

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Конесев С.Г.<sup>1</sup>, Хазиева Р.Т.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия (450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1), e-mail: KonesevSG@yandex.ru

Выполнено научное обоснование критериев надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК). Предложена методика расчета показателей надежности МИЭК (интенсивность отказов, среднее время наработки на отказ, вероятность безотказной работы, плотность распределения времени безотказной работы), учитывающая особенности функционирования и своеобразие МИЭК. Произведена оценка надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения на дискретных элементах с материальной и функциональной точек зрения. Представлены результаты расчетов показателей надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения на дискретных элементах. Показано, что надежность интегрированного компонента выше, чем у схемы на дискретных элементах. Повышение надежности в МИЭК обеспечивается за счет уменьшения числа элементов, отсутствием дополнительных межэлементных и монтажных соединений, паек.

Ключевые слова: многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК), надежность, методика оценки, сложные электромагнитные компоненты.

## METHOD FOR ASSESSMENT THE RELIABILITY OF COMPLEX ELECTROMAGNETIC COMPONENTS

Konesev S.G.<sup>1</sup>, Khazieva R.T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSBEI HPE «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russia (450062, Ufa, street Kosmonavtov, 1), e-mail: KonesevSG@yandex.ru

Scientific justification of criteria of reliability MIEC was achieved. The mathematical model of the MIEC (in terms of reliability) was developed. The method of calculating reliability parameters MIEC (failure rate, mean time between failures, probability of uptime, density of distribution uptime), which takes into account the features of functioning and originality MIEC. The assessment of the reliability of single-section MIEC and its equivalent circuit on discrete components in terms the material and functional basis. The results of calculations of reliability parameters of single-section MIEC and its equivalent circuit on discrete components. It has been shown that the reliability of the integrated component is higher than discrete circuit based components. Increase reliability MIEC is provided by reducing the number of elements and absence of additional inter-element and wiring, rations.

Keywords: multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC), reliability, evaluation method, complex electromagnetic components.

В настоящее время в различных областях электротехники, электромеханики и энергетики широко применяется функциональная интеграция электромагнитных элементов (ЭМЭ), позволяющая улучшить массовые и габаритные показатели, снизить материалоемкость и себестоимость изготовления источников вторичного электропитания, являющихся обязательным функциональным узлом практически любой электронной аппаратуры [9]. Для построения устройств силовой электроники и преобразовательной техники используются многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты (МИЭК), отличающиеся от дискретных элементов по конструкции и технологии изготовления, выполняющие функции нескольких ЭМЭ и позволяющие реализовать множество устройств [4–6]. Разработка методики оценки надежности МИЭК на основе соответствующей

методологической базы является важной и актуальной проблемой, решение которой позволит осуществлять обоснованный выбор наиболее надежного схемотехнического решения МИЭК с учетом их особенностей.

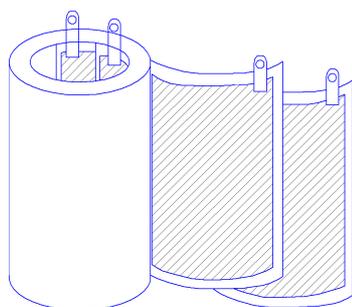
Трудность математического моделирования МИЭК обусловлена отсутствием достоверных экспериментальных данных о надежности МИЭК, в частности, данных о законах распределения отказов и восстановления, а также невозможностью статических испытаний из-за экономических ограничений. Электродинамические процессы, происходящие в МИЭК, с точки зрения надежности закономерны. Это позволяет изучать их общими для любых технических средств методами. Разработанные в теории надежности методы анализа, синтеза, способы повышения надежности и научные методы эксплуатации техники являются общими для любых технических систем [8]. Выбор того или иного метода расчета надежности определяется заданием на расчет надежности. На основании задания и изучения работы сложного компонента составляется алгоритм расчета надежности.

