

УДК 658.562.001.7

**ОЦЕНКА ИСПРАВНОСТИ БЛОКА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

© 2025 В.О. Кушнарев

АО «Ульяновский механический завод», г. Ульяновск, Россия
Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 12.09.2025

Качество работы радиолокационной аппаратуры в системе воздушно-космической обороны зависит от функционирования блока усилителя мощности. Возможные состояния этого блока могут быть разделены на три класса: хорошее, удовлетворительное или неудовлетворительное (аппаратура непригодна к эксплуатации). При различных частотах работы блока его состояние исправности может существенно отличаться, поэтому оценка состояния проводилась в трех точках частотного диапазона – нижней, средней и верхней. Это задача классификации, которая решается с применением методов машинного обучения. Особенность рассматриваемой выборки – небольшой объем и несбалансированность данных. Классификация состояний блока усилителя мощности, проведенная четырьмя методами (нейронная сеть, градиентный бустинг, случайный лес и метод опорных векторов) с оптимизацией гиперпараметров модифицированным сеточным методом, показала, что по критерию максимума F-меры наилучшим для всех трех уровней частот оказался градиентный бустинг. Полученный результат можно считать удовлетворительным.

Ключевые слова: блок усилителя мощности, клистрон, классификация состояний, машинное обучение, гиперпараметры

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-422-429

EDN: WKCVFZ

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы радиолокационной аппаратуры в системе воздушно-космической обороны существенно зависит от качества функционирования блока усилителя мощности [1-2]. Возможные состояния этого блока с точки зрения его исправности могут быть разделены на три класса: хорошее (обеспечивает стабильную работу радиолокационной аппаратуры), удовлетворительное (обеспечивает работоспособность блока в рамках технических условий, однако при эксплуатации может привести к нестабильной работе: потере дальности обнаружения и захвату целей радиолокационной станцией) или неудовлетворительное (аппаратура непригодна к эксплуатации).

Состояние блока определяется характеристиками клистрона - электровакуумного прибора сверхвысоких частот, служащего для преобразования, усиления, генерации электромагнитной энергии. Анализ влияния характеристик клистрона на качество функционирования блока усилителя мощности исследовалось многими авторами [3-7], однако надежных методов оценки исправности блока в настоящее время нет.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Электровакуумные приборы сверхвысокой частоты (СВЧ) играют ключевую роль в современных радиотехнических системах, включая радиолокацию, связь и медицинскую технику. Их эффективность во многом определяется множеством характеристик, таких как импульсный ток катода, напряжение накала, ток накала и другие параметры. Все эти характеристики влияют на выходную мощность блока усиления мощности, в котором они применяются.

Импульсный ток катода X_1 в клистроне (рис. 1-2) является одним из ключевых параметров, определяющих количество электронов, выбрасываемых катодом в вакуум. Более высокий импульсный ток катода может привести к увеличению числа доступных электронов для генерации СВЧ-колебаний, что в свою очередь может повысить выходную мощность блока усиления.

Кушнарев Василий Олегович, аспирант НОЦ ВКО «Алмаз-Антей», заместитель начальника управления производства АО «Ульяновский механический завод», старший преподаватель кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. E-mail: kushnarev1989@list.ru

Напряжение и ток накала (X_2, X_3) обеспечивают необходимую температуру катода для эффективной эмиссии электронов. Оптимальные значения этих параметров способствуют стабильной работе прибора и его высокой производительности. Неправильные значения могут привести к недостаточной эмиссии и, как следствие, к снижению выходной мощности.

