

## Определение оптимальных параметров усилителя мощности по результатам измерительного эксперимента

П.В. Сак, Г.В. Никонова, А.В. Никонов  
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается испытательный эксперимент с целью определения оптимальных параметров усилителя мощности в рабочих условиях с различными режимами питания. Представлена разработка методики проведения испытаний усилителя мощности в режиме с автоматической регулировкой режима с помощью детерминированного двухчастотного тестового сигнала. Данная методика позволяет упростить испытания аппаратуры и оценить энергопотребление выходного каскада не только по уровню пиковой мощности, но и по средней мощности на входе усилителя мощности. Для испытательного эксперимента разработана структурная схема измерения энергетических параметров усилителя мощности. Определены порядок и виды испытаний усилителя мощности. Приведены результаты испытания широкополосного усилителя мощности с целью добиться одинаково высоких параметров, во всем диапазоне рабочих частот. С целью автоматизации процесса измерений электрических параметров усилителей мощности, входящих в приемопередающую радиоаппаратуру разработана программа с использованием языка Python.

**Ключевые слова:** эксперимент, тестовый сигнал, испытания, программа, измерения

### 1. Введение

При проектировании передатчиков носимых средств связи коротковолнового (КВ) диапазона, остро стоит вопрос о повышении их коэффициента полезного действия КПД. Повышение КПД снижает тепловыделение и уменьшает связанные с ним массогабаритные характеристики изделий, улучшает тепловые режимы комплектующих и этим повышает надёжность их работы. Кроме того, увеличение КПД передатчика улучшает такой важнейший тактический показатель носимого средства связи, как длительность работы оборудования от аккумуляторной батареи без её подзарядки.

Так как основное энергопотребление в передатчике приходится на оконечный каскад усилитель мощности (УМ), то повышение его среднего КПД самым существенным образом влияет на энергопотребление всего передающего тракта [1-2].

При построении УМ с автоматической регулировкой режима (АРР) по питающему напряжению в оконечном каскаде, автоматически поддерживается критический режим работы выходного транзистора, независимо от текущей амплитуды импульса тока. Такой метод повышения энергетической эффективности называется АРР по напряжению питания, или Envelope Tracking (слежение за огибающей).

Актуальным является получение методики расчёта и количественных соотношений для оценки энергетического выигрыша от введения в выходном каскаде усилителя мощности (УМ) однополосного коротковолнового (КВ) передатчика автоматической регулировки режима по питанию (АРР).

Предъявляемые жесткие требования к линейности усилителя мощности объясняются необходимостью предотвратить искажение передаваемого сигнала и не допустить расширения спектра сигнала за счет появления в нем интермодуляционного продукта [1].

Необходимо решить научно-техническую проблему, имеющую важное народнохозяйственное значение, по развитию научно-технических основ построения, разработки и внедрения широкополосных измерительных и испытательных систем высокой точности в составе автоматизированного оборудования радиоэлектронной промышленности.

### II. Постановка задачи

За последнее время резко возросла актуальность в разработке высоколинейных усилителей мощности с высоким КПД, это связано с появлением требований к уменьшению габаритных размеров передатчиков и появлением новых видов модуляции, требующих большой линейности от усилителей мощности. Существует множество методов повышения энергетической эффективности УМ, таких как метод автоматической регулировкой режима (АРР), метод У. Догерти, метод дефазирования, схема Кана, но данные методы не позволяют получить максимальные значения КПД и линейности во всем диапазоне частот и при разных видах модуляции [2,3,4]. Основу данного направления заложил Леонардо Кан в работе «Однополосная передача путем устранения и восстановления огибающей» [3]. Поводились исследования параметрических нелинейных

искажений в усилителях мощности с распределенным усилением [1]. Результаты упрощенного моделирования параметрических нелинейных искажений в усилителях мощности с распределенным усилением, а также методов коррекции параметрических нелинейных искажений в усилителях мощности с распределенным усилением приведены в работах [5,6]. В работах [6,7,8] рассматриваются вопросы совместного применения двух методов повышения энергетической эффективности линейных усилителей мощности радиосигналов с непостоянной огибающей: метод Уильяма Догерти и метод двойной автоматической регулировки режима по питанию (Envelope Tracking). Результаты исследований влияния автоматической регулировки режима по питанию на амплитудно-амплитудные и фазо-амплитудные нелинейные искажения в схеме У. Догерти в работах [3, 9,10]. Также рассматривались вопросы компенсации нелинейных искажений при помощи предкоррекции [1].

