

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

Кафедра АПУ

ОТЧЕТ
по лабораторной работе №1
по дисциплине «Теория автоматического управления»
Тема: Типовые нелинейности

Студент гр. 8392

Сергеев М.С.

Преподаватель

Синица А.М.

Санкт-Петербург
2021

СОДЕРЖАНИЕ

1	Цель работы	3
2	Задание на лабораторную работу	3
3	Основные теоретические положения	3
3.1	Пробные сигналы	3
3.1.1	Синусоида	3
3.1.2	Меандр	4
3.1.3	Пила	5
3.2	Типовые нелинейные звенья	5
3.2.1	Идеальное реле (знак)	5
3.2.2	Мертвая зона	6
3.2.3	Усилитель с насыщением	7
3.3	Фильтрация сигнала	8
3.4	Построение спектра сигналов	8
4	Обработка результатов эксперимента	8
4.1	Пробные сигналы	9
4.2	Статические характеристики нелинейностей	10
4.2.1	Статические характеристики “Идеального реле”	10
4.2.2	Статические характеристики нелинейности “Мёртвая зона”	11
4.2.3	Статические характеристики нелинейности “Насыщение”	12
4.3	Получение откликов типовых нелинейных звеньев на пробные сигналы. Получение спектров откликов	13
4.3.1	Нелинейность “Идеальное реле”	13
4.3.2	Нелинейность “Мёртвая зона”	15
4.3.3	Нелинейность “Насыщение”	17
4.3.4	Выводы	19
4.4	Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейным звеном сигнал. Получение спектров откликов	20
4.4.1	Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейностью “Идеальное реле” сигнал. Получение спектров откликов	20
4.4.2	Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейностью “Мёртвая зона” сигнал. Получение спектров откликов	23
4.4.3	Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейностью “Насыщение” сигнал. Получение спектров откликов	26

4.5	Получение откликов нелинейного звена на преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов . . .	29
4.5.1	Получение откликов нелинейности “Идеальное реле” преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов	29
4.5.2	Получение откликов нелинейности “Мёртвая зона” преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов	32
4.5.3	Получение откликов нелинейности “Насыщение” преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов	35
5	Выводы	38

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с типовыми нелинейными звеньями.

2 ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

Выполнить следующие действия выполнить над пробными сигналами (синусоида, меандр, пила) и всеми нелинейностями (реле, мертвая зона, насыщение)

1. Сгенерировать пробный сигнал длительностью 100 секунд, построить его спектр
2. Получить отклик типовых нелинейных звеньев на пробные сигналы, построить их спектры
3. Построить статическую характеристику нелинейного звена, объяснить разницу при разных пробных сигналах
4. Получить отклик линейного звена на преобразованный сигнал, построить его спектр
5. Изменить последовательность НЭ-ЛЗ на ЛЗ-НЭ, получить результирующий сигнал, построить его спектр

3 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1 Пробные сигналы

3.1.1 Синусоида

Синусоидальное изменение какой-либо величины (рис. 1) называется гармоническим колебанием. Примерами могут являться любые колебательные процессы начиная от качания маятника и кончая звуковыми волнами (гармонические колебания воздуха) — колебания напряжения в электрической сети переменного тока, изменение тока и напряжения в колебательном контуре и др.

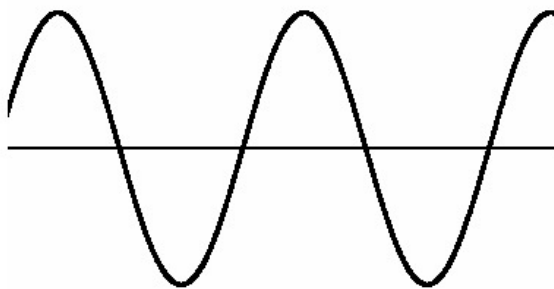


Рисунок 1 — Синусоида

Для вопросов теории автоматического управления синусоида имеет интерес вследствие того, что является базисной функцией преобразования Фурье. И, соответственно, спектр такого сигнала имеет значение только в одном отсчете частотной характеристики, что делает его идеальным для получения частотной характеристики объекта.

Для формирования синусоиды в Python используется функция $\sin(t)$ библиотеки NumPy:

```
sig_sin = np.sin(t)
```

3.1.2 Меандр

Меандр (по названию геометрического орнамента в виде ломаной линии) — периодический сигнал прямоугольной формы (рис. 2), широко используемый в радиотехнике. Длительность импульса и длительность паузы в периоде такого сигнала равны. Другими словами, меандр — периодический прямоугольный сигнал с коэффициентом заполнения, равным 0,5

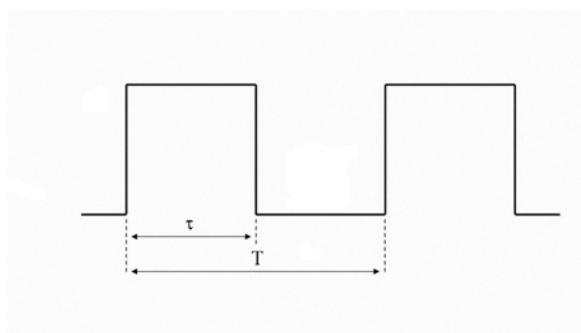


Рисунок 2 — Меандр

Спектр меандра пропорционален функции $\text{sinc}(x)$. Меандр может быть двухполярным (спектр описывается функцией $\text{sinc}(x)$) и однополярным ($\text{sinc}(x) + 1$)

Сигнал приближённо такого вида (с ненулевой длительностью фронтов и спадов) создаётся различными мультивибраторами (на транзисторах, логических элементах, операционных усилителях)

Для формирования меандра в Python используется функция `square(t)` из библиотеки `signal` пакета `SciPy`:

```
sig_meandr = signal.square(t)
```

3.1.3 Пила

Пилообразный сигнал является последовательностью пилообразных импульсов. Имеет более растянутую спектральную характеристику, чем меандр, что позволяет сигналом одной частоты анализировать отклик объекта на большем числе частот

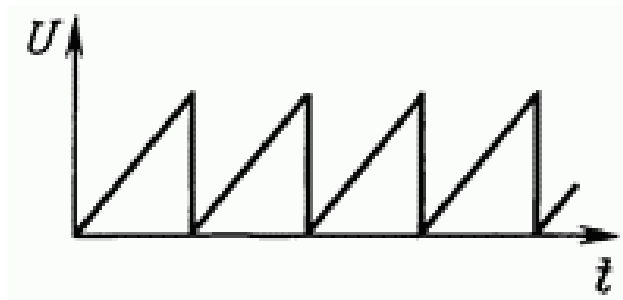


Рисунок 3 — Пила

Для формирования пилообразного сигнала в Python используется функция `sawtooth(t)` из библиотеки `signal` пакета `SciPy`:

```
sig_saw = signal.sawtooth(t)
```

3.2 Типовые нелинейные звенья

3.2.1 Идеальное реле (знак)

Нелинейность “Идеальное реле” позволяет учесть в моделях одноименных электромеханические механизмы или их электронные аналоги (транзисторы и др.), кроме того такая нелинейность необходима для описания физических процессов не зависящих от амплитуды, но зависящих от знака воздействия (например, сухое трение). Статическая характеристика представлена на рис. 4

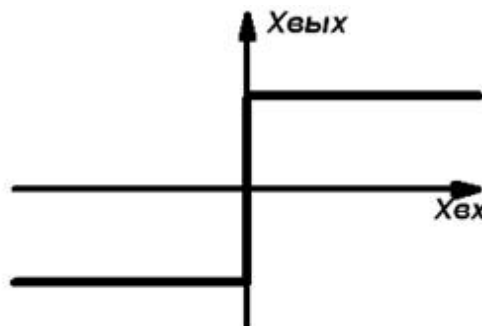


Рисунок 4 — Статическая характеристика нелинейности “Идеальное реле”

Для формирования Нелинейность “Идеальное реле” в Python используется функция $\text{sign}(x(t))$ из библиотеки NumPy:

```
sig_XXX_after_relay = np.sign(sig_XXX)
```

3.2.2 Мертвая зона

Мертвой зоной принято называть неединственность положения равновесия ($y = \text{const}$, $u = \text{const} \Rightarrow dy/dt = 0$, $du/dt = 0$). Примером объекта с такой нелинейностью может служить маятник. Нелинейность подобного рода приводит к конечности временных процессов. Статическая характеристика представлена на рис. 5.

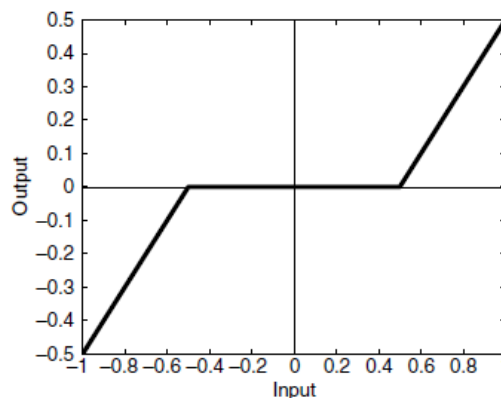


Рисунок 5 — Статическая характеристика нелинейности “Мертвая зона”

Нелинейность “Мертвая зона” позволяет учесть малые значения отклонений.

Для реализации нелинейности “Мертвая зона” в Python также необходимо реализовать функцию самостоятельно, а также векторизовать ее с помощью функции `np.vectorize`:

```
def dead_zone_scalar(x, width = 0.5):
    if np.abs(x)<width:
        return 0
    elif x>0:
        return x-width
    else:
        return x+width
dead_zone = np.vectorize(dead_zone_scalar,
    otypes=[np.float])
```

Векторизация — это прием ускорения вычислений, заключающийся в переходе от циклов к матричным (векторным) вычислениям. После создания функции задача сводится к применению полученной функции к сигналу:

```
sig_XXX_after_dead_zone = dead_zone(sig_XXX)
```

3.2.3 Усилитель с насыщением

Ограниченность уровня переменных связана в первую очередь с различными физическими ограничениями, препятствующими бесконечному росту переменных состояния, например вязкое трение (пренебрежимо малое при малых скоростях и имеющее квадратичный рост на больших) или различные процессы, связанные с насыщением. Статическая характеристика представлена на рис. 6.

Принцип работы такой нелинейности заключается в пропуске сигнала только до уровня предельной амплитуды.

Нелинейность “Насыщение” позволяет учесть большие значения переменных.

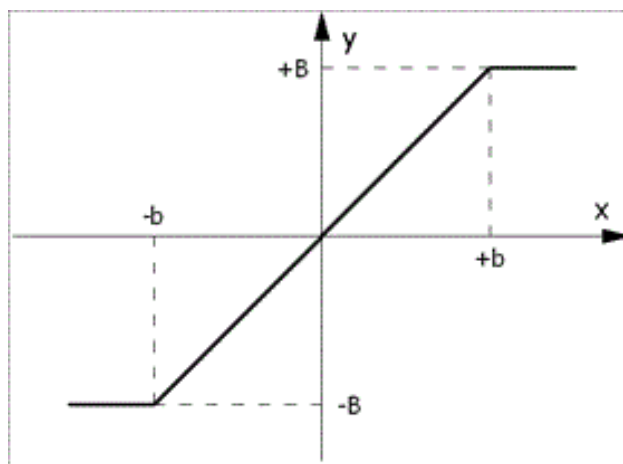


Рисунок 6 — Статическая характеристика нелинейности “Насыщение”

Для реализации нелинейности “Насыщение” в Python также необходимо реализовать функцию самостоятельно, а также векторизовать ее с помощью функции `np.vectorize`:

```
def saturation_scalar(x, hight = 0.5):  
    if np.abs(x)<hight:  
        return x  
    elif x>0:  
        return hight  
    else:  
        return -hight  
saturation = np.vectorize(saturation_scalar, oty  
pes=[np.float])
```

Далее применяем функцию к сигналу:

```
sig_XXX_after_saturation = saturation(sig_XXX)
```


3.3 Фильтрация сигнала

Фильтр — устройство (блок) для выделения желательных компонентов спектра сигнала и/или подавления нежелательных, фактически может представлять из себя любое звено с подходящей АЧХ.

В этой работе для фильтрации сигналов будем использовать простейший фильтр нижних частот — инерционное звено первого порядка, реальным аналогом которого служит, например, RC-фильтр.

Такие фильтры являются БИХ, для их применения в SciPy имеется функция `scipy.signal.lfilter`:

```
k = 1
T = 1
B = [ k/(1+T/0.01) ]
A = [1, -1/(1+0.01/T)]
filtered_sig_XXX_after_YYY=signal.lfilter(B,A,np.sign(sig_XXX_after_YYY))
```

3.4 Построение спектра сигналов

Для построения спектра дискретных сигналов берется модуль от дискретного (быстрого) преобразования Фурье сигнала.

В Python:

```
sig_spec = np.abs(fft(sin))
```

Заметим, что при формировании спектра таким образом он является репрезентативным только на отрезке $[0, T/2]$, где T — частота дискретизации. Кроме того необходимо получить значения частот для отсчетов дискретного преобразования Фурье:

В Python имеется функция:

```
freqs = np.fft.fftfreq(<Размер вектора сигнала>,
<Период дискретизации>)
```

4 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Вариант номер 14

Амплитуда тестового сигнала: 2.4

Частота тестового сигнала: 50 Гц

Длительность тестового сигнала: 100 с

Параметр нелинейностей 1: 1.9

Коэффициент усиления линейного звена: 4.7

Постоянная времени линейного звена: 2.9

Период дискретизации сигнала: 0.00001 с

4.1 Пробные сигналы

На рис. 7 представлена чистая синусоида и её спектр. Значение амплитуды сигнала составляет 2.4, а частоты - 50 Гц. Спектр построенного синусоидального сигнала является спичкой на частоте 50 Гц

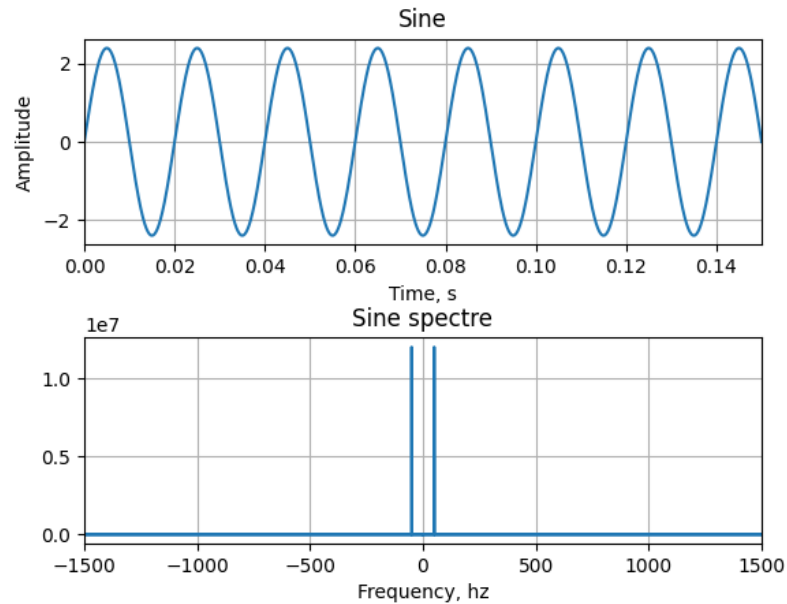


Рисунок 7 — Синусоида и её спектр

На рис. 8 представлен меандр скважностью 0.5 и его спектр. Появление дополнительных гармоник на спектре обусловлено наличием нечетных гармоник в его разложении в ряд Фурье, с амплитудой, уменьшающейся пропорционально их номеру

