

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 62.935.2

DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-4

А. С. Ишков, Р. А. Лемаев, Г. А. Солодимова

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ IGBT-МОДУЛЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются технические средства контроля, позволяющие проводить диагностику состояния изоляции композиционного материала путем регистрации частичных разрядов. Предметом исследования являются процессы появления электрических разрядов вблизи дефекта в диэлектрике, которые вызывают пробой изоляции и потерю работоспособности IGBT-модуля. Цель работы – разработка методики, которая позволяет проводить оценку технико-экономической эффективности средств измерения и контроля параметров изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей.

Материалы и методы. Рассмотрено применение нескольких методов качественного и количественного анализа для оценки эффективности различных средств контроля параметров изоляции композиционных материалов. Обосновано применение для решения задачи совокупности универсальных критериев: критерий среднего выигрыша, критерий Лапласа, критерий Вальда, критерий Гурвица, критерий Севиджа.

Результаты. Показано, что с целью повышения качества IGBT-модулей технически целесообразно проводить диагностику параметров изоляции композиционных материалов путем анализа характеристик частичных разрядов. Выявлено, что характеристики частичных разрядов достаточно хорошо коррелируют с размерами дефектов в диэлектрике, т.е. позволяют определять степень дефектности изоляционной конструкции. Определены оптимальные показатели качества средств контроля параметров изоляции композиционных материалов.

Выводы. Предложена методика, позволяющая оптимизировать выбор технического средства применительно к конкретным условиям его использования. Приведен пример расчета технико-экономической эффективности выбора средств контроля параметров изоляции с учетом различных критериев оценивания сложных систем, действующих в условиях неопределенности.

© Ишков А. С., Лемаев Р. А., Солодимова Г. А., 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Ключевые слова: сопротивление изоляции, частичные разряды, критерий Лапласа, критерий Севиджа.

A. S. Ishkov, R. A. Lemaev, G. A. Solodimova

IMPROVING THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF MEANS OF CONTROL OF ISOLATION PARAMETERS OF COMPOSITIONAL MATERIALS FOR IGBT-MODULES

Abstract.

Background. The research object is the technical means of control, allowing to diagnose the state of insulation of a composite material by registering partial discharges. The subject of the study is the processes of electric discharges occurrence near a defect in the dielectric, which cause a breakdown of insulation and loss of operability of the IGBT module. The purpose of the work is to develop a methodology that allows to evaluate the technical and economic efficiency of measuring instruments and controlling the insulation parameters of composite materials for IGBT modules.

Materials and methods. The application of several methods of qualitative and quantitative analysis to assess the effectiveness of various means of controlling the insulation parameters of composite materials is considered. The application of a set of universal criteria for the solution of the problem is justified: the average payoff criterion, the Laplace criterion, the Wald test, the Hurwitz criterion, the Savage criterion.

Results. It is shown that in order to improve the quality of IGBT modules it is technically feasible to diagnose the insulation parameters of composite materials by analyzing the characteristics of partial discharges. It has been revealed that the characteristics of partial discharges correlate quite well with the sizes of defects in the dielectric, i.e. allow to determine the degree of defectiveness of the insulating structure. The optimal quality indicators of means for controlling the insulation parameters of composite materials are determined.

Conclusions. A technique is proposed that allows you to optimize the choice of hardware in relation to the specific conditions of its use. An example is given of calculating the technical and economic efficiency of the choice of means for controlling isolation parameters, taking into account various evaluation criteria for complex systems operating in conditions of uncertainty.

Keywords: insulation resistance, partial discharges, Laplace criterion, Savage criterion.

