



РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА

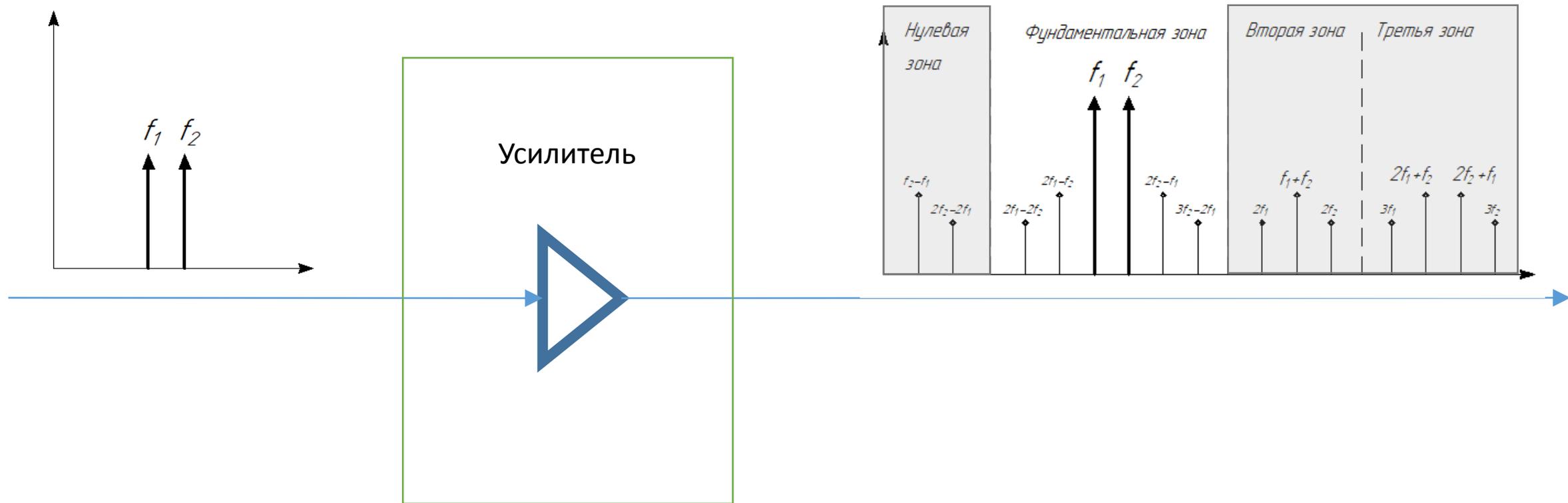
РАДИОКОМП

**31-я Международная конференция
«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»
5—11 сентября 2021 г.**

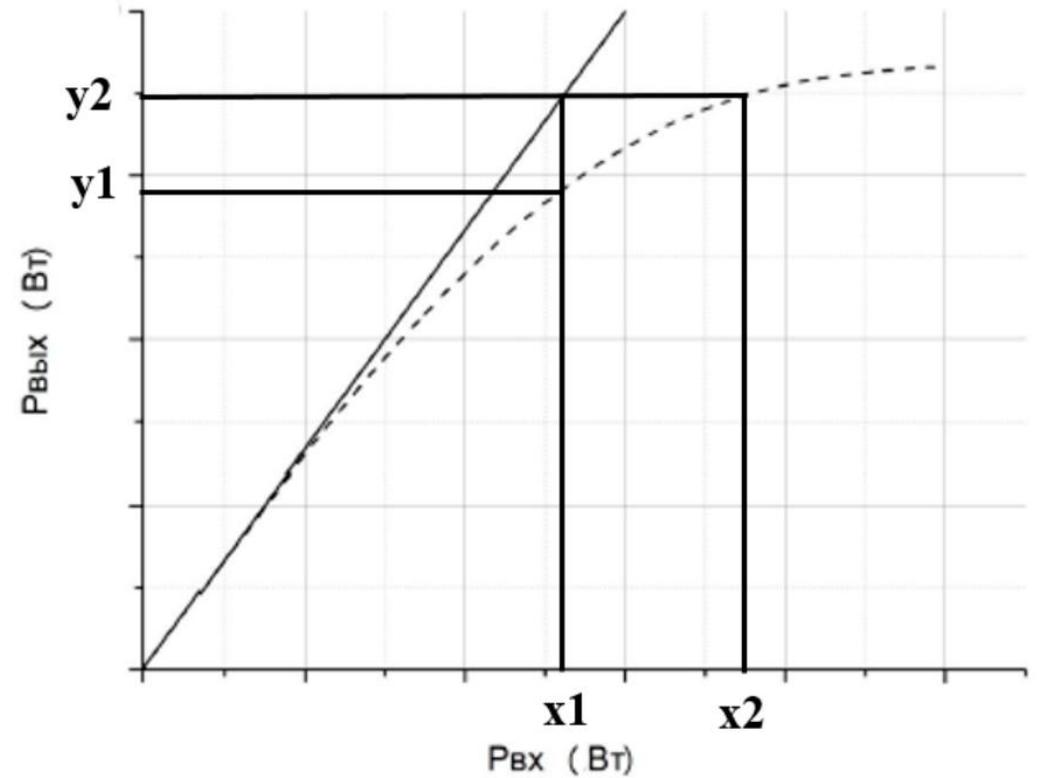
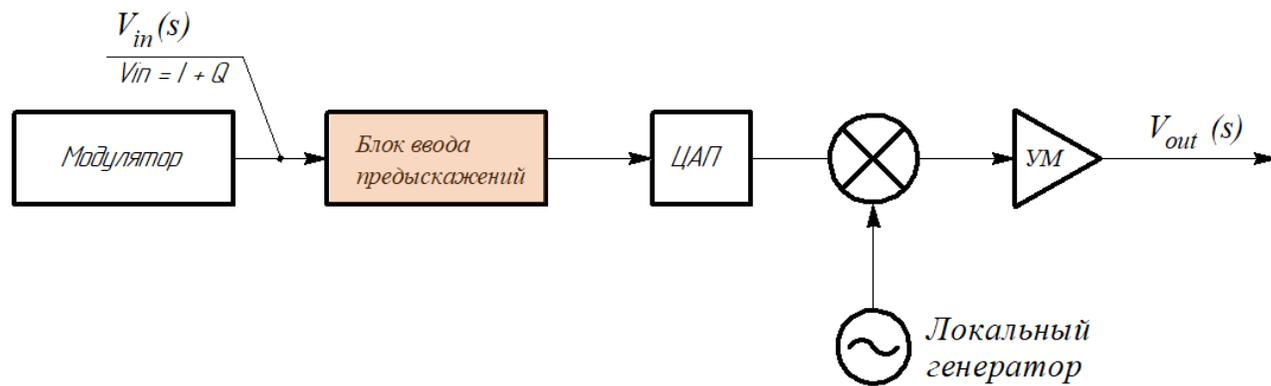
Цифровое предыскажение сигнала на основе полиномиальной модели усилителей мощности с «эффектом памяти»

Докладчик: нач. отдела УМ
Шокиров В.А.