Поэтому становится актуальна проблема поиска принципов задания испытательных воздействий и оценки отклика при испытании широкополосного усилителя мощности с целью добиться одинаково высоких параметров, во всем диапазоне рабочих частот

### III. Теория

#### 1. Приоритетное решение

При разработке высоколинейных усилителей мощности с высоким КПД усилитель мощности настраивают так, чтобы добиться превышения минимально допустимых параметров выходного сигнала во всем диапазоне частот. При этом если производить подстройку усилителя мощности при каждом изменении параметров входного сигнала, то можно получить параметры на выходе усилителя мощности куда выше, чем в усилителя мощности без подстройки.

При использовании в УМ адаптивной измерительной системы появится возможность поддержания КПД и линейности УМ в максимальных значениях, за счет подстройки на основе интегральной оценки параметров УМ [11].

В предыдущих работах проведена сравнительная оценка энергопотребления усилителя мощности с АРР и без нее, с учетом изменения других параметров усилителя мощности и потерь в управляемом источнике питания [11,12]. Определен энергетический выигрыш при применении автоматической регулировки режима по питанию выходного каскада широкополосного передатчика.

В работе [12,13] найдены соотношения, позволяющие по результатам измерений, полученных с двухчастотным тестовым сигналом судить об энергопотреблении оконечного каскада усилителя мощности с автоматической регулировкой режима при различных видах модуляции. Предложена методика расчета энергетического выигрыша и КПД при применении автоматического регулирования питающего напряжения выходных каскадов КВ передатчиков, предназначенных для модуляции речевыми сигналами. Оценена роль потерь в регулируемом источнике питания. Обоснован вывод о преимуществах применимости схем усилителей мощности с автоматической регулировкой режима [11,13].

#### 2. Исследование

Для измерения энергетических параметров усилителя мощности, входящего в КВ передатчик с однополосной модуляцией, работающий с автоматической регулировкой режима предлагается методика контроля параметров усилителя мощности по его энергопотреблению при усилении двухчастотного тестового сигнала. Рассматривается усилитель мощности, предназначенный для работы в режиме усиления КВ SSB (Single-sideband modulation) сигнала, модулированного речью.

В нашу задачу входит решение проблемы поиска принципов задания испытательных воздействий и оценки отклика при испытании широкополосного усилителя мощности с целью добиться одинаково высоких параметров, во всем диапазоне рабочих частот.

### IV. Эксперимент

Целью испытательного эксперимента является определение оптимальных параметров усилителя мощности в рабочих условиях с различными режимами питания. Представлена разработка методики проведения испытаний усилителя мощности в режиме с автоматической регулировкой режима с помощью детерминированного двухчастотного тестового сигнала. Данная методика позволит упростить испытания аппаратуры и оценить энергопотребление выходного каскада не только по уровню пиковой мощности, но и по средней мощности на входе усилителя мощности.

Для испытательного эксперимента разработана структурная схема измерения энергетических параметров усилителя мощности.