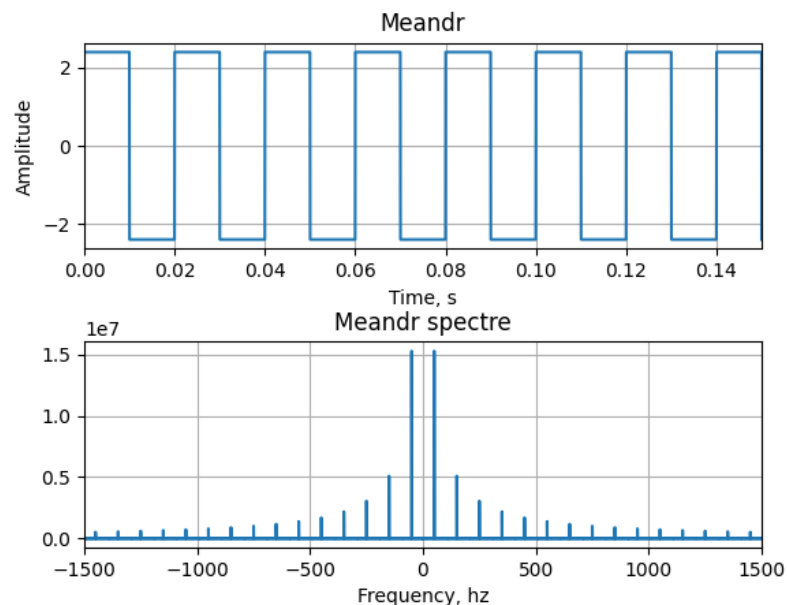


Рисунок 8 — Меандр и его спектр

На рис. 9 представлен пилообразный сигнал и его спектр. Спектр соответствует спектру меандра, но со включенными, помимо нечетных, четными гармониками

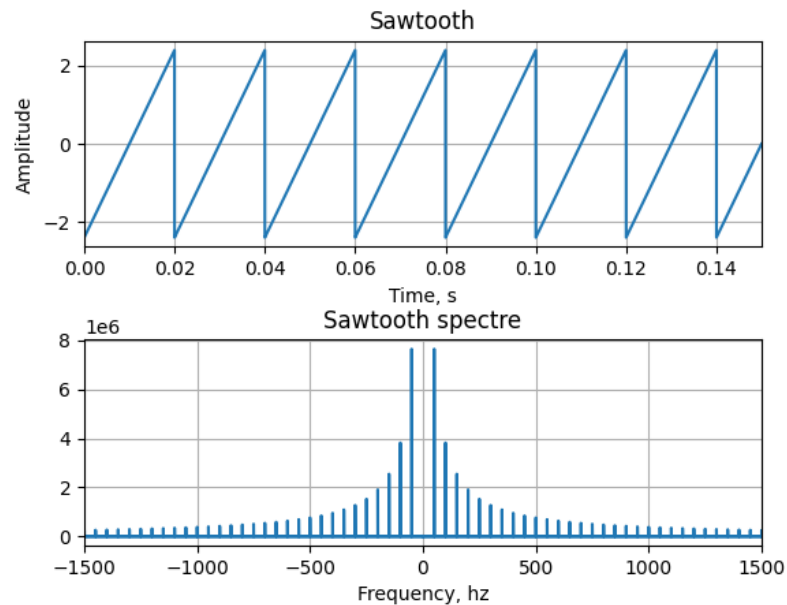


Рисунок 9 — Пила и ее спектр

4.2 Статические характеристики нелинейностей

4.2.1 Статические характеристики “Идеального реле”

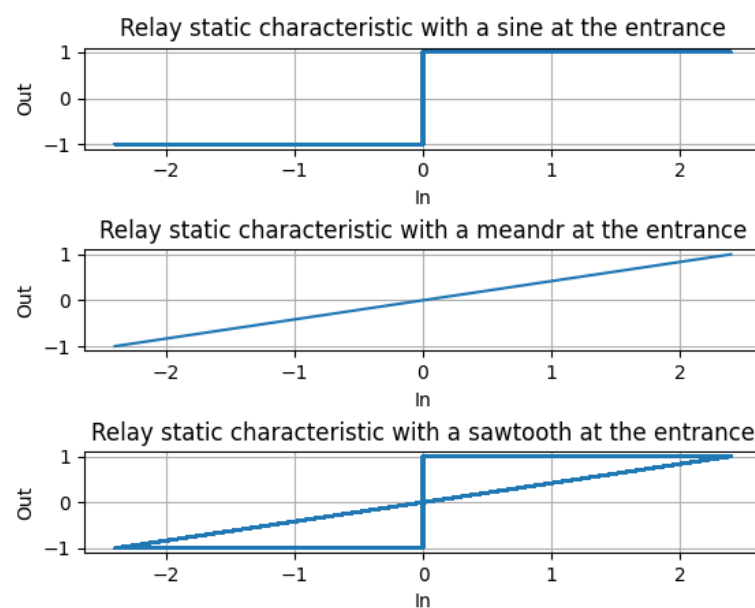


Рисунок 10 — Статические характеристики нелинейности “Идеальное реле”

На рис. 10 представлена статическая характеристика нелинейности “Идеальное реле” при подаче разных сигналов: синусоиды, меандра и пи-лы. Статическая характеристика показывает, что, при отрицательных входах, выход будет равен -1, а при положительных входах выход будет равен 1. Синусоида сформировала ту же характеристику, что и линейный возрастающий сигнал, используемый в теоретическом описании нелинейности “Идеального реле”, представляющую собой монотонную прямую с прыжком первого рода в точке 0. При подаче меандра статическая характеристика приобрела вид наклонной прямой, соединяющей две точки, соответствующие двум значениям, в которых мог бы находиться график меандра. Пилообразный сигнал же скомбинировал в себе черты первой и второй характеристик, так как наличие наклонного переднего фронта аналогично наличию линейно возрастающего сигнала, а вертикальный задний фронт соответствует скачку между значениями, что характерно для меандра

4.2.2 Статические характеристики нелинейности “Мёртвая зона”

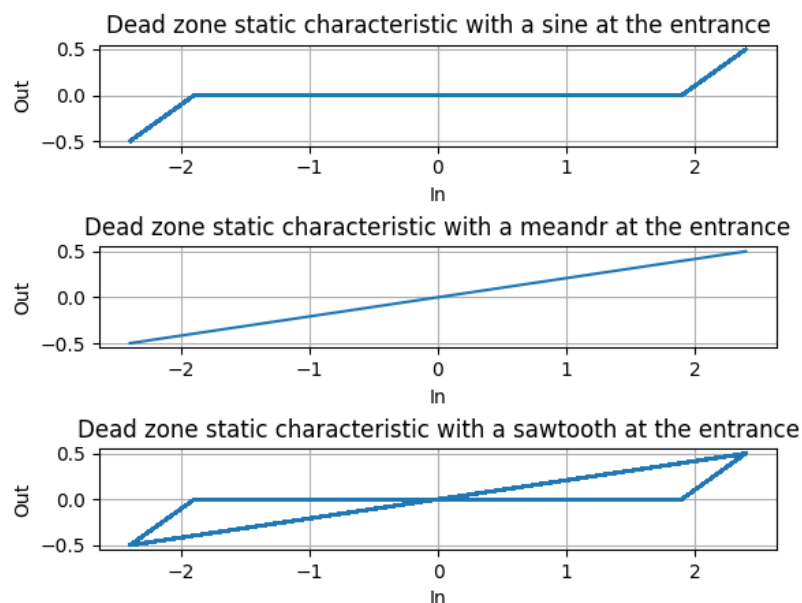


Рисунок 11 — Статические характеристики нелинейности “Мёртвая зона”

На рис. 11 представлена статическая характеристика нелинейности “Мёртвая зона” при подаче разных сигналов: синусоиды, меандра и пи-лы. По этой статической характеристике видно, что все статические характеристики получили отличными друг от друга. Синусоида сформировала ту же характеристику, что и линейный возрастающий сигнал, используемый в теоретическом описании нелинейности “Мёртвая зона”, представляющую из себя линейно возрастающую функцию, которая смещается на 3.8 на зна-

чении 0. При подаче меандра статическая характеристика приобрела вид наклонной прямой, соединяющий две точки, соответствующие двум значениям, в которых мог бы находиться график меандра. Пилообразный сигнал же скомбинировал в себе черты первой и второй характеристик, так как наличие наклонного переднего фронта аналогично наличию линейно возрастающего сигнала, а вертикальный задний фронт соответствует скачку между значениями, что характерно для меандра

4.2.3 Статические характеристики нелинейности “Насыщение”

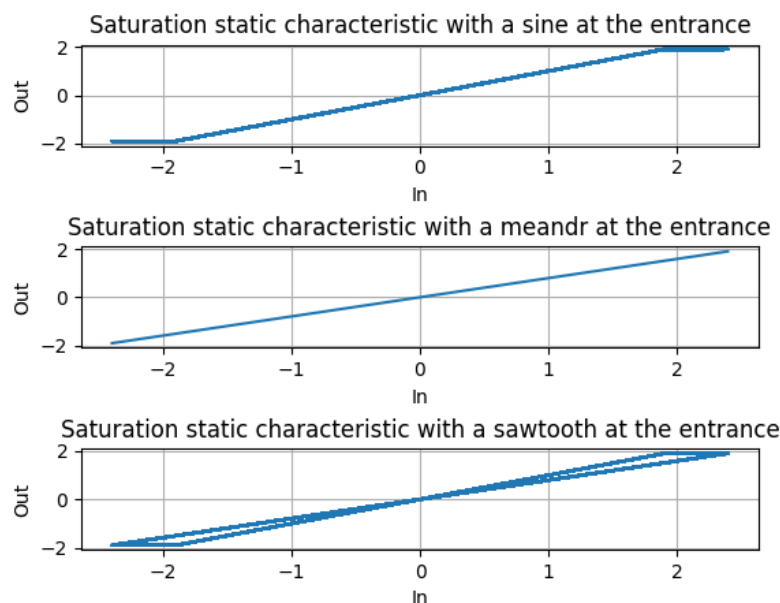


Рисунок 12 — Статические характеристики нелинейности “Насыщение”

На рис. 12 представлена статическая характеристика нелинейности “Насыщение” при подаче разных сигналов: синусоиды, меандра и пилы. По этой статической характеристике видно, что все статические характеристики получили отличными друг от друга. Синусоида сформировала ту же характеристику, что и линейный возрастающий сигнал, используемый в теоретическом описании нелинейности “Насыщение”, представляющую из себя линейно возрастающую функцию, которая рассекается на значениях -1.9 и 1.9. При подаче меандра статическая характеристика приобрела вид наклонной прямой, соединяющий две точки, соответствующие двум значениям, в которых мог бы находиться график меандра. Пилообразный сигнал же скомбинировал в себе черты первой и второй характеристик, так как наличие наклонного переднего фронта аналогично наличию линейно возрастающего сигнала, а вертикальный задний фронт соответствует скачку между значениями, что характерно для меандра

4.3 Получение откликов типовых нелинейных звеньев на пробные сигналы. Получение спектров откликов

4.3.1 Нелинейность “Идеальное реле”

После прохождения нелинейности “Идеальное реле” сигнал приобретает форму меандра, амплитуда которого по модулю равна 1. Сам же сигнал остаётся на той же частоте

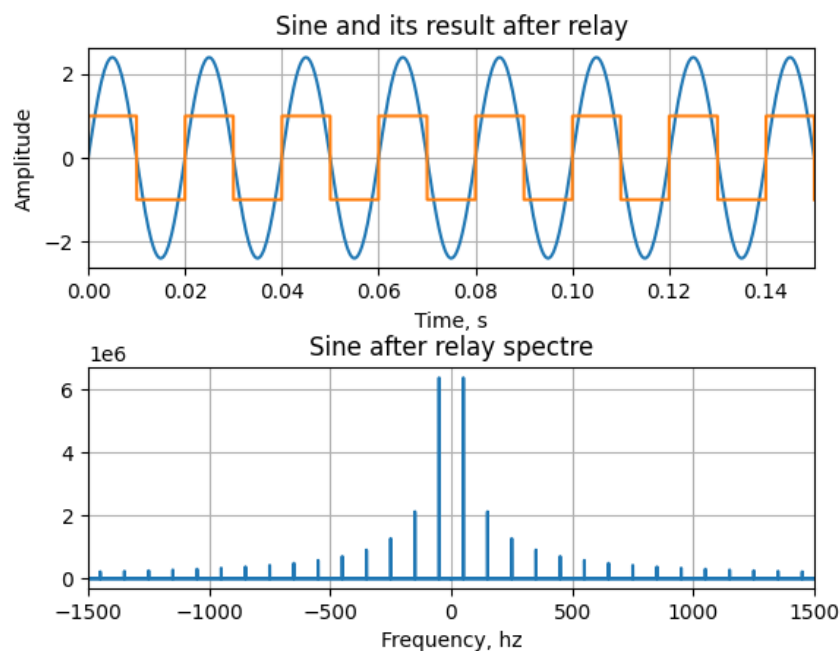


Рисунок 13 — График синусоиды и отклик нелинейности “Идеальное реле” на неё. Спектр отклика

На рис. 13 представлена синусоида до и после прохождения нелинейности “Идеальное реле”, а также спектр преобразованного сигнала. Синусоида после прохождения нелинейности “Идеальное реле” преобразилась до вида меандра, имеющего ту же частоту, что и пробный сигнал. Это отражается на спектре: в нём становится больше гармоник, — это обуславливается дополнительными преобразованиями меандра до синусоиды. Амплитуда же полученного меандра не соответствует амплитуде поданной синусоиды - это отличительная особенность нелинейности “Идеальное реле”. Амплитуда выходного сигнала по модулю будет равна 1. Это заметно и на спектре, где главная гармоника уменьшилась в своей мощности

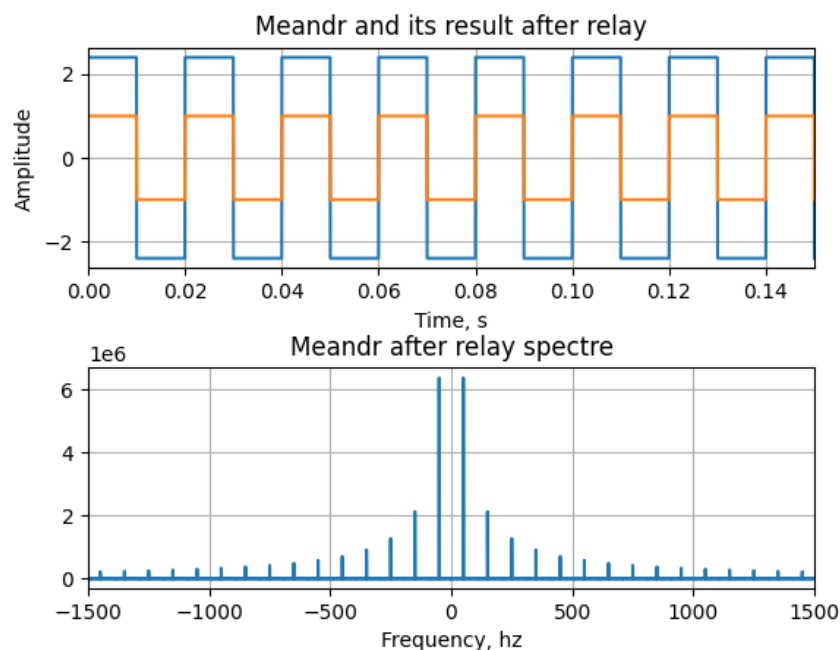


Рисунок 14 — График меандра и отклик нелинейности “Идеальное реле” на него. Спектр отклика

На рис. 14 представлен меандр до и после прохождения нелинейности “Идеальное реле”, а также спектр преобразованного сигнала. Меандр после прохождения нелинейности “Идеальное реле” лишь изменяет свою амплитуду, что видно и на спектре: все гармоники теряют в своей мощности