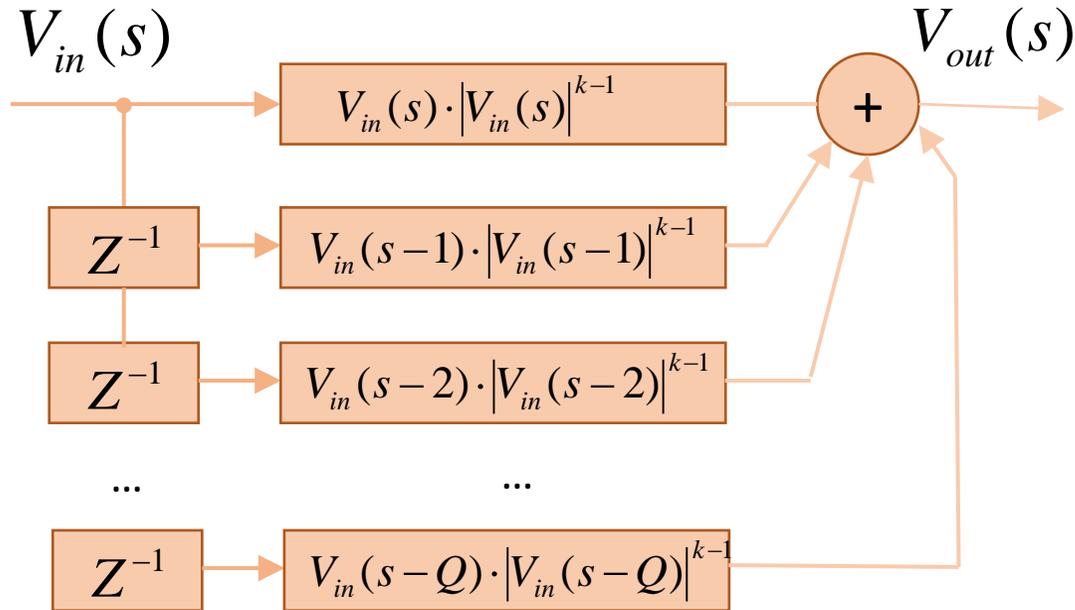
Актуальность вопроса



Блок ввода искажений



Полимодальная модель усилителя мощности с «эффектом памяти»



Источник: Коротков А.С., Румянцев И.А.
 Функциональные модели усилителя мощности с
 "Эффектом памяти" // Научно-технические
 ведомости СПбГПУ. Информатика.
 Телекоммуникации. Управление, Т. 5, 2012.

$$\begin{aligned}
 V_{out}(s) &= \sum_{q=0}^Q \sum_{k=1}^K a_{kq} \cdot V_{in}(s-q) \cdot |V_{in}(s-q)|^{k-1} = \\
 &= \sum_{q=0}^Q \sum_{k=1}^K a_{kq} \cdot F_{kq}(s-q) = \\
 &= a_{10} F_{10}(s) + \dots + a_{KQ} F_{KQ}(s-Q).
 \end{aligned}$$

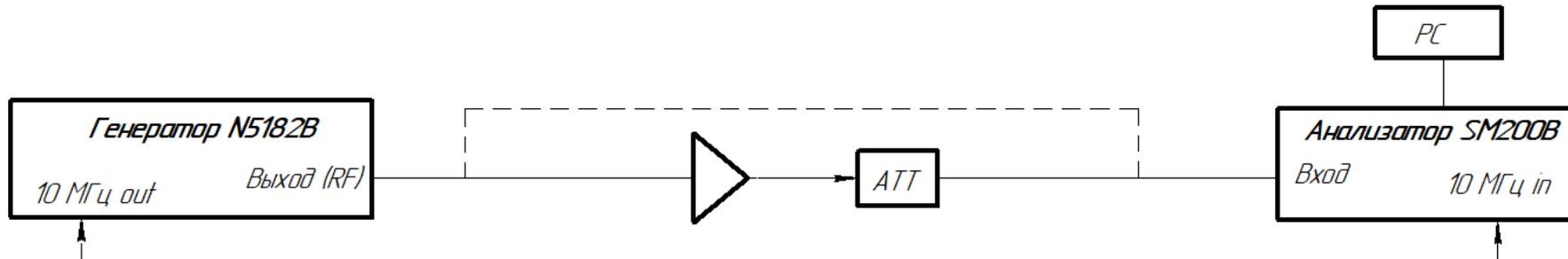
$$\mathbf{V}_{out} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{A}$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{V}_{out}$$

$(\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T$ – псевдообращение Мура – Пенроуза

Измерение V_{in} и V_{out}

Генератор → Усилитель → Анализатор



Генератор N5182B



Усилитель мощности 40 Вт



Анализатор SM200B

Measurements

Traces

Trace: Three

Type: Average

Avg Count: 50

Color: [Red]

Update:

Hide:

Export Clear

Markers

Marker: One

Type: Normal

Place On: Trace One

Set Freq: 1.000000 GHz

Update:

Active:

Pk Tracking:

Pk Threshold: -100.000 dBm

Pk Excurs.: 6.00 dB

Peak Search Delta

To Center To Ref

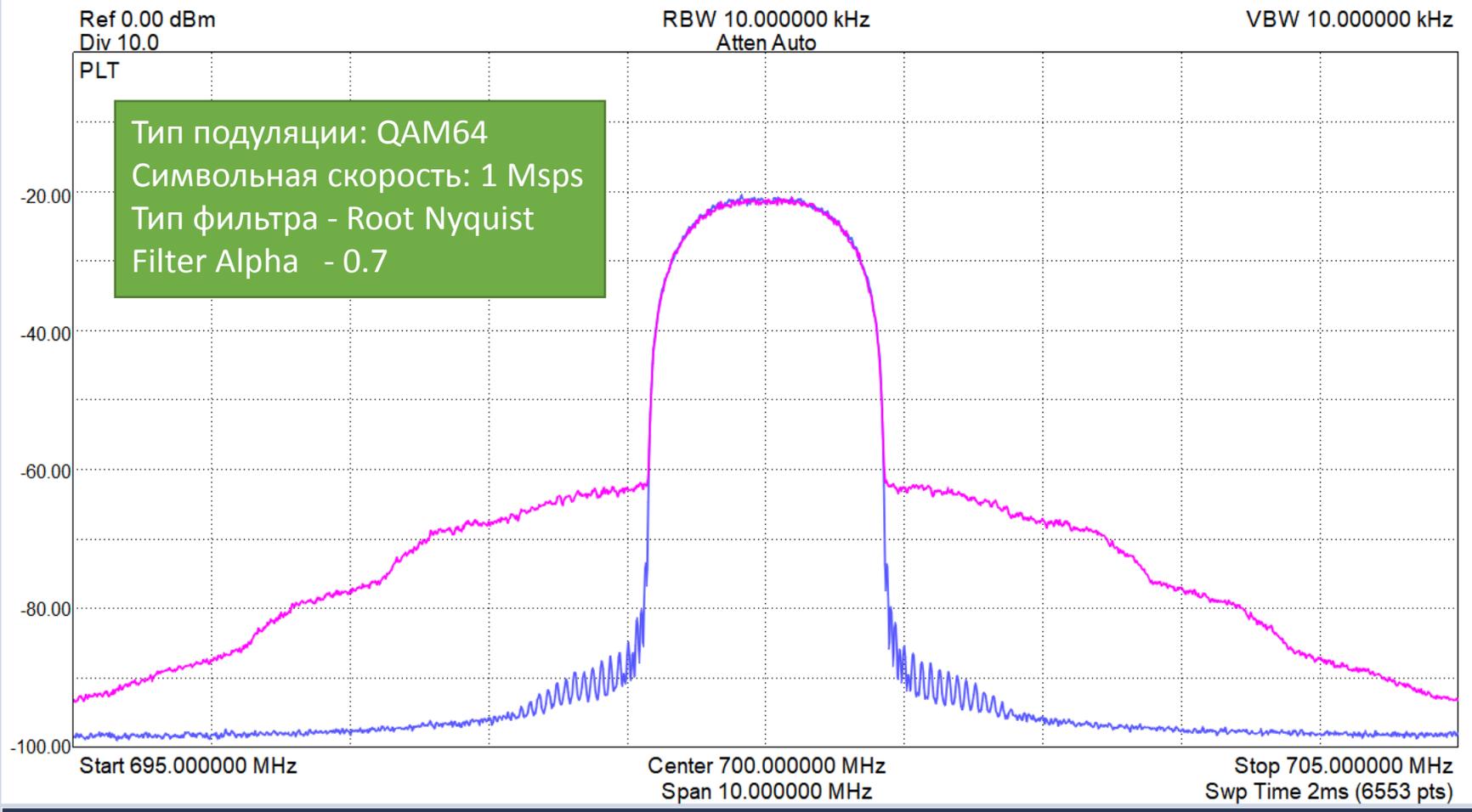
Peak Left Peak Right

Occupied Bandwidth

Enabled:

Target: Trace One

% Power: 99.00



Тип модуляции: QAM64
Символьная скорость: 1 Msps
Тип фильтра - Root Nyquist
Filter Alpha - 0.7

Sweep Settings

Frequency

Center: 700.000000 MHz

Span: 10.000000 MHz

Start: 695.000000 MHz

Stop: 705.000000 MHz

Step: 20.000000 MHz

Full Span Zero Span

Amplitude

Ref Level: 0.000 dBm

Div: 10.0 dB

Gain: N/A

Atten: Auto

Preamp: N/A

Bandwidth

RBW Shape: Flat Top

RBW: 10.000000 kHz

VBW: 10.000000 kHz

Auto RBW:

Auto VBW:

Acquisition

Video Units: Power

Detector: Average

Swp Time: 1.000 ms

Swp Interval: 0.0 s

Channel Power

Enabled:

Target: Trace One

Width: 20.000000 MHz

Power: N/A

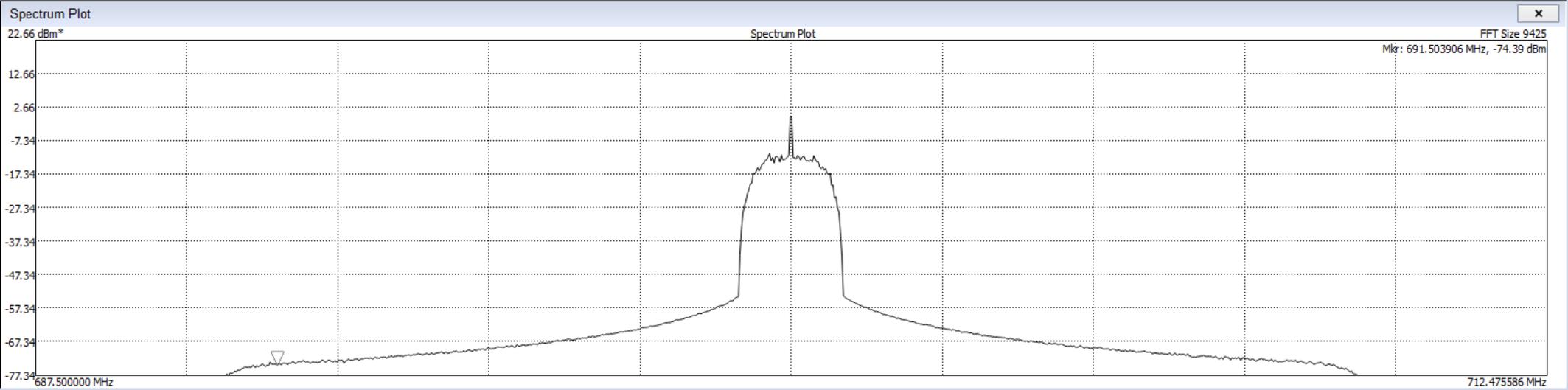
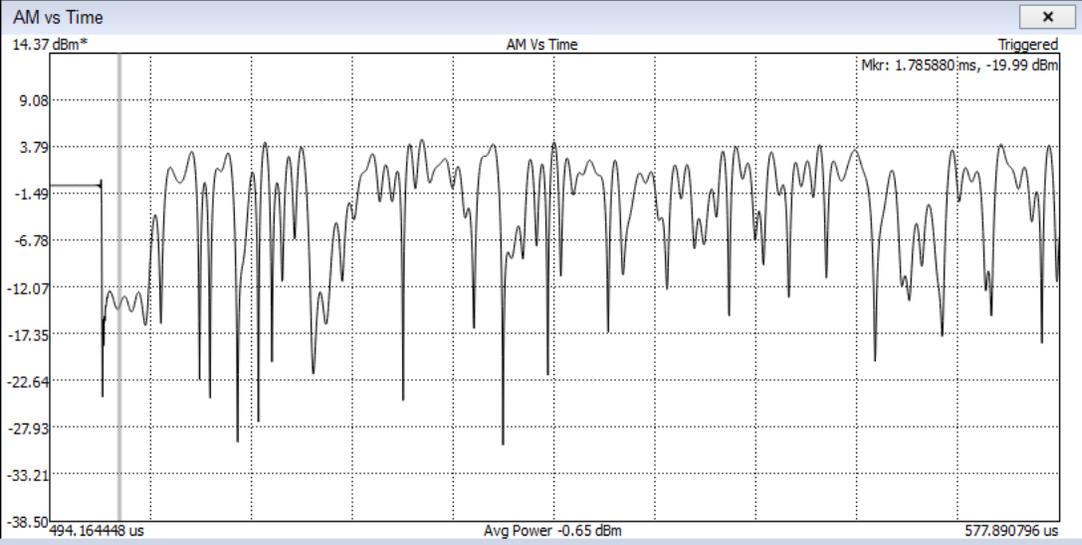
Start Logging

Change Directory

	State	Offset	Bandwidth	Lower (dBc)	Lower (dBm)	Upper (dBc)	Upper (dBm)
1	Disabled	20.000000 MHz	20.000000 MHz	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Disabled	20.000000 MHz	20.000000 MHz	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Disabled	20.000000 MHz	20.000000 MHz	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Disabled	20.000000 MHz	20.000000 MHz	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Disabled	20.000000 MHz	20.000000 MHz	N/A	N/A	N/A	N/A

Add Measurement Reset View

Single Auto Recal Preset



Zero-Span Settings

Capture Settings

Ref Level: 0.000 dBm

Center: 700.000000 MHz

Step: 1.000000 MHz

Sample Rate: 25.000 MS/s

IF BW: 19.200000 MHz

Auto IFBW:

Swp Time: 5.000 ms

Trigger Settings

Trigger Type: External Trigger

Trigger Edge: Rising Edge

Trigger Level: 0.000 dBm

Trigger Position: 10.000 %

Edit FMT

Measurement Interval Settings

Auto Interval:

Interval Offset: 0.0 s

Interval Length: 5.000 ms

FFT Settings

RBW: 10.000000 kHz

Auto Overlap:

Overlap %: 98.674

Max FFTs: 1000

Step Length: 5.000 us

Record IQ

Save Directory: /rs/admin/Documents/SignalHound/

File Prefix: IQREC

Capture Size: 1.000 ms

Max Number of Files: 1

Data Saved: 0 GB

Files Saved: 0

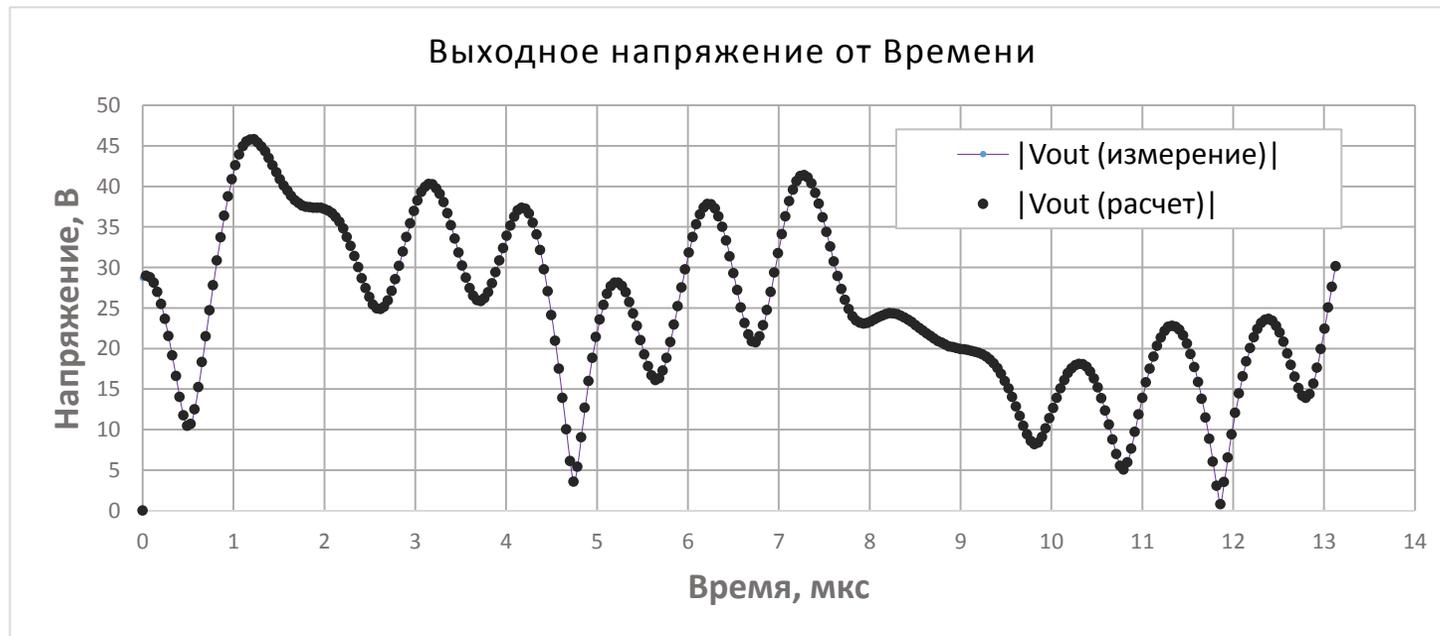
Disk Free Percent: 25.96 %

Математическая модель усилителя

$$\mathbf{A} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{V}_{\text{out}}$$

$$\mathbf{F}_{kq}(s - q) = V_{in}(s - q) \cdot |V_{in}(s - q)|^{k-1}$$

$$\mathbf{V}_{\text{out}}(\text{расчет}) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{A}$$



$$S = \sqrt{\frac{\sum |x - \bar{x}|^2}{n - 1}}$$

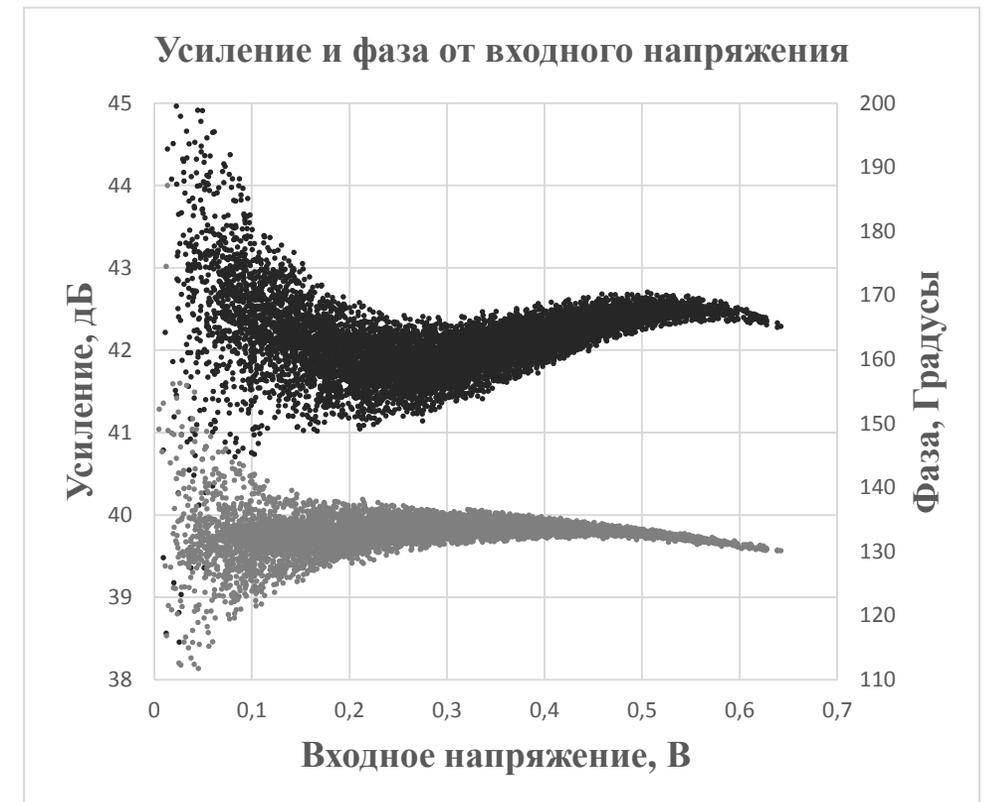
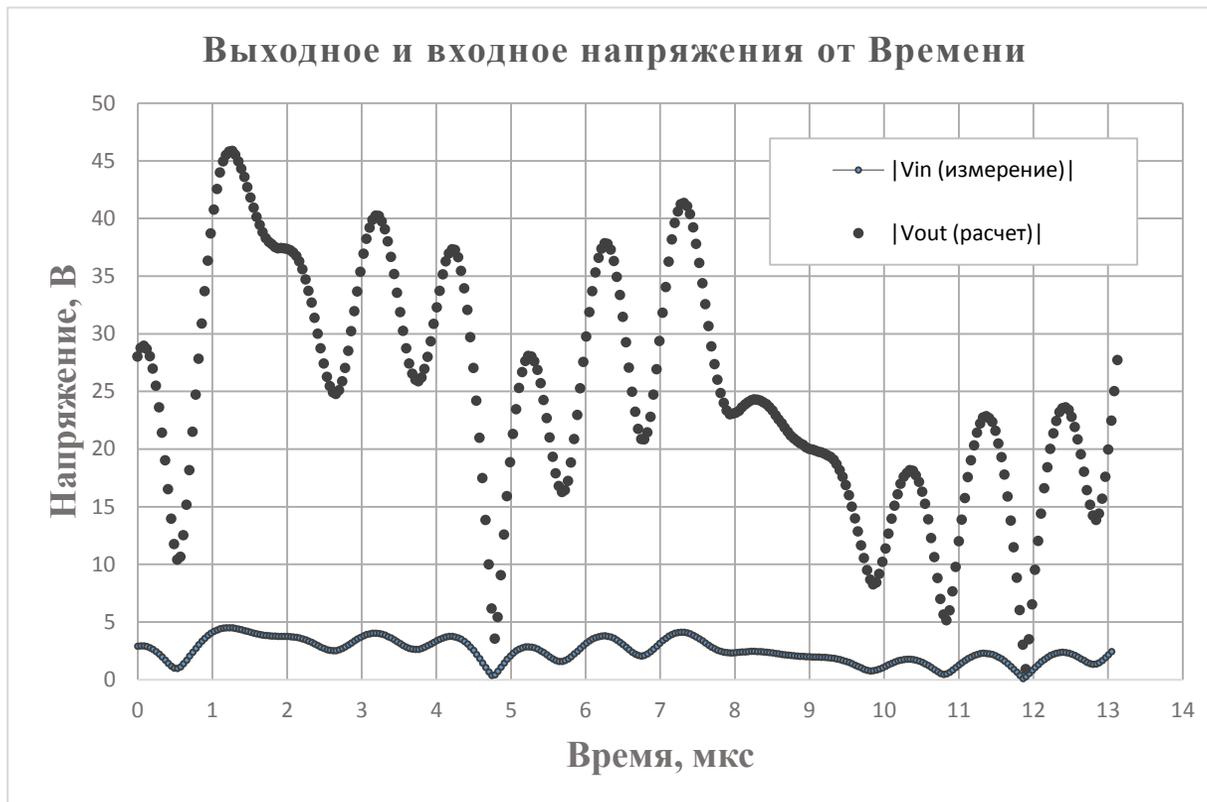
$$S = 0.23\%$$