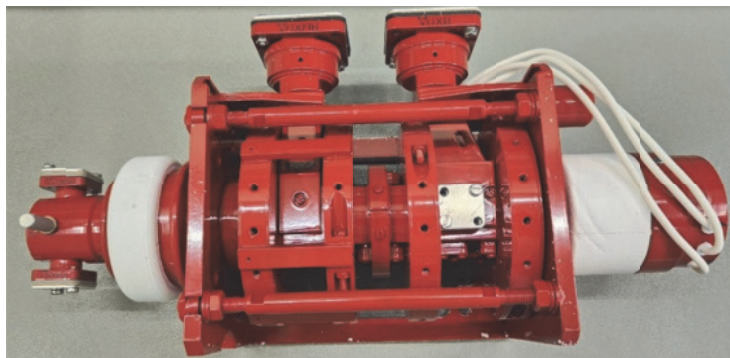


Рис. 1. Клистрон

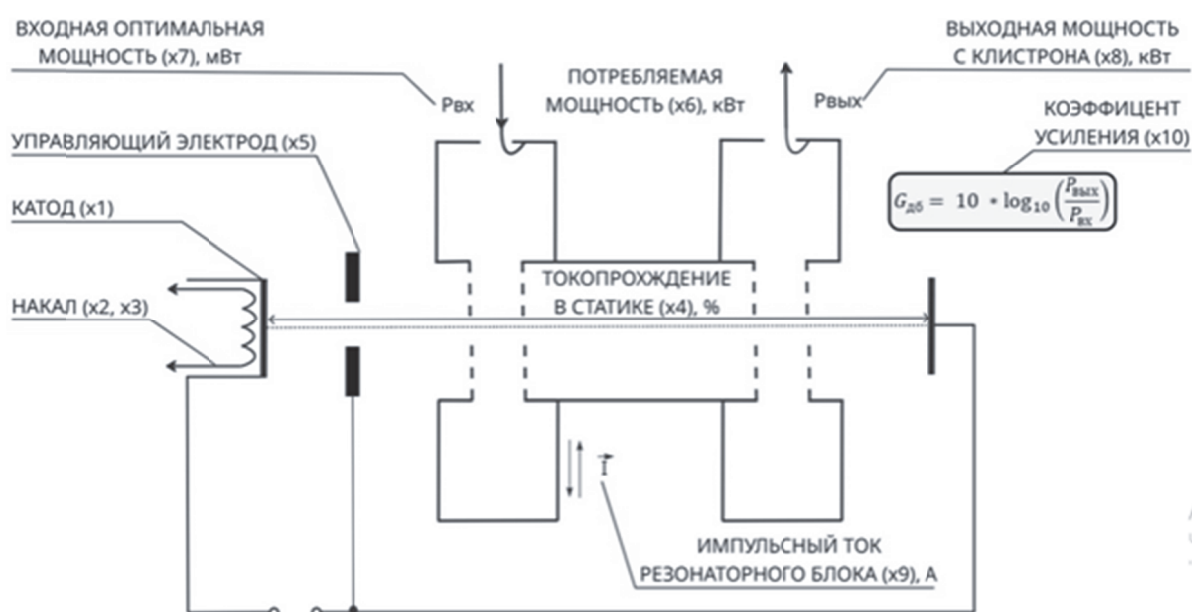


Рис. 2. Схема клистрона и его характеристики

Токопрохождение в статике X_4 характеризует эффективность передачи тока через прибор при отсутствии сигналов. Высокий процент токопрохождения указывает на низкие потери энергии и высокую эффективность работы прибора, что напрямую связано с выходной мощностью блока усиления. Это важно для достижения максимальной выходной мощности блока усиления. Низкий уровень токопрохождения может привести к потерям и снижению общей эффективности устройства.

Ток управляющего электрода X_5 отвечает за регулирование потока электронов в клистроне. При увеличении тока управляющего электрода происходит увеличение числа электронов, которые могут быть модулированы. Это может привести к повышению выходной мощности, так как большее количество электронов может взаимодействовать с резонатором и усиливать сигнал. Если ток управляющего электрода слишком высок, это может привести к перегрузке клистрона, что вызывает искажения в выходном сигнале и может снизить общую выходную мощность. Для достижения максимальной выходной мощности необходимо найти оптимальное значение тока управляющего электрода. Это значение должно обеспечивать достаточную эмиссию электронов без перегрузки устройства.

Потребляемая мощность X_6 отражает общую энергию, которую клистрон требует для своей работы. Эффективные клистроны имеют высокий коэффициент полезного действия, что позволяет уменьшить потребляемую мощность при высокой выходной мощности. Понимание работы этого параметра помогает инженерам проектировать более эффективные системы усиления.

Входная оптимальная мощность X_7 — это мощность, необходимая для достижения максимального коэффициента усиления и стабильности работы клистрона. Если входная мощность недоста-

точна, это может привести к снижению выходной мощности. Оптимальная входная мощность обеспечивает эффективное преобразование сигнала и максимальную выходную мощность.

Выходная мощность с клистрона X_8 — это конечный параметр, который интересует инженеров при проектировании блоков усиления. Она зависит от всех вышеперечисленных характеристик и является показателем эффективности работы клистрона в системе. Высокая выходная мощность делает клистрон идеальным выбором для применения в мощных радиочастотных системах.

Импульсный ток резонаторного блока X_9 влияет на резонансные свойства устройства для поддержания необходимых колебаний на заданной частоте. Этот параметр влияет на качество выходного сигнала и его стабильность.

