

УДК 621.375.018.756

ПРОБЛЕМА НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ТРАНЗИСТОРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ УСИЛИТЕЛЯХ

В.Л. Аронов, А.С. Евстигнеев, Г.С. Колчин, И.П. Яковлев
АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27

Как известно, электролитические конденсаторы, используемые в передающей радиотехнической аппаратуре в качестве накопительных конденсаторов в цепях питания мощных усилительных транзисторов, имеют существенно ограниченный диапазон отрицательных рабочих температур. Для аппаратуры, эксплуатируемой в широком интервале рабочих температур вплоть до -50 °С, есть необходимость независимого подогрева конденсаторов, что приводит к возникновению ряда конструктивных проблем, которые обсуждаются в настоящей работе.

Ключевые слова: *электролитические конденсаторы, цепи питания, цепи подогрева, последовательное сопротивление, тепловое сопротивление, просадка напряжения, теплоёмкость, граничная температура*

Сведения об авторах: *Аронов Вадим Львович, профессор, д.т.н.; Евстигнеев Андрей Семенович, к.т.н.; Колчин Геннадий Степанович; Яковлев Иван Павлович, yakovlev_ip@pulsarnpp.ru*

THE ISSUE OF ENERGY STORAGE CAPACITORS IN PULSE MICROWAVE TRANSISTOR AMPLIFIERS

V.L. Aronov, A.S. Evstigneev, G.S. Kolchin, I.P. Iakovlev
S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy Pr., 27

It is a well known fact that electrolytic capacitors used in transmitting radio equipment as energy storage capacitors in the power supply circuits of the power amplifier transistors work in a strictly limited negative temperature range. The necessity of the independent heating of capacitors in the equipment operating in extended temperature range up to -50 °C is causing several design issues. These issues are discussed in this paper.

Keywords: *electrolytic capacitors, power supply circuits, heating circuits, series resistance, heat transfer resistance, voltage slump, heat capacity, boundary temperature*

Authors: *Aronov Vadim Lvovich, Prof. Sc. D.; Evstigneev Andrei Semenovich, Ph. D; Kolchin Genadiy Stepanovich; Iakovlev Ivan Pavlovich, yakovlev_ip@pulsarnpp.ru*

Введение

Электролитические конденсаторы, используемые в радиотехнической аппаратуре, отличаются минимальными объёмами при высоких значениях ёмкости в сравнении с другими типами конденсаторов. Их электрические характеристики помимо ёмкости и предельного значения напряжения характеризуются неким активным последовательным сопротивлением r_s . Это сопротивление позволяет оценить «просадку» напряжения на конденсаторе при протекании большого импульсного тока безотносительно к основному процессу перезарядки ёмкости используемого конденсатора.

Указанное сопротивление определяется параметрами используемого электролита и оказывается существенным образом связано как с максимально допустимым рабочим напряжением, так и с минимальным значением рабочей температуры конденсатора.

По факту при повышении допустимого напряжения существенно возрастает минимальная температура для эффективной эксплуатации электролитического конденсатора.

Искусственный подогрев накопительных конденсаторов

При проектировании радиотехнической аппаратуры, предназначенной для эксплуатации при окружающей температуре вплоть до $-50\text{ }^\circ\text{C}$, нами уже несколько лет применяется искусственный подогрев каждого конденсатора по специальной цепи, включающей подогрев при температуре корпуса модуля порядка $-20\text{ }^\circ\text{C}$ [1, 2]. При этом используются конденсаторы Jamicon

серии WL с номинальной ёмкостью 220 мкФ и максимальным напряжением 50 В.

Конденсатор монтируется на полосковой плате, как показано на рис. 1. Плёночный резистор подогрева на керамической плате с сопротивлением порядка 50 Ом приклеен к торцу цилиндрического корпуса конденсатора диаметром 10 мм и длиной 16 мм. Мощность подогрева каждого конденсатора в существующей аппаратуре 0,5-0,7 Вт.

