

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНЫХ УЗЛОВ СВЧ-ПЕРЕДАТЧИКА

А.М. Гончаренко¹

alex8ussr@gmail.com

В.Г. Костиков¹

kvg303@yandex.ru

В.А. Шахнов²

shakhnov@mail.ru

¹ ПАО «НПО «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина»,
Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены пути улучшения характеристик модулятора, импульсного трансформатора и накопителя радиопередатчика с СВЧ-устройством на выходе. Показано, что использование аморфного сплава для магнитопровода позволяет значительно снизить объем и массу электромагнитных компонентов. Применение метастабильных электролитов в составе конденсаторов большой емкости позволяет значительно улучшить характеристики (в первую очередь показатели надежности) модулятора и снизить массу и объем радиопередатчика

Ключевые слова

Источник электропитания, модулятор, СВЧ-устройство, импульсный трансформатор, ионистор, конденсатор, наноуглеродный композит

Поступила в редакцию 05.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Одной из основных задач при проектировании радиопередающих устройств мобильных радиоэлектронных станций является обеспечение выполнения функциональных требований при минимизации массы и объема, что обеспечивается в основном выбором оптимальных режимов работы активных и миниатюризацией реактивных компонентов. Далее рассмотрены пути решения этой задачи на примере системы с выходным СВЧ-устройством.

Структурная схема блока получения модулирующих импульсов радиопередающего устройства мобильной радиолокационной станции (РЛС) приведена на рис. 1. На схеме введены следующие обозначения: ИЭП — источник электропитания постоянного тока ограничен штриховой линией и содержит n стабилизирующих каналов электропитания U_1, \dots, U_n ; Н — накопитель; М — модулятор ограничен штриховой линией и содержит n транзисторов VT_1, \dots, VT_n ; ИТ — высоковольтный импульсный трансформатор; ВП — выходное высоковольтное СВЧ-устройство.

Напряжения каналов U_1, \dots, U_n ИЭП-тока подаются на соответствующие транзисторы VT_1, \dots, VT_n , открытое или закрытое состояние которых определяется сигналами от схемы управления модулятором (на рис. 1 не показана). Суммарное напряжение ИЭП-тока подается на емкостный накопитель Н и последовательно включенные первичную обмотку импульсного трансформатора Т и

модулятор М. После заряда накопителя схема управления модулятором открывает транзисторы VT_1, \dots, VT_n и ток от ИЭП и накопителя протекает через первичную обмотку трансформатора. На вторичной обмотке индуцируется высокое напряжение, которое поступает на высокочастотный прибор (в приведенном примере — магнетрон).

Основным требованием, предъявляемым к работе этого блока, является получение формы огибающей выходного СВЧ-импульса не хуже формы огибающей импульса промежуточной частоты, приведенной на рис. 2.

К параметрам импульса предъявляются следующие требования: заданная длительность огибающей $\tau_{и}$; длительности фронта $\tau_{ф} = 0,15$ мкс и среза $\tau_{с} = 0,15$ мкс; длительность $\tau_{в}$ выброса, а также заданные уровни выброса ($\leq 5\%$) и скоса ($\leq 3\%$) плоской части импульса, определяемые отношением текущего значения напряжения U к номинальному значению напряжения U_n .

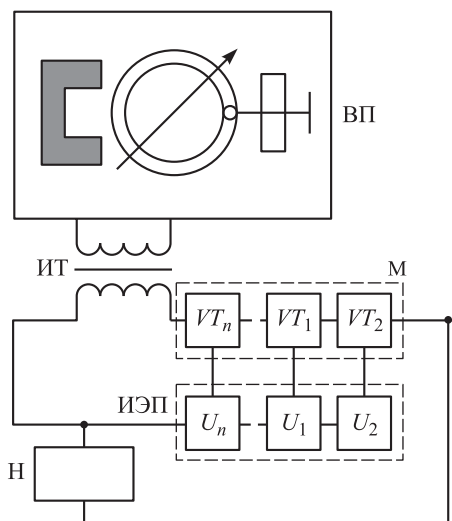


Рис. 1. Структурная схема блока получения модулирующих импульсов управления магнетроном