Коэффициент усиления X_{10} — это отношение выходной мощности к входной мощности. Он показывает, насколько эффективно устройство усиливает сигнал и напрямую связан с выходной мощностью блока усиления. Высокий коэффициент усиления является важным показателем для оценки производительности клистрона.

Все перечисленные характеристики взаимосвязаны и влияют на выходную мощность блока усиления мощности. Например, увеличение импульсного тока катода и оптимизация напряжения накала могут привести к росту выхода мощности клистрона. Аналогично, правильная настройка тока управляющего электрода может значительно повысить коэффициент усиления устройства.

Важно отметить, что каждая характеристика должна быть сбалансирована с другими для достижения максимальной производительности. Например, слишком высокий импульсный ток катода может привести к перегреву и снижению долговечности прибора, что в конечном итоге негативно скажется на выходной мощности.

Понимание этих взаимосвязей позволяет инженерам и разработчикам оптимизировать работу блоков усиления мощности и достигать высоких показателей производительности. Важно проводить комплексные исследования и тестирования для нахождения оптимальных значений всех ключевых параметров, что позволит максимально использовать потенциал СВЧ-технологий в различных областях применения.

В таблице 1 показаны характеристики клистрона, которые приводятся в паспорте каждого клистрона, поставляемого на предприятие и оцениваемые по результатам испытаний.

Таблица 1. Характеристики клистрона

Обозначение	Наименование	Единицы измерения	Допуск
x1	импульсный ток катода	А	8,5–10,5
x2	напряжение накала	В	10–12,6
x3	ток накала	А	3–5,5
x4	токопрохождение в статике	%	-
x5	ток управляющего электрода	мА	не более 30
x6	потребляемая мощность	кВт	до 12
x7	мощность входная	мВт	120–750
x8	выходная мощность клистрона	кВт	18 - 40
x9	импульсный ток резонаторного блока	А	до 2
x10	коэффициент усиления		-

При различных частотах работы блока усилителя мощности его состояние может существенно отличаться [8-9], поэтому оценка состояния проводилась в трех точках частотного диапазона – нижней (н), средней (с) и верхней (в) (рис. 3).

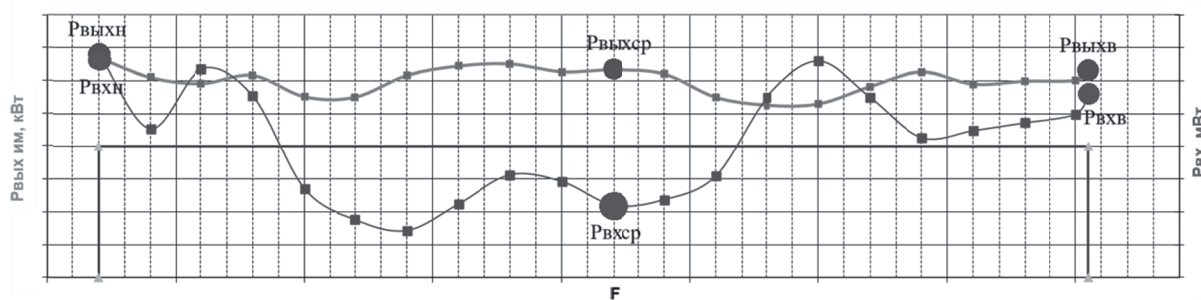


Рис. 3. Графики зависимости выходной мощности с клистрона и входной мощности от частоты

Возможные состояния блока усилителя были разделены на три класса для каждого значения частот (Z_H, Z_C, Z_B): $Z = 1$ – хорошее; $Z = 2$ – удовлетворительное; $Z = 3$ – неудовлетворительное.

Это задача классификации, которая решается с применением методов машинного обучения с учителем (при наличии обучающей выборки).

В таблице 2 показана часть обучающей выборки (всего получено 100 результатов наблюдений). Характеристики клистрона $X_1 - X_{10}$ оценивались по результатам испытаний. Исправность блока зависит также от напряжения питания U по высоковольтной линии и температуре T внешнего воздействия, которые, как и параметры клистрона, оценивались опытным путем.

Состояние блока (Z_H, Z_C, Z_B) оценивалось экспертами - инженерами-испытателями динамического отдела испытаний электровакуумных прибора сверхвысоких частот – специалистами в области разработки и эксплуатации радиолокационной аппаратуры.

