

РЕЖИМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЧ-КОЛЕБАНИЯМИ В ТРАНЗИСТОРНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КЛЮЧЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ

А.А. Ганбаев^{1*}, В.А. Филин¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: asif.ganbayev@gmail.com

Информация о статье

УДК 621.375.026

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ганбаев А.А., Филин В.А. Режимы возбуждения и методы управления ВЧ-колебаниями в транзисторных резонансных ключевых устройствах // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 60–67.

Аннотация: Рассмотрены методы возбуждения высокочастотного управляемого резонансного инвертора тока, а также описаны методы его модуляции. Приведены временные диаграммы на нагрузке инвертора в режиме автоколебаний. Исследована работа инвертора при использовании PSPICE модели нитрид-галлиевых транзисторов с учетом реальных характеристик и исследованы методы модуляции при котором линейность модуляционной характеристики сохраняется. Получен высокий (более 90 %) КПД инвертора.

Ключевые слова: управляемый резонансный инвертор тока, широтно-импульсная модуляция, внешнее возбуждение, автоколебания, коэффициент полезного действия.

DRIVE MODES AND METHODS OF CONTROLLING HF OSCILLATIONS IN TRANSISTOR RESONANT SWITCHING MODE DEVICES

A. Ganbayev¹, V. Filin¹

¹The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Ganbayev A., Filin V. Drive Modes and Methods of Controlling HF Oscillations in Transistor Resonant Switching Mode Devices // Proceedings of Educational Institutions of Communication. 2017. Vol 3. Iss. 2. PP. 60–67.

Abstract: *Methods of driving a controlled current fed resonant inverter are considered, and methods for modulation are also given. Time diagrams are presented for the load of inverter in the self-oscillation regime. The work of inverter was investigated using the PSPICE model of nitride-gallium transistors with considering the real characteristics and modulation methods are investigated in which the linearity of the modulation characteristic is preserved. A high efficiency of the inverter (more than 90 %) is obtained.*

Keywords: *controlled current fed resonant inverter, pulse-width modulation, external excitation, self-oscillation, drain efficiency, power added efficiency.*

Вводные замечания и постановка задачи

Энергетически эффективные режимы генерирования, усиления и преобразования мощности электрических колебаний в последнее десятилетие завоевывают все более высокие частоты (ВЧ). Известны разработки ключевых усилителей мощности (например, функционирующих в режиме Е с КПД более 85 %) для рабочих частот, превышающих 3 ГГц [1]. Эти достижения обусловлены в первую очередь появлением новых видов полевых и биполярных транзисторов, обладающих существенно более высокими энергетическими и скоростными характеристиками. В значительной мере эти свойства проявляются в нитрид-галлиевых полевых транзисторах (GaN) на гетеропереходах [2]. Проводятся широкие исследования по разработке методов и схем усиления радиочастотных модулированных колебаний на основе высокоэффективных GaN-транзисторных ключевых усилителей. Разрабатываются также промышленные ВЧ генераторы для нагрева металла и плазмы, DC-DC преобразователи с предельно высокой частотой переключения, ориентированные на применение GaN-транзисторов. Основным ключевым режимом на ВЧ и СВЧ остается мягкий режим переключения класса Е [2].

На сегодняшний день практически не решена проблема линейного управления мощностью ключевых генераторов и преобразователей класса Е при помощи простых и надежных схемных решений, не снижающих общий КПД и не ухудшающих массогабаритные показатели устройства. Высокочастотный ключевой режим колебаний может также быть получен в резонансном инверторе тока (РИТ), классическая мостовая схема которого приведена на рис. 1.

Практические схемные решения для РИТ с надежной защитой от перенапряжений на транзисторах и эффективным управлением мощностью колебаний фактически отсутствуют. Поэтому актуальным является исследование методов возбуждения ключевых режимов и управления ими в новой схеме управляемого резонансного инвертора тока (в управляемом дроссельном ключевом генераторе).