Введение

Растущие требования по энергосбережению и резкий рост сектора возобновляемых источников энергии привели к росту спроса на изделия силовой электроники. К изделиям силовой электроники можно отнести мощные транзисторы, диоды, тиристоры и т.п., позволяющие переключать токи от 10 А и выше. Такие приборы широко используются в энергетике, станкостроении, железнодорожном транспорте, авиации, судостроении, военной технике. Особый интерес представляют IGBT-модули, реализующие в одном кристалле полевые и биполярные транзисторы, такие как схемы управления и активной защиты. IGBT-модули широко используются в качестве мощных электронных ключей, способных переключать токи до 2 кА при напряжении до 3,5 кВ при частотах до 70 кГц. На базе этих модулей строят частотно-

регулируемые приводы, являющиеся основными узлами ветрогенераторов и солнечных батарей.

Высокая тепловая нагрузка, присущая современным IGBT-модулям, ставит перед материаловедами задачу по разработке новых высокоэффективных материалов, не содержащих дефицитных и дорогих компонентов, с низким коэффициентом теплового расширения, высоким сопротивлением изоляции и другими теплофизическими характеристиками, совместимыми с полупроводниковыми материалами. Наиболее полно этим требованиям отвечают композиционные материалы, которые состоят, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жесткостью и т.д. Сочетание разнородных веществ позволяет получить новый материал, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим и электрическим свойствам.

Известно, что выбор средств измерений и контроля является одним из основных факторов, определяющим качество измерений. При выборе средства измерений необходимо учитывать номенклатуру измеряемых физических величин, реализуемый метод измерения, диапазон измерения, погрешность измерений, стоимость и срок службы средства измерений и контроля, сложность использования, условия окружающей среды при проведении измерений. Зачастую при выборе конкретного средства измерения и контроля вследствие отсутствия одного критерия их выбора приходится отдавать предпочтение одним факторам, а другие факторы учитывать в меньшей степени. В связи с этим необходима разработка методики, которая позволяет проводить оценку технико-экономической эффективности средств измерения и контроля параметров изоляции композиционных материалов.

1. Материал и методика

Качество изоляции изделий из композиционных материалов проверяется при проведении прямо-сдаточных испытаний путем воздействия на объект повышенным напряжением в объеме и нормах согласно [1, 2]. Однако такие испытания являются разрушающими методами контроля и позволяют выявить лишь факт соответствия или несоответствия изоляция установленным требованиям к кратковременной электрической прочности. В связи с этим целесообразно применение неразрушающих методов, которые обеспечивают контроль текущего состояния испытываемого изделия под рабочим напряжением в рабочих условиях эксплуатации. Широко применяемыми в промышленности методами неразрушающего контроля параметров изоляции являются:

1. Методы контроля электрических характеристик изоляции (сопротивление, емкость, тангенс угла диэлектрических потерь). Данные методы основаны на зависимости электрической прочности от наличия и величины в изоляции загрязняющих примесей.

2. Методы контроля физико-химических показателей, выделяющихся при разложении изоляции.

3. Методы температурного контроля с использованием термодатчиков или тепловизоров.

Методы контроля электрических характеристик являются наименее затратными с точки зрения стоимости проведения испытаний и используемого оборудования. Вторая группа методов требует использования достаточно дорогих газовых и массогабаритных хроматографов, к тому же анализ может проводиться только в специализированных физико-химических лабораториях. Третья группа методов основана на исследовании локальных температурных полей, возникающих вследствие перегрева, вызванного дефектами изоляции.

Особенность композиционных материалов заключается в существенной неоднородности их структуры, анизотропии свойств, большом разнообразии типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), наличии специфических физических свойств: высокое электроизоляционное качество, низкая теплопроводность, звукоизоляция, большой разброс физико-механических характеристик, малые значения плотности ($0,02-2,0 \text{ г/см}^3$).

Основными дефектами, влияющими на параметры изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей, являются воздушные и газовые включения. Газообразные включения в изоляции возникают из-за несовершенства технологии изготовления изделий (неполная пропитка, усадочные каверны) или образуются в процессе эксплуатации вследствие чрезмерно высоких механических воздействий (трещины, расслоения), местных разогревов (термическое разложение изоляции с выделением газа) и по другим причинам [3].