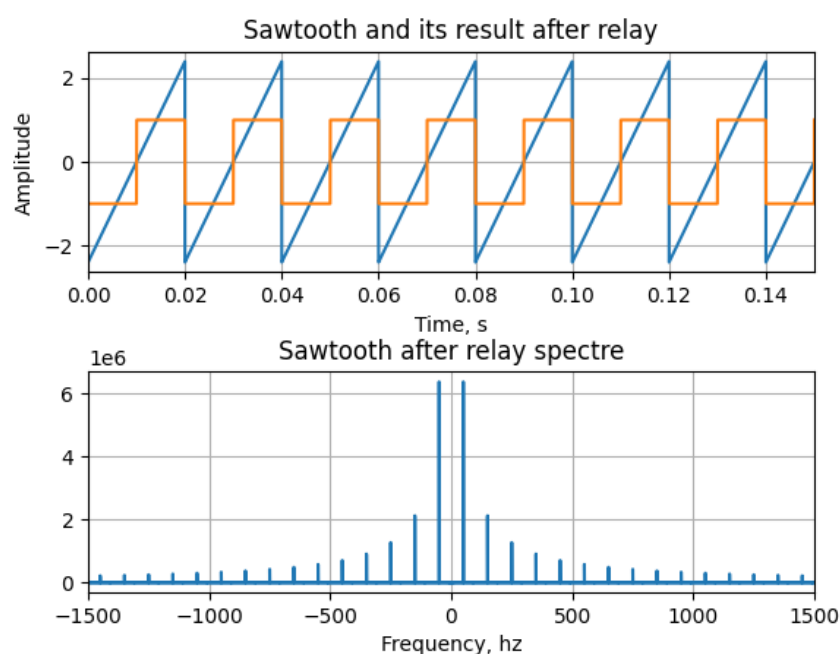


Рисунок 15 — График пилы и отклик нелинейности “Идеальное реле” на неё. Спектр отклика

На рис. 15 представлена пила до и после прохождения нелинейности “Идеальное реле”, а также спектр преобразованного сигнала. Пила после прохождения нелинейности “Идеальное реле” преобразилась до вида меандра, имеющего ту же частоту, что и пробный сигнал. Амплитуда выходного сигнала по модулю равна 1. Несмотря, что амплитуда получаемого на выходе меандра имеет меньшую амплитуду, нежели исходная пила, каждая из гармоник меандра мощнее гармоник пила на той же частоте. Также и самих гармоник стало в два раза больше. Это обусловлено тем, что пила “дальше” по виду от синусоиды. Нечётные гармоники пила - отрисовка “выступающих за меандр” частей пила. Из-за наклонной части пила, находящейся “под меандром” на спектре и видно, что гармоники меандра мощнее гармоник пила на той же частоте

4.3.2 Нелинейность “Мёртвая зона”

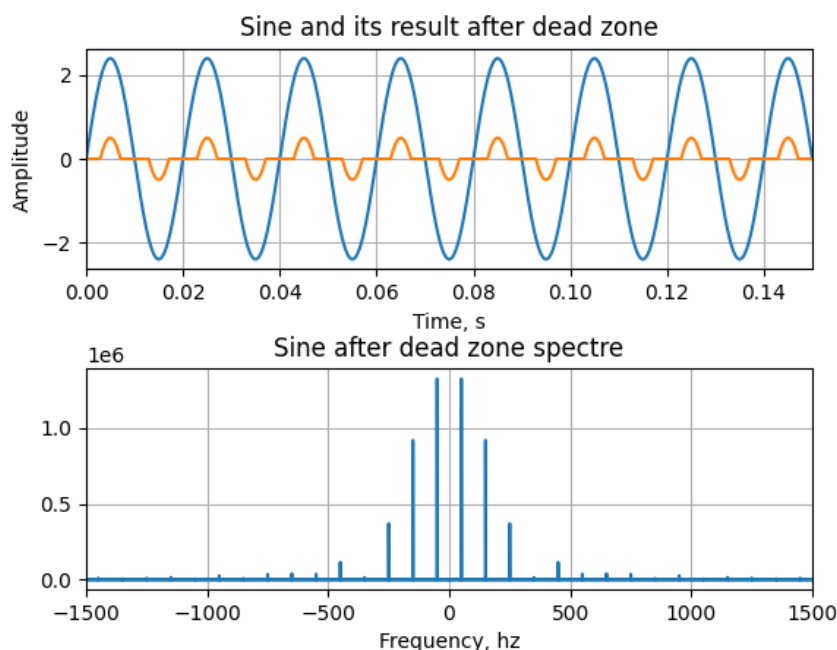


Рисунок 16 — График синусоиды и отклик нелинейности “Мёртвая зона” на неё. Спектр отклика

На рис. 16 представлена синусоида до и после прохождения нелинейности “Мёртвая зона”, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона” синусоида “вжимается” в ось абсцисс. Это отражается и на спектре: главная гармоника синусоиды теряет в мощности и появляются дополнительные гармоники, обусловленные неканоническим видом синусоиды после прохождения нелинейности “Мёртвая зона”

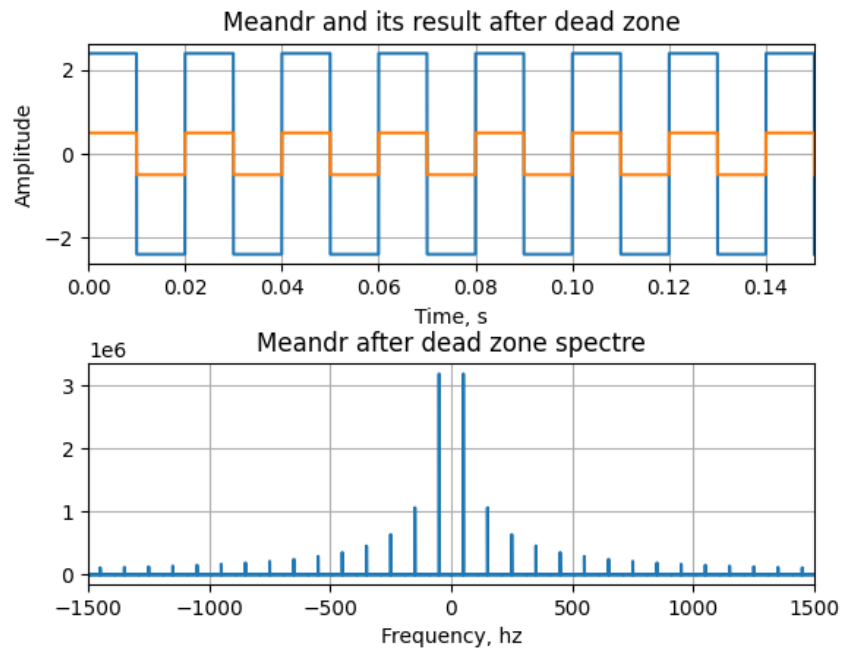


Рисунок 17 — График меандра и отклик нелинейности “Мёртвая зона” на него. Спектр отклика

На рис. 17 представлен меандр до и после прохождения нелинейности “Мёртвая зона”, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона” меандр меняет лишь свою амплитуду, что видно и на спектре: гармоники теряют в мощности

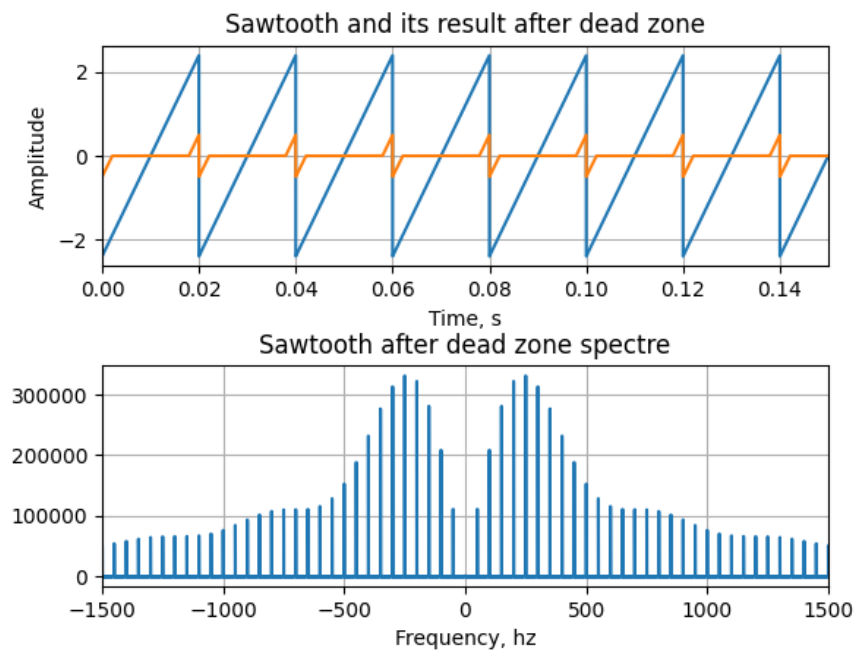


Рисунок 18 — График пилы и отклик нелинейности “Мёртвая зона” на неё. Спектр отклика

На рис. 18 представлена пила до и после прохождения нелинейности “Мёртвая зона”, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона” пила “вжимается” в ось абсцисс. Это отражается и на спектре: все гармоники теряют в мощности; основная и ближайшие к ней гармоники подавляются сильнее остальных, в результате чего частота новой основной гармоники стала выше частоты изначальной основной гармоники

4.3.3 Нелинейность “Насыщение”

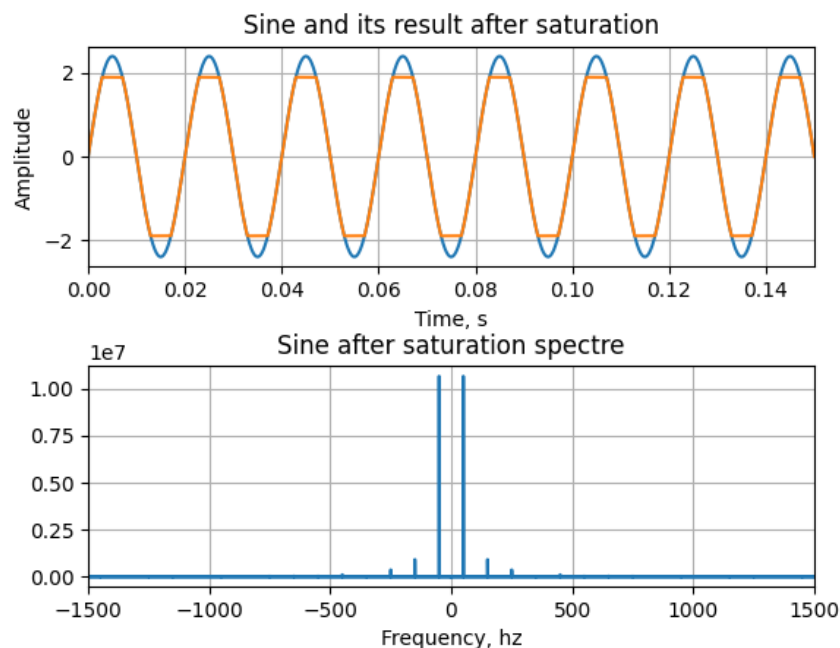


Рисунок 19 — График синусоиды и отклик нелинейности “Насыщение” на неё. Спектр отклика

На рис. 16 представлена синусоида до и после прохождения нелинейности “Насыщение”, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Насыщение” синусоида потеряла небольшую часть амплитуды. Верхняя часть каждого “лепестка” синусоиды срезалась под действием нелинейности “Насыщение”. На спектре же данное преобразование отражается потерей главной гармоникой небольшой части своей мощности, а также добавлением нескольких более высокочастотных гармоник. Это обусловлено тем, что срезанная нелинейностью “Насыщение” часть должна быть восстановлена для получения канонического вида сигнала синусоидальной формы. Так как эта срезанная часть мала в моей работе, то и, соответственно, гармоники имеют невысокую мощность и численность

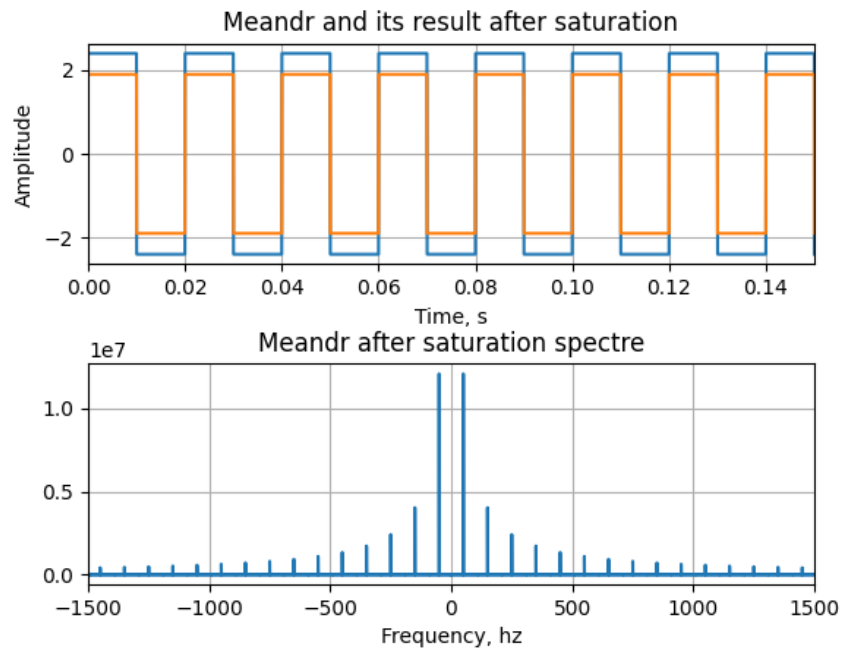


Рисунок 20 — График меандра и отклик нелинейности “Насыщение” на него. Спектр отклика

На рис. 17 представлен меандр до и после прохождения нелинейности “Насыщение”, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Насыщение” меандр лишь изменяет свою амплитуду, что видно и на спектре: все гармоники теряют в своей мощности

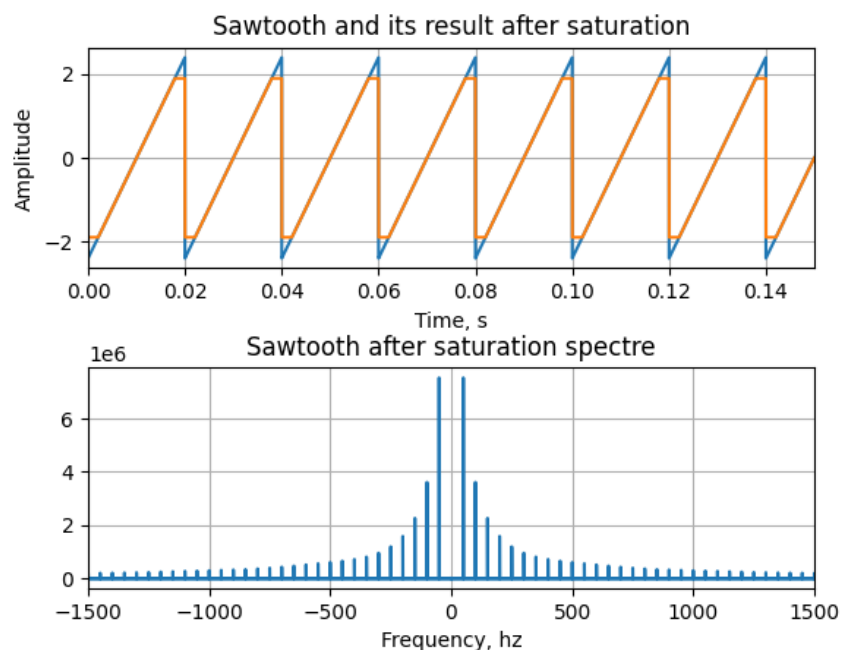


Рисунок 21 — График пилы и отклик нелинейности “Насыщение” на неё. Спектр отклика