Таблица 2. Обучающая выборка

№	Z_H	Z_C	Z_B	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	U	T
...															
13	2	1	1	9,7	11,5	4,4	89,8	2	10,1	310	34	1,2	50,4	10,2	73,3
14	1	1	2	9,2	11,8	4,6	87,8	2	9,7	345	33	1,2	49,8	10,8	65,9
15	3	2	2	8,9	11,0	4,1	90,6	2	9,4	302	25	0,8	49,1	10,2	84,7
16	1	1	1	9,0	12,6	4,5	88,0	0,3	8,3	311	29	1,2	49,8	10,8	70,2
17	1	2	1	9,2	10,6	4,2	88,5	2,5	9,7	458	35	1,2	48,8	10,8	74,9
18	1	1	2	9,4	12,6	4,6	90,5	2	9,9	376	34	1,1	49,5	10,3	69,7
19	1	3	1	9,2	10,8	4,0	93,1	2	9,7	474	30	0,6	48,0	10,6	78,6
...															

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решение задачи классификации проводится с применением методов машинного обучения. Особенность рассматриваемой выборки – небольшой объем и несбалансированность данных. При достаточно большом наборе наблюдений лучший результат дает применение нейронной сети [10]. При небольшом объеме данных имеет смысл опробовать несколько методов. Наиболее полезными в задачах классификации, наряду с нейронной сетью, являются градиентный бустинг, случайный лес и метод опорных векторов [11-14].

Для решения задачи было разработано специальное программное обеспечение. Программа должна обеспечивать разделение исходной выборки на обучающую и тестовую части, оценку гиперпараметров соответствующих моделей, а также вывод значений характеристик качества моделей классификации. Для несбалансированной выборки основной характеристикой качества является F-мера [13] - это среднее гармоническое между точностью (precision) и полнотой (recall):

$$F = 2 * \frac{precision * recall}{precision + recall}.$$

Наилучшая модель классификации ищется по максимуму значения этой меры, лежащему в диапазоне от 0 до 1.

Другая особенность рассматриваемого набора данных заключается в том, что классы сильно несбалансированы: значений $Z = 2$ (состояние блока удовлетворительное) и $Z = 3$ (состояние неудовлетворительное) гораздо меньше, чем $Z = 1$ (состояние хорошее). Такая ситуация характерна для большинства задач технической диагностики. Один из способов решить проблему дисбаланса – метод SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Techniques). Основная идея этого метода состоит в увеличении объема малого класса за счёт выбора нового объекта из k ближайших соседей [15].

Алгоритм предлагаемого метода оценки состояния блока усилителя мощности радиоэлектронной аппаратуры:

- вводится обучающая выборка, полученная по результатам испытаний;
- проводится предварительная обработка данных, в частности, стандартизация и балансировка;
- выборка делится на обучающую и тестовую части;
- на обучающей части строится математическая модель классификации с применением четырех методов (нейронная сеть, градиентный бустинг, случайный лес и метод опорных векторов);
- для подбора гиперпараметров моделей обучающая часть делится на блоки, один из которых – валидационный, остальные предназначены непосредственно для обучения;
- проводится кросс-валидация с оценкой гиперпараметров различными методами (сеточный метод, случайный поиск, байесовское оценивание);

- по тестовой выборке (не использованной для построения модели) оценивается качество полученных моделей по значению F-меры и выбирается наилучший метод;

- полученная наилучшая модель используется для оценивания состояния блока усилителя мощности по заданным характеристикам поступившего на предприятие клистрона, с учетом напряжения питания и температуры внешнего воздействия в трех точках частотного диапазона. Эта модель также применима для прогнозирования состояния блока при новых (предполагаемых) значениях этих характеристик.

Качество модели классификации существенно зависит от гиперпараметров модели [16-21]. Например, гиперпараметры случайного леса могут включать:

- количество деревьев: определяет, сколько деревьев будет построено в ансамбле;
- максимальная глубина дерева: ограничивает, насколько глубоко может расти каждое дерево;
- минимальное количество наблюдений для разделения узла;
- минимальное количество наблюдений в конечном узле (листе) дерева, и другие.

Использование трех наиболее распространенных подходов к оценке гиперпараметров - сеточного метода, случайного поиска и байесовского оценивания - не обеспечило необходимой точности расчетов. В связи с этим была предложена модификация сеточного метода.