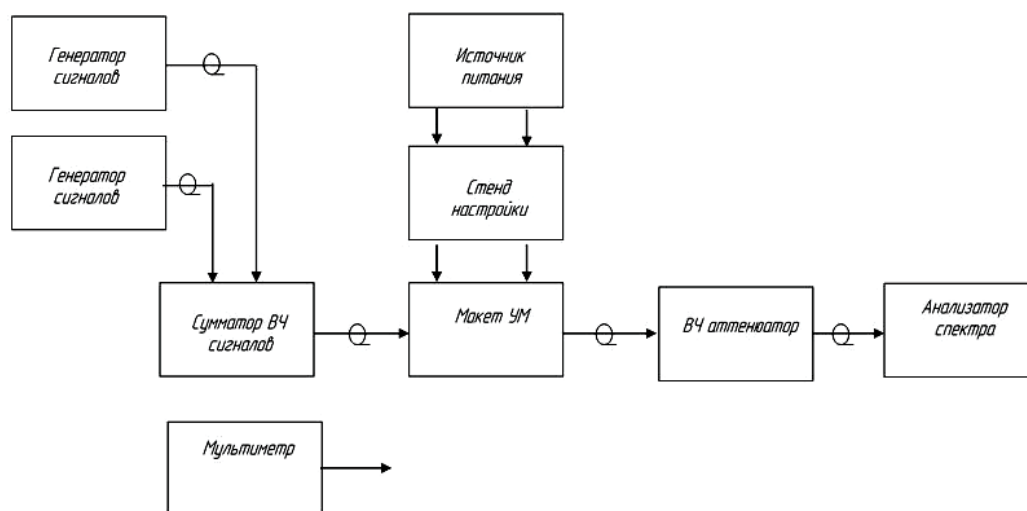


Рис. 1. Структурная схема испытательного эксперимента

Определены порядок и виды испытаний УМ.

Виды и очередность проведения испытаний усилителя мощности приведены в таблице 1.

Кроме того, предложена методика испытаний для каждого из видов испытаний и применяемое при испытаниях оборудование.

ТАБЛИЦА 1  
ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

	Виды испытаний	Методика испытаний
1	Измерения значения выходной мощности несущей	а)
2	Методика измерения внеполосных излучений УМ	б)
3	Методика измерения уровня комбинационных составляющих сигнала	в)

При измерениях параметров на разных частотах, не связанных с измерением уровня комбинационных составляющих, сигнал на сумматор подавался только с одного из генераторов. Величина выходной мощности основной частоты и ее гармоник устанавливалась изменением уровня входного сигнала и измерялась анализатором спектра.

Режимы по постоянному току контролировались с помощью приборов стенда и тестера.

#### 1. Методика измерения значения выходной мощности несущей

Рабочее место подготовлено, согласно структурной схемы, изображенной на рисунке 1.

На генераторе установить частоту 1,5 МГц. Уровень выходного сигнала генератора установить 100 мВ.

На анализаторе спектра установить центральную частоту (Center Freq) 1,5 МГц, полосу обзора (SPAN) - 50 кГц, полосу приемника (ResBW) - 1 кГц. В качестве единиц измерения (Y Axis Units) установить - В. Далее установить значение Ref Lvl Offset равным 40 дБ и в качестве единиц измерения - Вт.

На источниках питания установить значения напряжения 12 В при токе ограничения 0,5 А и 20 В при токе ограничения 2 А. Подать питание с обоих источников питания.

Постепенно изменяется уровень выходного сигнала генератора до тех пор, пока мощность несущей не станет равна 12,5 Вт.

Полученные значения заносятся в таблицу:

- мощность несущей частоты
- напряжение на выходе генератора
- ток выходного каскада
- ток предварительного каскада.

#### 2. Методика измерения внеполосных излучений УМ

Рабочее место также готовится согласно структурной схемы, изображенной на рисунке 1. Производится настройка приборов аналогично пункту а).

На анализаторе спектра установить центральную частоту (Center Freq) 3,0 МГц. Измерить значение мощности второй гармоники несущей.

На анализаторе спектра установить центральную частоту (Center Freq) 4.5 МГц. Измерить значение мощности третьей гармоники несущей частоты.

Повторите измерения для всех частот указанных в таблице 2

ТАБЛИЦА 2  
СПИСОК ЧАСТОТ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Номер диапазона	Частота генератора, МГц	Частота второй гармоники, МГц	Частота третьей гармоники, МГц
1	1,5	3	4,5
1	1,9	3,8	5,7
1	2,4	4,8	7,2
2	2,5	5	7,5
2	3,5	7	10,5
2	4,1	8,2	12,3
3	4,2	8,4	12,6
3	5,5	11	16,5
3	6,8	13,6	20,4
4	6,8	13,6	20,4
4	9	18	27
4	11,2	22,4	33,6
5	11,3	22,6	33,9
5	15	30	45
5	18	36	54
6	19	38	57
6	25	50	75
6	30	60	90
7	31	62	93
7	40	80	120
7	50	100	150

В таблице 2 указаны номера диапазонов, соответствующие им частоты настройки генератора и частоты второй и третьей гармоник несущей, на которых необходимо производить измерения уровня побочных излучений.