Если IGBT-модуль прошел приемосдаточные испытания, то необнаруженные (или не проявившиеся) при их проведении дефекты изоляции (которые практически всегда имеются), не вызывают пробой изоляции в нормальных рабочих условиях и потерю работоспособности изделия. Однако при дальнейшей эксплуатации изделия эти дефекты развиваются в связи с появлением сравнительно небольших электрических разрядов в зоне повышенной напряженности поля вблизи дефекта, которые называют частичными разрядами [1].

В связи с низким значением диэлектрической проницаемости воздуха напряженность поля в воздушной полости значительно превосходит среднюю напряженность поля в полости изоляции. Поэтому в воздушной полости уже при рабочем напряжении возникают ионизационные процессы – частичные разряды. Такой разряд вызывает импульс тока порядка $10^{-7}-10^{-8}$ с, снижение амплитуды рабочего напряжения и распространение в окружающее пространство электромагнитных волн частотой от 10 кГц до 100 МГц.

На рис. 1 представлено развитие во времени частичных разрядов при воздействии на изделие переменного напряжения.

После погасания разряда напряжение на воздушной полости начинает нарастать от значения $U_{\text{вп}}$ по кривой, соответствующей изменению приложенного напряжения, смещенной по вертикали на значение постоянной составляющей, возникшей в результате появления зарядов на поверхности воздушной полости. Когда напряжение на воздушной полости достигнет значения $U_{\text{вз}}$, процесс повторяется. Таким образом, разряды в композиционном материале с дефектом повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения [2]: $\Delta U = U_{\text{вз}} - U_{\text{вп}}$.

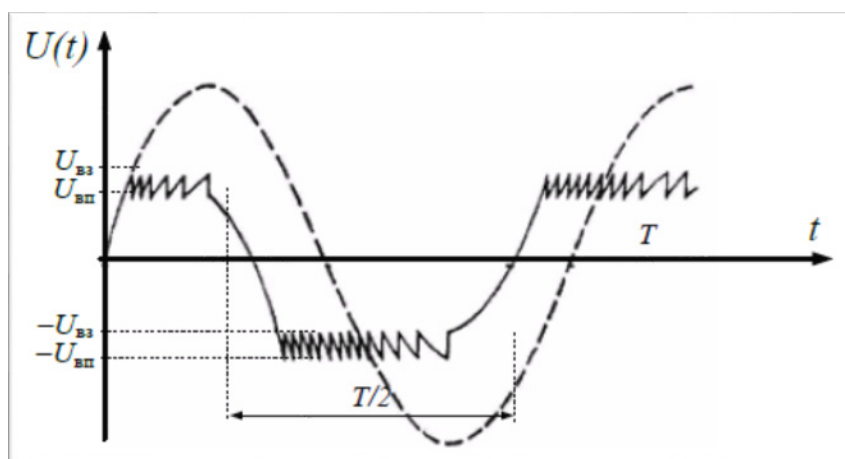


Рис. 1. Развитие частичных разрядов во времени

Под действием частичных разрядов происходит постепенный процесс разрушения изоляции композиционного материала, так как увеличивается размер полости дефекта и интенсивность частичных разрядов. Увеличение области дефекта в изоляционном материале влечет за собой процесс энерговыделения в его зоне, в результате разрушение изоляции ускоряется за счет термических процессов. Когда область дефекта в материале достигает достаточно больших размеров, становится возможным сквозной пробой изоляции. Таким образом, появление частичных разрядов свидетельствует о наличии дефекта изоляции, причем данный метод позволяет обнаружить наличие дефекта на самой ранней стадии его возникновения. Данный метод позволяет оценивать текущее состояние параметров изоляции и возможность дальнейшей эксплуатации IGBT-модулей.

2. Результаты

В настоящее время на отечественном рынке представлено несколько типов средств контроля, позволяющих проводить диагностику состояния изоляции путем регистрации частичных разрядов. По результатам анализа рынка средств измерения параметров частичных разрядов (ЧР) была составлена сводная табл. 1.