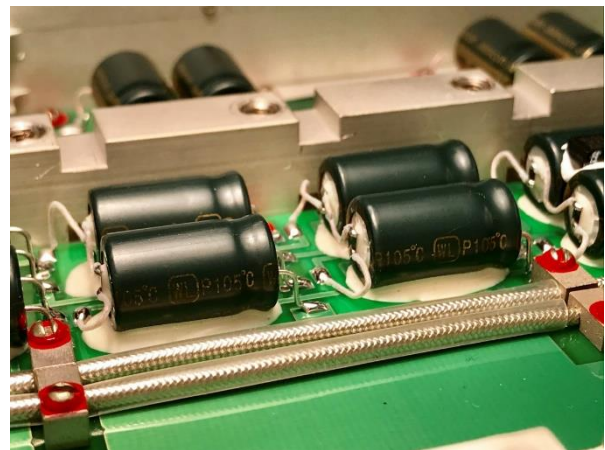


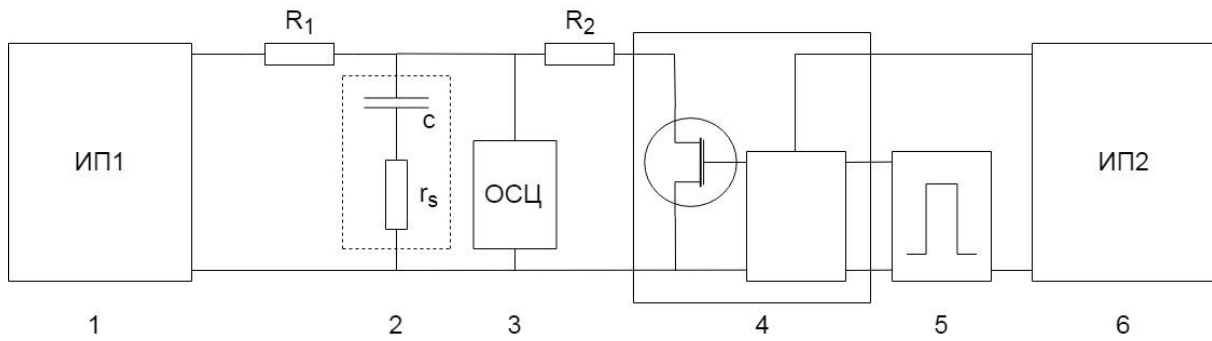
Рис. 1

Вариант монтажа конденсаторов

Проблемы возникли при проектировании новой аппаратуры с существенно повышенным уровнем СВЧ импульсной мощности при высокой скважности импульсного режима работы.

Проектируемая аппаратура основана на использовании новых более совершенных мощных транзисторов с повышенным рабочим напряжением питания, превышающим 50 В.

Попытка использовать конденсаторы той же фирмы и той же номинальной ёмкости, но с допустимым напряжением 63 В показала, что у них неприемлемое возрастание r_s начинается в районе от

**Рис. 2**

Электрическая схема стенда измерения электролитических конденсаторов:
 1 – ТП1 – источник питания № 1 для формирования требуемого напряжения на испытуемом конденсаторе; 2 – испытуемый конденсатор с ёмкостью C и с последовательным сопротивлением r_s ; 3 – осциллограф; 4 – импульсный ключ, формирующий короткое замыкание цепи при подаче управляющего импульса; 5 – импульсный генератор; 6 – ТП2 – вспомогательный источник питания для схемы ключа

0 до -10 °С, и это требует радикального пересмотра конструкции распределённых блоков накопительных конденсаторов и соответствующей коррекции конструкции аппаратного модуля.

Исследования характеристик электролитических конденсаторов в диапазоне температур

Измерения проводились на стенде, электрическая схема которого представлена на рис. 2.

В отличие от контроля режима усилительного каскада здесь более чётко формируется режим испытуемого конденсатора, который здесь испытывается в единственном числе.