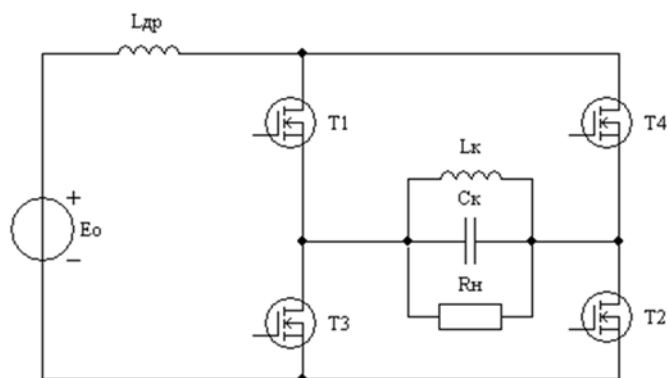


Рисунок 1. Классическая схема РИТ

Модуляция при внешнем возбуждении управляемого РИТ

Как показано в [3] исследуемая схема управляемого инвертора тока имеет линейную модуляционную характеристику. Известно, что схема классического РИТ является дуальной резонансному инвертору напряжения и обладает суще-

ственно более высокой рабочей частотой по сравнению с резонансным инвертором напряжения, поскольку паразитные выходные емкости транзисторов моста суммируются с емкостью параллельного резонансного контура и не происходит потерь энергии, т. к. переключения происходят при нулевых напряжениях на транзисторах.

Но практического применения классический РИТ не нашел из-за возможных перенапряжений на дросселе и транзисторах при нештатном изменении нагрузки, что приводит к аварийному режиму. В исследуемой схеме управляемого РИТ с помощью диодов устранена возможность перенапряжений на транзисторах моста и на дросселе. В схему также введен дополнительный ключевой усилитель класса D, на выходе которого формируются импульсы, модулированные по длительности и линейно управляющие мощностью ВЧ колебаний. На рис. 2 показана обобщенная схема управляемого РИТ, построенная в программе ADS при использовании реальных моделей нитрид-галлиевых (GaN) транзисторов [4, 5].

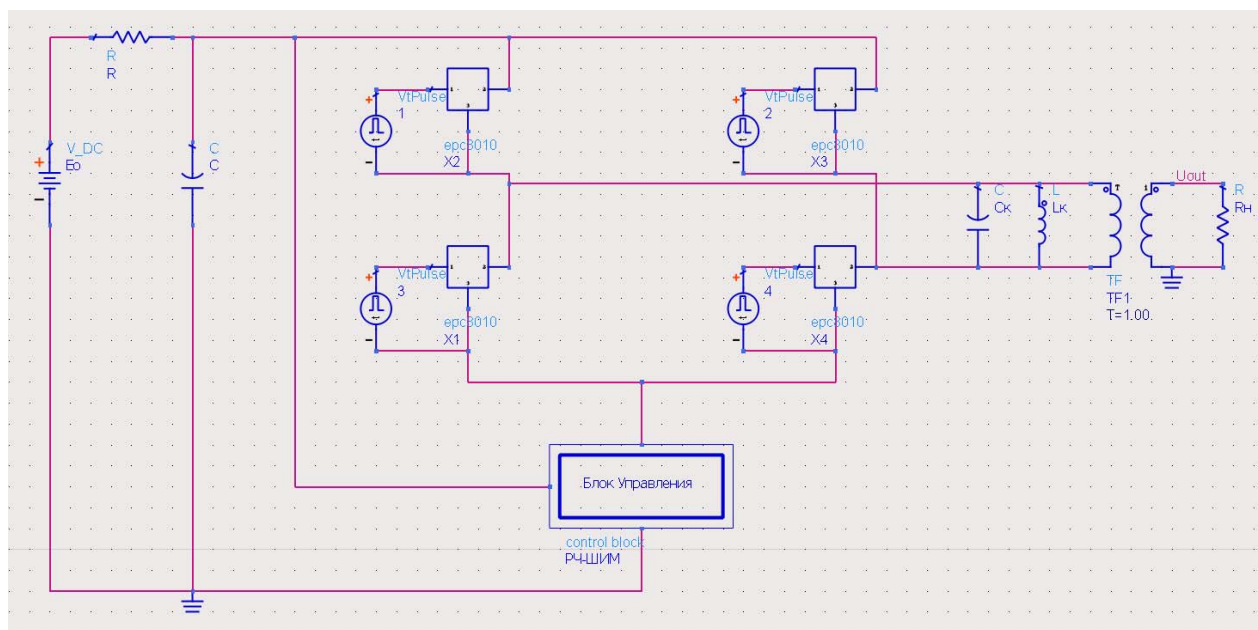


Рисунок 2. Обобщенная модель управляемого РИТ

При увеличении частоты переключения транзисторов моста в управляемом РИТ (рис. 2) до сотен мегагерц потребуется широкополосная ШИМ, реализовать которую классическим методом невозможно. Поэтому приходится использовать другие виды модуляции: дельта-сигма ($\Delta\Sigma$) модуляцию, многоканальную ШИМ, радиочастотную ШИМ и т. д.