**Цель исследования:** разработка методики расчета показателей надежности МИЭК.

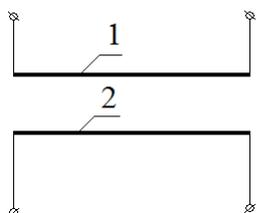
#### **Описание предлагаемой методики**

Для оценки надежности электромагнитный компонент из-за неоднородности его составляющих может рассматриваться как система. Разделение компонента на группу элементов имеет материальную (вещественную), функциональную и другие основы. Надежность МИЭК зависит от многих факторов, критерии надежности устанавливаются в зависимости применения, следовательно, МИЭК с позиции надежности – объект системного анализа.

В статье рассмотрены проблемы оценки надежности МИЭК с точки зрения материальной и функциональной основы. Для оценки надежности рассмотрим наиболее простую с позиции надежности и функциональности односекционную структуру МИЭК, которая в литературе часто упоминается как «индукон» (индуктивность – конденсатор) [1, 2]. Односекционный МИЭК сочетает в себе свойства катушки индуктивности и конденсатора и состоит из каркаса, обкладок из проводящего материала, свернутых в спираль, разделенных диэлектриком. Каждая обкладка МИЭК имеет выводы в начале и в конце обкладки (рисунок 1). При отказе любого элемента наступает отказ системы. Отказ односекционного МИЭК может происходить по двум основным причинам: во-первых, старение (разрушение) изоляции и/или проводящего материала, во-вторых, повреждение выводов в начале и в конце обкладки. Поэтому для односекционного МИЭК возможны три состояния: работоспособное, отказ по причине старения изоляции и/или разрушения проводящего материала, отказ по причине повреждения выводов проводящих обкладок.

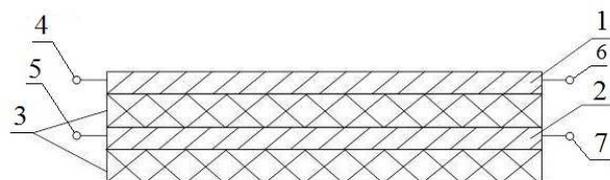


а) конструкция МИЭК



1, 2 – первая и вторая проводящие обкладки

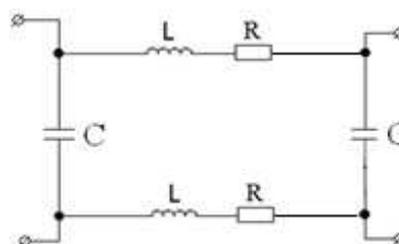
в) односекционная структура МИЭК



1, 2 – проводящие обкладки, 3 – диэлектрик,

4, 5 и 6, 7 – выводы в начале и в конце обкладки

б) МИЭК в развернутом виде



г) схема замещения на дискретных элементах

Рис. 1. Односекционная структура МИЭК и ее схема замещения

Оценить надежность сложного компонента технической системы можно только семейством критериев, которые совокупно характеризуют надежность компонента технической системы. Выбор критериев зависит от типа технического объекта, его назначения и требуемой полноты оценки надежности. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент является невосстанавливаемым объектом, в то время как устройства на основе МИЭК являются восстанавливаемыми объектами, работоспособность которых может быть восстановлена путем замены поврежденного (вышедшего из строя) элемента. Для достижения заданной эффективности МИЭК необходимо гарантировать определенное значение вероятности безотказной работы, для обеспечения долговечности – среднее время безотказной работы. Таким образом, надежность оценивается по следующим критериям: вероятность безотказной работы  $P(t)$ , интенсивность отказов  $\lambda(t)$ , средняя наработка на отказ  $T_1$ , плотность распределения времени безотказной работы  $f(t)$ .

Определим показатели надежности односекционного МИЭК (рисунок 1) как системы. Расчет показателей надежности целесообразно выполнять при помощи электронных таблиц программы Excel. В таблицу заносятся все элементы устройства, включая монтажные.