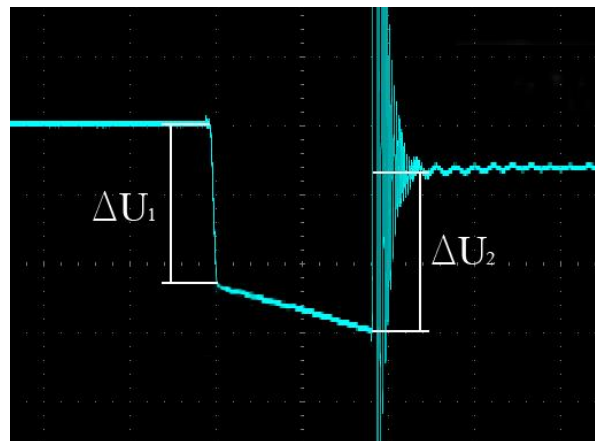
Типовая осциллограмма контролируемого напряжения на испытуемом конденсаторе представлена на рис. 3.

Напряжение на испытуемом конденсаторе с незначительной погрешностью соответствует напряжению источника U_n , что гарантируется правильным выбором

резистора R_1 . В нашем случае $R_1 = 2,2$ Ом при импульсных токах через испытуемый конденсатор около 4-6 А. Эта погрешность составляет менее 0,1 В.

Импульсный ток испытуемого конденсатора определяется при заданном U_n величиной R_2 , которая может принимать значения 2,5, 5 и 7,5 Ом.

Погрешность расчёта импульсного тока за счёт остаточного напряжения на открытом ключе не превышает 2 % в режимах

**Рис. 3**

Типовая осциллограмма контролируемого напряжения на испытуемом конденсаторе

испытаний, исключая экстремальное возрастание r_s .

Интересный метрологический вопрос связан с измерением двух перепадов напряжения ΔU_1 и ΔU_2 . В типовых условиях при не слишком больших U_n и импульсных токах разряда накопительного конденсатора $\Delta U_1 = \Delta U_2$, что говорит о постоянстве измеряемой величины r_s .

Однако с ростом импульсной мощности, выделяемой в r_s , ΔU_2 может быть заметно меньше ΔU_1 вследствие саморазогрева электролита за время длительности импульса. Это требует дополнительных измерений.

Измеренная величина ΔU в типовых условиях при $\Delta U_1 = \Delta U_2$ позволяет вычислить искомое значение r_s с учётом вторичного влияния R_1 и R_2 на результат измерения:

$$r_s = \frac{\Delta U \times R_2}{e \left(1 - \frac{\Delta U}{e} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right)} \quad (1)$$

Погрешность определения r_s оценивается величиной порядка 10 % в области режимов ниже экстремальных условий. Основным источником погрешности связан с точностью определения границ ΔU по осциллограмме, поскольку крутые фронты искажаются сопутствующими переходными процессами из-за наличия некоторых паразитных индуктивностей в коммутируемой цепи. Пологий участок осциллограммы приходится визуально экстраполировать на крутые участки осциллограммы для формирования границ ΔU .

Результаты измерений r_s в диапазоне температур представлены в следующем разделе.

Отдельный раздел исследований связан с определением теплового сопротивления электролитического конденсатора с элементом внешнего подогрева при конкретном конструктивном решении монтажа конденсатора в проектируемой аппаратуре.

Такие исследования проведены с использованием современного измерителя температуры контролируемой поверхности объекта по оптическому излучению с контролируемой поверхности – тепловизора Fluke TiS20.

Как уже было сказано, результат измерения теплового сопротивления в сильной степени зависит от конструкции блока, где смонтировано значительное количество конденсаторов. Конструкция должна обеспечивать достаточно высокое тепловое сопротивление для каждого из объединяемых в блок конденсаторов.

В реальной аппаратуре должно быть выполнено очень жесткое требование достижения малой индуктивности в основной электрической цепи, соединяющей накопительные конденсаторы с коллекторными выводами мощных СВЧ усилительных транзисторов.