Радиочастотную ШИМ (РЧ-ШИМ) впервые предложил американский ученый Рааб в 1973 году [6–8]. На данный момент ее все чаще используют для модуляции ВЧ ключевых усилителей мощности и генераторов. По сравнению с дельта-сигма модуляцией в РЧ-ШИМ отсутствуют ВЧ шумы квантования. Способ получения модулированных импульсов при РЧ-ШИМ приведен на рис. 3.

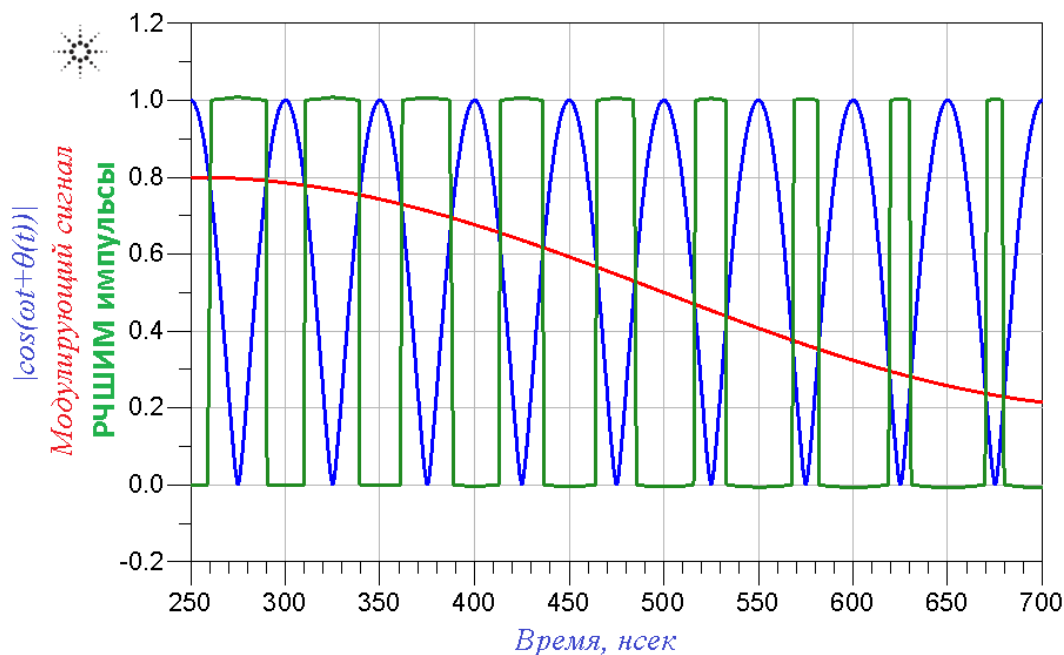


Рисунок 3. Временная диаграмма импульсов при РЧШИМ

Также для управляемого РИТ можно применить многоканальную ШИМ. Принцип многоканальной ШИМ заключается в увеличении эквивалентной тактовой частоты ШИМ на количество каналов, подключенных параллельно с задержкой каждого канала на k/N , где N – число каналов, k – номер канала. На рис. 4 показана временная диаграмма импульсов в каждом канале для 8-канальной ШИМ.