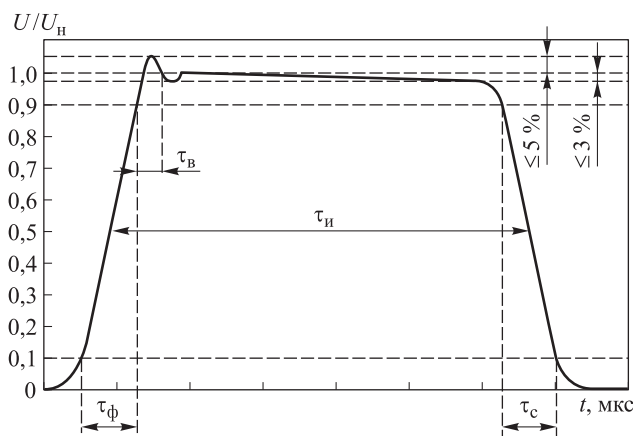


Рис. 2. Огибающая импульса промежуточной частоты

Эти требования должны обеспечивать основные составные части схемы, влияющие на параметры модулирующих импульсов: модулятор, накопитель и импульсный трансформатор. Далее рассматриваются особенности выполнения модулятора и импульсного трансформатора, а также приводятся результаты исследований накопителя с высокой энергоемкостью в единице объема, обеспечивающего малое время заряда от источника электропитания и разряда на цепь последовательно включенных импульсного трансформатора и модулятора.

Модулятор. Учитывая высокий уровень напряжения, подаваемого от ИЭП на импульсный трансформатор, модулятор выполняют по схеме последовательно соединенных транзисторов (см. рис. 1). Источник электропитания содержит последовательно включенные каналы с выходными напряжениями, которые в N раз меньше суммарного напряжения, подаваемого на вход импульсного трансформатора. Каналы выполнены по схеме высоковольтного выпрямителя с LC -фильтром. К каждому из транзисторов прикладывается напряжение соответствующего канала источника электропитания, что позволяет использовать транзисторы со сравнительно невысокими допустимыми напряжениями. Так, при суммарном напряжении 1000 В транзисторы выбирают на рабочее напряжение не менее 400 В (с учетом ограничений, согласно техническим условиям). Такие транзисторы имеют малое время срабатывания и обеспечивают заданные длительности фронта и среза импульса.

В различных штатных режимах работы частота следования и длительность импульсов изменяются в широких пределах. При работе в режиме длинных импульсов происходит существенный разряд накопителя за время импульса, таким образом, выходной СВЧ-прибор работает при непостоянных в течение импульса напряжениях на его электродах. Похожие изменения от импульса к импульсу на электродах наблюдаются при работе в режиме коротких импульсов. От этих изменений зависят изменения формы импульса тока катода, ВЧ-огибающей, выходной мощности, КПД и др. Отметим, что для широкополосных СВЧ-приборов являются критичными изменения напряжения в течение импульса, поскольку при перестройке частоты изменяются также характеристики высокочастотной нагрузки. Это может вызвать дополнительное изменение выходной мощности, срыв огибающей в режиме длинных импульсов (т. е. привести к развитию вторичного электронного резонанса), повышение вероятности электрических пробоев в СВЧ-приборе и ВЧ-тракте.

При коротком промежутке времени перехода из режима длинных импульсов в режим коротких и обратно отсутствует возможность подстройки напряжений источников электропитания. Поэтому основным средством компенсации изменения напряжения электропитания электродов (особенно в режиме длинных импульсов) является накопитель электроэнергии. Уменьшения скаса импульса тока катода можно достичь увеличением энергоемкости накопителя, если такое решение допустимо при ограничениях на объем и массу радиопередающего устройства.