Количественно требование к паразитной индуктивности в упомянутой цепи очень сложно сформулировать, поскольку в реальной схеме усилительного каскада используются дополнительные керамические (безындуктивное) конденсаторы малых габаритов, которые даже при относительно небольшой ёмкости (6,8 мкФ) позволяют снизить длительность переднего и заднего фронтов импульсного тока. Однако одновременно возникают вторичные искажения типа «звона», которые сложным

образом связаны с паразитной индуктивностью в цепи накопительных конденсаторов и которые могут по-разному проявляться в тестовом режиме испытаний (длительность радиоимпульса 10 мкс при скважности 200) и реально востребованных «пачечных» режимах эксплуатации, когда формируются сложные комбинации радиоимпульсов.

В этих условиях требование к паразитной индуктивности цепи транзистор-накопительные конденсаторы сформулировано как 10 нГн в пересчёте на четыре конденсатора суммарной ёмкостью 880 мкФ, приходящихся на каждый СВЧ каскад.

Из названной величины индуктивности для усилителей мощности L -диапазона примерно 5 нГн приходится на неизбежный дроссель питания на СВЧ плате усилительного каскада. Оставшаяся часть, 5 нГн, ограничивает конструкцию блока конденсаторов.

Если принять, что на один усилительный каскад приходится четыре конденсатора, то допустимая индуктивность в пересчёте на один конденсатор составляет 10 нГн.

После таких предварительных оценок можно рассмотреть вариант монтажа конденсаторов, представленный на рис. 1. Конденсаторный блок в этом случае представляет собой несколько рядов конденсаторов, расположенных близко друг к другу на единой плате с двусторонней металлизацией. На внешней стороне платы размещён «+», на обратной стороне, частично лежащей на металлическом основании, «-». Блоки конденсаторов размещены на металлическом основании, представляющем

собой пластину толщиной около 5 мм. На другой стороне этой пластины размещены СВЧ усилительные каскады.

В представленном выше конкретном случае (рис. 1) расчётная оценка индуктивности выводов одного конденсатора при длине выводов 7 мм и диаметре 0,6 мм даёт величину порядка 5 нГн. В пересчёте на четыре конденсатора это составит 1,25 нГн.

Таким образом, суммарная индуктивность от накопительных конденсаторов до коллекторного электрода СВЧ транзистора составила 9,25-9,75 нГн, что по порядку величины соответствует изначально сформулированному требованию 10 нГн на один каскад СВЧ усилителя.

Представленные оценки являются весьма приближенными, однако позитивный результат серийного производства и эксплуатации блоков с подобной конструкцией даёт дополнительное подтверждение справедливости полученных результатов.

Оценка теплового сопротивления отдельно взятого конденсатора складывается из трёх определяющих составляющих. Внутреннее тепловое сопротивление R_{Ti} от нагреваемого торца корпуса до начального сечения выводов на другом торце корпуса. Следующая составляющая R_{Tb} определяется тепловым сопротивлением выводов до присоединения их к металлизированной текстолитовой плате. Третья составляющая R_{Tn} определяется растеканием тепла по металлизированным поверхностям платы к металлическому основанию, температура которого принимается независимой от включаемой мощности подогрева накопительных конденсаторов. Частично поток тепла с верхней металлизации идёт

через текстолитовую плату к нижней металлизации и далее на металлическое основание. Однако это происходит по большой площади платы после растекания по верхней металлизации. Здесь исключена составляющая потока тепла непосредственно с корпуса на плату, к которой корпус приклеен. Для исключения этой составляющей металлизация удалена с обеих поверхностей платы под местом приклейки.

Расчётная оценка очень ограничена, но она показывает, что теплопроводность поверхностной металлизации платы очень значительная.

Достоверный результат даёт экспериментальная оценка температуры на поверхности платы, представленной на рис. 1. Эта оценка позволяет в первом приближении исключить из рассмотрения третью составляющую.

Вторая составляющая позволяет достаточно достоверно оценить тепловое сопротивление выводов, которое составляет 26 град/Вт.

