



Григорьев С.Н.

АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ СВЧ-АТТЕНЮАТОРА

В статье приведен анализ надёжности и технологичности конструкции СВЧ-аттенюатора, на примере серийно выпускаемых аттенюаторов, используемых в современных мощных ваттметрах, поглощающего типа.

Ключевые слова: СВЧ-аттенюатор, ваттметр, надёжность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, технологичность, трудоёмкость, материалоемкость, энергоёмкость, технологическая себестоимость.

Введение

В настоящее время в России сложилась ситуация, когда находящиеся в эксплуатации согласованные резисторные СВЧ-аттенюаторы повышенной мощности устарели, не соответствуют требованиям потребительского рынка и представителей заказчиков на продукцию двойного назначения, а серийное производство новых образцов весьма недешево или отсутствует. Стоит отметить, что приборы зарубежного производства имеют стоимость, недоступную для большинства отечественных потребителей. На этом фоне наиболее актуальной представляется задача создания принципиально нового прибора, не имеющего в своем составе дорогостоящих СВЧ-компонентов, обладающего достаточно широким спектром функциональных возможностей, пригодного для решения большого круга инженерных задач. И, что очень важно, спроектированный прибор должен быть максимально автоматизирован и иметь наименьшую вносимую погрешность измерений [1-4].

Конструкторско-технологическая реализация основных положений, предложенных в статье, необходима для создания широкомасштабной научной базы обоснования ряда технических новшеств по коренному обновлению и модернизации радиоизмерительных приборов СВЧ-диапазона — мощных ваттметров поглощаемой мощности типа «МЗ-106», в соответствии с нормами и стандартами, принятыми в мировой практике и теории современной метрологии (ISO 9001, ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ РВ 15.002), а также возрастающим спросом на мировом рынке на более мощные, надёжные, современные радиоизмерительные приборы и СВЧ-технику [1-4].

Мощные ваттметры поглощающего типа «МЗ-106» являются разработками 1982 года, и действительно во времена бывшего СССР представляли собой перспективные СВЧ радиоизмерительные

приборы двойного назначения. В настоящий период указанные приборы относятся к устаревшим моделям, не удовлетворяющим современным требованиям метрологической науки в области СВЧ-измерительной техники, представляют образцы, нуждающиеся в экстренном переоборудовании и немедленной модернизации в сторону улучшения своих основных технических и эксплуатационных характеристик [1-4].

В серийно выпускаемых ваттметрах «МЗ-106» и «МЗ-108» основными элементами поглощения поступающей мощности являются СВЧ-аттенюаторы [1-4], обладающие достаточно высокими техническими характеристиками.

Рассмотрим основные технические критерии выбора модели проектируемого согласованного резисторного СВЧ-аттенюатора повышенной мощности рассеивания на примере конструкции, предназначенной для измерителей поглощаемой мощности типа «МЗ-106» и «МЗ-108»:

1. Сопротивление нагрузки — $R_n = 50 \text{ [Ом]}$ ($R_{вх} \approx R_{вых} \approx 50 \text{ [Ом]}$);
2. Предельная СВЧ-мощность рассеивания (поглощения) — $P_{\max \text{ СВЧ}} = 1,5 \text{ [кВт]}$ для ваттметра типа «МЗ-106» и $P_{\max \text{ СВЧ}} = 2 \text{ [кВт]}$ для ваттметра типа «МЗ-108»;
3. Номинальное значение ослабления — $\alpha_{\text{ном}} = 40 \text{ [дБ]}$;
4. Неравномерность АЧХ в диапазоне частот $50 \text{ [Гц]} \dots 1,2 \text{ [ГГц]}$ — $A_{\max} = \pm 1,2 \text{ [дБ]}$ для ваттметра типа «МЗ-106» и $50 \text{ [Гц]} \dots 2,0 \text{ [ГГц]}$ — $A_{\max} = \pm 0,5 \text{ [дБ]}$ для ваттметра типа «МЗ-108»;
5. Значение $KCB_{U_{вх}} \leq 1,15$ для ваттметра типа «МЗ-106» и $KCB_{U_{вх}} \leq 1,05$ для ваттметра типа «МЗ-108».

Среди выше приведённых оптимальных критериев наибольшую сложность для их реализации представляют значения предельной мощности рассеивания и неравномерность АЧХ в широком частотном диапазоне — начиная от 50 [Гц] и кончая $1,2 \dots 2,0 \text{ [ГГц]}$.

При разработке СВЧ-аттенюаторов повышенной мощности необходимо выполнение ряда взаимно противоречивых требований. В анализируемой конструкции требование обеспечения высокой предельной мощности сводится к увеличению габаритных размеров аттенюатора за счёт увеличения количества поглощающих резистивных элементов, выполняемых на стандартных диэлектрических подложках. Сопутствующее этому увеличение количества паяных соединений с применением медной (Cu) фольги приводит не только к сложностям обеспечения допустимых значений KCB_U и неравномерности АЧХ в заданном диапазоне частот, но и к снижению надёжности [5].