Процесс выбора средства измерения параметров частичных разрядов можно рассматривать как метрологическую систему, функционирующую в условиях неопределенности [4]. Неопределенность возникает в том случае, когда ситуация имеет несколько исходов и вероятность каждого исхода неизвестна. Зачастую при выборе конкретного средства измерения и контроля вследствие отсутствия одного критерия их выбора приходится отдавать предпочтение одним факторам, а другие факторы учитывать в меньшей степени. В связи с этим необходимо применение методов, которые позволяют проводить оценку эффективности выбора средств измерения и контроля, необходимых для решения поставленной задачи.

Любая сложная система характеризуется множеством факторов неопределенности: неопределенность внешней среды, неопределенность, связанная с характером, вариантами и моделью развития, неопределенность ха-

рактических элементов, составляющих данную систему их взаимоотношений, и т.д. Для оценки систем, действующих в условиях неопределенности, используются самые различные методы качественного и количественного анализа. К наиболее известным методам оценки следует в мировой практике отнести: метод сценариев, методы теории игр, метод дерева решений, имитационное моделирование по методу Монте-Карло [4].

Таблица 1
Показатели качества средств контроля параметров частичных разрядов

Тип	Диапазон измерения заряда, пКл	Диапазон измерения частоты следования ЧР, МГц	Длительность регистрируемых импульсов, мкс	Погрешность измерения ЧР, пКл, не более	Количество каналов регистрации	Связь с персональным компьютером	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Стоимость, тыс. руб.
ИЧР-201	1–10000	0,1–5	от 0,1	±10	3	RS-485	6	110//170//250	100
R2200	10–10000	0,1–10	от 0,07	±5	9	USB	14	260/250//80	300
PD-Analyzer-3	1–10000	0,1–30	от 0,03	±10	1	USB	10	220/160//45	120
HVPD Longshot	1–10000	0,1–30	от 0,03	±2	1	USB	7	292/399//131	500
HVPD Mini-Monitor	1–10000	0,1–30	от 0,03	±5	1	USB	10	520/280//175	500

Метод сценариев представляет собой ситуационный анализ при прогнозировании вероятности появления тех или иных событий как результата принятия решений в условиях неопределенности. Как правило, для решения проблемы создается несколько сценариев, в которых учитывается влияние разных факторов. Теория игр является математической теорией оптимального поведения в условиях конфликтной ситуации. Метод дерева решений использует модель разветвляющегося по каким-либо условиям процесса. Модель представляет собой графическое изображение связей основных и последующих вариантов управленческих решений. В ней приводятся сведения об основных результатах каждого решения и ожидаемой эффективности.

Метод имитационного моделирования Монте-Карло предполагает наличие математической модели какого-либо интересующего показателя, которая подвергается ряду расчетов с использованием исходных данных, которые являются неопределенными и потому в процессе анализа полагаются случайными величинами.

В настоящее время нет универсального метода, который позволяет решить задачу оценки эффективности выбора средства измерения для контроля

изоляции. Поэтому для решения данной задачи целесообразно применение совокупности универсальных критериев: критерий среднего выигрыша, критерий Лапласа, критерий Вальда, критерий Гурвица, критерий Севиджа [5].

Анализ технических параметров изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей показал, что средства контроля должны соответствовать показателям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные показатели качества средства контроля параметров изоляции композиционных материалов

Наименование технического показателя	Значение показателя
Диапазон измерений кажущегося заряда	от 1,0 пКл до 10000 пКл
Диапазон измерения частоты следования ЧР, МГц	от 0,1 до 5
Длительность регистрируемых импульсов, мкс	от 0,05
Погрешность измерения ЧР, пКл, не более	±5
Метод измерения	Электрический/ электромагнитный
Количество каналов регистрации	5
Связь с персональным компьютером	USB
Масса, кг	5
Габаритные размеры, мм	200/200/500
Стоимость, тыс. руб.	100,0

С целью оптимального выбора одного из приведенных в табл. 1 средств измерения параметров частичных разрядов авторами выполнена оценка их эффективности с учетом положений системного анализа. Для решения поставленной задачи будут поочередно использованы упомянутые выше критерии. Для применения критериев выбора составлена таблица эффективности (табл. 3).