Первая составляющая измерений перепада температуры по поверхности цилиндра (корпуса конденсатора) от одного торца до другого составляет величину порядка 5-10 град/Вт.

Таким образом, при реальной мощности подогрева 0,7 Вт достигается повышение температуры конденсатора в среднем на 25 °С. Этого достаточно, чтобы вернуть работоспособность электролитического конденсатора Jamicon с предельным напряжением 50 В. Этот вывод также соответствует позитивной практике производства и эксплуатации модулей, где реализована описанная конструкция и упомянутые электролитические конденсаторы.

Основной принципиальный момент – использование достаточно длинных выводов при монтаже конденсаторов и исключение дополнительного отвода тепла от поверхности корпуса конденсаторов в месте приклейки корпуса к плате.

Обеспечение заданного времени разогрева, обеспечивающего выход аппаратуры на приемлемый режим работы передатчика, – следующий принципиальный момент. В нашем случае это время определяется величиной достигнутого теплового сопротивления и величиной теплоёмкости в пересчёте к одному конденсатору.

Величина теплоёмкости конденсатора экспериментально определена с большой погрешностью. Расчётная оценка основывается на измерении массы одного конденсатора и предположении о том, что эта масса определена полностью алюминием, из которого изготовлен корпус и внутренние электроды конденсатора. При измеренной массе 2,1 г теплоёмкость получается порядка 1,9 Дж/град. Эта величина, по-видимому, несколько завышена.

Таким образом, тепловая постоянная времени получается порядка 75 с, что по порядку величины согласуется с положительными экспериментальными результатами, получаемыми через 120 с после включения подогрева конденсаторов при температуре корпуса модуля –50 °С.

При этом в рассматриваемом конкретном примере мощность подогрева составляет 35-40 % средней мощности, потребляемой усилительным модулем от источника питания в номинальном режиме.

Отвлекаясь от конкретного примера, надо отметить, что, увеличивая мощность подогрева, можно реализовать достижение

необходимого сдвига рабочей температуры конденсатора и одновременного снижения времени выхода модуля на приемлемый режим работы в различных более сложных ситуациях. В дальнейшем экономия энергопотребления будет одним из важных факторов при оптимизации цепей подогрева накопительных конденсаторов.

Характеристики электролитических конденсаторов в диапазоне отрицательных температур

Проведено исследование характеристик трёх типов конденсаторов с повышенным предельным рабочим напряжением 63 В в сравнении с широко используемым конденсатором с предельным рабочим напряжением 50 В.

Ёмкости и габариты всех четырёх образцов одинаковы. Ёмкость 220 мкФ,

цилиндрический корпус диаметром 10 мм и длиной 16 мм.

Исследования проводились со следующими образцами электролитических конденсаторов: Nichicon WZ 220 мкФ 63 В; Jamicon ТК 220 мкФ 63 В; К50-93И 220 мкФ 63 В; Jamicon WL 220 мкФ 50 В.

С использованием методики импульсных измерений, описанной в предыдущем разделе, проведены измерения последовательного сопротивления четырёх образцов конденсаторов в диапазоне пониженных рабочих температур.

Результаты измерений представлены на рис. 4. Область значений $r_s \geq 0,7$ Ом соответствует сниженной достоверности результатов. Эта область для дальнейших оценок не представляет интереса, так как режим работы усилительных каскадов при больших значениях r_s заведомо выходит за допустимые рамки.