Длина памяти $Q = 2$

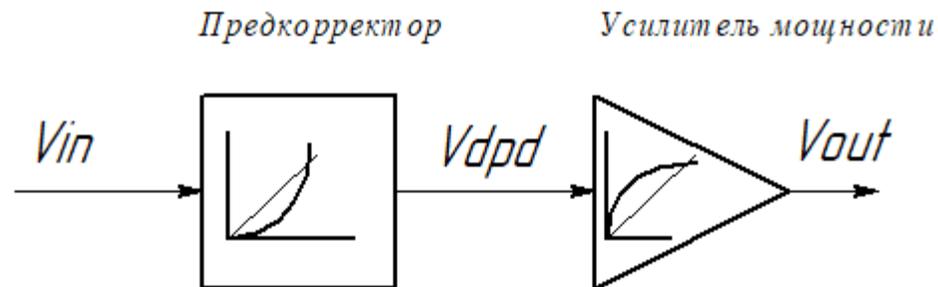
Степень нелинейности $K = 8$

Число отсчетов $S = 10000$

Передаточная характеристика



Коэффициенты корректора **C**



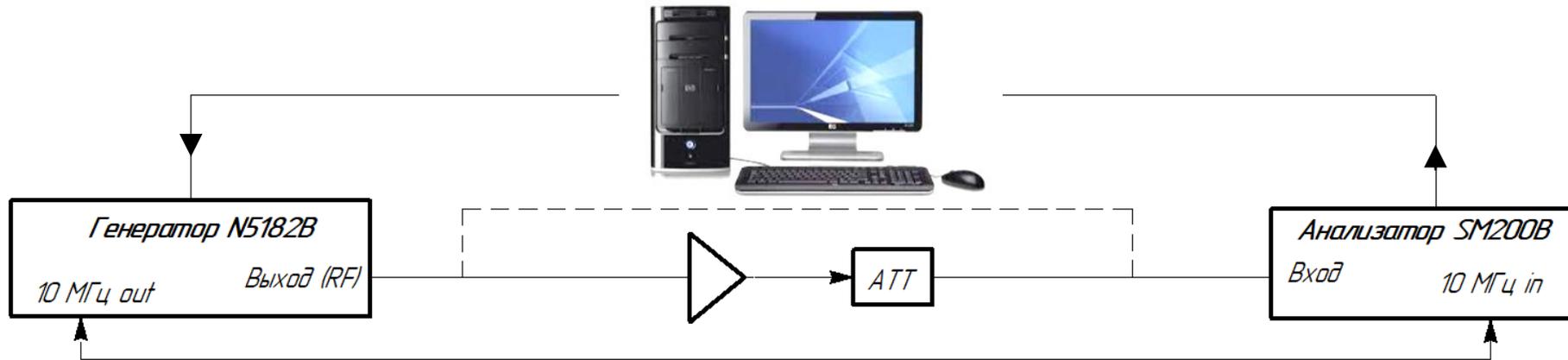
$$V_{in}(s) = \sum_{q=0}^Q \sum_{k=1}^K c_{kq} \cdot \frac{V_{out}(s-q)}{G} \cdot \left| \frac{V_{out}(s-q)}{G} \right|^{k-1} =$$