На рис. 18 представлена пила до и после прохождения нелинейности “Насыщение”, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Насыщение” пила потеряла небольшую часть амплитуды. Верхняя часть каждого “зубчика” пилы срезалась под действием нелинейности “Насыщение”. На спектре же данное преобразование, на первый взгляд, отражается лишь потерей амплитуды каждой из гармоник. В этой работе тяжело различить изменения, которые связаны со срезанием части каждого “зубчика” пилы, так как сам пилообразный сигнал обладает очень отдалённой формой синусоиды, а поэтому и количество гармоник получается невероятно большим. В связи с этим и входными данными варианта я не могу однозначно утверждать о идентичности спектров, не рассматривая разницу по амплитуде

4.3.4 Выводы

Из вышерассмотренных комбинаций нелинейностей и сигналов, можно высказать несколько выводов. При воздействии на исходный сигнал нелинейности “Идеальное реле” лучше всего себя показывает меандр, который изменяет только лишь свою амплитуду, а, как следствие, спектр до и после воздействия нелинейности “Идеальное реле” изменяет лишь мощность гармоник, не меняя их частоту и не добавляя новые. При воздействии на исходный сигнал нелинейности “Мёртвая зона” было выяснено, что исходный сигнал “вдавливается” в ось абсцисс. Меандр не очень чувствителен к таким преобразованиям нелинейности “Мёртвая зона”, так как имеет мгновенное изменение сигнала, похожее на разрывы первого рода. Из-за этого нелинейность “Мёртвая зона” действует только на амплитуду меандра, не имея возможность “вдавливить” его в ось абсцисс из-за отсутствия наклона сигнала. На спектрах синусоиды и пилы нелинейность “Мёртвая зона” отражается особенно ярко: в спектр синусоиды добавляются гармоники, а главная гармоника теряет в амплитуде; в спектре же пилы происходят ещё большие изменения. Эти изменения выглядят так: главная и ближайшие к ней гармоники подавляются, а главной гармоникой становится более высокочастотная гармоника; все гармоники теряют в мощности. При воздействии на исходный сигнал нелинейности “Насыщение” было выяснено, что синусоида робастна к воздействию этой нелинейности. Синусоида после прохождения нелинейности “Насыщение” лишь немного теряет в амплитуде и приобретает несколько высокочастотных и маломощных гармоник, которые компенсируют срезанную нелинейностью часть. Меандр по-прежнему проявляет себя лучше всех. Как и в случае с вышерассмотренными нелинейностями, меандр теряет в амплитуде, что отражает и на спектре - все гармоники теряют в мощности. Тем не менее никаких дополнительных гармоник не возникает, что говорит о устойчивости этого сигнала к нелинейностям. Пилообразный сигнал при отображённой вычислительной

мощности, рассчитанной на 100 000 точек, не изменяется даже при детальнейшем рассмотрении. Возможно при большем количестве точек и большем срезе каждого из “зубчиков” пилы можно было бы получить более наглядные результаты. Как итог, можно сказать, что меандр проявил себя лучше всех при взаимодействии с такими нелинейностями, как “Идеальное реле”, “Мёртвая зона”, “Насыщение”. После их воздействия он теряет своей амплитуды, а на спектре изменения касаются только мощности гармоник

4.4 Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейным звеном сигнал. Получение спектров откликов

4.4.1 Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейностью “Идеальное реле” сигнал. Получение спектров откликов

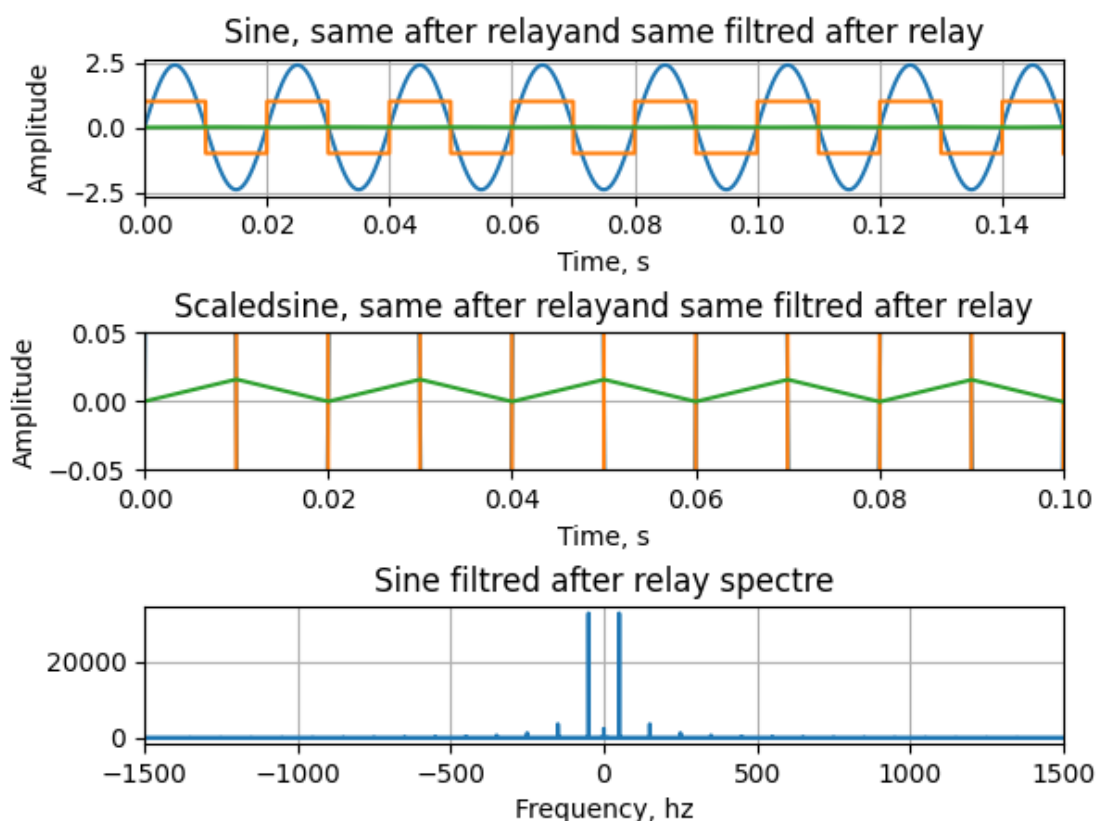


Рисунок 22 — График синусоиды, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 22 представлена синусоида, она же после прохождения нелинейности “Идеальное реле” и синусоида, пропущенная последовательно че-

рез нелинейность “Идеальное реле” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Идеальное реле”, а затем фильтрующего звена, преобразований сигнал становится значительно подавлен, но не становится монотонной прямой - это видно на детальном рассмотрении сигнала. Результирующий сигнал напоминает своей формой асимптотически построенную синусоиду, сдвинутую по фазе на половину периода исходной синусоиды. Касательно амплитуды, полученный сигнал значительно потерял в амплитуде. На спектре же его главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначальной синусоиды, но мощность этой гармоники значительно уменьшилась. Также и самих гармоник после фильтрации относительно преобразованной нелинейностью “Идеальное реле” синусоиды становится меньше. Это обусловлено большей схожестью полученного сигнала с каноническим видом синусоиды, которая смещена на значение равное своей амплитуде. Заметна и появившаяся невероятно низкочастотная гармоника

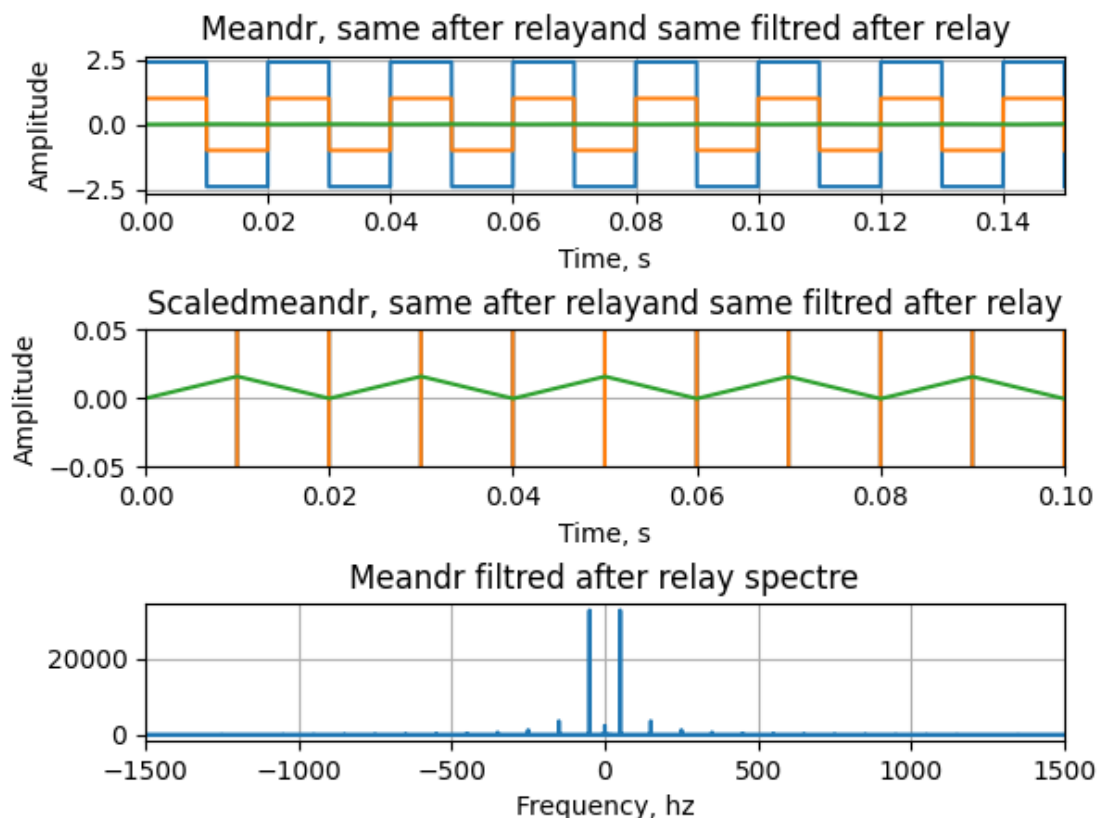


Рисунок 23 — График меандра, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 23 представлен меандр, он же после прохождения нелинейности “Идеальное реле” и меандр, пропущенный последовательно через нелинейность “Идеальное реле” и линейное фильтрующее звено, а также спектр

преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Идеальное реле” преобразований сигнал остаётся меандром, который теряет в амплитуде из-за свойств нелинейности “Идеальное реле”. Полученный после фильтрации сигнал напоминает своей формой асимптотически построенную синусоиду, сдвинутую по фазе на половину периода исходного меандра. На спектре же его главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначального меандра, но мощность этой гармоники значительно уменьшилась. Также и самих гармоник после фильтрации относительно преобразованного нелинейностью “Идеальное реле” меандра становится меньше. Это обусловлено большей схожестью полученного сигнала с каноническим видом синусоиды, которая смещена на значение равное своей амплитуде. Заметна и появившаяся невероятно низкочастотная гармоника

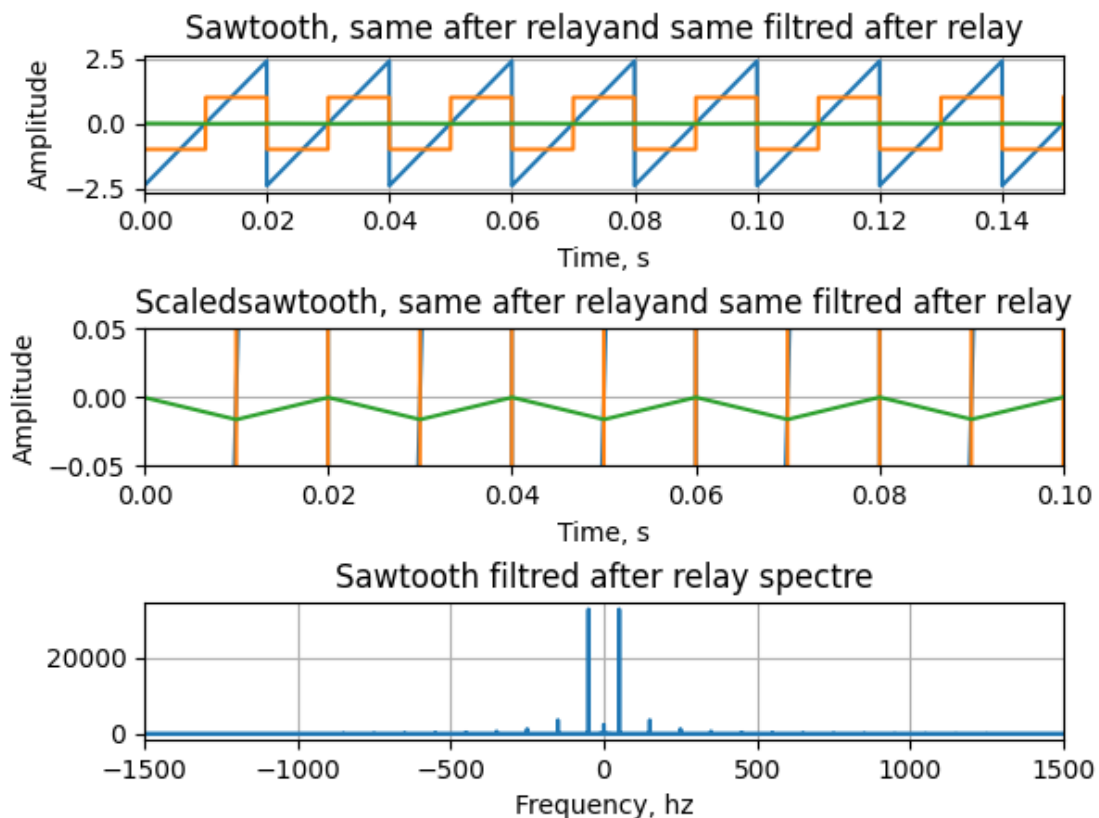


Рисунок 24 — График пилы, отклика нелинейности и отклик линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 24 представлена пила, она же после прохождения нелинейности “Идеальное реле” и пила, пропущенная последовательно через нелинейность “Идеальное реле” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Идеальное реле”, а затем фильтрующего звена, преобразований сигнал становится значительно подавлен, но не становится монотонной прямой - это видно

на детальном рассмотрении сигнала. Результирующий сигнал напоминает своей формой асимптотически построенную синусоиду, сдвинутую по фазе на половину периода исходной пилы. Касательно амплитуды, полученный сигнал значительно потерял в амплитуде. На спектре же его главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначальной синусоиды, но мощность этой гармоники значительно уменьшилась. Также и самих гармоник после фильтрации относительно преобразованной нелинейностью “Идеальное реле” пилы становится меньше. Это обусловлено большей схожестью полученного сигнала с каноническим видом синусоиды, которая смещена на значение равное своей амплитуде. Заметна и появившаяся невероятно низкочастотная гармоника

4.4.2 Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейностью “Мёртвая зона” сигнал. Получение спектров откликов