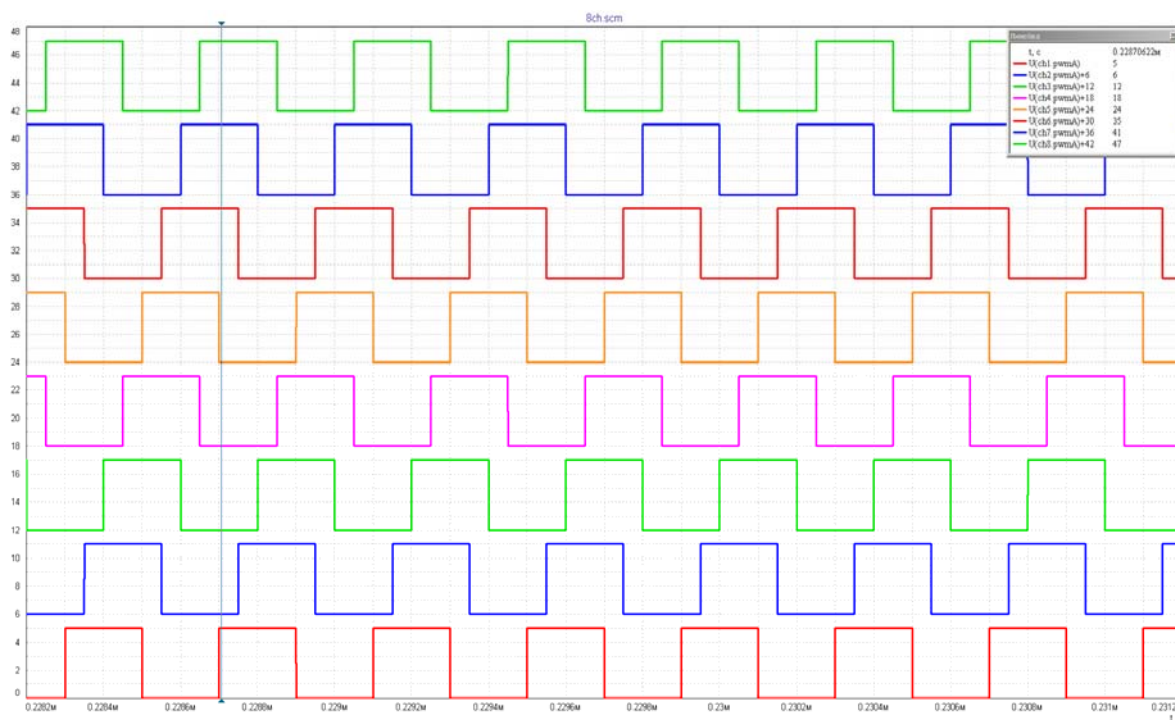


Рисунок 4. Временная диаграмма импульсов при многоканальной (8-канальной) ШИМ

На рис. 5 представлен модулированный сигнал на нагрузке и его спектр при использовании 4-канальной ШИМ. Резонансный контур настроен на частоту 20 МГц, тактовая частота каждого канала ШИМ составляет 10 МГц, частота модулирующего сигнала – 5 МГц.