С точки зрения мощностных и тепловых характеристик СВЧ-аттенюатора [1-5], его конструкцию можно условно разделить на две составные части:

1. Входные тонкоплёночные резистивные структуры, выполненные в виде пакетов и соединённые последовательно, имеют суммарное сопротивление $R_{\Sigma} \approx 43,91 \text{ [Ом]}$. При входном и выходном сопротивлении аттенюатора $R_{вх} \approx R_{вых} \approx 50 \text{ [Ом]}$ на данных резистивных структурах будет рассеиваться основная часть подаваемой на вход мощности (приблизительно 80 %).

Выделяемая в исследуемых структурах тепловая энергия в виде джоулевых потерь отводится, в основном, за счёт механизма теплопроводности и теплопередачи через боковые грани пакетов к основанию корпуса, в котором выполнены сквозные диаметральные отверстия для принудительного воздушного охлаждения с использованием пары мощных вентиляторов. В конструкции СВЧ-аттенюатора обеспечено минимальное тепловое сопротивление между боковыми гранями резисторных плат и стенками волновода.

Интересно отметить, что сам корпус совмещён с теплоотводящим радиатором, выполненным из алюминиевого сплава В-95, в виде сквозных отверстий по бокам (в СВЧ-аттенюаторе ваттметра типа

«МЗ-106» – в виде стандартного профиля). Пакеты с резистивными тонкоплёночными структурами, соединённые в последовательную цепь, представляют собой центральную энергетическую жилу в виде полосковой линии подвешенного типа, закрепляемой посередине, внутри прямоугольного волновода, стенки которого и корпус радиатора смонтированы на “общий провод – землю”.

Необходимо признать, что в гораздо меньшей степени здесь присутствует рассеяние СВЧ-мощности в виде слабо выраженного многократного переизлучения тепловых волн ИК-диапазона (не более 5 %).

2. Выходная резистивная структура — конструкция делителя напряжения, на котором рассеивается до 19 % подаваемой мощности, выполнена на отдельных (поликоровых – 98% Al_2O_3) подложках, припаянных к основанию корпуса-радиатора аттенюатора. Плоскость крепления ориентирована по нормали к распространению СВЧ-волны, что способствует внесению минимального дополнительного рассогласования на оконечном участке аттенюатора. В то же время область крепления подложек несколько удалена от охлаждаемой вентиляторами области основания, вследствие чего их температурный режим более энергонагруженный и напряжённый.

С целью обеспечения заданной предельной мощности аттенюатора оконечная часть выполнена в виде двух симметрично сформированных резистивных структур, соединённых параллельно.

Анализ надёжности конструкции СВЧ-аттенюатора

Анализ рассмотренного СВЧ-аттенюатора для ваттметра «МЗ-106» показал, что его конструкция не является наилучшей по нижеприведённым в табл. 1 критериям надёжности по сравнению с предложенной конструкцией СВЧ-аттенюатора для ваттметра «МЗ-108», согласно работам [1-9].

Требования к надёжности конструкции СВЧ-аттенюатора следующие:

1. Упрощение конструкции и сокращение до \min числа резистивных плат без ухудшения выходных характеристик за счёт применения рациональных схемных решений.

2. Проверка надёжности конструкции путём анализа надёжности на всех этапах САПР.

3. Наиболее возможное расширение поля допусков на параметры СВЧ-резисторов.

4. Максимально возможное облегчение режимов работы СВЧ-плёночных резисторов за счёт снижения рабочих параметров по сравнению с номинально-рассчитанными.

5. Уменьшение $T_{\text{раб}}$ [°C] резистивных плат в СВЧ-аттенюаторе, предусмотрев для этого теплоотводы, соответствующую компоновку и хорошее воздушно-принудительное охлаждение (не исключена возможность принудительно-жидкостного или масляного).

6. Устранение вибраций с помощью хорошей амортизации.

7. Защита от ударов, влажности, коррозии, внешней радиации и электромагнитных полей.

8. Задание требований к надёжности комплектующих резисторных плат.

9. Уточнение условий испытаний и методики приработки выпускаемых СВЧ-аттенюаторов.