Импульсный трансформатор. При проектировании трансформатора основной задачей является уменьшение в нем потерь. Потери в магнитопроводе трансформатора зависят от его конфигурации, размеров, массы, электромагнитных свойств материала магнитопровода, режима работы, частоты тока. Выбор частоты тока определяется функциональными и конструктивно-технологическими требованиями к устройству, в состав которого входит трансформатор. Так, в радиопередающих устройствах, работающих в доплеровском диапазоне частот, выбор частоты преобразования более указанного диапазона позволяет получить допустимый

уровень гармонических составляющих помех. При этом повышение частоты f при заданной мощности P , передаваемой трансформатором, позволяет снизить его размеры и массу, что следует из соотношения

$$P = cf \Delta B S,$$

где c — коэффициент, определяемый режимом работы трансформатора; ΔB — изменение индукции; S — сечение магнитопровода.

Повышение рабочей частоты в схемах преобразования электроэнергии ограничивается как активными компонентами (полупроводниковыми приборами), так и реактивными (конденсаторами, дросселями, трансформаторами). Выбор материала магнитопровода для работы в сильных магнитных полях при повышенных частотах определяется допустимыми потерями, значение которых зависит от тангенса угла магнитных потерь, и изменением формы петли магнитного гистерезиса.

Общий тангенс угла магнитных потерь имеет три составляющие:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_n + \operatorname{tg} \delta_f + \operatorname{tg} \delta_r,$$

где $\operatorname{tg} \delta_n$, $\operatorname{tg} \delta_f$ и $\operatorname{tg} \delta_r$ — тангенсы углов магнитных потерь, обусловленных магнитной вязкостью, вихревыми токами и магнитным гистерезисом соответственно.

Составляющая $\operatorname{tg} \delta_n$ обусловлена концентрацией разновалентных ионов марганца, железа и наличием катионных вакансий. Минимальное значение этой составляющей ($\operatorname{tg} \delta_n = 0,0002$) может быть достигнуто технологическим путем (например, регулированием состава и выбором режима обжига феррита).

Составляющая $\operatorname{tg} \delta_f$ определяется зависимостью

$$\operatorname{tg} \delta_f = \frac{4\pi\mu d^2 f}{\rho\beta} \cdot 10^{-9}, \quad (1)$$

где d — толщина магнитопровода; β — коэффициент формы (для пластин $\beta = 6$); f — частота; ρ — удельное объемное электрическое сопротивление.

В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость ρ марганец-цинкового феррита [(MnO / ZnO) = 35/15] от содержания оксида железа в его составе. Отметим, что с увеличением содержания оксида железа значение ρ снижается.

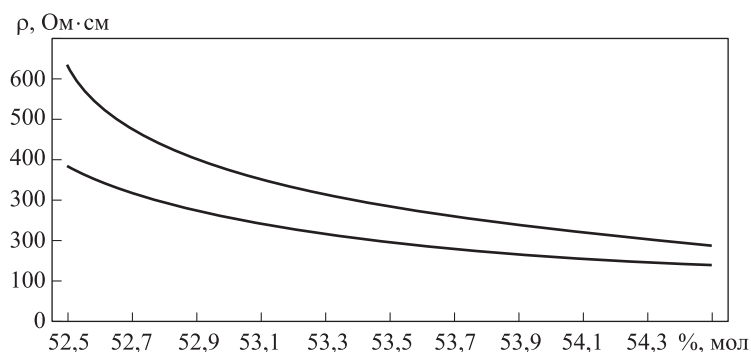


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от содержания оксида железа в составе марганец-цинкового феррита

На рис. 4 приведена зависимость удельного электрического сопротивления феррита от частоты намагничивающего тока. В диапазоне частот до 100 кГц влияние вихревых токов сравнительно невелико. При повышении частоты до 1 МГц вклад потерь, обусловленных вихревыми токами, возрастает в связи со снижением удельного электрического сопротивления.