Показатели надежности системы, представленной на рисунке 1, вычисляются по формулам:

$$P_c(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t),$$

$$T_{1c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt,$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(t).$$

$$f_c(t) = f_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t) + P_1(t) \cdot f_2(t) \dots P_n(t) + \dots + P_1(t) \cdot P_2(t) \dots f_n(t),$$

где  $P_j(t)$  – вероятность безотказной работы  $j$ -го элемента,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

$f_j(t)$  – плотность распределения времени до отказа  $j$ -го элемента,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

$\lambda_j(t)$  – интенсивность отказа  $j$ -го элемента,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

В [7] показано, что схема замещения на дискретных элементах эквивалентна с точки зрения электродинамических процессов интегрированной структуре МИЭК [3]. Рассмотрим схему замещения односекционного МИЭК на дискретных компонентах (рисунок 1, г), представляющую собой параллельное соединение двух RLC-контуров. Принимается, что электрические и температурные режимы работы, базовые коэффициенты надежности и условия эксплуатации одинаковы в обоих случаях. Показатели надежности схемы замещения односекционного МИЭК на дискретных элементах приведены в таблице 1.

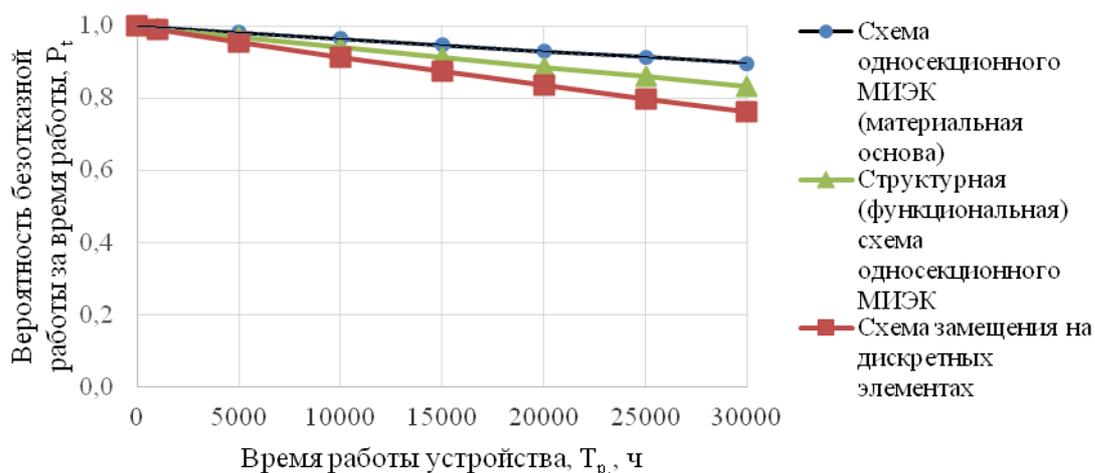
Таблица 1

Интенсивности отказов элементов, составляющих односекционный МИЭК

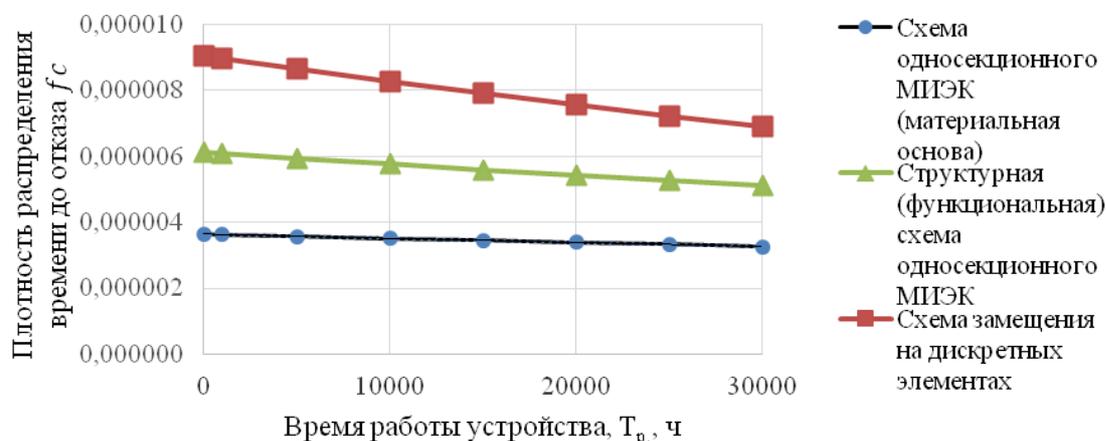
Элементы	Количество, n	$\lambda \cdot 10^{-5}$ , час <sup>-1</sup>	$n \cdot \lambda \cdot 10^{-5}$ , час <sup>-1</sup>
Интенсивности отказов элементов, составляющих односекционный МИЭК			
Проводящие обкладки, разделенные диэлектриком	2	0,08	0,16
Электрические выводы, расположенные в начале и конце проводящих обкладок (разъемы коаксиальные)	4	0,021	0,084
Пайки	8	0,01	0,08
Печатные проводники	4	0,01	0,04
Интенсивности отказов элементов, составляющих схему замещения МИЭК			
Конденсаторы	2	0,15	0,3
Катушки индуктивности	2	0,075	0,15
Резисторы	2	0,075	0,15
Электрические выводы (разъемы коаксиальные)	4	0,021	0,084
Пайки	16	0,01	0,16
Печатные проводники	6	0,01	0,06