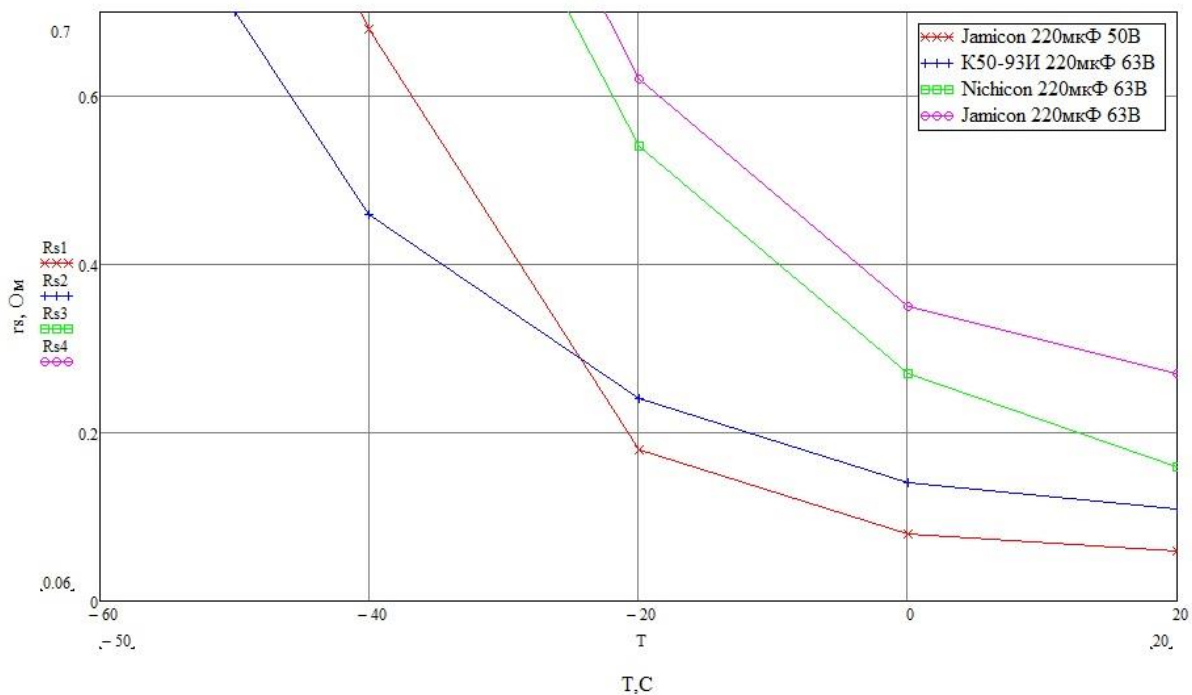


Рис. 4

Результаты измерений электролитических конденсаторов

Величины теплового сопротивления для всех четырёх образцов конденсаторов оказываются примерно одинаковыми в пределах погрешности измерений порядка 15 %.

Собственное тепловое сопротивление цилиндрического корпуса от торца с нагревательным резистором до торца, несущего выводы, оказывается в пределах 5-10 град/Вт, а вторая составляющая определяется тепловым сопротивлением выводов от торца корпуса конденсатора до сечения припайки выводов к металлизации на токопроводящей плате.

При длине выводов 7 мм, как было показано на рис. 1, измеренная величина теплового сопротивления, это полное сопротивление от верхней части корпуса до подложки, составила 50-60 °/Вт при собственном тепловом сопротивлении корпуса 4-8 °/Вт.

Полученные результаты в пределах ожидаемых погрешностей согласуются с расчётными оценками.

При вертикальном, по отношению к плате, монтаже конденсаторов при длине выводов 1,5 мм измеренное тепловое сопротивление составило 14-16 °/Вт, что по порядку величины также согласуется с расчётными результатами.

При измерении тепловых сопротивлений заметной разницы между четырьмя образцами испытываемых конденсаторов отмечено не было.

Экспериментальная оценка тепловой постоянной времени варианта сборки с выводами длиной 5 мм дала результат 80-250 с, что, по крайней мере, не противоречит также достаточно грубой расчётной оценке.

В области достоверных результатов измерений, представленных на рис. 4, видно

существенное различие испытанных образцов конденсаторов.

Интересно отметить, что среди трёх образцов конденсаторов с предельным уровнем напряжения 63 В лучшим оказался отечественный конденсатор К50-93И. К сожалению, эти конденсаторы удалось приобрести лишь в количестве пяти штук, что не позволяет заложить их в новые разработки передающих модулей.