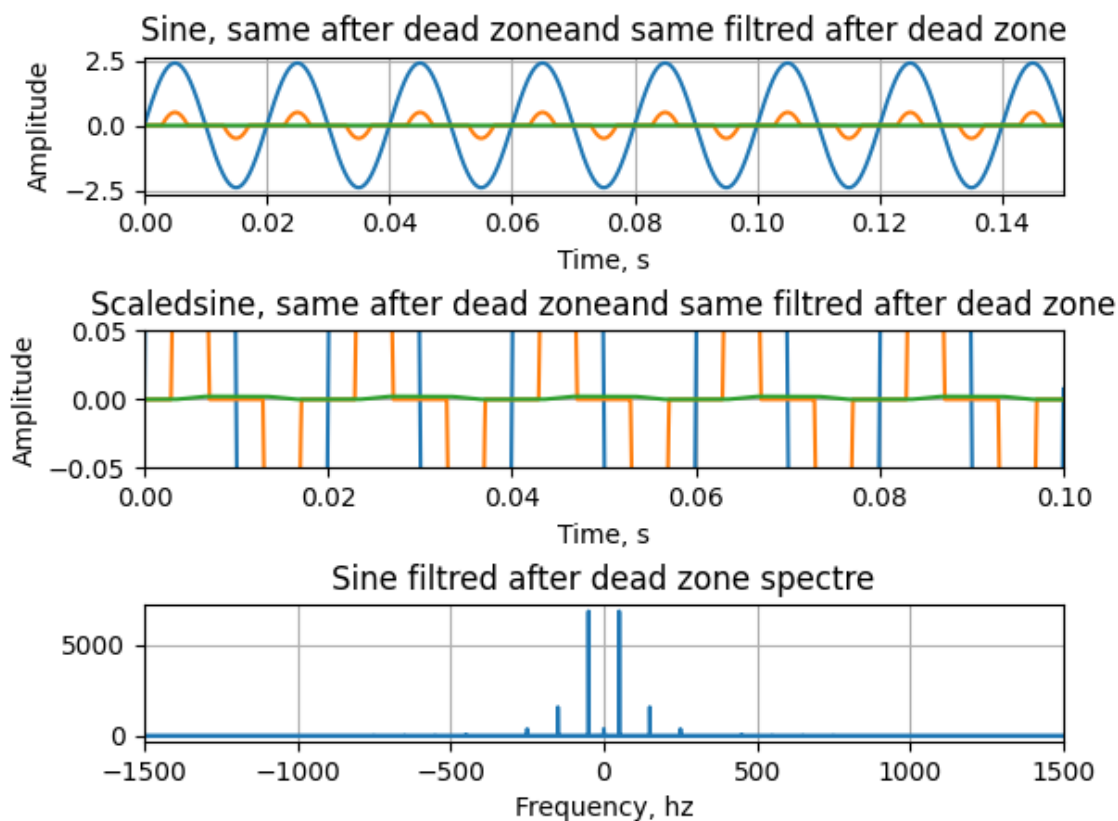


Рисунок 25 — График синусоиды, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 25 представлена синусоида, она же после прохождения нелинейности “Мёртвая зона” и синусоида, пропущенная последовательно че-

рез нелинейность “Мёртвая зона” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона”, а затем фильтрующего звена, преобразований сигнал становится значительно подавлен, но не становится монотонной прямой - это видно на детальном рассмотрении сигнала. Результирующий сигнал напоминает своей формой асимптотически построенную синусоиду, сдвинутую по фазе на половину периода исходной синусоиды. Касательно амплитуды, полученный сигнал значительно потерял в амплитуде. На спектре же его главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначальной синусоиды, но мощность этой гармоники значительно уменьшилась. Также и самих гармоник после фильтрации относительно преобразованной нелинейностью “Мёртвая зона” синусоиды становится меньше. Это обусловлено большей схожестью полученного сигнала с каноническим видом синусоиды, которая смещена на значение равное своей амплитуде. Заметна и появившаяся невероятно низкочастотная гармоника

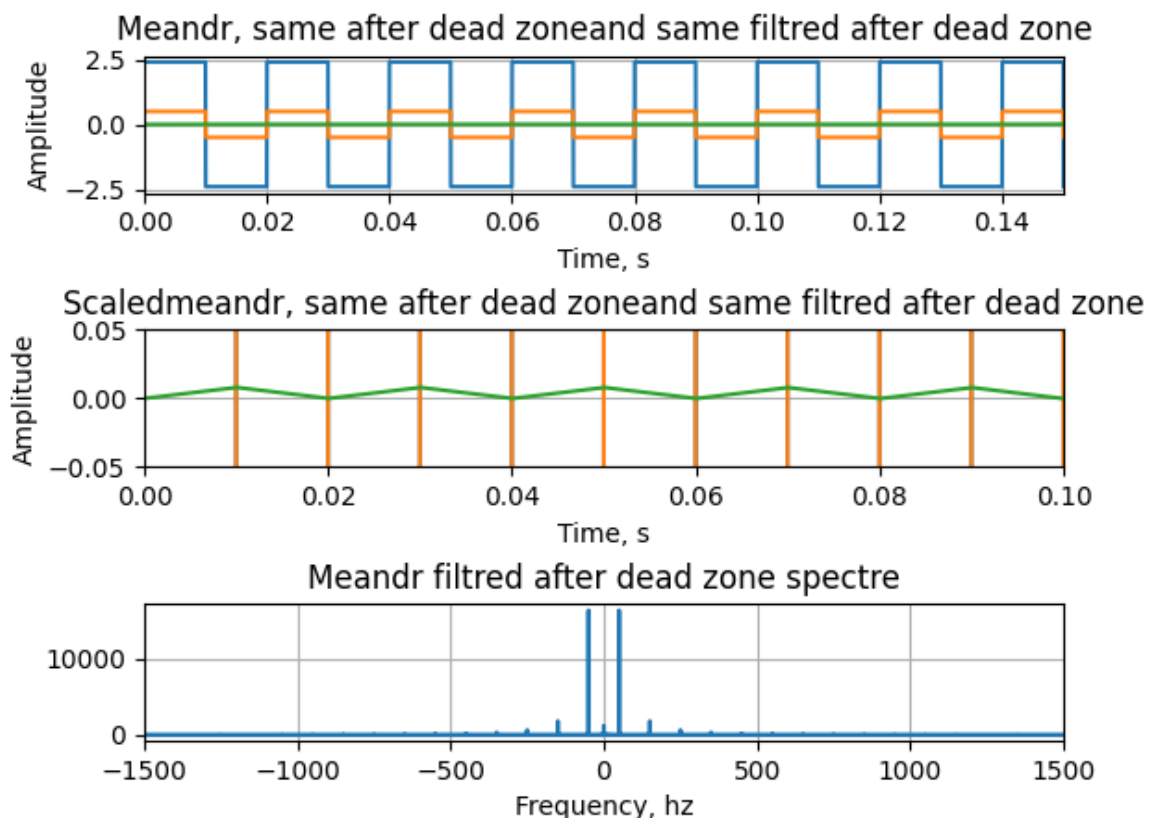


Рисунок 26 — График меандра, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 26 представлен меандр, он же после прохождения нелинейности “Мёртвая зона” и меандр, пропущенный последовательно через нелинейность “Мёртвая зона” и линейное фильтрующее звено, а также спектр

преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона” преобразований сигнал остаётся меандром, который теряет в амплитуде из-за свойств нелинейности “Мёртвая зона”. Полученный после фильтрации сигнал напоминает своей формой асимптотически построенную синусоиду, сдвинутую по фазе на половину периода исходного меандра. На спектре же его главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначального меандра, но мощность этой гармоники значительно уменьшилась. Также и самих гармоник после фильтрации относительно преобразованного нелинейностью “Мёртвая зона” меандра становится меньше. Это обусловлено большей схожестью полученного сигнала с каноническим видом синусоиды, которая смещена на значение равное своей амплитуде. Заметна и появившаяся невероятно низкочастотная гармоника

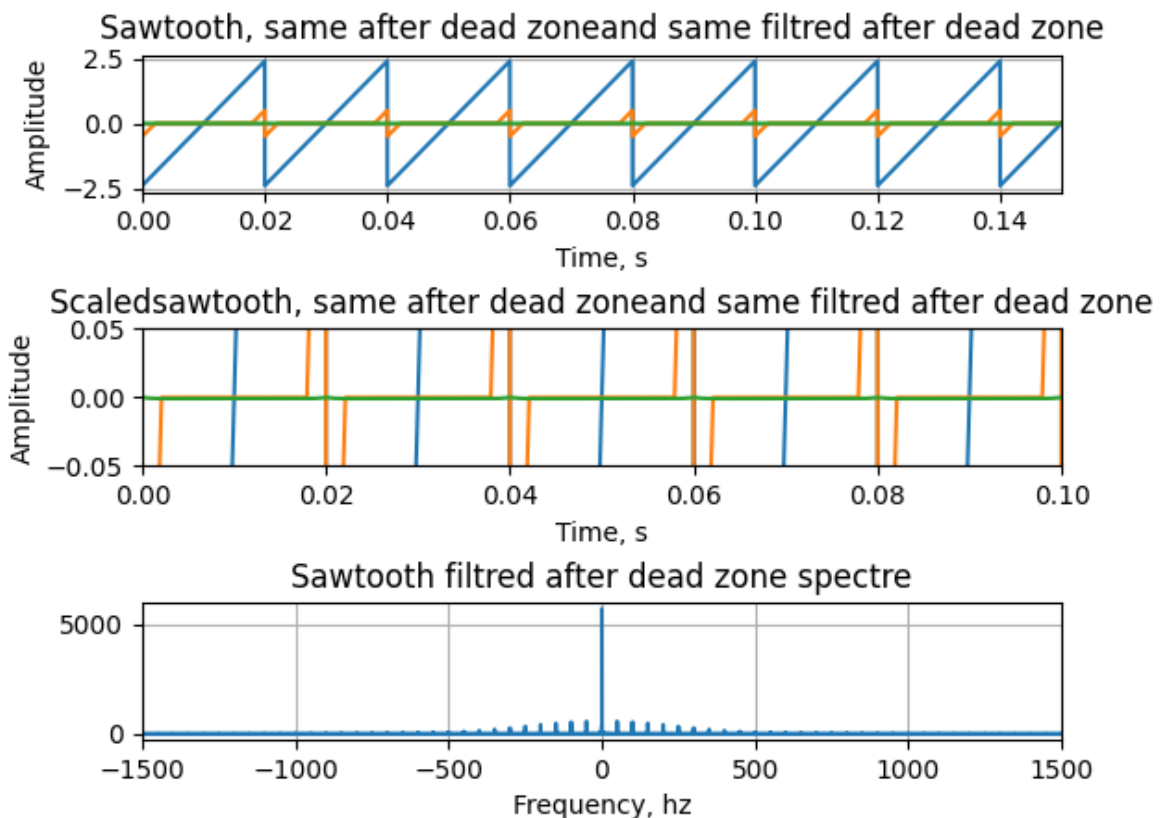


Рисунок 27 — График пилы, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 27 представлена пила, она же после прохождения нелинейности “Мёртвая зона” и пила, пропущенная последовательно через нелинейность “Мёртвая зона” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона”, а затем фильтрующего звена, преобразований сигнал становится подавляюще практически полностью, но не становится монотонной прямой, но всё

же стремится к ней. Касательно амплитуды, полученный сигнал потерял практически всё значение амплитуды. На спектре же его главной гармоникой становится гармоника, близкая к нулевой частоте. Остальные гармоники сохраняют качественный вид гармоник исходной пилы, но встречаются реже

4.4.3 Получение откликов линейного звена на преобразованный нелинейностью “Насыщение” сигнал. Получение спектров откликов

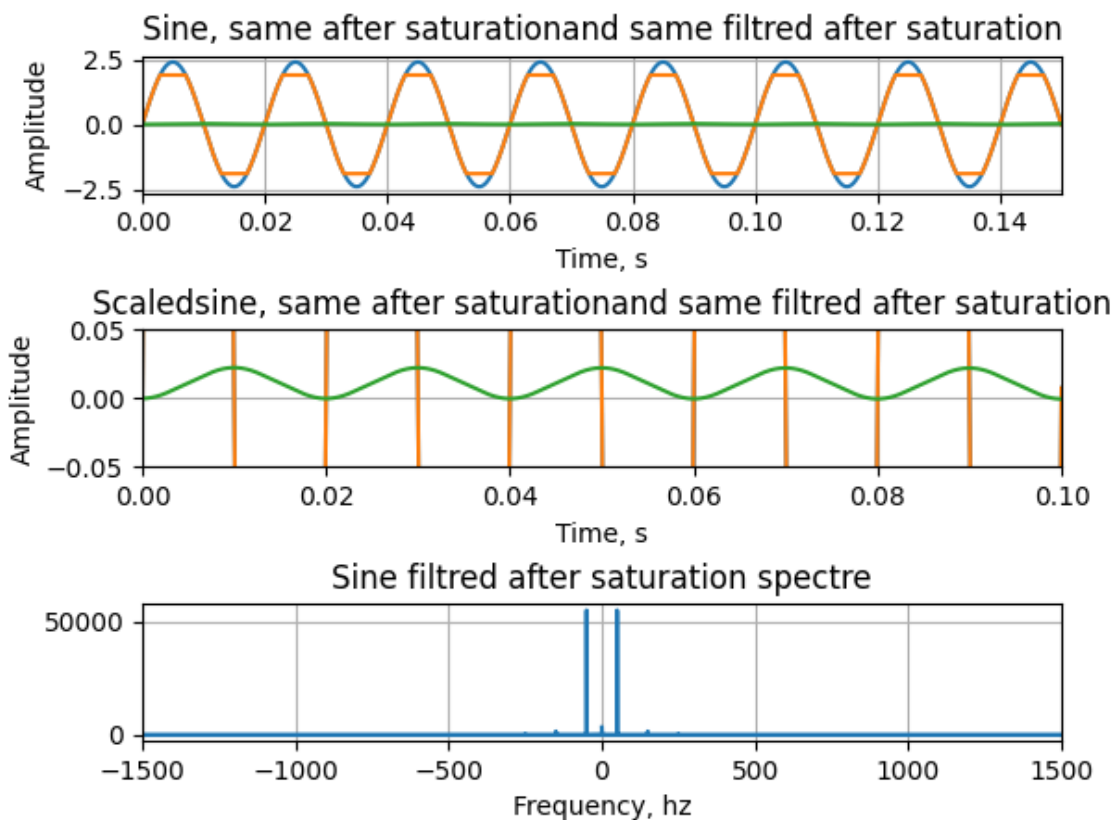


Рисунок 28 — График синусоиды, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 28 представлена синусоида, она же после прохождения нелинейности “Насыщение” и синусоида, пропущенная последовательно через нелинейность “Насыщение” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. Полученный после фильтрации сигнал остаётся синусоидой с сильно уменьшенной амплитудой. Эта синусоида сдвинута по фазе на половину периода исходной синусоиды. На спектре же её главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначальной

синусоиды, но также появляются и низкочастотные, высокочастотные маломощные гармоники