Метод модифицированного сеточного перебора предполагает вначале поиск количественных значений гиперпараметров по сетке с большими ячейками, затем выбираются несколько наилучших точек (несколько точек необходимо для того, чтобы исключить локальный экстремум). В окрестностях этих точек ведется свой поиск по сеткам с меньшими ячейками. Такой подход обеспечил не только повышение точности модели в среднем на 8%, но и существенно сократил время вычислений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Классификация состояний блока усилителя мощности, проведенная четырьмя методами (нейронная сеть, градиентный бустинг, случайный лес и метод опорных векторов) с оптимизацией гиперпараметров модифицированным сеточным методом, показала, что по критерию максимума F-меры наилучшим для всех трех уровней частот оказался градиентный бустинг.

Значения F-меры в трех точках частотного диапазона

- нижней: $F = 0,84$,
- средней: $F = 0,93$,
- верхней: $F = 0,89$.

Полученный результат можно считать удовлетворительным.

При этом лучшими гиперпараметрами, градиентного бустинга, например, для Zc оказались:

'n_estimators = 66' (количество деревьев в ансамбле),

'learning_rate = 0,3' (скорость обучения),

'max_depth = 6' (глубина деревьев),

'subsample = 0,7' (доля выборки, используемая при обучении каждого дерева),

'colsample_bytree = 0,7' (доля признаков, используемых при построении дерева),

'min_child_weight = 5' (контролирует, насколько легко дерево может "разветвляться": чем выше значение, тем менее склонна модель к переобучению),

'reg_lambda = 1', 'reg_alpha = 1' (параметры регуляризации).

Более полно результаты исследования по четырем использованным методам представлены на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к оценке и прогнозированию состояния исправности блока усилителя мощности обеспечит повышение качества работы радиолокационной аппаратуры в системе воздушно-космической обороны: стабильную работу системы при хорошем состоянии блока, удовлетворительное состояние блока обеспечивает работоспособность блока в рамках технических условий, однако при эксплуатации может привести к потере дальности обнаружения и захвату целей радиолокационной станцией, при прогнозе неудовлетворительного состояния блока аппаратура непригодна к эксплуатации.

Следует отметить, что все четыре метода, использованные для решения задачи дали близкие результаты: расхождение по F-мере для нижней точки частотного диапазона составило $(0,84 - 0,74) / 0,84 * 100\% = 12\%$, по средней точке - 6%, по верхней - 13%. Из этого следует, что при проведении исследования целесообразно применение всех четырех методов: для конкретных данных заранее