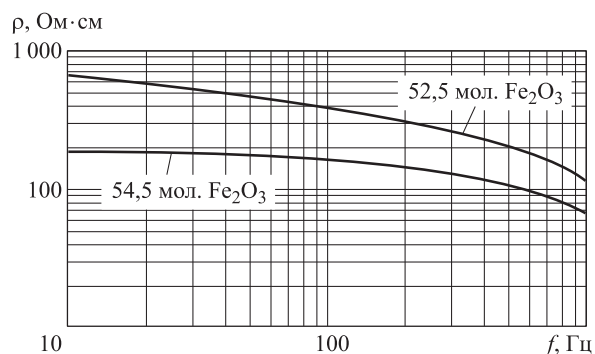


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления феррита от частоты намагничивающего тока

Если принять характерные для марганец-цинковых ферритов значения начальной магнитной проницаемости $\mu_n = 1100$ и удельного электрического сопротивления $\rho = 20 \cdot 10^2$ Ом·см и учесть, что в большинстве практических случаев в соответствии с выражением (1) ρ снижается не более, чем в 3 раза при повышении рабочей частоты до 1 МГц, то составляющая тангенса угла потерь равна

$$\operatorname{tg} \delta_f = \frac{4\pi \cdot 1100 \cdot 1^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9}}{7 \cdot 10^2 \cdot 6} \cong 3,3 \cdot 10^{-3}.$$

Составляющая $\operatorname{tg} \delta_r$ пропорциональна отношению

$$\frac{S}{\beta_m H_m},$$

где S — площадь петли гистерезиса; β_m — максимальная индукция; H_m — намагничивающее поле.

При применении систем автоматизированного проектирования электромагнитных компонентов в библиотеку параметров закладывают аналитическое описание петли гистерезиса в виде аппроксимирующей функции. Определяющим при выборе такой функции является род тока. При подаче на обмотку электромагнитного компонента однополярного сигнала кривая намагничивания расположена в первом квадранте и для ее аппроксимации используют четную или нечетную функцию. При подаче переменного тока рассматривают всю кривую намагничивания, которую аппроксимируют нечетной кусочно-линейной функцией. Так, для однополярного сигнала используют аппроксимацию кривой намагничивания гиперболой $B = H / (a + bH)$, а также экспоненциальной функцией $H = \alpha [\exp(\beta B) - 1]$. В последнем случае значения коэффициентов α и β находят с помощью метода выбранных точек.

Аппроксимация арктангенсной функцией имеет вид $B = a \operatorname{arctg}(\alpha H)$. Эта нечетная функция асимптотически приближается к прямым, отстоящим от абсциссы на расстоянии $\pm a$. Если к правой части уравнения прибавить линейный член βH , то получают лучшее совпадение с кривой намагничивания. При этом значения коэффициентов a , α и β находят по методу выбранных точек. В некоторых случаях используют также аппроксимации гиперболическим синусом $H = \alpha \operatorname{sh}(\beta B)$ и гиперболическим тангенсом $B = \alpha \operatorname{th}(\beta H)$.

Удовлетворительное совпадение получают аппроксимацией кривой намагничивания нечетным степенным полиномом

$$H = a_1 B + a_2 B^2 + a_3 B^3 + \dots,$$

который в инженерной практике ограничивают двумя первыми членами в правой части.

Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля можно представить в виде

$$\mu = \mu_n + \gamma H^2,$$

где γ — коэффициент пропорциональности, а индукции от напряженности поля в виде

$$B = \mu_n H + \gamma H^3. \quad (2)$$

Восходящая и нисходящая ветви гистерезисной петли приближенно могут быть описаны зависимостью

$$B = \mu_n H - \frac{3}{4} \gamma H_m^2 H + \frac{1}{4} \gamma H^3 \pm \left(\frac{3}{4} \gamma H_m^3 - \frac{3}{4} \gamma H_m H^2 \right) \dots$$

Составляющая $\operatorname{tg} \delta_r$ определяется в этом случае формулой

$$\operatorname{tg} \delta_r = \frac{2\gamma H^2}{\pi \mu}.$$

Исследования показали, что порядок значений $\operatorname{tg} \delta_r$ и γ совпадает при оптимальных условиях синтеза марганец-цинкового феррита. В этом случае с помощью соотношения (2) может быть рассчитана напряженность магнитного поля, при которой обеспечивается заданная индукция.

Исследования [1] показали, что в высокопотенциальных импульсных трансформаторах, работающих в режимах с короткими импульсами, целесообразно применение магнитопроводов из аморфного сплава (в частности, марки 2СНР) при эксплуатации в условиях температуры окружающей среды свыше $+100$ °С. Однако отмечено, что при коротких импульсах необходима высокая скорость намагничивания. Это приводит к снижению импульсной магнитной проницаемости аморфного сплава и нивелирует преимущества, полученные при замене ферритового магнитопровода.

В процессе изготовления трансформатора с магнитопроводом из аморфного сплава имеет место некоторое изменение его характеристик по сравнению с исходными. На примере аморфного сплава марки 10НСР исследовано влияние технологических факторов на изменение удельных потерь в магнитопроводе на различных этапах изготовления его и трансформатора [2, 3]. Анализ результатов исследований показал, что после термомагнитной обработки удельные потери в различных испытуемых образцах снижаются в 5–10 раз. После заливки магнитопроводов различными изолирующими герметиками (Виксинт, Эластосил, Силэк) потери в них несколько увеличиваются и находятся в пределах 13...21 Вт/кг. Сравнительная оценка магнитопроводов из аморфного сплава и феррита марки М2000НМ1-17 в составе трансформаторов одинаковой мощности показала, что магнитопроводы из аморфного сплава 10НСР имеют меньшие (в 1,5–2 раза) массу и габаритные размеры.

Накопитель. Анализ выпускаемых отечественной промышленностью накопителей для спецтехники показал, что для применения в СВЧ-технике наибольший интерес представляют ионисторы (конденсаторы с двойным электрическим слоем) (рис. 5) [4] и молекулярные накопители энергии [5]. На рис. 5, б показано устройство ионистора типа К58-20И, в котором для формирования двойного электрического слоя использовано углеродное волокно. Площадь поверхности последнего определяет емкость ионистора.

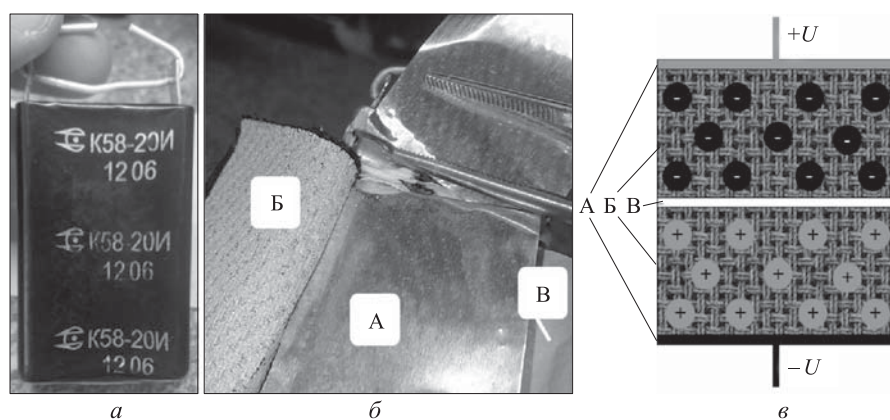


Рис. 5. Ионистор:

a — общий вид; *б* — внутреннее устройство; *в* — схема расположения зарядов в углеродном волокне при указанной полярности приложенного напряжения U ; А — электроды; Б — углеродное волокно; В — сепаратор

Накопители совершенствуют по нескольким направлениям. В одном из направлений исследований рассматривают ионисторы, в которых двойной электрический слой формируется с помощью углеродных нанотрубок. В этой конструкции существенно выше энергоемкость по сравнению с ионисторами, в которых использовано углеродное волокно, но хуже стабильность и меньше допустимое количество циклов заряд-разряд.