### 3. Методика измерения уровня комбинационных составляющих сигнала

При измерениях уровня комбинационных составляющих сигналы подавались на вход сумматора от двух генераторов. Уровень сигналов устанавливался одинаковым и таким, чтобы на частотах и первого, и второго генератора мощность спектральных составляющих на выходе усилителя была равна одной четвертой пиковой мощности при одночастотном режиме. Разнос частот, подаваемых на вход усилителя мощности, выбран 1 кГц.

Измерялись спектральные составляющие, отстоящие от несущих на 1 и 2 кГц, то есть комбинационные составляющие 3 и 5 порядков

На первом генераторе установить частоту 1,5 МГц. Уровень выходного сигнала генератора установить 100 мВ.

На втором генераторе установить частоту 1,501 МГц. Уровень выходного сигнала генератора установить 100 мВ.

Постепенно изменять уровень выходных сигналов генератора до тех пор, пока мощность спектральных составляющих на выходе усилителя не станет равна 35 дБ.

От значений уровня несущих отнимаются уровни спектральных составляющих 3 и 5 порядков. Результаты представлены в таблицу. Измерения проводятся для всех частот из таблицы 1.

По представленным методикам а), б), в) проведены измерения в соответствии со структурной схемой изображенной на рисунке 1 при напряжениях питания 20, 22 и 24 В.

### V. Результаты измерительного эксперимента

Результаты данных измерительного эксперимента при подаче напряжение питания 24 В приведены в таблице 3 и на графиках рисунков 2-5.

ТАБЛИЦА 3  
ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПИТАНИЯ 24 В

f, МГц	Uвх, мВ	Рвых, дБм	Iок, А	Iпред, мА	Ргарм 2, дБм	Ргарм 3, дБм	КПД общ	Ртепл, Вт	КПД, %	Рвых, Вт	Рпот р, Вт
1,5	145	1,03	1,04	125	-45,8	-44,1	47,9	12,28	50,79	12,68	24,96
1,9	150	1,25	1,07	130	-49,1	-42,2	48,9	12,34	51,93	13,34	25,68
2,4	155	1,02	1,18	130	-59,3	-43,7	42,3	15,66	44,69	12,66	28,32
2,5	145	1,19	1,01	130	-44,2	-48,2	50,9	11,09	54,26	13,15	24,24
3,5	145	0,93	1	130	-66,6	-48,3	48,4	11,61	51,62	12,39	24
4,1	150	0,96	1,04	130	-63	-43,4	47,0	12,49	49,98	12,47	24,96
4,2	145	1,19	1,08	130	-46,4	-47,7	47,8	12,77	50,74	13,15	25,92
5,5	145	0,94	1,05	130	-63	-49,4	46,4	12,78	49,27	12,42	25,2
6,8	150	0,93	1	130	-56,8	-48,3	48,4	11,61	51,62	12,39	24
6,8	145	1,06	1	130	-40,9	-54,2	49,9	11,24	53,18	12,76	24
9	155	0,98	1,06	130	-56,5	-54,5	46,4	12,91	49,26	12,53	25,44
11,2	165	1,14	1,14	135	-56	-50	44,8	14,36	47,52	13,00	27,36
11,3	160	1,2	1,13	135	-45	-59,2	45,8	13,94	48,61	13,18	27,12
15	160	1,02	1,12	135	-57,5	-51,7	44,3	14,23	47,05	12,65	26,88
18	170	0,98	1,15	135	-55,6	-45,9	42,8	15,07	45,40	12,53	27,6
19	165	1,15	1,11	135	-38,6	-52,5	46,1	13,61	48,92	13,03	26,64
25	190	1,17	1,2	135	-52	-73,3	43,0	15,71	45,46	13,09	28,8
30	205	1,12	1,23	140	-56,5	-51,5	41,4	16,58	43,84	12,94	29,52
31	205	0,95	1,22	140	-33,8	-52,2	40,2	16,83	42,50	12,45	29,28
40	235	1,02	1,21	145	-48	-59,6	41,0	16,39	43,55	12,65	29,04
50	300	1,07	1,36	155	-54,9	-48,3	37,0	19,85	39,20	12,79	32,64