Таблица 1. Исходные данные расчёта основных критериев и показателей надёжности конструкции аттенюатора для ваттметров типа «МЗ-106» и «МЗ-108»

Порядковый № ранжированной последовательности $i = 1, s$	Частный (относительный) показатель	Тип ваттметра	Обозначение показателя, расчётная формула	Единица измерения		Весовой коэффициент (функция, нормирующая весовую значимость показателя) $\varphi_i = i/2^{i-1}$
				час	%	
1	Безотказности (Средняя – базовая наработка на отказ приборов)	МЗ-106	$\bar{N}_б$	≥ 15000	100	1,0
			\bar{N}_{Real}	≥ 12000	80	
		МЗ-108	$\bar{N}_б$	≥ 20000	100	
			\bar{N}_{Real}	≥ 18000	90	
	Усреднённый коэффициент безотказности приборов составляет	$0 < \bar{k}_N = \frac{\bar{N}}{\bar{N}_б} \leq 1,0$			100	
		МЗ-106	$\bar{k}_N \geq 0,8$		80	
		МЗ-108	$\bar{k}_N \geq 0,9$		90	
	Базовая вероятность отсутствия скрытых дефектов приборов за межповерочный интервал 24 месяца при среднем коэффициенте использования 0,1, определяется	$P_{T_{нов.б}} \langle k_{использования} \rangle = 0,1 \geq 0,95$			95	
		МЗ-106	$P_{T_{нов}} \geq 0,80$	24 мес. = 1 год	80	
		МЗ-108	$P_{T_{нов}} \geq 0,92$		92	
2	Долговечности (Базовый гамма-процентный ресурс приборов)	МЗ-106	$\Gamma_{ресурс.б} \gamma=95\%$	≥ 10000	100	1,0
			$\Gamma_{ресурс.}^{Real} \gamma=95\%$	≥ 8000	80	
		МЗ-108	$\Gamma_{ресурс.б} \gamma=95\%$	≥ 12000	100	
			$\Gamma_{ресурс.}^{Real} \gamma=95\%$	≥ 11000	90	
	Доверительная вероятность	$\gamma = 0,95$			95	
	Усреднённый коэффициент гамма-процентного ресурса приборов составляет	$0 < \bar{k}_{\Gamma_{ресурс}} = \frac{\Gamma_{ресурс} \gamma=95\%}{\Gamma_{ресурс.б} \gamma=95\%} \leq 1,0$			100	
		МЗ-106	$\bar{k}_{\Gamma_{ресурс}} \geq 0,8$		80	
		МЗ-108	$\bar{k}_{\Gamma_{ресурс}} \geq 0,9$		90	

2	Базовый гамма-процентный срок службы приборов. Усреднённый коэффициент гамма-процентного срока службы приборов составляет	$0 < \Gamma_{\text{служ.б}} \Big _{\gamma=95\%} \leq 25,$ $\bar{k}_{\Gamma_{\text{служ.б}}} = \frac{\Gamma_{\text{служ.б}} \Big _{\gamma=95\%}}{\Gamma_{\text{служ.б}} \Big _{\gamma=95\%}}$		25 лет	100
		МЗ-106	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{служ.б}}} \geq 0,48$	12 лет	48
		МЗ-108	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{служ.б}}} \geq 0,80$	20 лет	80
	Гамма-процентный срок сохраняемости приборов	Норма, согласно ТУ	$\Gamma_{\text{сохр.отап.б}} \Big _{\gamma=95\%} \geq 10 \text{ лет}$		100
			$\Gamma_{\text{сохр.неотап.б}} \Big _{\gamma=95\%} \geq 5 \text{ лет}$		100
		МЗ-106	$\Gamma_{\text{сохр.отап.}} \Big _{\gamma=95\%} \geq 8 \text{ лет}$		80
			$\Gamma_{\text{сохр.неотап.}} \Big _{\gamma=95\%} \geq 3 \text{ лет}$		60
		МЗ-108	$\Gamma_{\text{сохр.отап.}} \Big _{\gamma=95\%} \geq 9 \text{ лет}$		100
			$\Gamma_{\text{сохр.неотап.}} \Big _{\gamma=95\%} \geq 4 \text{ лет}$		90
	Усреднённый коэффициент сохраняемости приборов для неотпливаемых хранилищ	$0 < \bar{k}_{\Gamma_{\text{сохр.неотап}}} = \frac{\Gamma_{\text{сохр.неотап}} \Big _{\gamma=95\%}}{\Gamma_{\text{сохр.неотап.б}} \Big _{\gamma=95\%}} \leq 1$			100
		МЗ-106	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{сохр.неотап}}} \geq 0,6$		60
		МЗ-108	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{сохр.неотап}}} \geq 0,8$		80
	Усреднённый коэффициент сохраняемости приборов для отопляемых хранилищ составляет	$0 < \bar{k}_{\Gamma_{\text{сохр.отап}}} = \frac{\Gamma_{\text{сохр.отап}} \Big _{\gamma=95\%}}{\Gamma_{\text{сохр.отап.б}} \Big _{\gamma=95\%}} \leq 1,0$			100
		МЗ-106	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{сохр.отап}}} \geq 0,8$		80
		МЗ-108	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{сохр.отап}}} \geq 0,9$		90
Базовый гамма-процентный срок службы приборов. Усреднённый коэффициент гамма-процентного срока службы приборов составляет	$0 < \Gamma_{\text{служ.б}} \Big _{\gamma=95\%} \leq 25,$ $\bar{k}_{\Gamma_{\text{служ.б}}} = \frac{\Gamma_{\text{служ.б}} \Big _{\gamma=95\%}}{\Gamma_{\text{служ.б}} \Big _{\gamma=95\%}}$		25 лет	100	
	МЗ-106	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{служ.б}}} \geq 0,48$	12 лет	48	
	МЗ-108	$\bar{k}_{\Gamma_{\text{служ.б}}} \geq 0,80$	20 лет	80	