Другим направлением модернизации накопителей является использование в качестве электролита метастабильных веществ, которые отличаются высокой стабильностью характеристик при воздействии влияющих величин и способностью передавать это свойство материалам, с которыми они вступают во взаимодействие. Малый размер молекул метастабильных веществ обуславливает достаточно большие коэффициенты диффузии, что позволяет использовать жесткие сепараторы высокой плотности, не препятствуя образованию двойного электрического слоя и не искажая при этом электрических параметров конденсатора. Установлено, что при использовании метастабильных веществ в качестве электролита с нанокремниевым композитом, содержащим микроалмазы (рис. 6, *a*) и нанотрубки (рис. 6, *б*), можно получить новое поколение ионисторов с улучшенными параметрами.

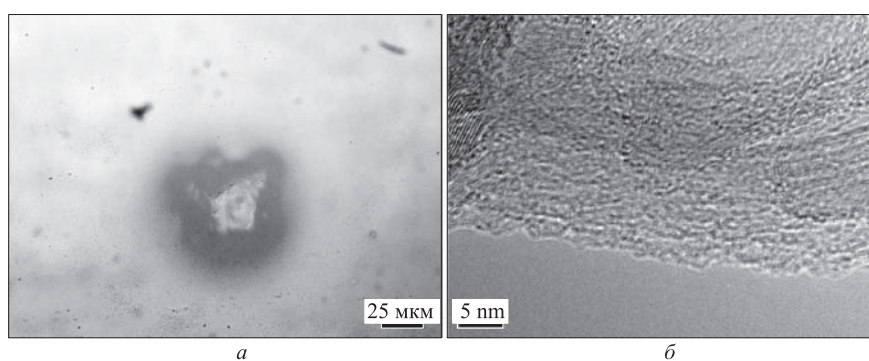


Рис. 6. Микроалмаз (*a*) и нанотрубки (*б*) в составе нанокремниевым композита

В нанокремниевом композите заняты почти все уровни размерной декомпозиции частиц, что позволяет многократно увеличить площадь двойного электрического слоя.

Способность метастабильных веществ к стимуляции восстановления кристаллических решеток металлов используется для регенерации материалов электродов при отсутствии токов заряда или разряда, что существенно увеличивает количество циклов заряд-разряд.

В настоящее время можно прогнозировать многократное увеличение емкости рассмотренных накопителей относительно современных аналогов. Если взять к примеру ионистор К58-20И [4] в качестве прототипа, то можно ожидать увеличения емкости ориентировочно на 50 % в том же корпусе, увеличения количества циклов заряд-разряд до 1 000 000, расширения диапазона допустимой температуры при эксплуатации ($-100...+200$) °С, срока хранения до 2 раз, токов заряд-разряд до 100А.

Заключение. На основе проведенного анализа можно сделать выводы о том, что использование аморфного сплава для магнитопровода позволяет значительно снизить объем и массу электромагнитных компонентов. Применение метастабильных электролитов в составе конденсаторов большой емкости позволит значительно улучшить характеристики (в первую очередь показатели надежности) модулятора и снизить массу и объем радиопередатчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левченко Н.П. Некоторые вопросы применения аморфных сплавов в импульсных трансформаторах, работающих в режимах коротких импульсов // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 1990. № 1. С. 49–53.
2. Костиков В.Г., Скрипко А.А., Стрельников П.С. Трансформаторы и дроссели на базе нанокристаллических и аморфных материалов // Оборонная техника. 2008. № 5. С. 30–35.
3. Костиков В.Г., Скрипко А.А., Кузнецов Е.И. Влияние технологических факторов на параметры трансформаторов с магнитопроводами из аморфного сплава // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 1989. № 2. С. 96–99.
4. Шахнов В.А. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры. М.: КНОРУС, 2010. 536 с.
5. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы) // Элеконд: веб-сайт компании.
URL: http://www.elecond.ru/kondensatory_ionistory.php (дата обращения: 03.06.2017).