$$\mathbf{V}_{in} = \mathbf{F}_{out} \cdot \mathbf{C}$$

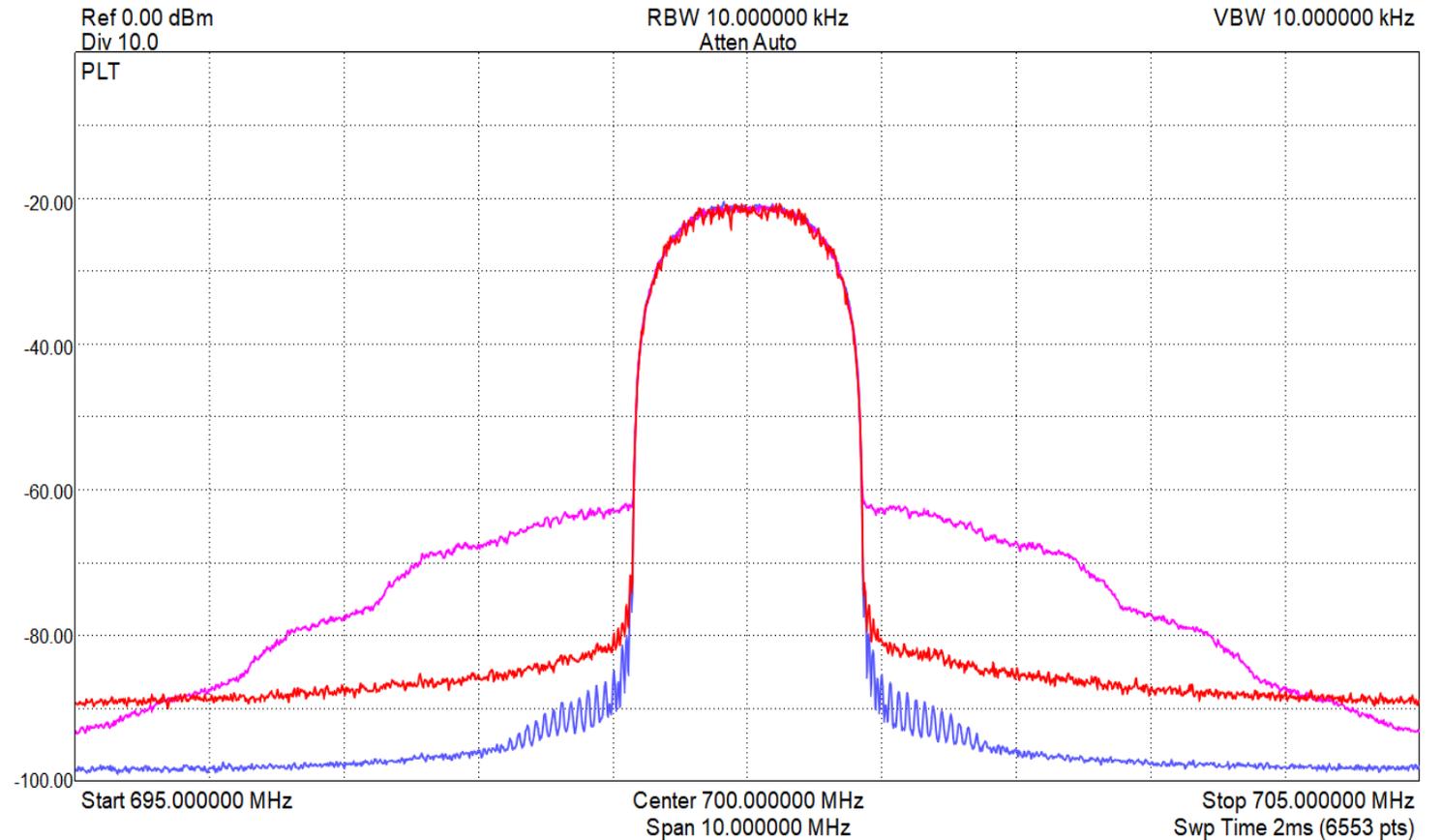
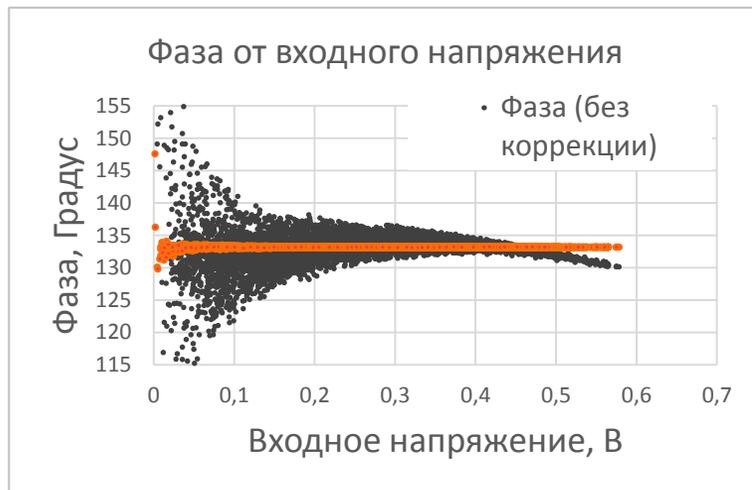
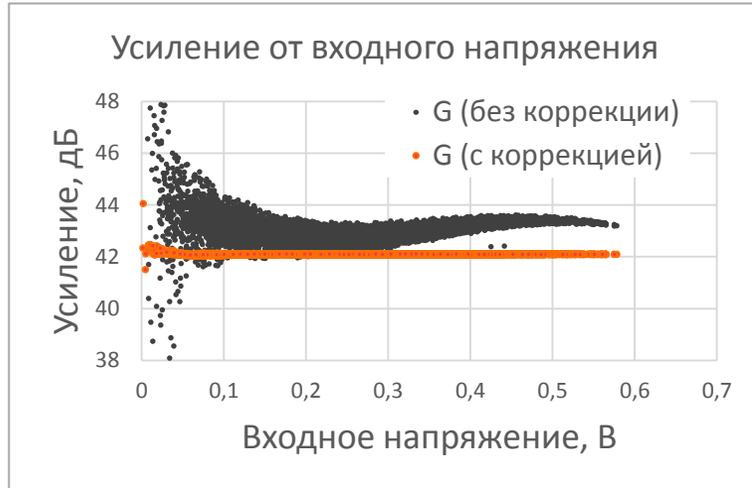
$$\mathbf{C} = (\mathbf{F}_{out}^T \mathbf{F}_{out})^{-1} \mathbf{F}_{out}^T \mathbf{V}_{in}$$

$$\mathbf{V}_{dpd} = \mathbf{F}_{in} \cdot \mathbf{C}$$

Эксперимент



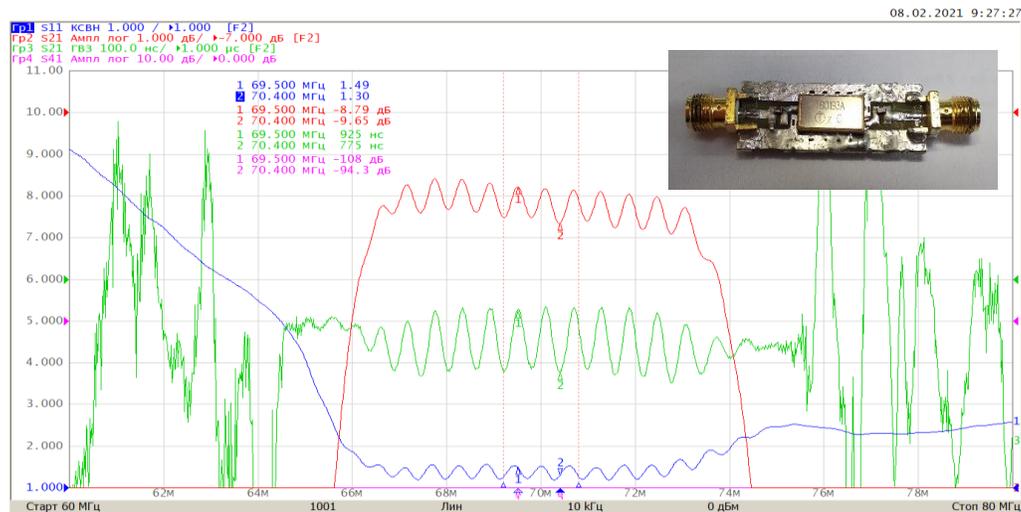
Результаты предкоррекции



Недостатки

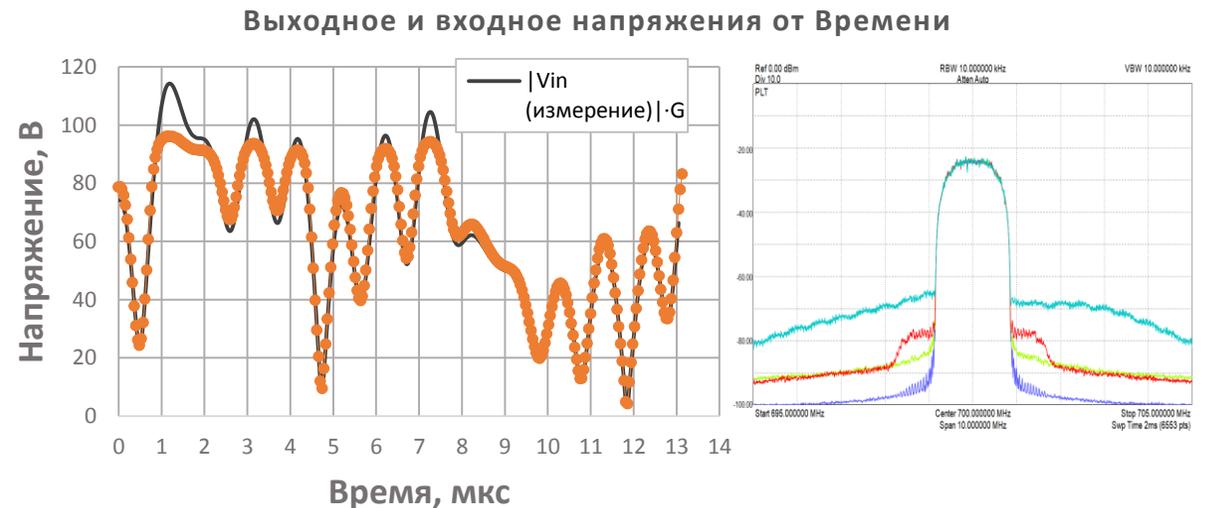
1. Предельная неравномерность приёмного тракта в полосе приема не более 0,2 дБ.

«Если приемный тракт имеет неравномерность более 1,2 дБ, то среднеквадратичная ошибка более 50%.»