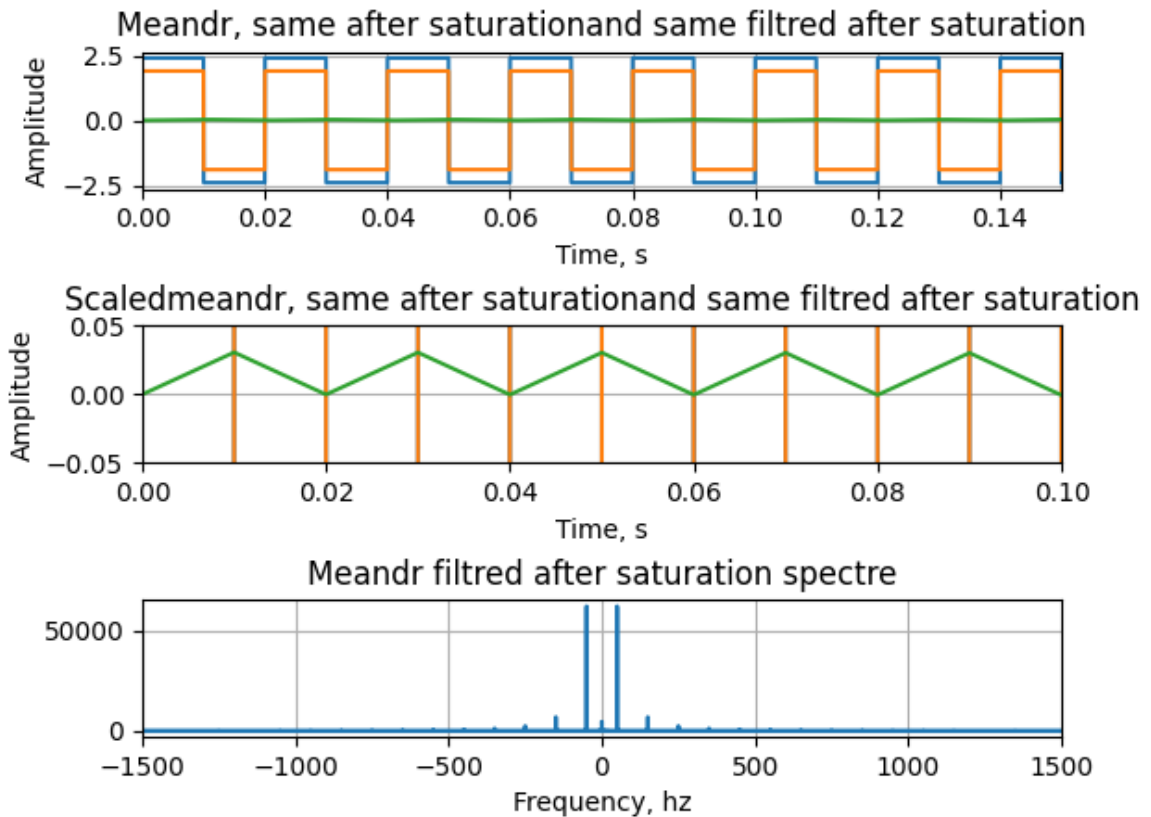


Рисунок 29 — График меандра, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 29 представлен меандр, он же после прохождения нелинейности “Насыщение” и меандр, пропущенный последовательно через нелинейность “Насыщение” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Насыщение” преобразований сигнал остаётся меандром, который незначительно теряет в амплитуде из-за свойств нелинейности “Насыщение”. Полученный после фильтрации сигнал напоминает своей формой асимптотически построенную синусоиду, сдвинутую по фазе на половину периода исходного меандра. На спектре же его главной гармоникой по-прежнему остаётся гармоника частоты первоначального меандра, но мощность этой гармоники значительно уменьшилась. Также и самих гармоник после фильтрации относительно преобразованного нелинейностью “Насыщение” меандра становится меньше. Это обусловлено большей схожестью полученного сигнала с каноническим видом синусоиды, которая смещена на значение равное своей амплитуде. Заметна и появившаяся невероятно низкочастотная гармоника

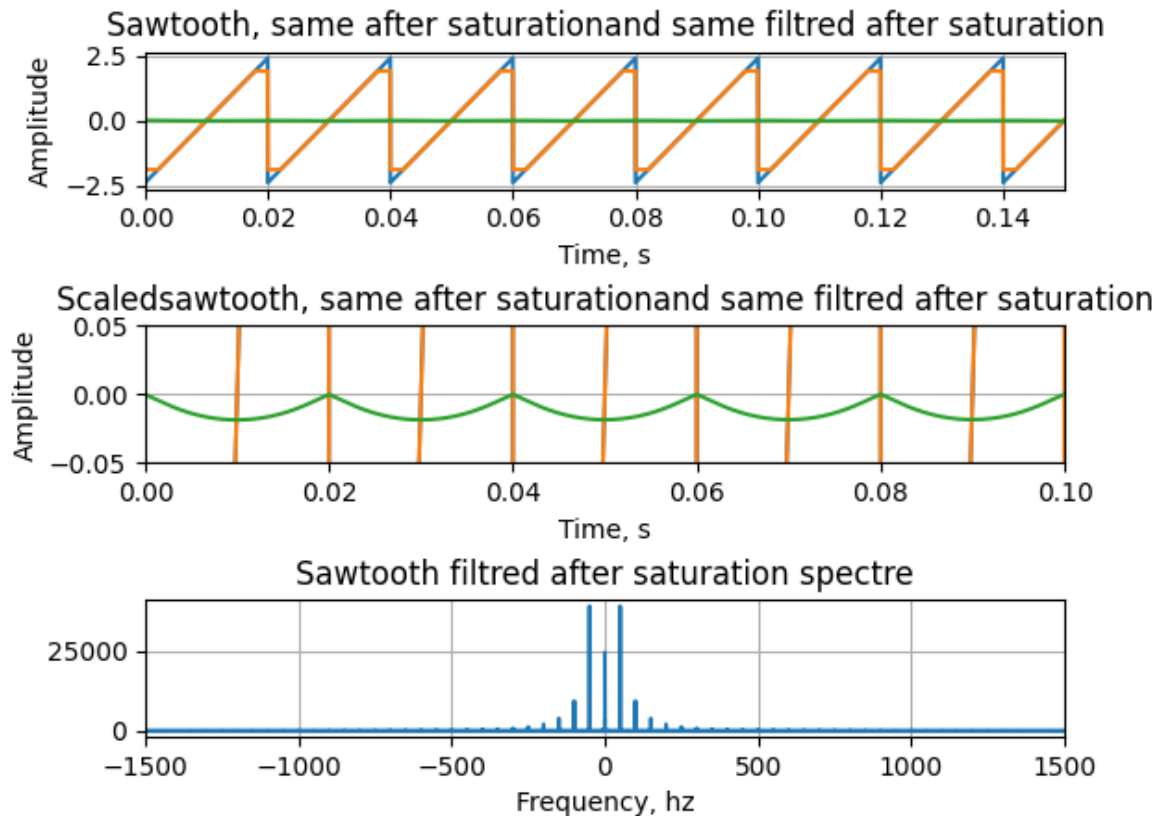


Рисунок 30 — График пилы, отклика нелинейности и отклика линейного звена на преобразованный нелинейностью сигнал. Спектр отклика линейного звена

На рис. 30 представлена пила, она же после прохождения нелинейности “Насыщение” и пила, пропущенная последовательно через нелинейность “Насыщение” и линейное фильтрующее звено, а также спектр преобразованного сигнала. После прохождения нелинейности “Мёртвая зона”, а затем фильтрующего звена, преобразований сигнал становится похож на конкатинацию сегментов круга. Спектр полученного сигнала отдалённо напоминает качественный вид спектра исходной пилы, прошедшей через нелинейность “Насыщение”: Главная гармоник не является самой низкочастотной, все гармоники теряют в мощности, а низкочастотные гармоники подавляются тем сильнее, чем мощнее их изначальная мощность

4.5 Получение откликов нелинейного звена на преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов

4.5.1 Получение откликов нелинейности “Идеальное реле” преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов

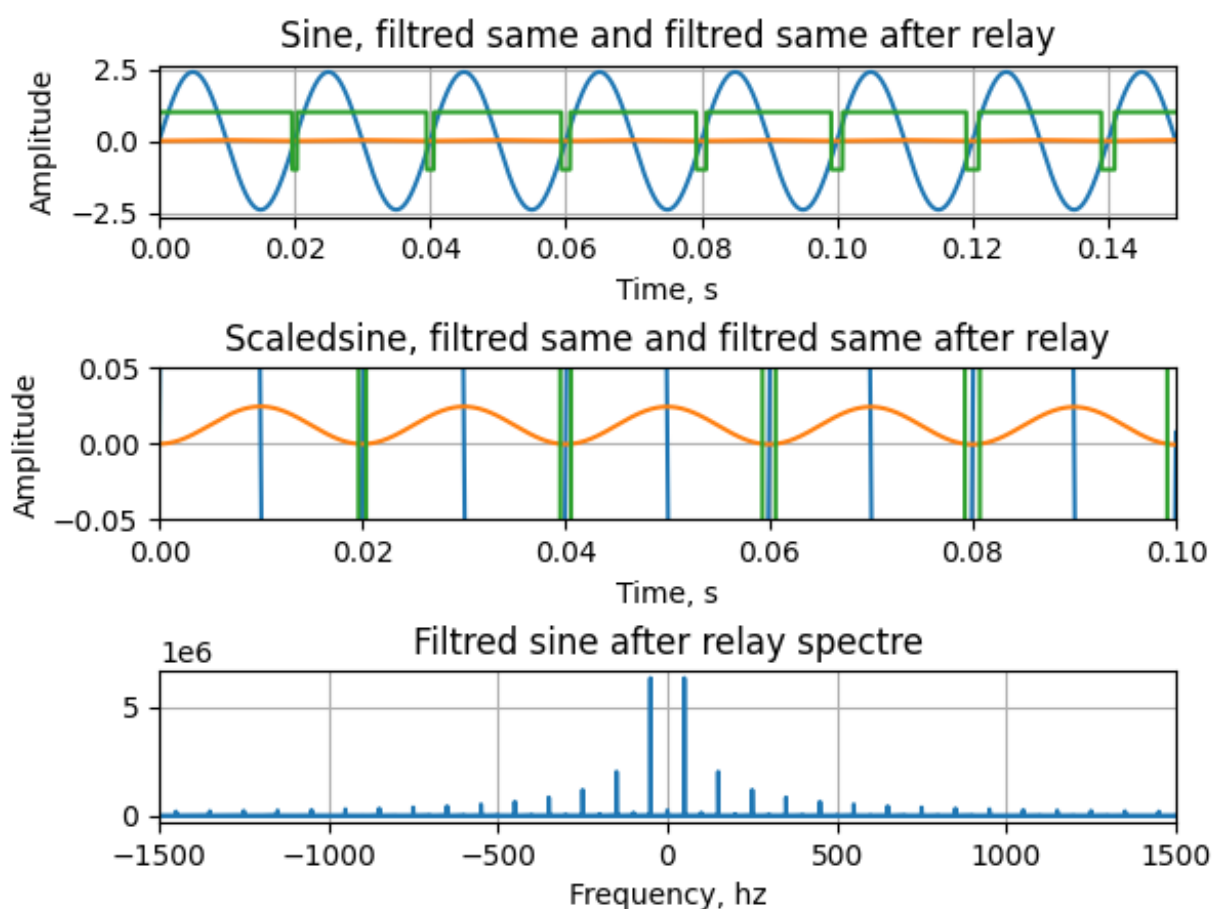


Рисунок 31 — График синусоиды, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 31 представлена синусоида, она же после прохождения линейного фильтрующего и синусоида, пропущенная последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Идеальное реле”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации синусоида теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также она вздымается ввысь на значение своей амплитуды. После преобразования нелинейностью “Идеальное реле” сигнал представляет собой меандр с уменьшающейся с каждым периодом скважностью или, если говорить по-другому,

увеличивающимся с каждым периодом коэффициентом заполнения. Это видно на графике: расстояние между переходами меандра увеличиваются с течением времени. Амплитуда теряет в соответствии с преобразованием сигнала нелинейностью “Идеальное реле”. Спектр напоминает спектр меандра с гармониками, мощность которых такая же, как мощность гармоник синусоиды, пропущенной через нелинейность “Идеальное реле”. Также на всех частотах: и на низких, и на высоких, - появляются дополнительные маломощные гармоники

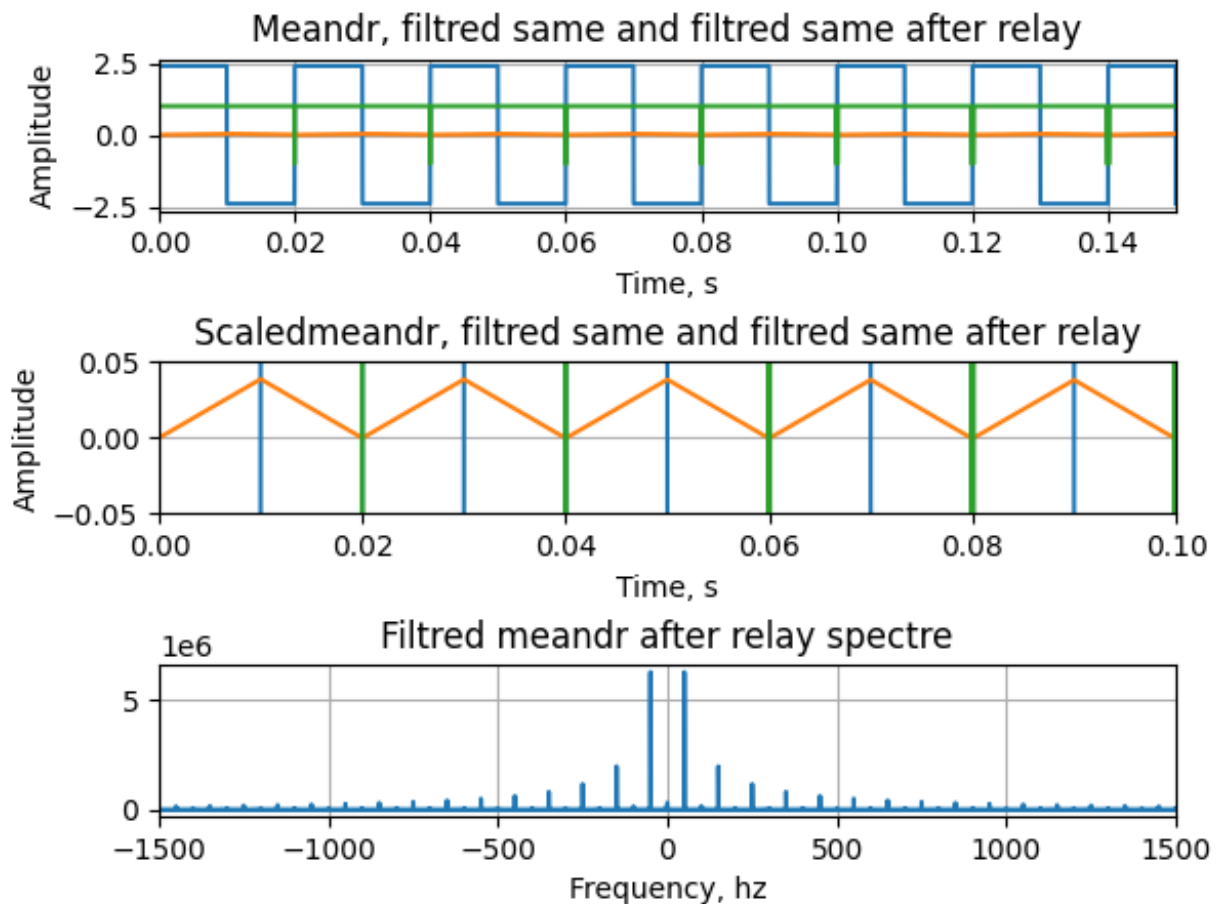


Рисунок 32 — График меандра, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 32 представлен меандр, он же после прохождения линейного фильтрующего и меандр, пропущенный последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Идеальное реле”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации меандр теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также он вздымается ввысь на значение своей амплитуды. Сигнал после фильтрации представляет собой асимптотически построенную синусоиду. После преобразования нелинейностью “Идеальное реле” сигнал представляет собой меандр с умень-

шащейся с каждым периодом скважностью или, если говорить по-другому, увеличивающимся с каждым периодом коэффициентом заполнения. Это видно на графике: расстояние между переходами меандра увеличиваются с течением времени. Амплитуда теряет в соответствии с преобразованием сигнала нелинейностью “Идеальное реле”. Спектр напоминает спектр меандра с гармониками, мощность которых такая же, как мощность гармоник синусоиды, пропущенной через нелинейность “Идеальное реле”. Также на всех частотах: и на низких, и на высоких, - появляются дополнительные маломощные гармоники