Гончаренко Алексей Михайлович — научный сотрудник ПАО «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина» (Российская Федерация, 125190, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, корп. 16).

Костиков Владимир Григорьевич — д-р техн. наук, профессор, ПАО «Научно-производственного объединения «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина» (Российская Федерация, 125190, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, корп. 16).

Шахнов Вадим Анатольевич — чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Гончаренко А.М., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Улучшение характеристик основных узлов СВЧ-передатчика // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 54–63. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-54-63

IMPROVING CHARACTERISTICS OF PRIMARY ASSEMBLIES OF A MICROWAVE TRANSMITTER

A.M. Goncharenko¹

alex8ussr@gmail.com

V.G. Kostikov¹

kvg303@yandex.ru

V.A. Shakhnov²

shakhnov@mail.ru

¹PJSC "Research and Production Corporation "Almaz" named by Academician A.A. Raspletin", Moscow, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article deals with the ways of improving characteristics of a modulator, a pulse transformer and an accumulator in a radio transmitter with a microwave output device. We show that using an amorphous alloy for the magnetic core

Keywords

Power supply, modulator, microwave device, pulse transformer, supercapacitor, capacitor, nanocarbon composite

leads to a considerable reduction in the volume and mass of the electromagnetic components. Using metastable electrolytes in high capacitance capacitors makes it possible to considerably improve the characteristics of the modulator (primarily its reliability parameters) and reduce the mass and size of the radio transmitter

Received 05.06.2017

© BMSTU, 2017

REFERENCES

- [1] Levchenko N.P. Some issues of amorphous alloys application in pulse transformers working in short-pulse mode. *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Ser. RLT*, 1990, no. 1, pp. 49–53 (in Russ.).
- [2] Kostikov V.G., Skripko A.A., Strel'nikov P.S. Transformers and reactor chokes based on single-crystal and amorphous materials. *Oboronnaya tekhnika*, 2008, no. 5, pp. 30–35 (in Russ.).
- [3] Kostikov V. G., Skripko A. A., Kuznetsov E.I. Technology factors effect on parameters of transformer with core of amorphous alloy. *Voprosy radioelektroniki. Ser. RLT*, 1989, no. 2, pp. 96–99 (in Russ.).
- [4] Shakhnov V.A. *Proektirovanie istochnikov elektropitaniya elektronnoy apparatury* [Engineering power supply of electronic equipment]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 536 p.
- [5] Kondensatory s dvoynym elektricheskim sloem (ionistory) [Capacitors with double electric layer (supercaps)]. Elecond: company website (in Russ.). Available at: http://www.elecond.ru/kondensatory_ionistory.php (accessed: 03.06.2017).

Goncharenko A.M. — Research Scientist, PJSC "Research and Production Corporation "Almaz" named by Academician A.A. Raspletin" (Lenigradskiy prospekt 80, korp. 16, Moscow, 125190 Russian Federation).

Kostikov V.G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, PJSC "Research and Production Corporation "Almaz" named by Academician A.A. Raspletin" (Lenigradskiy prospekt 80, korp. 16, Moscow, 125190 Russian Federation).

Shakhnov V.A. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Goncharenko A.M., Kostikov V.G., Shakhnov V.A. Improving Characteristics of Primary Assemblies of a Microwave Transmitter. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 6, pp. 54–63. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-54-63