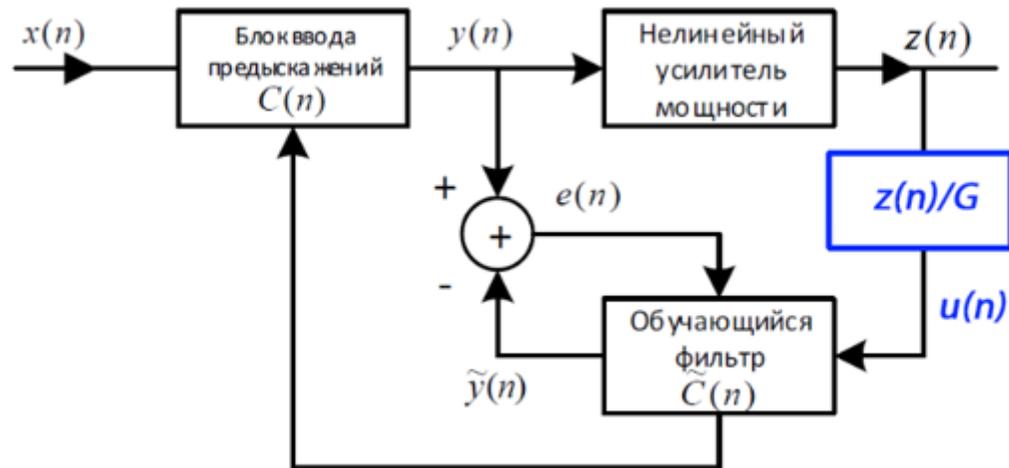
2. Актуален для усилителей мощности, построенных по схеме Догерти.

«Для усилителя с $P_{1дБ}=240$ Вт максимальная выходная мощность, при которой можно получить внеполосные искажения на уровне -65дБ это 45Вт»



3. Время на расчет: 10 секунд

Рекурсивный алгоритм прогноза ошибки



Источник: Кащенко И.Е.

Линеаризация радиопередающих устройств декаметрового диапазона радиоволн с помощью цифровых предсказаний и инжекции гармоник. Омск. 2018. Диссертация.

$$y(n) = \sum_{q=0}^Q \sum_{k=1}^K a_{kq} \cdot x(n-q) \cdot |x(n-q)|^{k-1}$$

$$e(n) = y(n) - \tilde{c}^T \cdot Fu$$

$$\varphi(n) = \bar{F}u$$

$$\lambda(n) = \lambda_0 \cdot \lambda(n-1) + 1 - \lambda_0$$

$$s(n) = \varphi^T(n) \cdot P(n-1) \cdot \varphi(n) + \lambda(n)$$

$$P(n) = \frac{P(n-1) - P(n-1) \cdot \varphi(n) \cdot s^{-1}(n) \cdot \varphi^T(n) \cdot P(n-1)}{\lambda(n)}$$

$$c(n+1) = c(n) + P(n) \cdot \varphi(n) \cdot e(n)$$

Рекурсивный алгоритм прогноза ошибки

$$e(n) = y(n) - \tilde{c}^T \cdot Fu$$

$$\lambda(n) = \lambda_0 \cdot \lambda(n-1) + 1 - \lambda_0$$

$$s(n) = \varphi^T(n) \cdot P(n-1) \cdot \varphi(n) + \lambda(n)$$

$$P(n) = \frac{P(n-1) - P(n-1) \cdot \varphi(n) \cdot s^{-1}(n) \cdot \varphi^T(n) \cdot P(n-1)}{\lambda(n)}$$

$$c(n+1) = c(n) + P(n) \cdot \varphi(n) \cdot e(n)$$

Источник: Кащенко И.Е.

Линеаризация радиопередающих устройств декаметрового диапазона радиоволн с помощью цифровых предискажений и инъекции гармоник.

Омск. 2018. Диссертация.

$$Fu = \frac{z(n-q) \cdot |z(n-q)|^{k-1}}{G}$$

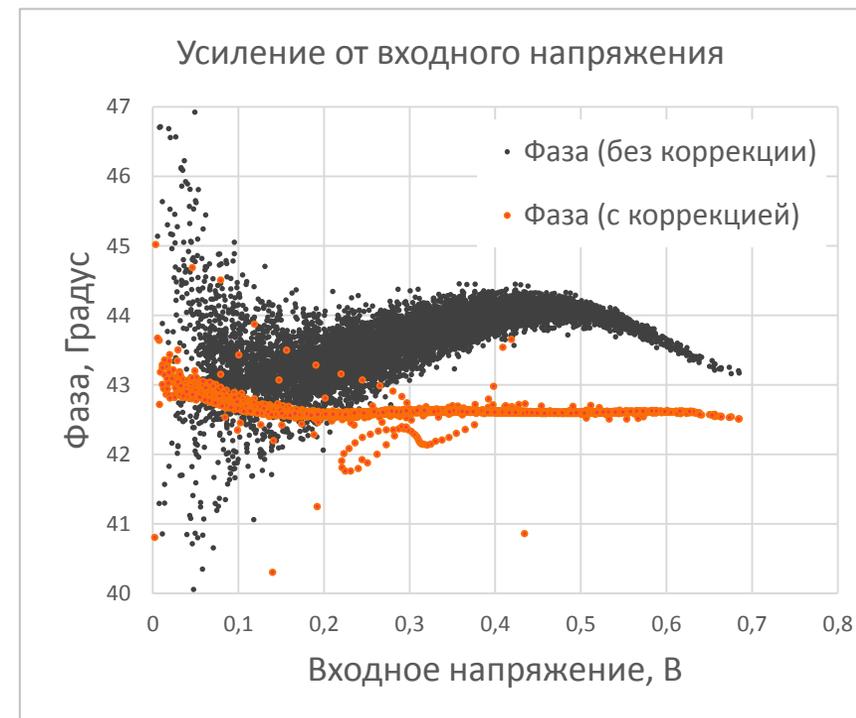
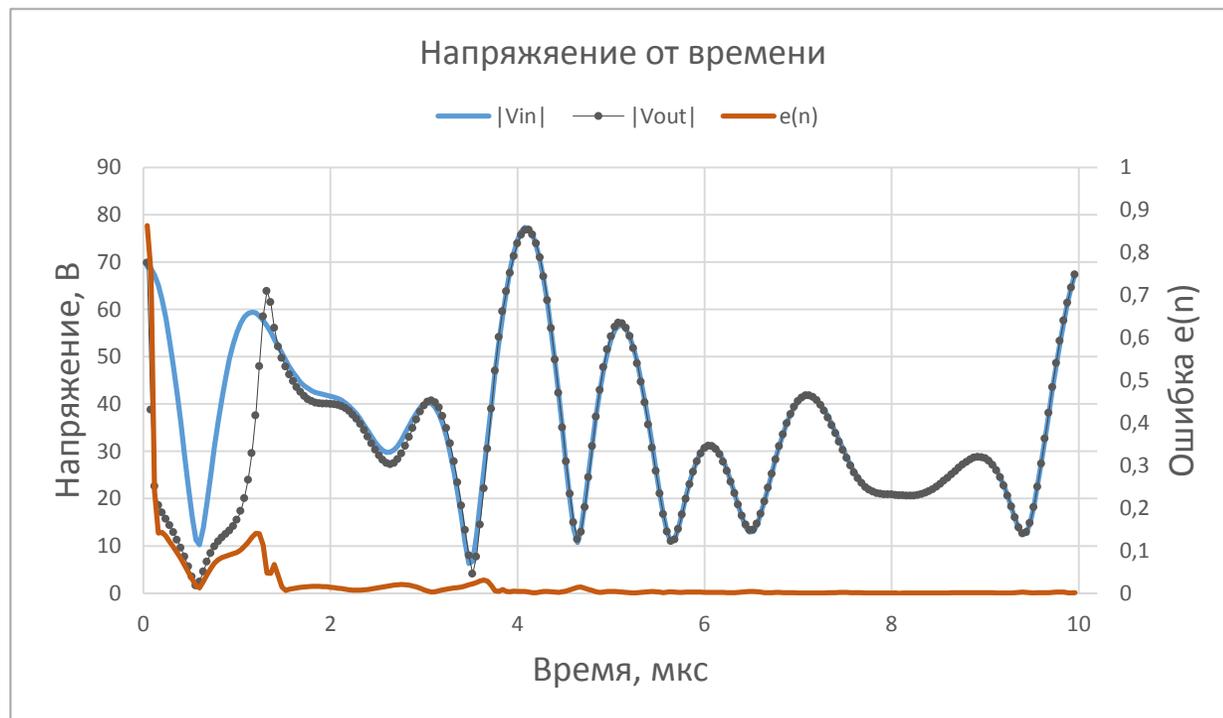
λ – параметр забывания