Расчет надежности сложных технических систем часто базируется на предположении о том, что время безотказной работы и время восстановления элементов имеют экспоненциальные распределения вероятностей. Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы большого числа элементов. В первую очередь это относится к элементам радиоэлектронной аппаратуры, а также к машинам, эксплуатируемым в период после окончания приработки и до существенного проявления

постепенных отказов. Получим значения вероятности безотказной работы, и плотности распределения времени до отказа, табулируя функции  $P(t) = e^{-\lambda \cdot t}$  и  $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  (рисунок 2).



а) вероятность безотказной работы



б) плотность распределения времени до отказа

Рис. 2. Показатели надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения на дискретных элементах с материальной и функциональной точек зрения

В зависимости от структуры МИЭК выполняет различные функции: накопление (аккумулирование) электрической (выполняет роль конденсатора, зарядной/разрядной емкости, емкости нагрузки) и магнитной (выполняет роль катушки индуктивности) энергии, трансформации энергии (первичной и/или вторичной обмотки трансформатора). Для оценки надежности технических систем, предназначенных для выполнения нескольких функций, требуется определить вероятность безотказной работы системы по каждой функции (функциональный подход). При этом для каждой функции необходимо составить свою структурную схему надежности. Возникает необходимость декомпозиции МИЭК как функциональной системы по выполняемым функциям. По сложности функции делятся на простые, которые рассматриваются как неразложимые составляющие, и составные, состоящие из нескольких простых и объединенные по общности цели, роли в процессе функционирования.

Односекционный МИЭК (рисунок 1) выполняет простые функции накопителя электрической (за счет наличия двух проводящих обкладок, разделенных диэлектриком) и магнитной энергии (за счет наличия проводящего материала, свернутого в спираль) и составную функцию последовательного RLC-контура.

Результаты расчета показателей надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения с материальной и функциональной основы представлены в таблице 2.

Таблица 2

Показатели надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения на дискретных компонентах с материальной и функциональной точек зрения

Показатели надежности	Схема замещения на дискретных элементах	Схема односекционного МИЭК (материальная основа)	Структурная (функциональная) схема односекционного МИЭК
Интенсивность потока отказов, $\lambda$ , 1/ч	$9,04 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$	$6,12 \cdot 10^{-6}$
Среднее время наработки на отказ, $T_1$ , ч	110 619	274 725	163 399
Вероятность (заданная) наработки на отказ, $P$	0,90	0,90	0,90
Время наработки на отказ с заданной вероятностью, $t$ , ч	11 062	27 473	16 340
Время работы устройства, $T_p$ , ч	30 000	30 000	30 000
Вероятность безотказной работы за время работы, $P_t$	0,76	0,90	0,83

Функциональный подход к оценке надежности является более сложным, глубоким и дифференцированным, и в случае МИЭК включает в себя оценку надежности с материальной точки зрения, что обусловлено своеобразием конструкции МИЭК и спецификой выполняемых им функций. Как правило, при расчете функциональной надежности определяется возможность полноты выполнения функций, считается, что возможен не только отказ компонента, но и частичная потеря его работоспособности.