1,0

2	Базовое среднее время восстановления работоспособного состояния приборов	$\bar{T}_{\text{восст.б}}$		$\leq 120 [\text{мин}]$ $= 2 [\text{час}]$	100	1,0
		M3-106	$\bar{T}_{\text{восст}}$	$\leq \begin{pmatrix} 150 \\ \dots 180 \end{pmatrix}$ [мин] = $\begin{pmatrix} 2,5 \dots \\ 3,0 \end{pmatrix}$ [час]	125... 150	
		M3-108	$\bar{T}_{\text{восст}}$	$\leq \begin{pmatrix} 90 \\ \dots 120 \end{pmatrix}$ [мин] = $\begin{pmatrix} 1,5 \dots \\ 2,0 \end{pmatrix}$ [час]	75... 100	
	Усреднённый коэффициент среднего времени восстановления работоспособного состояния приборов составляет	$0 < \bar{k}_{\bar{T}_{\text{восст}}} = \frac{\bar{T}_{\text{восст}}}{\bar{T}_{\text{восст.б}}} \leq 1,0$			100	
	M3-106	$\bar{k}_{\bar{T}_{\text{восст}}} \leq (1,25 \dots 1,50)$		125... 150		
	M3-108	$\bar{k}_{\bar{T}_{\text{восст}}} \leq (0,75 \dots 1,00)$		75... 100		
3	Ремонтопригодности (Базовый коэффициент взаимозамены стандартными изделиями или унифицированными узлами приборов)	M3-106	$K_{\text{вззам.б}} \Big _{\gamma_{\text{qualities\&guarantee}}=95\%}$ $= 0,80 \dots 0,85$		80...85	1,0
			$K_{\text{вззам}}^{\text{Real}} \Big _{\gamma_{\text{qualities\&guarantee}}=95\%}$ $= 0,30 \dots 0,40$		30...40	
		M3-108	$K_{\text{вззам.б}} \Big _{\gamma_{\text{qualities\&guarantee}}=95\%}$ $= 0,90 \dots 0,95$		90...95	
			$K_{\text{вззам}}^{\text{Real}} \Big _{\gamma_{\text{qualities\&guarantee}}=95\%}$ $= 0,80 \dots 0,85$		80...85	
	Заранее известная степень качества и гарантии изделий или узлов	$\gamma_{\text{qualities\&guarantee}} = 0,95$			95	
	Усреднённый коэффициент взаимозамены стандартными изделиями или унифицированными узлами приборов	$0 < \langle k \rangle_{K_{\text{вззам}}} = \frac{K_{\text{вззам}} \Big _{\gamma_{\text{qualities\&guarantee}}=95\%}}{K_{\text{вззам.б}} \Big _{\gamma_{\text{qualities\&guarantee}}=95\%}} \leq 1,0$			100	
	M3-106	$\langle k \rangle_{K_{\text{вззам}}} \approx 0,375 \dots 0,471$		37,5... 47,1		
	M3-108	$\langle k \rangle_{K_{\text{вззам}}} \approx 0,889 \dots 0,895$		88,9... 89,5		

Под технологичностью конструкции СВЧ-аттенюатора понимается количество комплектующих резисторных плат на основе теплоотводящих диэлектрических подложек, при котором возможен технологический процесс наиболее быстрого и экономичного освоения СВЧ-аттенюатора в серийном производстве, когда выпуск готовой продукции происходит с минимальными затратами, высокой степенью надёжности и эффективностью. При этом, оценивая степень технологичности конструкции с точки зрения её надёжности, необходимо исходить из уровня развития техники производства, степени модернизации и требуемого класса точности изготовления по погрешностям, заложенным в ТУ на само изделие и станочное оборудование, соответствия международному (ISO 9001) или общероссийскому типу качества и стандартов (РД4.4110.02-93 и ОСТ4.0018-95), уровня общей автоматизации и механизации наиболее трудоёмких операций при серийном производстве комплектующих резисторных плат, пакетов и секций в конструкции СВЧ-аттенюатора, активно используемых, например, в измерителях повышенной мощности рассеивания типа «МЗ-106» и «МЗ-108».