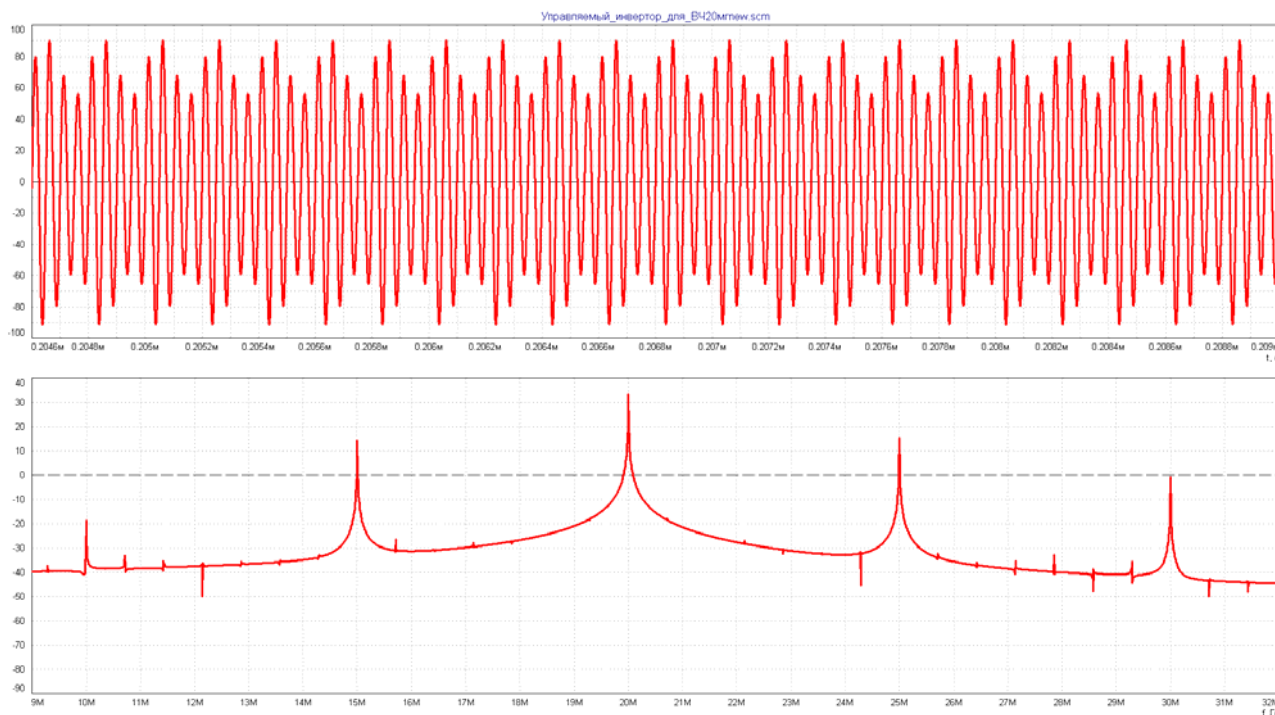


Рисунок 5. Временная диаграмма и спектр АМ сигнала на нагрузке

Режим внешнего возбуждения транзисторов моста РИТ наиболее целесообразно использовать в радиосвязи, где нагрузка характеризуется постоянством и стабильностью [9, 10].

Режим автоколебаний в управляемом РИТ

Современные промышленные генераторы требуют больших мощностей и высоких частот колебаний в нагрузке. Технологические процессы (нагрев металлов, плазмы и др.) при этом характеризуются существенным изменением нагрузки. Однако при нестабильной нагрузке обеспечить энергетически эффективный режим переключения транзисторов в нуле напряжения, используя фиксированное внешнее возбуждение, невозможно. В этих случаях целесообразно использовать режим автоколебаний в управляемом РИТ, при котором изменение нагрузки приводит к автоматической подстройке частоты автоколебаний, обеспечивающей режим переключения в нуле напряжения.

На рис. 6 приведена упрощенная математическая модель управляемого резонансного инвертора тока в режиме автоколебаний для работы на частоте 10 МГц.

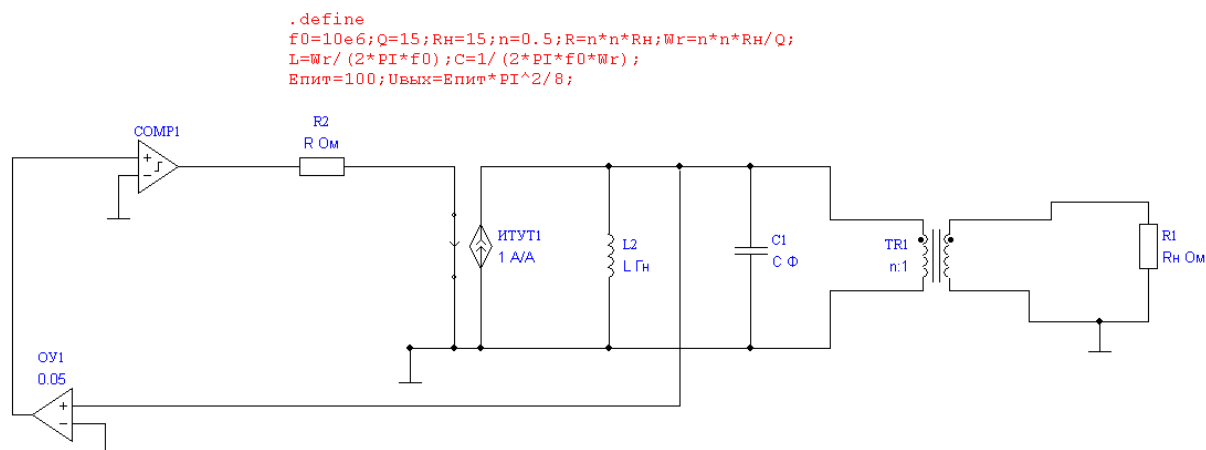


Рисунок 6. Упрощенная модель РИТ в режиме автоколебаний

В этой модели на выходе компаратора COMP1 формируется прямоугольный ток в диагонали моста (см. рис. 1 и 2). Постоянный управляющий ток соответствует установившемуся значению тока дросселя, задаваемого источником питания и нагрузкой. Возбуждение автоколебаний происходит при выполнении условия баланса фаз и амплитуд.