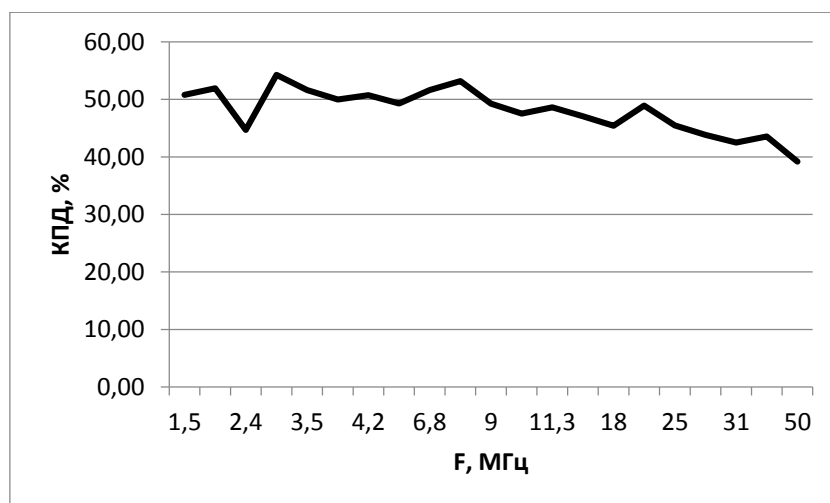


Рис. 2. График КПД выходного каскада в зависимости от частоты при напряжении питания выходного каскада 24 В

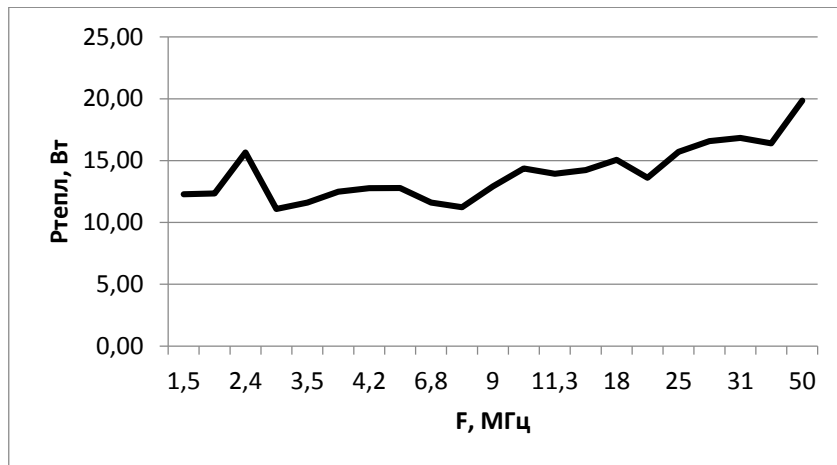


Рис. 3. График выделяемой тепловой мощности  $P_{\text{тепл}}$  в зависимости от частоты при напряжении питания выходного каскада 24 В

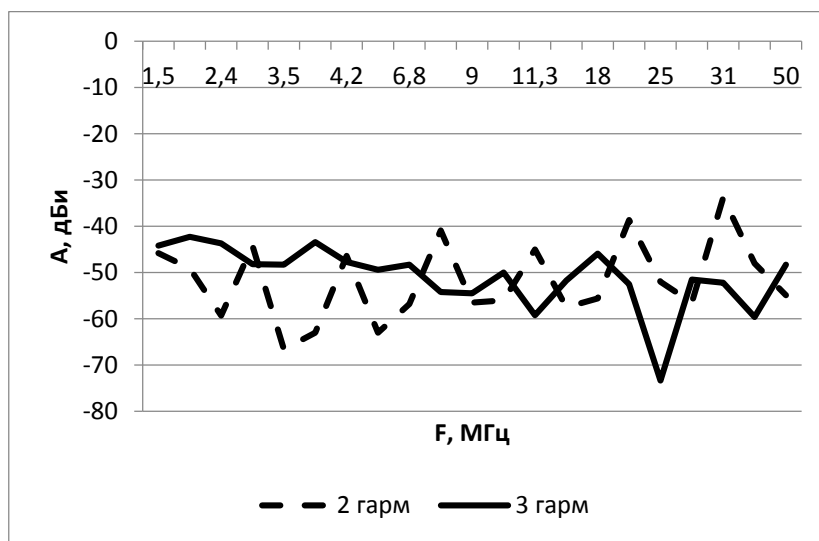


Рис. 4. Уровень гармоник в зависимости от частоты при напряжении питания выходного каскада 24 В.