Основной задачей отработки конструкции на технологичность является повышение производительности труда при оптимальном снижении затрат труда, средств, материалов и времени на проектирование, подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), обеспечение прочих заданных показателей качества изделия в принятых условиях его производства и эксплуатации [5-9].

Анализ технологичности конструкции СВЧ-аттенюатора

Анализ рассмотренного СВЧ-аттенюатора для ваттметра «МЗ-106», с учётом его конструктивных особенностей на этапах производства, эксплуатации и ремонта, показал, что его конструкция не является наилучшей также и по нижеприведённым в табл. 2...4, критериям технологичности, по сравнению с предложенной конструкцией СВЧ-аттенюатора для ваттметра «МЗ-108», согласно работам [1-9].

При количественной оценке показателей технологичности конструкции 1 шт. изделия — СВЧ-аттенюатора (ТКИ) наиболее распространены и удобны для сравнительной оценки относительные показатели. При этом значения относительных частных показателей принимаются в пределах $0 < k_i \leq 1$, причём рост значения самого показателя k_i соответствует более высокой степени ТКИ.

Следует заметить, что частные показатели характеризуют только один признак (критерий) технологичности. В отличие от частных, комплексные показатели характеризуют не отдельные частные признаки технологичности, а определённую группу признаков (критериев) ТКИ.

Таблица 2. Анализ конструкции СВЧ-аттенюатора по критериям технологичности

№ п/п	Критерии технологичности приборов, изделий, узлов и т.п.	СВЧ-аттенюатор, %	
		МЗ-106	МЗ-108
1	Трудоёмкость — количество труда, затрачиваемого на 1 шт. изделия	100	70...75
2	Материалоёмкость — количество материальных ресурсов, необходимых для создания и использования 1 шт. изделия		74...80
3	Энергоёмкость — количество топливно-энергетических ресурсов, необходимых на 1 шт. изделия		82...85
4	Технологическая себестоимость — стоимость выражения ресурсоёмкости 1 шт. изделия		80...85

Метод определения комплексного показателя ТКИ СВЧ-аттенюатора как средневзвешенной (среднеарифметической) величины частных показателей с введением весовых коэффициентов наиболее прост, нагляден, удобен для механизации и компьютеризации расчётных работ, поэтому широко распространён в радиоэлектронной промышленности при серийном изготовлении измерителей повышенной поглощаемой мощности типа «МЗ-106» и «МЗ-108». При этом пределы комплексного показателя, как и для частных показателей, которые он обобщает ($0 < K_{TKИ} \leq 1$), одинаковы. Уровень ТКИ определяется как отношение достигнутого показателя технологичности $K_{TKИ}$ к значению базового или нормативного показателя K_{σ} , заданного в техническом задании (ТЗ), и должен удовлетворять следующему условию (1):

$$K_y = \frac{K_{TKИ}}{K_{\sigma}} \geq 1,02. \quad (1)$$

Порядок определения уровня технологичности K_y конструкции изделия — СВЧ-аттенюатора наглядно рассматривается в табл. 3 и 4, при задании жёстких условий $K_{\sigma} = 0,7$.

Таблица 3. Исходные данные расчёта показателей технологичности конструкции аттенюатора

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра для ваттметра	
			МЗ-106	МЗ-108
1	Количество микросхем и микросборок в изделии	H_{mc}	0	0
2	Количество ЭРЭ, включая модули и микромодули	$H_{\text{ЭРЭ}}$	282	190
3	Количество операций монтажа, которые можно осуществить механизированным или автоматизированным способом	$H_{\text{м.монт}}$	1	6
4	Количество операций определённого типа	H_0	3	7
5	Количество навесных элементов, подготовка которых к монтажу может осуществляться механизированным или автоматизированным способом, включая элементы, не требующие подготовки (реле, разъёмы, патроны и т.п.)	$H_{\text{м.подг}}$	15	164
6	Количество типоразмеров печатных плат	$H_{\text{т.п.п}}$	2	2
7	Количество типоразмеров ЭРЭ	$H_{\text{т.ЭРЭ}}$	11	4
8	Общее количество печатных плат в изделии	$H_{\text{п.п}}$	109	59
9	Количество операций контроля и настройки, которые можно осуществить механизированным или автоматизированным способом	$H_{\text{м.к.н}}$	2	57
10	Количество типовых технологических процессов	$Q_{\text{т.п}}$	5	46
11	Общее количество технологических процессов	$Q_{\text{п}}$	60	50

Значения базовых комплексных показателей эксплуатационной технологичности конструкции СВЧ-аттенюатора определяются из следующих условий:

Таблица 4. Состав дополнительных показателей технологичности конструкции аттенюатора для ваттметров типа «МЗ-106» и «МЗ-108»