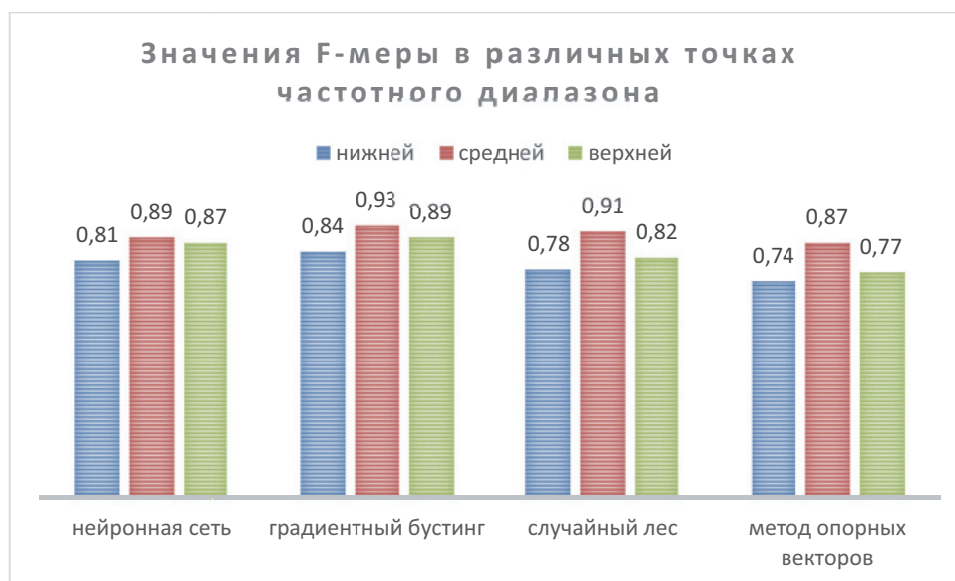


Рис. 4. Диаграмма качества классификации различными методами

сказать, какой из них обеспечит лучший результат, нельзя. Заметим также, что предложенная в работе модификация сеточного метода обеспечила существенное повышение качества классификации (в среднем на 8%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрейдович, И.А. Перспективы развития многолучевых клистронов / Фрейдович И.А., Балабанов А.К., Акимов П.И. и др. // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. С-Петербург, 2014. – СПб, 2014.
2. Калачев, А.Д. Пути повышения комплекса выходных параметров миниатюрного многолучевого клистрона Ку-диапазона // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург. 29 мая - 2 июня 2023 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023.
3. Боев, С.Ф. Современное состояние и направления совершенствования систем технического обслуживания комплексов специального назначения, ведущих зарубежных военно-промышленных компаний / С.Ф. Боев, А.А. Рахманов. – М., 2019. – 29 с
4. Борисов, А.А. Электровакуумные усилители СВЧ, выпускаемые АО «НПП Исток» им. Шокина / А.А. Борисов, С.В. Щербаков, А.С. Котов, П.М. Мелешкевич, А.Д. Закурдаев, М.С. Востров, Е.В. Жарый, В.И. Пугнин, К.Г. Симонов, Б.В. Сазонов, Т.И. Полянская, Е.А. Стройков, А.Н. Юнаков, С.В. Евсеев. // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы VI общероссийской научно-технической конференции. Омск, 19-20 апреля 2016 г. – Омск, 2016.
5. Борисов, Л. Мощные и сверхмощные СВЧ-источники: от клистронов до нового класса приборов / Л. Борисов, Г. Щелкунов // Электроника: наука, технологии, бизнес. – 2012. – № 4(00118). – С.102-106.
6. Крючков, В.Л. Обеспечение качества проектирования и производства твердотельных усилителей мощности передатчиков РЛС на основе метода преобразований эвристических моделей : автореф. дисс. канд. техн. наук : 05.02.23 / Крючков Василий Леонидович; [Место защиты: Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики]. – М., 2011. – 24 с.
7. Юнаков, А.Н. Исследование и разработка широкополосных многолучевых клистронов с выходной средней мощностью более 10кВт и низковольтным управлением на пространственно-развитых резонаторах в средней части сантиметрового диапазона длин волн. автореф. дисс. канд. техн. наук : 05.27.02 / Юнаков Алексей Николаевич; [Место защиты: «НПП Исток»]. – Фрязино, 2011. – 24 с.
8. Кушнарев, В.О. Повышение эффективности радиолокационной аппаратуры на основе прогнозирования качества функционирования блока усилителя мощности / В.О. Кушнарев, В.Н. Клячкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 8. – С. 33-39.
9. Кушнарев, В.О. Обеспечение качества функционирования блока усилителя мощности передающего устройства РЛС / В.О. Кушнарев, А.Б. Климовский // Вестник УлГТУ. – 2023. – № 4(104). – С. 56–61.
10. R. Liu, Q. Zhang, D. Lin, W. Zhang and S. X. Ding. Causal Disentangled Graph Neural Network for Fault Diagnosis of Complex Industrial Process // IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, vol. 21, no. 1. pp. 386-395.
11. Клячкин, В.Н. Статистические методы анализа данных / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, В.А. Алексеева. – М.: Финансы и статистика, 2016. – 240 с.
12. Kovalnogov V., Fedorov R., Klyachkin V., Generalov D., Kuvayskova Y., Busygin S. Applying the Random Forest Method to Improve Burner Efficiency // Mathematics. 2022. T. 10. № 12.
13. Клячкин, В.Н. Применение методов машинного обучения при решении задач технической диагностики /

- В.Н. Клячкин, И.Н. Карпунина, Ю.Е. Кувайскова, А.С. Хорева // Научный вестник УИ ГА. – 2016. – № 8. – С. 158-161.
14. Fernandez-Delgado M., Cernadas E., Barro S. Do we Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classification Problems? *The Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol.15, pp. 3133–3181.
 15. Дьяконов, А. Методы борьбы с дисбалансом классов в машинном обучении [Электронный ресурс] / А. Дьяконов // Блог Александра Дьяконова. – 2021. – URL: <https://alexanderdyakonov.wordpress.com/2021/05/27/imbalance/> (дата обращения 14.08.2025).
 16. Данилов, В.В. Алгоритм выбора оптимальных значений гиперпараметров нейронных сетей на основе критерия Стьюдента / В.В. Данилов // *Cloud of Science*, 2020. – Т. 7. – №1. – С.165-179.
 17. Первун, О.Е. Реализация настройки гиперпараметров моделей случайного леса методом байесовского оценивания / О.Е. Первун // *Перспективы науки*. – 2020. – № 9(132). – С. 11-13.
 18. Zebin Yang, Aijun Zhang. Hyperparameter Optimization via Sequential Uniform Designs // *Journal of Machine Learning Research*, 2021, (22), (149). Pp. 1-47
 19. Auto-WEKA: Combined Selection and Hyperparameter Optimization of Classification Algorithms. C. Thornton, F. Hutter, H.H. Hoos, K. Leyton-Brown. // *Proc. of 19th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pp 847–855.
 20. F. Hutter, H. H. Hoos, K. Leyton-Brown. Sequential Model-Based Optimization for General Algorithm Configuration. // *Learning and Intelligent Optimization*. 2011. *Lecture Notes on Computer Science*. Vol. 6683. Springer, 2011. pp. 507–523.
 21. AMLB: an AutoML Benchmark. P. Gijbbers, M.L.P. Bueno, S. Coors, E. LeDell, S. Poirier, J. Thomas, B. Bischl and J. Vanschoren // *Journal of Machine Learning Research*. 2024. Vol. 25. pp. 1–65.