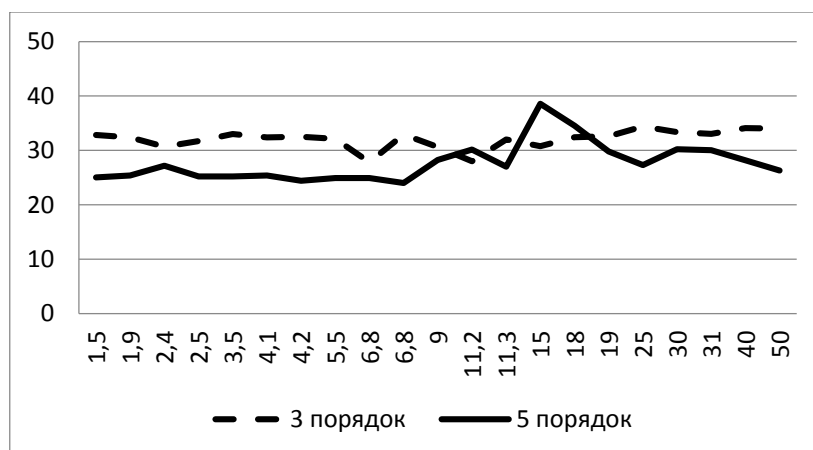


Рис. 5. График интермодуляционных продуктов 3 и 5 порядка при напряжении питания 24В

С целью автоматизации процесса измерений электрических параметров усилителей мощности, входящих в приемно-передающую радиоаппаратуру разработана программа с использованием языка Python [14].

Функциональные возможности программы таковы, что программа позволяет подключать приборы с программным управлением, устанавливать настройки подключенных приборов, задавать диапазон частот, в

котором необходимо провести измерения и шаг измерений. Проводить автоматизированные измерения выходной мощности, линейности, внеполосных излучений усилителя мощности в заданном диапазоне частот. Формировать отчет о проведенных измерениях.

## VI. Результаты исследований

Выходная мощность усилителя достаточна для его использования в проектируемой аппаратуре. Номинальный уровень выходной мощности после датчика падающей и отраженной мощности целесообразно принять равным  $12 \pm 1,5$  Вт.

Минимальное значение КПД с учётом потребления предварительного усилителя, потребления выходного каскада, потерь в фильтрах гармоник в процессе испытаний составляют:

- 37% при напряжении питания 24 В,
- 39,9% при напряжении питания 22 В,
- 43, 5% при напряжении питания 20 В.

Среднее значение КПД в диапазоне частот:

- 48% при напряжении питания 24 В,
- 52% при напряжении питания 22 В,
- 55,3% при напряжении питания 20 В.

Выделяемая тепловая мощность при выходной мощности на выходе фильтров гармоник 12 Вт не превосходила:

- 19,85 Вт при напряжении питания 24 В,
- 17,23 Вт при напряжении питания 22 В,
- 14,64 Вт при напряжении питания 20 В.

Уровень сигнала на частотах 2 и 3 гармоник не превосходит соответственно:

- 34,8 и -43,3 дБ при напряжении питания 24 В,
- 37,3 и -41 дБ при напряжении питания 22 В,
- 39,7 и -42,17 дБ при напряжении питания 20 В.

Уровень 2 гармоники в нескольких точках диапазона выше минус 40 дБ, по ГОСТ уровень гармоник должно быть менее минус 40 дБ.

Линейность передающего тракта

Интермодуляционные продукты 3 и 5 порядка в диапазоне частот не превосходят соответственно величин:

- 25,6 дБ и 30,1 дБ при напряжении питания 24 В
- 25,2 дБ и 27,1 дБ при напряжении питания 22 В
- 26 дБ и 25,7 дБ при напряжении питания 20 В.

## V. Заключение

В рамках поставленной задачи были исследованы методы и средства контроля параметров усилителя мощности радиопередатчика в условиях нестационарных режимов. Для измерения энергетических параметров УМ, входящего в КВ передатчик с однополосной модуляцией, работающий с АРР разработана методика контроля параметров УМ по его энергопотреблению при усилении двухчастотного тестового сигнала.