Таблица 3

Таблица эффективности

a/K	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9
a_1	1,0	1	0,5	0,5	1	0,6	0	0,83	4,3
a_2	0,9	2	0,71	1	2	1,8	1	0,36	3,8
a_3	1,0	6	1,6	0,5	2	0,2	1	0,50	1,6
a_4	1,0	2	1,6	2,5	1	0,2	1	0,71	1,3
a_5	1,0	6	1,6	1	1	0,2	1	0,50	0,8

В табл. 3 параметром a_i является действительное значение технического показателя средства контроля, коэффициентом K_i является отношение желаемого значения технического показателя качества к действительному в случае, если действительное значение показателя меньше желаемого, и наоборот, если действительное значение показателя больше желаемого.

Оценка эффективности с помощью критерия среднего выигрыша. Данный критерий предполагает задание так называемых вероятностей состояния p_j . Эффективность оценивается как среднее ожидаемое значение оценок

эффективности по всем возможным вариантам [5]: $K(a_i) = \sum_{j=1}^t p_j k_{ij}$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, t$. Оптимальный вариант выбора тот, у которого максимальное значение эффективности [5]: $K_{\text{опт}}(a_i) = \max_i \sum_{j=1}^t p_j k_{ij}$. Пусть вероятности для рассматриваемого случая составляют: $p_1 = 0,2$; $p_2 = 0,1$; $p_3 = 0,2$; $p_4 = 0,3$; $p_5 = 0,05$. Тогда таблица эффективности примет вид табл. 4.

Таблица 4

Оценивание по критерию среднего выигрыша

a/K	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}	$K(a_i)$
a_1	1,00	1	2	1	1,00	0,625	2,5	1,8	1	1,00	1	1,21
a_2	0,83	0	0,1	0	0,57	1	0,5	1,2	0	1,25	1	0,73
a_3	1,25	0	0,1	0	0,71	1	0,5	1,2	0	1,25	1	0,94
a_4	1,00	0	1	0	0,71	1	0,5	1,2	0	1,05	1	0,89
a_5	0,83	0	1	1	0,86	0,625	1	1,2	0	0,83	1	0,83
P	0,5	0,05	0,1	0,01	0,02	0,01	0,05	0,05	0,03	0,08	0,1	

Анализ табл. 4 показывает, что по техническим параметрам лучшими показателями качества обладает прибор с показателем $K(a_i) = 1,21$, стоящий на первой позиции в табл. 1.

Оценка технико-экономической эффективности средств контроля с помощью критерия Лапласа. В основе оценки эффективности выбора по критерию Лапласа лежит предположение, что если о состоянии системы ничего неизвестно, то все события можно считать равновероятными [5]:

$$K(a_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^t k_{ij}.$$

Критерий эффективности для оптимальной системы определяется по следующей формуле [5]:

$$K_{\text{опт}}(a_i) = \max_i \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^t p_j k_{ij} \right).$$

Пусть все события равновероятны, тогда среднее ее значение составит $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = 1/6 = 0,17$. Значение эффективности выбора равны: $K(a_1) = 2,32$, $K(a_2) = 1,08$, $K(a_3) = 1,17$, $K(a_4) = 1,24$, $K(a_5) = 1,39$. Анализ эффективности по критерию Лапласа показал, что оптимальным вариантом выбора является первый прибор в табл. 1 со значением $K(a_1) = 2,32$.

Оценка эффективности средств контроля с помощью критерия Вальда, который гарантирует определенный положительный результат при худших условиях. Критерий ориентирован на достижение минимального значения положительного эффекта. В каждой строке таблицы эффективности находится минимальное значение эффективности [5]: $K(a_i) = \min_j k_{ij}$. Оптимальным вариантом выбора считается строка с максимальным значением эф-

эффективности [5]: $K_{\text{опт}} = \max_i (\min_j k_{ij})$. Применение критерия Вальда для рассматриваемой задачи дает следующие оценки эффективности: $K(a_1) = 0,625$, $K(a_2) = 0$, $K(a_3) = 0$, $K(a_4) = 0$, $K(a_5) = 0$. Оптимальным выбором по данному критерию является первый прибор в табл. 1, так как $K(a_1) = 0,625$.

