformer // *Energies*, 2022, no. 15, 5609 p.

9. Gupta S., Mazumder S.K. Analysis of resonant PWM active-clamp Cuk DC/DC converter // *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2023, pp. 2170–2176.

10. Zhu B. et al. Buck-based active-clamp circuit for current-fed isolated DC-DC converters // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 37, no. 4. pp. 4337–4345.

11. Tran T.N.T., Xu H.Y., Wang J.M. Development of Active-Clamp Flyback Converter for Improving Light Load Efficiency // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 2456–2469.

12. Bartenev A.I., Legostaev N.S. Analysis of the efficiency of using an active clamp in the secondary circuit of a forward converter with a synchronous rectifier // *Proceedings of the International Scientific Conference for Bachelor, Master,*

Бартенев Александр Иванович

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-906-950-11-71
Эл. почта: san4ubas1@gmail.com

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, проф. каф. ПрЭ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-821-22-92
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Поступила в редакцию: 29.11.2024.

Принята к публикации: 14.04.2025.

Postgraduate Students and Young Researchers «TUSUR Scientific Session – 2020». Tomsk, V-Spectr, 2020, pt. 1, pp. 175–178 (in Russ.).

13. Bartenev A.I., Legostaev N.S. Study of interference emission of a forward converter with a synchronous rectifier and an active clamp in the secondary circuit // *Proceedings of the International Scientific Conference for Bachelor, Master, Postgraduate Students and Young Researchers «TUSUR Scientific Session – 2020»*, Tomsk, V-Spectr, 2020, pt. 1, pp. 178–180 (in Russ.).

14. Bartenev A.I., Semenov V.D., Legostaev N.S. Ways to improve the energy efficiency of a flyback converter // *Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*, Tomsk, V-Spectr, 2020, vol. 1, pp. 180–183 (in Russ.).

15. Bartenev A.I., Bartenev D.I., Suslov A.G. Priamohodovoi preobrazovatel s sinhronnim viprymлением I aktivnym ogranicheniem perenapriajenii [Forward converter with synchronous rectification and active surge limitation]. Patent RF No. 2743574 2021 (in Russ.).

16. Yahong Xiong, Zhongwei Ke, Alpha J. Zhang. Active snubber for synchronous rectifier. Patent US, No. 6 771 521, 2004.

Aleksandr I. Bartenev

Postgraduate student, Department Industrial Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-906-950-11-71
Email: san4ubas1@gmail.com

Valery D. Semenov

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Department Industrial Electronics, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-821-22-92
Email: svd@ie.tusur.ru

Received: 29.11.2024.

Accepted: 14.04.2025.