Выбор был сделан в пользу конденсаторов Nichicon 200 мкФ 63 В, которые оказались дешевле отечественных конденсаторов К50-93И.

Проектирование блоков накопительных конденсаторов при экономии мощности подогрева и обеспечении совокупности эксплуатационных требований

Один из возможных вариантов задачи проектирования новых блоков накопительных конденсаторов связан с необходимостью повышения рабочего напряжения усилителя мощности, который обслуживается обсуждаемым блоком накопительных конденсаторов.

Для начала необходимо выбрать граничную величину просадки питающего напряжения, которое надо принять как граничное значение, после которого должен включаться подогрев.

Примем эту величину

$$\Delta U_t = 1,5 \text{ В.} \quad (2)$$

В этом случае граница включения подогрева составит для выбранного типа конденсатора $T_n = 0$ °С при рабочем импульсном токе 6 А. Для сравнения укажем, что для рассмотренного выше успешно

реализованного варианта накопительных конденсаторов $T_{\text{п}} = -20$ °С.

Отдельный вопрос связан с выбором величины импульсного тока, приходящегося на один конденсатор. Здесь первично надо рассмотреть эффект разряда конденсатора за время тестового импульса, составляющего $T_{\text{и}} = 10$ мкс. Просадка напряжения от начала к концу импульса при токе 6 А составит $\Delta U_c = 0,27$ В. Это заведомо удовлетворяет требованиям к параметрам радиоимпульса на выходе СВЧ усилителя мощности и заметно меньше выбранного ранее $\Delta U_t = 1,5$ В. Это лишний раз указывает на определяющую роль t_s при проектировании блоков накопительных конденсаторов.

Рассмотренный вариант соответствует использованию шести конденсаторов Nichicon 200 мкФ 63 В на один типовой мощный усилительный каскад, потребляющий около 24 А при постоянном напряжении питания порядка 53 В.

Расчёт мощности подогрева каждого конденсатора основывается на достижении граничной температуры конденсатора при температуре корпуса модуля $T_{\text{min}} = -50$ °С. При этом тепловая постоянная времени должна быть не выше половины заданного в технических условиях времени $t_{\text{п}}$ между моментом включения подогрева и моментом включения СВЧ режима усиления мощности. Аппаратура в этот момент должна обеспечивать номинальные энергетические параметры.

Такая постановка задачи предполагает, что тепловое сопротивление блока конденсаторов может меняться при вариации конструкции блока.

При подобной вариации конструкции возможна вариация и эквивалентной теп-

лоёмкости, однако мы будем предполагать, что определяющей в этом процессе останется теплоёмкость самих конденсаторов, которая будет принята равной $C_{\text{п}} = 1,9$ Дж/град в расчёте на один конденсатор.

Если принять величину требуемой тепловой постоянной времени $T_{\text{аут}} = 60$ с (время заранее включаемого подогрева 2 минуты), то необходимое тепловое сопротивление в пересчёте на один конденсатор составит 32 К/Вт. Примем, что 7 К/Вт приходится на сам конденсатор от одного торца корпуса до другого.

Если исключить тепловое сопротивление металлизированной платы, к которой припаяны выводы конденсатора, и боковой отвод тепла от поверхности корпуса конденсатора, то необходимая длина выводов составит 5,5 мм.

Такой вариант требует специального конструктивного решения, поскольку реально используемый вариант – корпус лежит боковой поверхностью на плате – обеспечивает длину выводов порядка 7 мм. Другой более эффективный с технологической точки зрения вариант вертикального крепления корпуса конденсаторов на плате имеет длину выводов всего 1-1,5 мм.

Определённой проблемой при выборе необходимой длины выводов оказывается сложность вариации этого конструктивного параметра при экспериментальной отработке конструкции блока накопительных конденсаторов. Экспериментальная отработка блока необходима в силу приближённого характера численных оценок.

Перспективным представляется вариант искусственного увеличения теплового сопротивления при минимальной длине

выводов, но при введении дополнительного теплового сопротивления на плате крепления конденсаторов, однако это область дальнейших разработок.