Оценка эффективности выбора с помощью критерия максимакса, согласно которому процесс выбора происходит по максимальному значению эффективности $K(a_i)$: $K(a_i) = \max(k_{ij})$. Результаты оценок средств контроля на основе максимаксного критерия: $K(a_1) = 2,5$, $K(a_2) = 1,25$, $K(a_3) = 1,25$, $K(a_4) = 1,2$, $K(a_5) = 1,2$. Оптимальным вариантом выбора является прибор № 1.

Анализ эффективности выбора с помощью критерия Гурвица. При его использовании для каждой ситуации определяется «взвешенный» результат путем учета как отрицательного, так и положительного результатов. Вес каждого определяется так называемыми коэффициентами оптимизма α , при этом $0 \leq \alpha \leq 1$. Эффективность выбора определяется как взвешенная сумма максимальной и минимальной оценок [5]: $K(a_i) = \alpha \max_j k_{ij} + (1 - \alpha) \min_j k_{ij}$. Условие оптимальности записывается в следующем виде [5]:

$$K_{\text{опт}}(a_i) = \max_i (\alpha \max_j k_{ij} + (1 - \alpha) \min_j k_{ij}).$$

Пусть коэффициент оптимизма $\alpha = 0,5$, тогда значения эффективности равны: $K(a_1) = 1,56$, $K(a_2) = 0,625$, $K(a_3) = 0,625$, $K(a_4) = 0,6$, $K(a_5) = 0,6$, следовательно, оптимальным вариантом выбора является прибор № 1.

Оценка эффективности системы в соответствии с критерием Сэвиджа. Критерий Сэвиджа минимизирует потери эффективности при наихудших условиях. Для проведения оценки таблица эффективности должна быть преобразована в таблицу риска (табл. 5). Каждый элемент таблицы риска определяется как разность между максимальным и текущим значениями оценок эффективности в столбце [5]: $\Delta k_{ij} = \max_i k_{ij} - k_{ij}$. После преобразования таблицы проводится расчет оптимального значения [5]:

$$K_{\text{опт}} = \min_i (\max_j \Delta k_{ij}).$$

Таблица 5

Таблица риска

a/K	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
a_1	0,25	0	0	0	1,00	0,375	2,5	0	0	0,25	0
a_2	0,42	1	0,9	1	0,43	0	2,0	0,6	1	0	0
a_3	0	1	0,9	1	0,29	0	2,0	0,6	1	0	0
a_4	0,25	1	1	1	0,29	0	2,0	0,6	1	0,2	0
a_5	0,42	1	1	0	0,14	0,375	1,5	0,6	1	0,42	0

Значения эффективности равны: $K(a_1) = 2,5$, $K(a_2) = 2,0$, $K(a_3) = 2,0$, $K(a_4) = 2,0$, $K(a_5) = 1,5$, следовательно, оптимальным вариантом выбора является прибор № 5.

Кроме использования критериев эффективности, также целесообразно выполнить анализ эффективности с учетом цены приборов. С этой целью

составлена таблица эффективности с учетом цены прибора. Коэффициент эффективности (табл. 6) вычисляется по формуле [5]:

$$K_{эi} = \frac{C_{\text{опт}}}{K(a_i)C_i},$$

где C_i – рыночная цена прибора; $C_{\text{опт}}$ – оптимальная для потребителя цена ($C_{\text{опт}} = 10,0$ тыс. руб.). Полученные результаты сведены в табл. 6.