На рис. 7 приведены временные диаграммы тока в диагонали моста и напряжения на нагрузке в установившемся автоколебательном режиме при добротности контура $Q = 0,7$, а также спектр напряжения. Аналогичные кривые и их спектры для добротностей нагруженного контура $Q = 1,0$ и $Q = 5,0$ приведены, соответственно, на рис. 8 и 9.

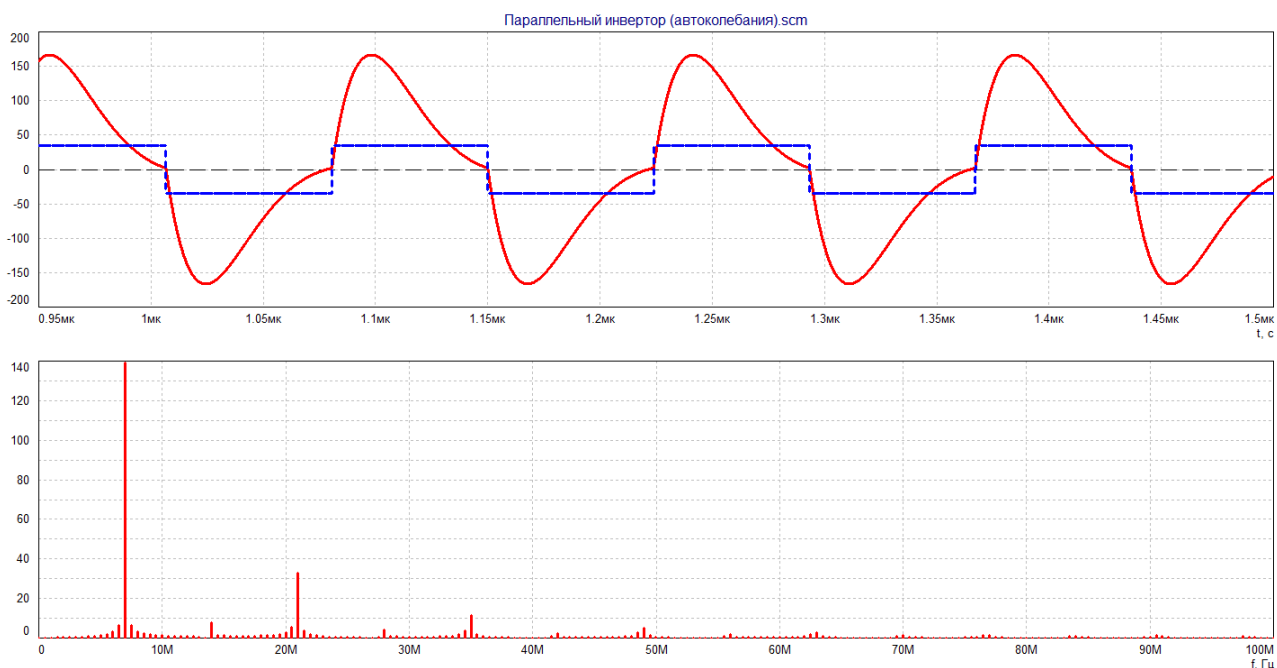


Рисунок 7. Временные диаграммы тока в диагонали моста и напряжения на нагрузке и спектр при добротности $Q = 0,7$