Анализируя результаты оценки показателей надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения, можно сделать вывод, что интегрированное исполнение компонента приводит к снижению интенсивности потока отказов в 1,5 раза, увеличению среднего времени работы компонента и времени безотказной работы с заданной вероятностью в 1,5 раза, увеличению вероятности безотказной работы на 9 %. Повышение надежности в МИЭК обеспечивается за счет уменьшения числа элементов, отсутствием дополнительных межэлементных и монтажных соединений, паек.

Существуют различные структуры МИЭК. Отсутствие единообразной методики оценки их надежности затрудняет сопоставление полученных результатов и усложняет выбор наиболее эффективного и надежного схемотехнического решения МИЭК. Особенность предложенной методики, основанной на вероятностной оценке состояний функционирования МИЭК, заключается в объединении преимуществ элементного и функционального подходов к анализу и расчету показателей надежности МИЭК, позволяющих оценить количественно роль каждого из элементов системы на ее показатели надежности.

### **Выводы**

1. С целью исследования структур МИЭК с точки зрения надежности и разработки устройств на их основе решена научная задача разработки методики расчета показателей надежности МИЭК.

2. Электродинамические процессы, происходящие в МИЭК, с точки зрения надежности закономерны. Это позволяет изучать их общими для любых технических средств методами. Экспоненциальные модели позволяют выполнить сравнительную оценку надежности различных схемных решений и выбрать наилучшую. Однако они не позволяют с необходимой для практики точностью получить ответ в виде числа. Трудность математического моделирования МИЭК обусловлена отсутствием достоверных экспериментальных данных о надежности, в частности, данных о законах распределения отказов и восстановления, а также невозможностью статических испытаний из-за экономических ограничений.

3. Не существует единственного критерия, достаточно полно характеризующего надежность МИЭК. Это объясняется его многофункциональностью. Все критерии надежности связаны между собой однозначными математическими зависимостями. Поэтому, задавая требования на множество критериев, в большинстве случаев обнаруживается их противоречивость и физическая нереализуемость. Для достижения заданной эффективности МИЭК необходимо гарантировать определенное значение вероятности безотказной работы, для обеспечения долговечности – среднее время безотказной работы.

4. Интегрированное исполнение компонента приводит к снижению интенсивности потока отказов в 1,5 раза, увеличению среднего времени работы компонента и времени безотказной работы с заданной вероятностью в 1,5 раза, увеличению вероятности безотказной работы на 9 %. Повышение надежности в МИЭК обеспечивается за счет уменьшения числа элементов, отсутствием дополнительных межэлементных и монтажных соединений, паек.

### **Список литературы**

1. Волков И.В., Закревский С.И., Пшеничный В.В. Гибридный элемент электрической цепи – индукон и его использование в качестве преобразователя источника напряжения в источник тока // Проблемы преобразовательной техники: тезисы докл. Всесоюзной научно-техн. конф.– Киев, 1983. – С. 125-128.
2. Волков И.В., Кубышин Б.Е., Милях А.Н. Индуктивно-емкостные преобразователи. – Киев: Наукова думка, 1964.
3. Конесев С.Г., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – С. 65-75.
4. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Мухаметшин А.В. Генератор импульсов напряжений / Патент России № 2477918. 2013. Бюл. № 8.
5. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Мухаметшин А.В., Садииков М.Р. Устройство заряда емкостного накопителя / Патент России № 117748. 2012. Бюл. № 18.
6. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Конесев И.С., Нурлыгаянов А.Р. Индуктивно-емкостной преобразователь / Патент России № 2450413. 2012. Бюл. № 13.
7. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Математическая модель односекционного многофункционального интегрированного компонента [Электронный ресурс] // Научный электронный архив. – URL: <http://econf.rae.ru/article/7908> (дата обращения: 10.10.2013).
8. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки параметров надежности сложных компонентов и систем [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал. – 2015. – № 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-17558> (дата обращения: 27.02.2015).
9. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Функциональная интеграция как техническое средство развития электромагнитных элементов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. – С. 135-138.

**Рецензенты:**

Гизатуллин Ф.А., д.т.н., профессор кафедры электромеханики ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа;

Сапельников В.М., д.т.н., профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.