При разработке высоколинейных усилителей мощности с высоким КПД усилитель мощности настраивают так, чтобы добиться превышения минимально допустимых параметров выходного сигнала во всем диапазоне частот. На данном этапе проводились испытания широкополосного усилителя мощности с целью добиться одинаково высоких параметров, во всем диапазоне рабочих частот. При этом если производить подстройку усилителя мощности при каждом изменении параметров входного сигнала, то можно получить параметры на выходе усилителя мощности куда выше, чем в усилителя мощности без подстройки. Для чего была разработана программа для автоматизации системы контроля параметров усилителя мощности. Результаты проведения испытаний усилителя мощности в режиме с автоматической регулировкой режима с помощью детерминированного двухчастотного тестового сигнала показывают, что разработанная методика позволяет упростить испытания аппаратуры и оценить энергопотребление выходного каскада не только по уровню пиковой мощности, но и по средней мощности на входе усилителя мощности.

Источник финансирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант (Адаптивный контроль параметров усилителя мощности радиопередатчика в условиях нестационарных режимов, № 20-37-90122).

Научный руководитель Никонова Галина Владимировна, Омский государственный технический университет.

## Список литературы

1. А. Титов, “Управление гармоническими и импульсными сигналами мощности”, Электроника: НТБ, 2010, №1. 10, стр. 78-83.
2. L. Khan, “Single Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration,” Proc. IRE, Vol.40, July 1952, pp. 803-806.
3. Ivanyushkin R. Yu., Razin K.O., “Investigation of nonlinear distortions in a power amplifier according to the W. Daugherty scheme with double automatic control of the power supply mode,” Technologies of the Information Society: collection of articles. tr. XIV Intern. branch scientific and technical. conf., 2020 Moscow: ID Media Publisher, 2020, pp. 184–186.
4. Артым А., Бахмуцкий А., Козин Е. и др. «Повышение эффективности мощных радиопередатчиков»: Под ред. А. Д. Артым. М.: Радио и связь, 1987. – 176 с.
5. N. D. Shmakov, R.Y. Ivanyushkin, “Research of Distributed Power Amplifier for Radio Transmitters of the DVB-T2 Standard,” Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2021, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488409.
6. R. Y. Ivanyushkin, N. D. Shmakov, “Computer Modeling and Research of Parametric Nonlinear Distortions for Amplifiers with Distributed Amplification of HF-VHF Band,” Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2020, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166126.
7. Шахгильдян В. В., Иванюшкин Р. Ю. Методы повышения энергетической эффективности линейных усилителей мощности. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5, № 9. С. 143–145.
8. K. Youn, B. Kim, C. Lee, S. Maeng, J. Lee, K. Pyun, H. Park, “Low dissipation power and high linearity PCS power amplifier with adaptive gate bias control circuit,” Electron. Lett., 1996, Vol. 32, no. 17, pp. 1533 – 1535.
9. I. Dulov, R. Ivanyushkin, “Application of nonlinear APP on power in the digital radio transmission transmitters,” Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, INTERMATIC, 2013, Moscow: MIREA, 2013, Part 4, pp. 169-172.
10. K. Razin, R. Ivanyushkin, “The problem of building power amplifiers of terrestrial digital television transmitters based on the U. Doherty method with the introduction of automatic power mode adjustment”, Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, INTERMATIC, 2017, Moscow: MIREA, 2017, part 4, pp. 1131-1134.
11. Сак П. В. Интегральная оценка параметров усилителя мощности радиопередатчика с автоматической регулировкой режима двухчастотным тестовым сигналом // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 59–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-59-64.
12. Sak P. V., Rakhlin V. P., Nikonova G. V., “Parameters Checkout of a Short-Wave Power Amplifier With Automatic Mode Adjustment via a Dual Frequency Test Signal,” International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729627.
13. Рахлин В.П., Сак П.В., Повышение энергетических показателей КВ-передатчика с однополосной модуляцией речевой информации при применении автоматической регулировки режима // Техника радиосвязи. 2021. № 4 (51). С. 37-43. DOI: 10.33286/2075-8693-2021-51-37-43.
14. Сак П. В. Программа автоматизации процесса измерений электрических параметров усилителей мощности. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021661691. 14.07.2021. Заявка № 2021660968 от 14.07.2021.