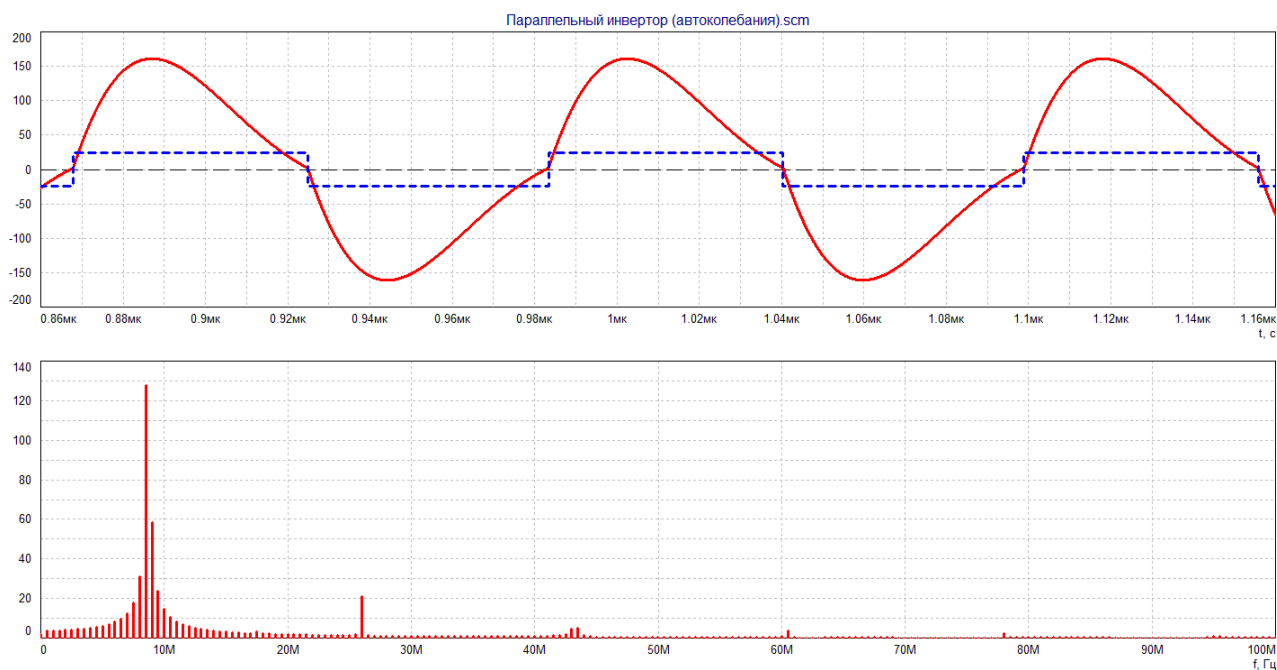


Рисунок 8. Временные диаграммы тока и напряжения на нагрузке (и спектр) при добротности $Q = 1,0$