Порядковый № ранжированной последовательности $i = \overline{1, s}$	Частный (относительный) показатель	Обозначение показателя, расчётная формула и величина для ваттметра		Весовой коэффициент (функция, нормирующая весовую значимость показателя) $\phi_i = \frac{i}{2^{i-1}}$
		МЗ-106	МЗ-108	
1	Коэффициент использования микросхем и микросборок	$k_{исп.мс} = \frac{H_{мс}}{H_{мс} - H_{ЭРЭ}}$		1,0
		0	0	
2	Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	$k_{м.монт} = \frac{H_{м.монт}}{H_0}$		1,0
		1/3	6/7	
3	Коэффициент механизации и автоматизации подготовки навесных элементов и монтажа	$k_{м.подг} = \frac{H_{м.подг}}{H_{ЭРЭ}}$		0,75
		15/282	164/190	
4	Коэффициент автоматизации и механизации контроля и настройки	$k_{м.к.н} = \frac{H_{м.к.н}}{H_0}$		0,5
		2/3	57/7	
5	Коэффициент повторяемости микросхем и микросборок	$k_{повт.ЭРЭ} = 1 - \frac{H_{м.ЭРЭ}}{H_{ЭРЭ}}$		0,3125
		271/282	186/190	
6	Коэффициент повторяемости печатных плат	$k_{повт.п.п} = 1 - \frac{H_{м.п.п}}{H_{п.п}}$		0,1875
		107/109	57/59	
7	Коэффициент применения типовых технологических процессов	$k_{м.п} = \frac{Q_{м.п}}{Q_n}$		0,109375
		5/60	46/50	
Комплексный показатель технологичности конструкции изделия СВЧ-аттенюатора		$K_{ТКИ} = \frac{\sum_{i=1}^{s=7} (\phi_i \cdot k_i)}{\sum_{i=1}^{s=7} \phi_i}$		

Уровень технологичности конструкции изделия СВЧ-аттенюатора	$K_y = \frac{K_{ТКИ}}{K_{\sigma}}$	
	$\approx \frac{0,315}{0,7} \approx 0,450 < 1,020$	$\approx \frac{1,618}{0,7} \approx 2,311 \geq 2,0 \geq 1,020$

1. $K_{\sigma} = 0,6...0,7$ — для стадии разработки конструкторской документации на уровне реализации в виде технического проекта;

2. $K_{\sigma} = 0,7...0,8$ — для стадии разработки конструкторской документации на уровне разработки в качестве рабочей документации.

Уровень технологичности K_y СВЧ-аттенюатора может определяться по одному или нескольким частным и комплексным показателям, принятым в качестве критериев оценки ТКИ в ТЗ на разработку и изготовление изделия СВЧ-аттенюатора. Допустимые пределы значений K_y СВЧ-аттенюатора соответствуют установленным для базовых показателей K_{σ} , согласно работам [7-9].

Уровень технологичности K_y СВЧ-аттенюатора характеризует возможность производственных мощностей радиоэлектронных компаний и фирм к подготовке и промышленному производству приборов:

1. если $K_y \geq 2,0$ — наблюдается высокий уровень технологичности конструкции аттенюатора;
2. если $1,02 \leq K_y < 2,0$ — обнаруживается низкий уровень технологичности конструкции аттенюатора;
3. если $0 < K_y < 1,02$ — конструкция аттенюатора не технологична.

Состав базовых показателей технологичности конструкции, их оптимальные значения и предельные отклонения определяются для однотипных изделий СВЧ-аттенюаторов утверждёнными отраслевыми стандартами (ОСТ). При этом оптимальные значения базовых показателей ТКИ — $K_{\sigma \text{ optim}}$ указываются в ТЗ на разработку и серийное промышленное освоение изделия СВЧ-аттенюатора.

При коэффициентах $k_{\text{м.монт}} \approx 0,333... < 1,0$ и $k_{\text{м.подг}} \approx 0,053... < 1,0$ образуется производственная необходимость применения в единичном и мелкосерийном производстве СВЧ-аттенюаторов высокой доли технологических операций с использованием ручного труда (подготовка, оснастка, сборка, монтаж, ремонт, регулировка и т.п.), доходящего порой в некоторых операциях до 95...97%. Стоит заметить, что наблюдается крайне низкое значение повторяемости схожих и примитивных ручных операций в общем технологическом процессе при изготовлении востребуемых измерителей повышенной мощности рассеивания, где широко применяются СВЧ-аттенюаторы поглощаемого типа $0 < k_{\text{повт.р.о}} = 0,5 (50\%) < 1$. Экспериментально обнаружена закономерность — чем выше класс точности (меньше погрешность результатов) СВЧ-аттенюаторов, тем выше степень применения трудоёмких и низкопроизводительных ручных операций при промышленном производстве приборов, в соответствии с работами [7-9].