$$\lambda(0) = 0.95 \quad \lambda_0 = 0.99$$

$P(n)$ – аппроксимация Гессе в алгоритме Гаусса - Ньютона

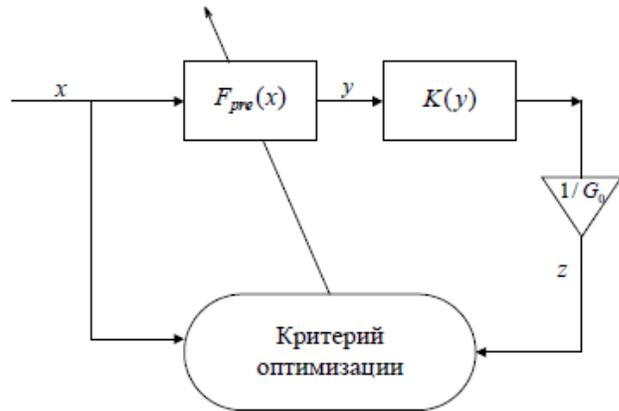
$$P(n) = p \cdot [K \cdot Q], \text{ где } p = 0.5$$

Результаты рекурсивного метода



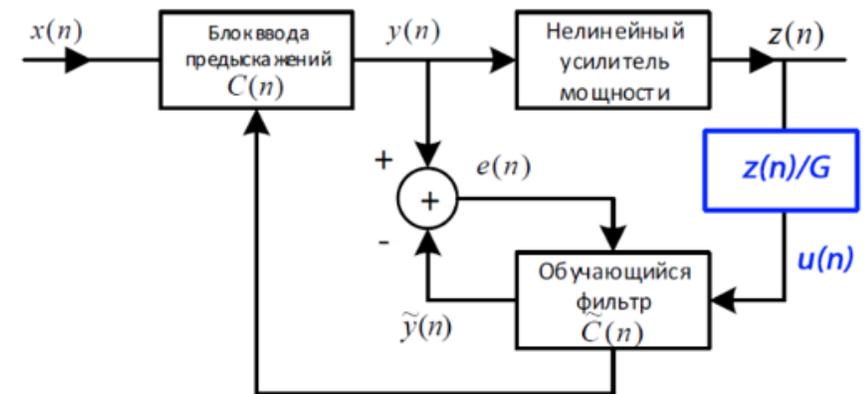
$$e(n) = y(n) - \tilde{c}^T \cdot Fu$$

Сравнение методов



Источник: Шутов В.Д. Линеаризация СВЧ усилителей мощности методом цифровых предсказаний. Воронеж. 2015. Диссертация

- возможно разбить на более простые шаги
- нужно решать матрицы размерностью $(S, K \cdot Q)$. Время расчет ~ 10 с. Нужно не менее 2 итераций



Источник: Кащенко И.Е. Линеаризация радиопередающих устройств декаметрового диапазона радиоволн с помощью цифровых предсказаний и инжекции гармоник. Омск. 2018. Диссертация.

- высокая сложность программной реализации
- коэффициенты системы ввода предсказаний подстраиваются на каждом отсчете

Выводы

- Полиномиальная модель показывает улучшение внеполосных искажений на 5-20дБ в зависимости от рабочей точки усилителя.
- Ограниченная область использования (нужен пиковый усилитель).
- Неравномерность тракта не более 0,2дБ.
- Нельзя получить внеполосные искажения меньше, чем в приемном тракте (цепь обратной связи).



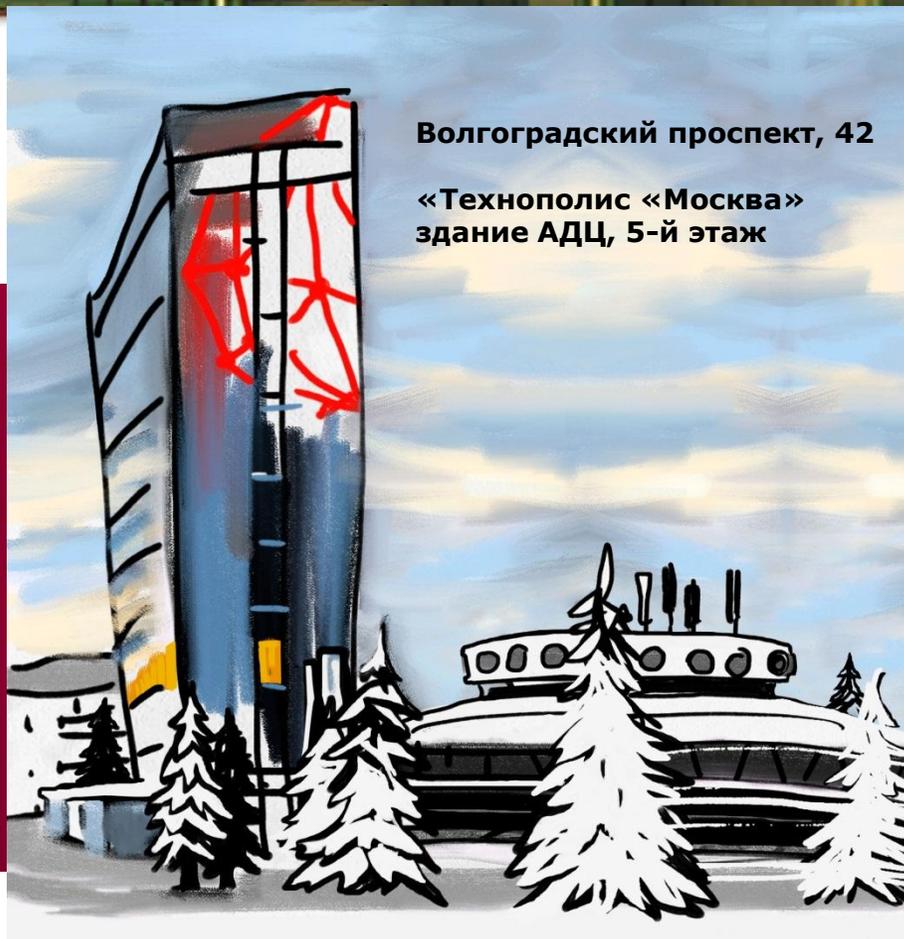
РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА

РАДИОКОМП



ТЕХНОПОЛИС
МОСКВА

Особая
экономическая
зона



Волгоградский проспект, 42

«Технополис «Москва»
здание АДЦ, 5-й этаж

www.radiocomp.ru / www.filin-rf.ru

NF@radiocomp.ru

www.signalhound.ru +7 495 95 777 45