Таблица 6

Оценивание технико-экономической эффективности

a_i	Рыночная цена прибора	$K(a_i)$	$Kэ$
a_1	10,0	1,21	0,83
a_2	3,0	0,73	4,55
a_3	2,0	0,94	5,30
a_4	4,0	0,89	2,80
a_5	5,0	0,83	2,42

Анализ данных табл. 6 показывает, что с учетом цены лучшими экономическими показателями обладает прибор с показателем $K_{э3} = 5,3$. Данный прибор имеет самую низкую цену при относительно хороших технических показателях качества.

3. Обсуждение

Результаты оценивания средств измерения параметров частичных рядов сведены в табл. 7, анализ показателей которой показал, что согласно большинству критериев выбор прибора ИЧР-201 является наиболее оптимальным.

Таблица 7

Результаты оценивания показателей качества средств измерения параметров частичных рядов

Тип прибора	Значения эффективности $K(a_i)$ по критериям						
	среднего выигрыша	технико-экономический	Лапласа	Вальда	Максима	Гурвица	Сэвиджа
ИЧР-201	1,21	0,83	2,32	0,625	2,5	1,56	2,5
R2200	0,73	4,55	1,08	0	1,25	0,625	2,0
PD-Analyzer-3	0,94	5,3	1,17	0	1,25	0,625	2,0
HVPD Longshot	0,89	2,8	1,24	0	1,2	0,6	2,0
HVPD Mini-Monitor	0,83	2,42	1,39	0	1,2	0,6	1,5

Заключение

Таким образом, предложенная методика позволяет не упустить при рассмотрении требуемые характеристики средства измерения и оптимизировать его выбор применительно к конкретным условиям использования.

Библиографический список

1. **Вдовико, В. П.** Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. – Новосибирск : Наука, 2007. – 155 с.
2. **Андреев, А. М.** Частичные разряды и методы их измерения / А. М. Андреев, А. Е. Монастырский, Ю. В. Соловьев, А. И. Таджикибаев ; под ред. А. И. Таджикибаева. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2010. – 48 с.
3. **Ишков, А. С.** Исследование влияния отказа на техническое состояние изделий электронной техники / А. С. Ишков, Г. А. Солодимова, П. А. Блинков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 69–71.
4. **Емельянов, А. А.** Имитационное моделирование в управлении рисками / А. А. Емельянов. – Санкт-Петербург : Инжэкон, 2000. – 376 с.
5. **Анфилатов, В. С.** Системный анализ в управлении / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин ; под ред. А. А. Емельянова. – Москва : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

References

1. Vdoviko V. P. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Partial discharges in diagnosing high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka, 2007, 155 p. [In Russian]
2. Andreev A. M., Monastyrskiy A. E., Solov'ev Yu. V., Tadzhibaev A. I. *Chastichnye razryady i metody ikh izmereniya* [Partial discharges and methods of their measurement]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2010, 48 p. [In Russian]
3. Ishkov A. S., Solodimova G. A., Blinkov P. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an international symposium Reliability and Quality]. 2018, no. 2, pp. 69–71. [In Russian]
4. Emel'yanov A. A. *Imitatsionnoe modelirovanie v upravlenii riskami* [Simulation in risk management]. Saint-Petersburg: Inzhekon, 2000, 376 p. [In Russian]
5. Anfilatov V. S., Emel'yanov A. A., Kukushkin A. A. *Sistemnyy analiz v upravlenii* [System analysis in management]. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 368 p. [In Russian]

Ишков Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ishkovanton@mail.ru

Ishkov Anton Sergeevich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department of radio
engineering and radio electronic systems,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Лемаев Роман Андреевич

кандидат технических наук, начальник
отдела метрологии, Научно-
производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: lemaev@ro.ru

Lemaev Roman Andreevich

Candidate of engineering sciences,
chief metrologist, «SPE «Rubin»
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Солодимова Галина Анатольевна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: solodimova@mail.ru

Solodimova Galina Anatol'evna
Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of information-measuring equipment
and metrology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ишков, А. С. Повышение технико-экономической эффективности средств контроля параметров изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей / А. С. Ишков, Р. А. Лемаев, Г. А. Солодимова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 51–62. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-4.