Так как $K_y \approx 0,450 < 1,020$, то соотношение (1) не выполняется, следовательно, опытная конструкция спроектированного СВЧ-аттенюатора [6] не удовлетворяет требованиям технологичности при серийном производстве ваттметров «МЗ-106». Конструкция исследуемого образца аттенюатора не технологична!

Напротив, так как $K_y \approx 2,311 \geq 2,0 \geq 1,020$, то известное соотношение (1) уже выполняется, а значит, опытная конструкция рассчитанного СВЧ-аттенюатора [5-9] полностью удовлетворяет всем требованиям технологичности при серийном производстве ваттметров «МЗ-108» на заводах радиоизмерительной индустрии России. В данном случае выявлен высокий уровень технологичности искомой конструкции аттенюатора.

Требования к технологичности конструкции СВЧ-аттенюатора включают следующий комплекс работ по снижению трудоёмкости и себестоимости его изготовления и монтажа на производственном объекте [8]:

1. Повышение серийности СВЧ-аттенюатора и его составных частей при изготовлении (обработка, сборка, испытания) посредством стандартизации, унификации и обеспечения конструктивного подобия (в настоящее время наблюдается лишь единичное или мелкосерийное производство).

2. Ограничение номенклатуры составных частей конструктивных элементов и применяемых материалов в СВЧ-аттенюаторе.

3. Внедрение высокопроизводительных и малоотходных технологических решений, основанных на типизации процессов и других прогрессивных формах их организации.

4. Применение высокопроизводительных стандартных средств технологического оснащения, обеспечивающих оптимальный уровень механизации и автоматизации.

5. Применение в разрабатываемой конструкции СВЧ-аттенюатора освоенных в производстве конструктивных решений, соответствующих современным требованиям.

6. Использование конструкторско-технологических решений, позволяющих снизить затраты на обеспечение доступа к составным частям и транспортировать СВЧ-аттенюатор в собранном виде или в виде законченных составных частей, не требующих при монтаже на объекте разборки или операций по подгонке (операций по подгонке узлов СВЧ-аттенюатора, с последующим испытанием его в структуре СВЧ-тракта измерителей повышенной мощности рассеяния полностью избежать пока не удаётся).

При решении основной задачи оценки ТКИ СВЧ-аттенюатора необходимо учитывать, что любое изделие должно рассматриваться как объект проектирования, производства и эксплуатации [8].

При рассмотрении СВЧ-аттенюатора как объекта проектирования необходимо участвовать в разработке конструкции на всех стадиях проектирования, отчетливо представляя специфику каждой стадии.

Если СВЧ-аттенюатор рассматривается как объект производства, нужно учитывать: виды и методы получения заготовки, обработки, сборки, контроля и испытаний; возможность автоматизации и механизации, условия материального обеспечения производства [8].

При оценке технологичности СВЧ-аттенюатора, являющегося объектом эксплуатации, анализируют: удобство СВЧ-аттенюатора к управлению и контролю работоспособности, сокращение трудоёмкости профилактических работ, удобство и сокращение ремонтных работ, обеспечение требований техники безопасности, транспортабельность [8].

На основании вышеизложенных фактов следует, что в конструкции СВЧ-аттенюатора имеются существенные недостатки, которых по-видимому можно избежать даже при имеющихся объективных сложностях разработки согласованных СВЧ-аттенюаторов повышенной мощности рассеивания.

Конструкция рассчитанного СВЧ-аттенюатора обнаружила ряд недостатков [1-4]:

1. Наличие экранирующей фольги по всей длине СВЧ-тракта и под платами.
2. Большое количество удельных поверхностных сопротивлений резисторов.

3. Задание номинальных значений сопротивлений резисторов в пакетах $A_1 \dots A_6$ с точностью до сотых долей [Ом].
4. Жесткие допуски на допустимый разброс сопротивлений резисторов ($\pm 1 \dots 3 \%$).
5. Значительная тепловая нагруженность резисторов $R_7 \dots R_{10}$ на платах.

Перечисленные недостатки приводят к повышению трудоёмкости, себестоимости изготовления и снижению надёжности СВЧ-аттенюатора.

Кроме того, наличие многочисленных паяных соединений перемычками и припоями с различными температурами плавления, использование фольги с двухсторонним покрытием олово – висмут ($\text{Sn} - \text{Bi}$) не исключают возможность выполнения отдельных соединений с повышенным контактным тепловым сопротивлением. В этом случае при высоких уровнях электрической и тепловой нагрузки, характерных для аттенюатора, возможно отслаивание покрытия $\text{Sn} - \text{Bi}$ и дальнейшее ухудшение электромеханического контакта, приводящее к дополнительному нагреву тепловыделяющего элемента. В первую очередь, это касается оконечной части аттенюатора (резисторы $R_7 \dots R_{10}$), платы $A_7 \dots A_{10}$ которого припаиваются к основанию через прокладку из фольги, играющую роль экранирующего слоя.