Интересно отметить, что при реализации рекомендованного теплового сопротивления требуемая мощность разогрева, обеспечивающая дополнительный разогрев на 50 °С, составит 1,6 Вт. В пересчёте на один усилительный каскад будет 9,6 Вт.

Мощность, потребляемая усилительным каскадом в течение импульса, составит в соответствии с ранее представленными оценками

$$P = 24 \times 53 = 1272 \text{ Вт.} \quad (3)$$

При нормированной тестовой скважности $Q = 200$ средняя потребляемая мощность составит 6,4 Вт.

Таким образом мощность подогрева в 1,5 раза превысит собственную мощность потребления усилителя мощности.

Отметим, что в рассмотренном действующем варианте усилителя с цепями подогрева мощность подогрева составляла 0,35-0,4 средней потребляемой мощности.

Полученный результат представляется очень существенным, так как он означает существенную модернизацию блока питания модуля.

На фоне выявленных проблем, возникающих при проектировании модуля с использованием более высоковольтных усилительных транзисторов при вынужденном переходе на более высоковольтные электролитические накопительные конденсаторы, очень интересным и эффективным представляется привлечение заказ-

чика разработки новых модулей к некоторому смягчению требований по отношению к параметру время разогрева до включения номинального режима при отрицательных температурах окружающей среды.

К примеру, разрабатываемый модуль имеет два импульсных режима работы: один достаточно часто используемый режим связан с формированием коротких радиоимпульсов длительностью < 1 мкс при высокой скважности, второй режим соответствует формированию достаточно плотной пачки коротких радиоимпульсов, что соответствует тестовому режиму с одним импульсом длительностью 10 мкс при скважности $Q = 200$. Такой режим используется гораздо реже.

Рассматривается вопрос: нельзя ли вообще исключить задержку включения первого режима при увеличенной в несколько раз задержке включения второго редко используемого режима.

При положительном решении поставленного вопроса конструктивное решение будет заключаться в том, что для каждого каскада усилителя будут использованы дополнительные керамические накопительные конденсаторы (достаточно будет четырёх конденсаторов 5 мкФ 100 В), которые обеспечат работу каскада в первом режиме, а ток подогрева, а быть может, и количество электролитических конденсаторов удастся существенно снизить, что заметно повысит эффективность разрабатываемой аппаратуры.

Заключение

Проблемы, возникающие при использовании более высоковольтных электролити-

ческих конденсаторов, используемых в качестве накопительных в современной СВЧ аппаратуре с высокой выходной мощностью в широком диапазоне рабочих температур, представлены в виде приближённых оценок применительно к двум примерам реальной и проектируемой реализации.

В действительности возможны другие, несколько различающиеся ситуации, однако представленные проблемы могут оказаться существенными и в этих вариантах.

Литература

1. Аронов, В.Л. Конструкция 4-канального приёмно-передающего модуля для бортовой АФАР / В.А. Аронов, А.С. Евстигнеев, А.А. Евстигнеев и др. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2007. – Вып. 1. – С. 94-102.
2. Евстигнеев, А.С. Полнофункциональный модуль бортовой АФАР L-диапазона / А.С. Евстигнеев, Г.Н. Колодко, В.Л. Аронов и др. // Фазотрон. – 2011. – Вып. 3-4 (16). – С. 65-69.

References

1. Aronov V.L., Evstigneev A.S., Evstigneev A.A. et al. Konstruktsiya 4-kanal'nogo priemo-pereayushchego modulya dlya bortovoy AFAR [Structure of the onboard AESA 4-channel transceiver module] *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2007, iss.1, pp. 94-102.
2. Evstigneev A.S., Kolodko G.N., Aronov V.L. et al. Polnofunktsional'niy modul' bortovoy AFAR L-diapazona [Full-featured L-band onboard AESA module]. *Fazotron*, 2011, iss.3-4 (16), pp.65-69.