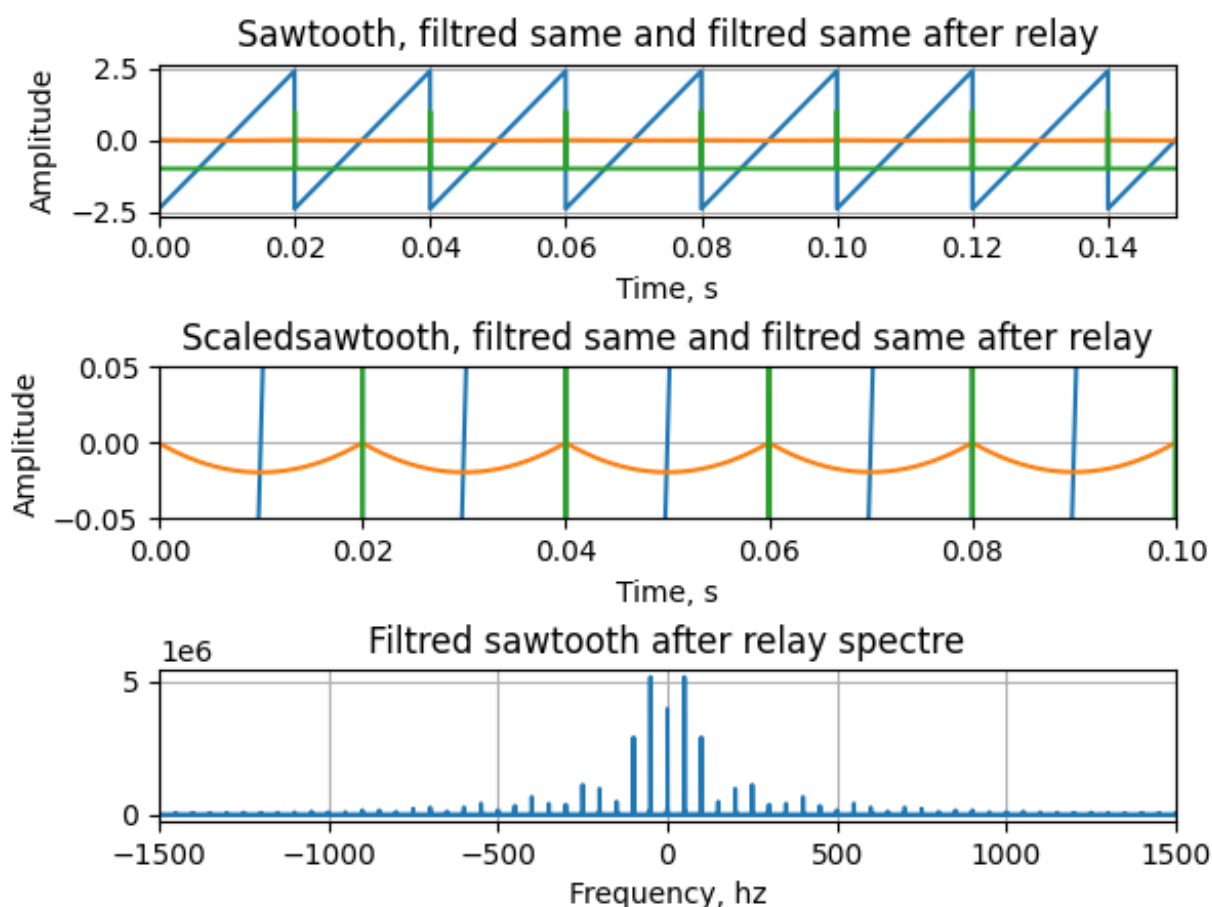


Рисунок 33 — График пилы, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 33 представлена пила, она же после прохождения линейного фильтрующего и пила, пропущенная последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Идеальное реле”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации пила теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также она опускается на значение своей амплитуды. Сигнал после фильтрации представляет собой конкатинацию сегментов круга. После преобразования нелиней-

ностью “Идеальное реле” сигнал представляет собой меандр с уменьшающейся с каждым периодом скважностью или, если говорить по-другому, увеличивающимся с каждым периодом коэффициентом заполнения. Амплитуда теряет в соответствии с преобразованием сигнала нелинейностью “Идеальное реле”. Спектр представляет собой комбинацию “холмов”, образованный разночастотными гармониками

4.5.2 Получение откликов нелинейности “Мёртвая зона” преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов

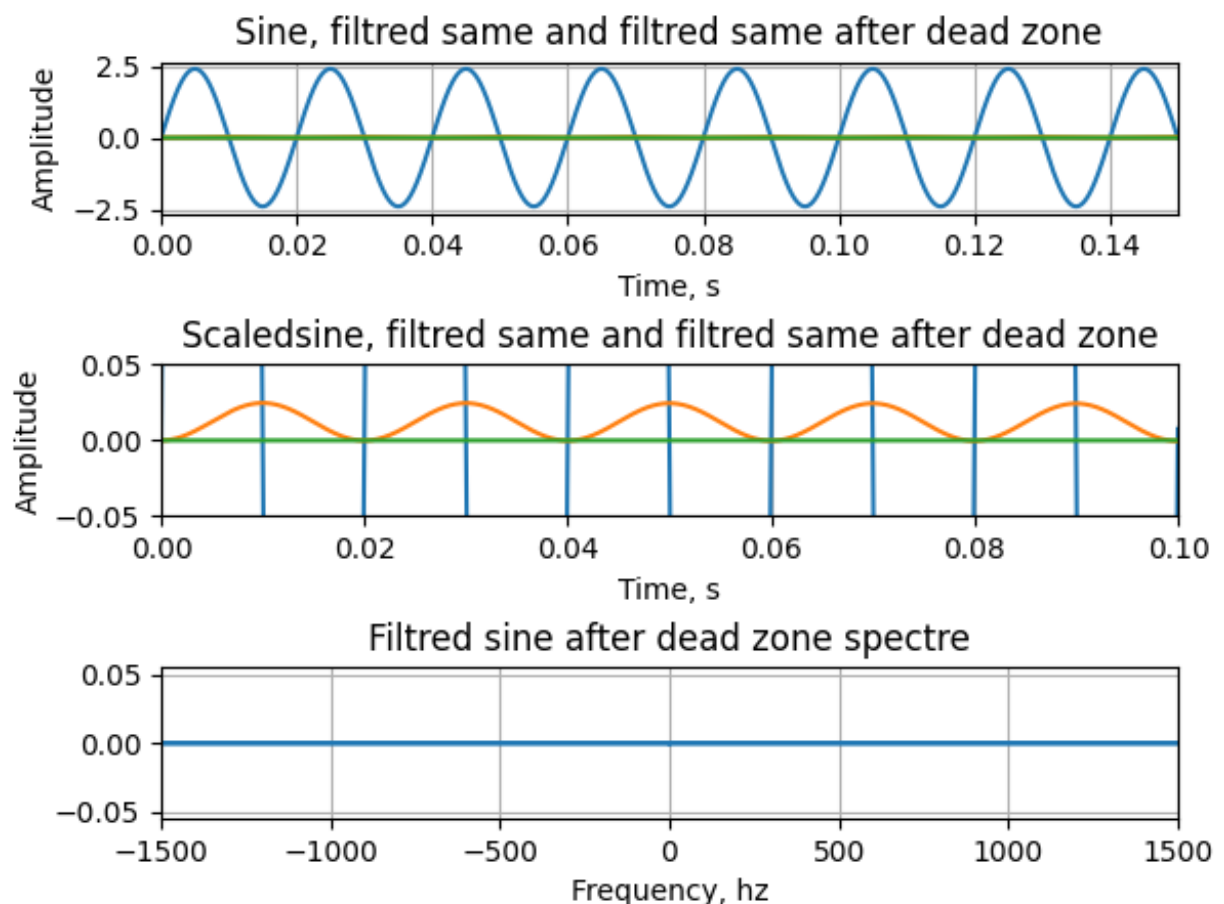


Рисунок 34 — График синусоиды, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 34 представлена синусоида, она же после прохождения линейного фильтрующего и синусоида, пропущенная последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Мёртвая зона”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации синусоида теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также она вздыма-

ется ввысь на значение своей амплитуды. После преобразования нелинейностью “Мёртвая зона” сигнал представляет собой монотонную прямую. Это связано с тем, что после фильтрации сигнал уже подавлен настолько, что просто-напросто выходит за пределы мёртвой зоны. Все гармоники в следствие этого зануляются. Из-за нулевых гармоник спектр представляет собой гладь без пиков гармоник

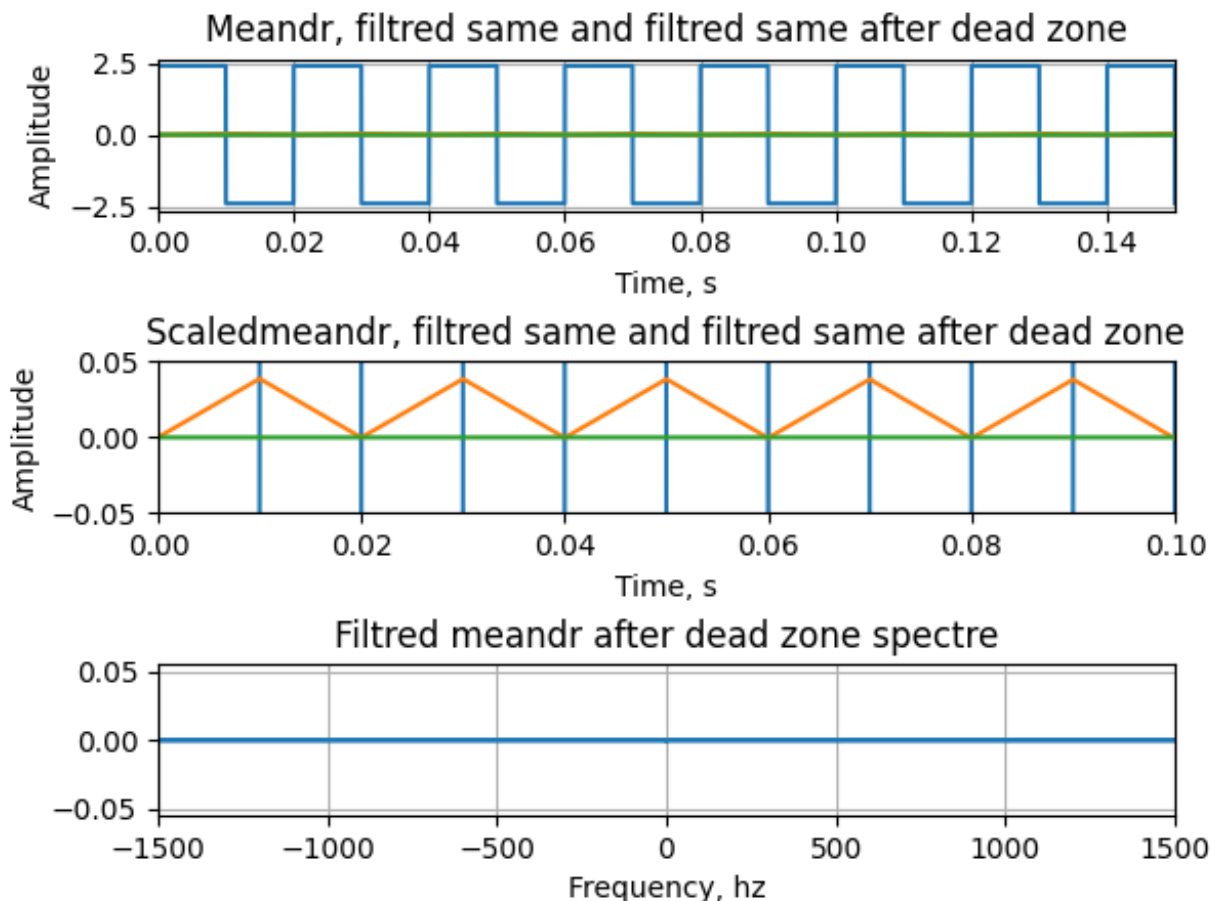


Рисунок 35 — График меандра, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 35 представлен меандр, он же после прохождения линейного фильтрующего и меандр, пропущенный последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Мёртвая зона”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации меандр теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также он вздымается ввысь на значение своей амплитуды. Сигнал после фильтрации представляет собой асимптотически построенную синусоиду. После преобразования нелинейностью “Мёртвая зона” сигнал представляет собой монотонную прямую. Это связано с тем, что после фильтрации сигнал уже подавлен настолько, что просто-напросто выходит за пределы мёртвой зоны. Все гармоники в след-

ствие этого зануляются. Из-за нулевых гармоник спектр представляет собой гладь без пиков гармоник

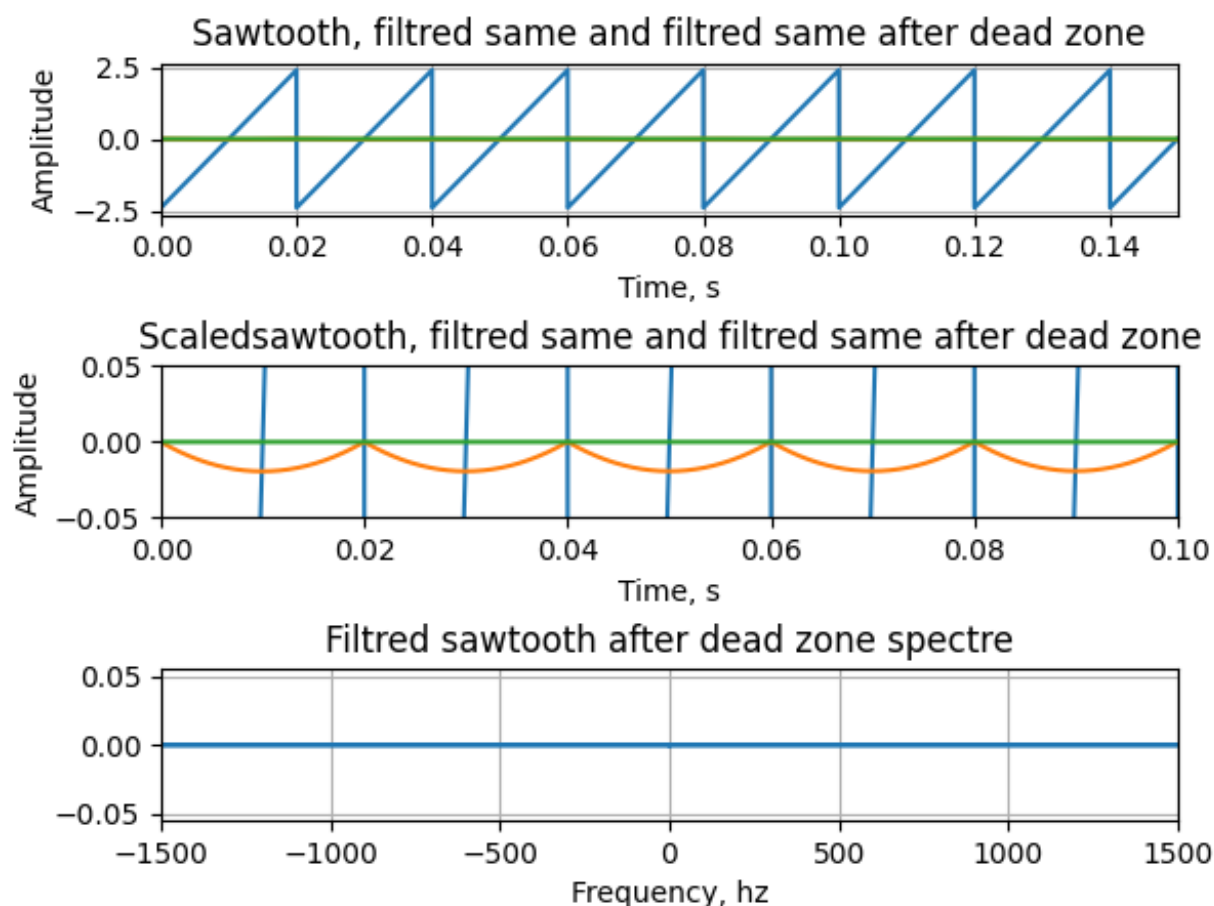


Рисунок 36 — График пилы, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 36 представлена пила, она же после прохождения линейного фильтрующего и пила, пропущенная последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Мёртвая зона”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации пила теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также она опускается на значение своей амплитуды. Сигнал после фильтрации представляет собой конкатинацию сегментов круга. После преобразования нелинейностью “Мёртвая зона” сигнал представляет собой монотонную прямую. Это связано с тем, что после фильтрации сигнал уже подавлен настолько, что просто-напросто выходит за пределы мёртвой зоны. Все гармоники в следствие этого зануляются. Из-за нулевых гармоник спектр представляет собой гладь без пиков гармоник