В рассчитанной конструкции нет особой необходимости устанавливать экранирующий слой фольги непосредственно под платами $A_7 \dots A_{10}$, достаточно её припаять к основанию вблизи данных плат. Экспериментальная проверка варианта смоделированной конструкции «МЗ-108», в которой платы $A_7 \dots A_{10}$ непосредственно припаивались к основанию, показала хорошую работоспособность аттенюатора при уровнях $P_{\text{нч}} = 2,0$ [кВт] и кратковременно ($t \leq 30$ [мин.]) при $P_{\text{нч}} = 2,5$ [кВт], а также в СВЧ-режиме. В последнем случае не наблюдалось ухудшения частотных характеристик и КСВ_U .

Выводы

1. Предложены 9 пунктов требований по надёжности к конструкции проектируемого СВЧ-аттенюатора на стадии конструкторско-технологической разработки.
2. Предложен анализ и расчёт основных показателей надёжности для вновь спроектированной конструкции СВЧ-аттенюатора (табл. 1) по безотказности, долговечности и ремонтпригодности.
3. Предложен анализ и расчёт показателей технологичности конструкции СВЧ-аттенюатора (табл. 2), по следующим оценочным критериям: трудоёмкости, материалоёмкости, энергоёмкости и технологической себестоимости.
4. Исследован метод определения комплексного показателя ТКИ применительно к сравниваемым конструкциям базового, устаревшего образца и вновь спроектированного новейшего типа СВЧ-аттенюатора.
5. Рассматривается сравнительный анализ надёжности и технологичности конструкции СВЧ-аттенюатора на примере серийно выпускаемых аттенюаторов, используемых в ваттметрах устаревшего типа «МЗ-106» и новейшего типа «МЗ-108».
6. В ходе приведённого сравнительного анализа основных технических характеристик СВЧ-аттенюаторов стал очевидным факт, что в диапазоне частот до 2 [ГГц] при номинальной мощности рассеивания радиосигнала до 2 [кВт], наиболее оптимальным с точки зрения согласования по входу и выходу при $R_{\text{вх}} \approx R_{\text{вых}} \approx 50$ [Ом], считается модель спроектированного СВЧ-аттенюатора типа «МЗ-106», у которого, в среднем, $\text{КСВ}_U = 1,05 \dots 1,07$ и неравномерность по АЧХ в пределах $\pm 0,5$ [дБ].

Литература

1. **Григорьев С.Н.** Устройство для регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению в СВЧ-аттенюаторах. // Журнал “Проектирование и технология электронных средств”, № 4, Владимир: ВГУ, 2007, с. 5-19.
2. **Григорьев С.Н.** Устройство для регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению в СВЧ-аттенюаторах. // Журнал “Микроэлектроника” РАН, Т. 38, № 5, М.: Наука, 2009, с. 391-400.
3. **Григорьев С.Н.** Устройство для регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению в СВЧ-аттенюаторах. // Журнал “Физика волновых процессов и радиотехнические системы”, Т. 12, № 4, Самара: СамГУ, 2009, с. 52-55.
4. **Гудков А.Г., Григорьев С.Н.** Прогнозирование качества и надёжности ИС СВЧ на этапах разработки и производства./ Ч-37: Автоматизированная регулировка коэффициента стоячей волны по напряжению, // Научно-технический журнал «Машиностроитель»,/ Серия «Электроника», М.: Изд-тво ООО «НТП “Виразж-Центр”», № 4, 2013, с. 20-27.
5. **Гудков А.Г.** Микрополосковые аттенюаторы и нагрузки. // Журнал “Вопросы радиоэлектроники”/ Общие вопросы радиоэлектроники. М.: “Радиотехника”, 1989, вып. 5, с. 59-82
6. **Воробьёв Е.А.** Расчёт производственных допусков устройств СВЧ. Л.: Судостроение, 1980, с. 5-54, 70-86, 123-140.
7. **Пашков В.П., Поповская Я.А.** Анализ и оценка технологичности изделий приборостроения // Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. С-Пб, кафедра «Технологии аэрокосмического приборостроения» С-ПбГУАП, 2007, с. 1-21.
8. **Амиров Ю.Д., Алферова Т.К., Волков П.Н.** и др. Технологичность конструкции изделия // Справочник. Под ред. Амирова Ю.Д. М.: Машиностроение, 1990, 768 С.
9. **Пашков В.П.** Испытания и эксплуатация авиационной и ракетно-космической техники // Методические указания для курсового и дипломного проектирования. С-Пб, кафедра «Технологии аэрокосмического приборостроения» С-ПбГУАП, 2002, с. 1-22.