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE POWER AMPLIFIER UNIT FUNCTIONING IN RADAR EQUIPMENT

© 2025 V.O. Kushnarev

Ulyanovsk Mechanical Plant JSC, Ulyanovsk State Technical University

The quality of radar equipment in the aerospace defense system depends on the functioning of the power amplifier unit. Possible states of this unit can be divided into three classes: good, satisfactory or unsatisfactory (the equipment is unfit for operation). At different frequencies of the unit's operation, its condition can differ significantly, so the condition was assessed at three points of the frequency range - lower, middle and upper classification that can be solved using machine learning methods. The peculiarity of the sample under consideration is the small volume and imbalance of data. Classification of the states of the power amplifier unit carried out by four methods (neural network, gradient boosting, random forest, and support vector method) with hyperparameter optimization by a modified grid method showed that gradient boosting turned out to be the best for all three frequency levels according to the F-measure maximum criterion. The result obtained can be considered satisfactory.

Keywords: power amplifier unit, klystron, state classification, machine learning, hyperparameters

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-422-429

EDN: WKCVFZ

REFERENCES

1. *Frejdovich, I.A.* Perspektivy razvitiya mnogoluchevykh klistronov / Frejdovich I.A., Balabanov A.K., Akimov P.I. i dr. // *Materialy III Vserossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferenciyi «Elektronika i mikroelektronika SVCh»*, g. S-Peterburg, 2014. – SPb, 2014.
2. *Kalachev, A.D.* Puti povysheniya kompleksa vyhodnykh parametrov miniatyurnogo mnogoluchevogo klistrona Ku-diapazona // XII Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Elektronika i mikroelektronika SVCh». Sbornik dokladov. Sankt-Peterburg. 29 maya - 2 iyunya 2023 g. – SPb.: SPbGETU «LETI», 2023.
3. *Boev, S.F.* Sovremennoe sostoyaniye i napravleniya sovershenstvovaniya si-stem tekhnicheskogo obsluzhivaniya kompleksov special'nogo naznacheniya, vedushchih zarubezhnykh voenno-promyshlennykh kompanij/ S.F. Boev, A.A. Rahmanov. – M., 2019. – 29 s
4. *Borisov, A.A.* Elektrovakuumnye usiliteli SVCh, vypuskaemye AO «NPP Istok» im. Shokina / A.A. Borisov, S.V. Shcherbakov, A.S. Kotov, P.M. Meleshkevich, A.D. Zakurdaev, M.S. Vostrov, E.V. Zharyj, V.I. Pugnin, K.G. Simonov, B.V. Sazonov, T.I. Polyanskaya, E.A. Strojkov, A.N. Yunakov, S.V. Evseev. // *Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverhshiroko-polosnykh radioelektronnykh sistem. Materialy VI obshcherossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Omsk, 19-20 aprelya 2016 g. – Omsk, 2016.
5. *Borisov, L.* Moshchnye i sverhmoshchnye SVCh-istochniki: ot klistronov do novogo klassa priborov / L. Borisov, G. Shchelkunov // *Elektronika: nauka, tekhnologii, biznes*. – 2012. – № 4(00118). – S.102-106.
6. *Kryuchkov, V.L.* Obespechenie kachestva proektirovaniya i proizvodstva tverdotel'nykh usilitelej moshchnosti peredatchikov RLS na osnove metoda preobrazovaniy evristicheskikh modelej : avtoref. diss. kand. tekhn. nauk : 05.02.23 / Kryuchkov Vasilij Leonidovich; [Mesto zashchity: Mosk. gos. in-t radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki]. – M., 2011. – 24 s.