4.5.3 Получение откликов нелинейности “Насыщение” преобразованный линейным звеном сигнал. Получение спектров откликов

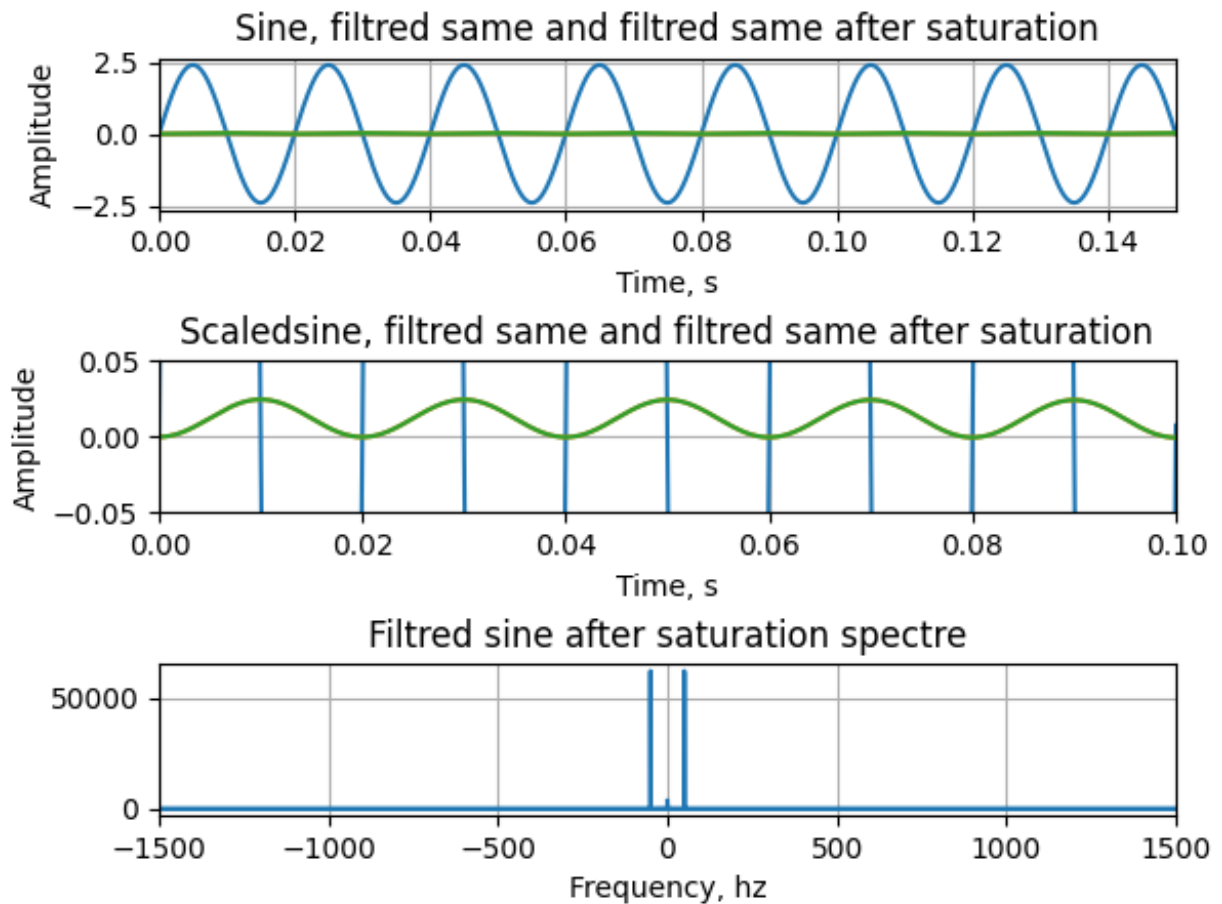


Рисунок 37 — График синусоиды, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 37 представлена синусоида, она же после прохождения линейного фильтрующего и синусоида, пропущенная последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Насыщение”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации синусоида теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также она вздымается ввысь на значение своей амплитуды. Так как амплитуда сигнала после фильтрации невероятно мала, то нелинейность “Насыщение” не может заметно повлиять на сигнал, вследствие чего сигнал остаётся без изменений. Это видно и на спектре: никаких дополнительных гармоник не появляется. Спектр остаётся таким же, как и после прохождения сигналом линейного фильтрационного звена. Рассматривая спектр, можно сказать, что на нём видно только уменьшение мощности гармоник. Новых гармоник по срав-

нению с сигналом, пропущенным через линейное фильтрующее звено, не наблюдается

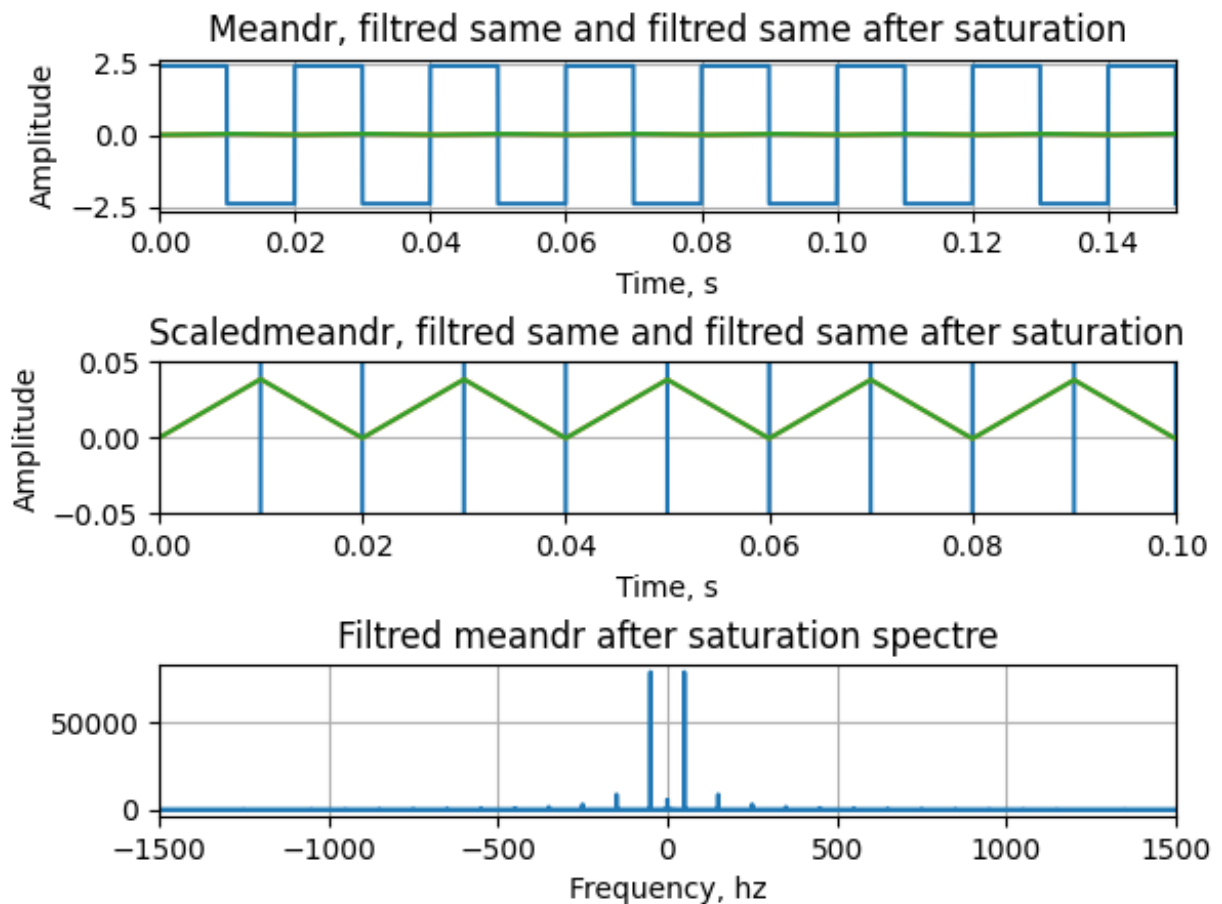


Рисунок 38 — График меандра, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 38 представлен меандр, он же после прохождения линейного фильтрующего и меандр, пропущенный последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Насыщение”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации меандр теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также он вздымается ввысь на значение своей амплитуды. Сигнал после фильтрации представляет собой асимптотически построенную синусоиду. Так как амплитуда сигнала после фильтрации невероятно мала, то нелинейность “Насыщение” не может заметно повлиять на сигнал, вследствие чего сигнал остаётся без изменений. Это видно и на спектре: никаких дополнительных гармоник не появляется. Спектр остаётся таким же, как и после прохождения сигналом линейного фильтрационного звена. Рассматривая спектр, можно сказать, что на нём видно только уменьшение мощности гармоник. Новых гармоник по сравнению с сигналом, пропущенным через линейное фильтрующее звено, не

наблюдается

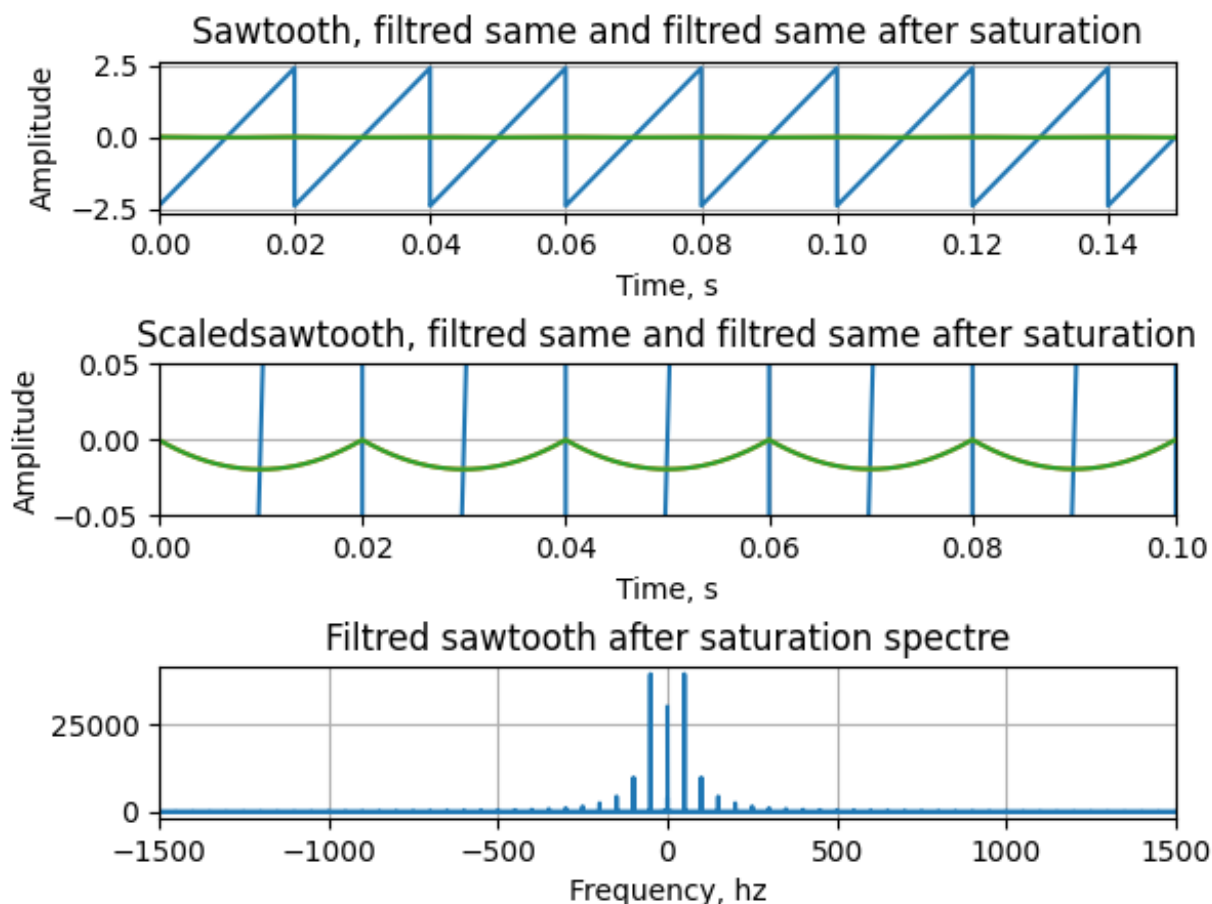


Рисунок 39 — График пилы, отклика линейного звена и отклика нелинейности на преобразованный линейным звеном сигнал. Спектр отклика нелинейности

На рис. 39 представлена пила, она же после прохождения линейного фильтрующего и пила, пропущенная последовательно через линейное фильтрующее звено и нелинейность “Насыщение”, а также спектр преобразованного сигнала. После фильтрации пила теряет в амплитуде, а также сдвигается по фазе на половину периода. Также она опускается на значение своей амплитуды. Сигнал после фильтрации представляет собой конкатинацию сегментов круга. Так как амплитуда сигнала после фильтрации невероятно мала, то нелинейность “Насыщение” не может заметно повлиять на сигнал, вследствие чего сигнал остаётся без изменений. Это видно и на спектре: никаких дополнительных гармоник не появляется. Спектр остаётся таким же, как и после прохождения сигналом линейного фильтрационного звена. Рассматривая спектр, можно сказать, что на нём видно только уменьшение мощности гармоник. Новых гармоник по сравнению с сигналом, пропущенным через линейное фильтрующее звено, не наблюдается

5 ВЫВОДЫ

В ходе выполнения лабораторной работы были изучены основные виды нелинейностей: “Идеальное реле”, “Мёртвая зона”, “Насыщение”. Также было рассмотрено их влияние на три типа пробных сигналов: синусоида, меандр, пилообразный сигнал. Были рассмотрены отклики нелинейностей на каждый из пробных сигналов, а также рассмотрены их спектры. Из полученных данных установлено, что нелинейность “Идеальное реле” преобразует сигналы в меандр с амплитудой, равной 1; нелинейность “Мёртвая зона” не меняет форму сигнала, но уменьшает его амплитуду; нелинейность “Насыщение” обрезает сигналы.

Были получены статические характеристики нелинейностей. При формировании статической характеристики синусоида каждый раз отображала характеристику, аналогичную теоретической. При формировании статической характеристики меандр каждый раз отображал наклонную линию, форма которой связана с мгновенным изменением значений сигнала. При формировании статической характеристики пила каждый раз отображала комбинацию двух вышеописанных характеристик.

Опираясь на результаты комбинации НЭ-ЛЗ можно сказать, что синусоида, как правило, приобретал высокочастотные гармоники, меандр сохранял все гармоники, а пила либо приобретала низкочастотные, либо терял высокочастотные.

Опираясь на результаты комбинации ЛЗ-НЭ можно сказать, что нелинейность “Идеальное реле” нивелировало работу фильтра, каждый раз формируя меандр. Нелинейность “Идеальное реле” полностью гасила сигнал. Нелинейность “Насыщение” практически никак не влияла на полученный после фильтрации сигнал.

Также в дополнение к самой работе, были изучены возможности языка программирования Python. Был разработан код для формирования всех сигналов, который можно увидеть в репозитории [github](#)