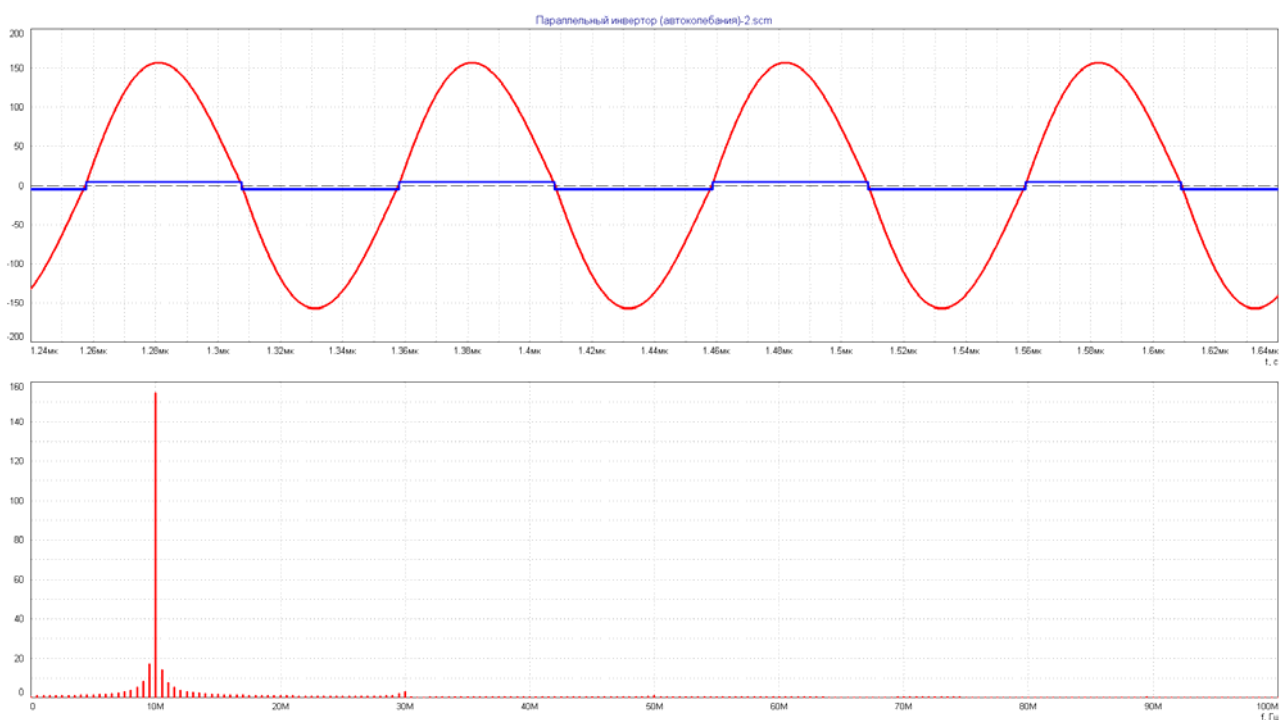


Рисунок 9. Временные диаграммы тока и напряжения на нагрузке (и спектр) при добротности $Q = 5,0$

Таким образом, по приведенным диаграммам на рис. 7–9 можно увидеть, что при минимальной добротности $Q=0,7$, а также при добротностях $Q=1$, $Q=5$ режим переключения транзисторов моста всегда происходит при нулевом значении напряжения на транзисторе. При малых добротностях частота автоколебаний смещается в область более низких значений от заданной резонансной ча-

стоты контура, подстраиваясь под заданную нагрузку. Напряжение в нагрузке при этом становится несинусоидальным, но при этом сохраняется важное свойство автогенератора в ключевом режиме: переключения происходят в нуле напряжения на транзисторах моста.

Был также рассчитан коэффициент полезного действия (КПД) для управляемого РИТ в программе Advanced Design Systems (ADS), используя SPICE-модели с реальными характеристиками нитрид-галлиевых транзисторов. Для рабочей частоты 10 МГц и добротности нагруженного контура $Q = 5$ КПД составил 98 % при мощности в нагрузке равной 420 Ватт.

Заключение

Предложенная схема управляемого РИТ может работать как в режиме внешнего возбуждения, так и в режиме автоколебаний. Схема является высокочастотной, а также позволяет получать высокий КПД, при высоких мощностях. Модуляционная характеристика является линейной и позволяет использовать в качестве управления разные виды модуляции.

Список используемых источников

1. Крыжановский В.Г. Транзисторные усилители с высоким КПД. Донецк: АПЕКС. 2004. 448 с.
2. Grebennikov A., Sokal N., Franco M. Switchmode RF Power Amplifiers. Elsevier Inc. 2012. 448 p.
3. Филин В.А., Ганбаев А.А. Моделирование и анализ характеристик управляемого резонансного инвертора тока на нитрид-галлиевых транзисторах // «Неделя науки 2016». Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб: Изд-во СПбПУ. 2016. С. 15–17.
4. Артым А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. Москва: Радио и связь. 1980. 209 с.
5. Артым А.Д. Повышение эффективности радиопередающих устройств. М.: Радио и связь. 1987. 176 с.
6. Bo Shi, Siew Weng Leong. Pulse-Width Modulation for Switching Mode Power Amplifiers. Singapore: Institute for Infocomm Research. 2015.
7. Raab F. Radio Frequency Pulse-Width Modulation // IEEE Trans. Comm. Aug. 1973. Vol. COM-21. Iss. 8. PP. 958–966.
8. Raab F. Class-D Power Amplifier with RF Pulse-Width Modulation // Dig. IEEE Micro w. Theory Tech. Sym. June 2010. PP. 924–927.
9. Филин В.А., Ганбаев А.А. Анализ методов модуляции ВЧ-колебаний в ключевых генераторах // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 2. С. 39–44.
10. Филин В.А., Ганбаев А.А. Применение дельта-сигма модуляции в ключевых усилителях мощности // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 3. С. 78–83.