7. Yunakov, A.N. Issledovanie i razrabotka shirokopolosnyh mnogoluchevykh klistronov s vyhodnoj srednej moshchnost'yu bolee 10kVt i nizkovol'nym upravleniem na prostran-stvenno-razvitykh rezonatorah v srednej chasti santimetrovogo diapazona dlin voln. avto-ref. diss. kand. tekhn. nauk : 05.27.02 / Yunakov Aleksej Nikolaevich; [Mesto zashchity: «NPP Istok»]. – Fryazino, 2011. – 24 s.
8. Kushnarev, V.O. Povyshenie effektivnosti radiolokacionnoj apparatury na osnove prognozirovaniya kachestva funkcionirovaniya bloka usilitelya moshchnosti / V.O. Kushnarev, V.N. Klyachkin // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2025. – № 8. – S. 33-39.
9. Kushnarev, V.O. Obespechenie kachestva funkcionirovaniya bloka usilitelya moshchnosti peredayushchego ustrojstva RLS / V.O. Kushnarev, A.B. Klimovskij // Vestnik UIGTU. – 2023. – № 4(104). – S. 56-61.
10. R. Liu, Q. Zhang, D. Lin, W. Zhang and S. X. Ding. Causal Disentangled Graph Neural Network for Fault Diagnosis of Complex Industrial Process // IEEE Transactions on Industrial In-formatics, 2025, vol. 21, no. 1. pp. 386-395.
11. IStatisticheskie metody analiza dannyh / V.N. Klyachkin, Yu.E. Kuvajskova, V.A. Alekseeva. – M.: Finansy i statistika, 2016. – 240 s.
12. Kovalnogov V., Fedorov R., Klyachkin V., Generalov D., Kuvajskova Y., Busygin S. Apply-ing the Random Forest Method to Improve Burner Efficiency // Mathematics. 2022. T. 10. № 12.
13. Klyachkin, V.N. Primenenie metodov mashinnogo obucheniya pri reshenii zadach tekhnicheskoy diagnostiki / V.N. Klyachkin, I.N. Karpunina, Yu.E. Kuvajskova, A.S. Horeva // Nauch-nyy vestnik UI GA. – 2016. – № 8. – S. 158-161.
14. Fernandez-Delgado M., Cernadas E., Barro S. Do we Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classification Problems? The Journal of Machine Learning Research, 2014, vol.15, pp. 3133-3181.
15. D'yakonov, A. Metody bor'by s disbalansom klassov v mashinnom obuche-nii [Elektronnyj resurs] / A. D'yakonov // Blog Aleksandra D'yakonova. – 2021. – URL: [https://alexanderdyakonov.wordpress.com/2021/05/27/imbalance/\(data obrashcheniya 14.08.2025\)](https://alexanderdyakonov.wordpress.com/2021/05/27/imbalance/(data obrashcheniya 14.08.2025)).
16. Danilov, V.V. Algoritm vybora optimal'nykh znachenij giperparametrov nejronnykh setej na osnove kriteriya St'yudenta / V.V. Danilov // Cloud of Science, 2020. – T. 7. – №1. – S.165-179.
17. Pervun, O.E. Realizaciya nastrojki giperparametrov modelej sluchajnogo lesa metodom bajesovskogo ocenivaniya / O.E. Pervun // Perspektivy nauki. – 2020. – № 9(132). – S. 11-13.
18. Zebin Yang, Aijun Zhang. Hyperparameter Optimization via Sequential Uniform Designs // Journal of Machine Learning Research, 2021, (22), (149). Rr. 1-47
19. Auto-WEKA: Combined Selection and Hyperparameter Optimization of Classification Algorithms. C. Thornton, F. Hutter, H.H. Hoos, K. Leyton-Brown. // Proc. of 19th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, pr 847-855.
20. F. Hutter, H. H. Hoos, K. Leyton-Brown. Sequential Model-Based Optimization for General Algorithm Configuration. // Learning and Intelligent Optimization. 2011. Lecture Notes on Computer Science. Vol. 6683. Springer, 2011. pr. 507-523.
21. AMLB: an AutoML Benchmark. P. Gijsbers, M.L.P. Bueno, S. Coors, E. LeDell, S. Poirier, J. Thomas, B. Bischl and J. Vanschoren // Journal of Machine Learning Research. 2024. Vol. 25. pp. 1-65.