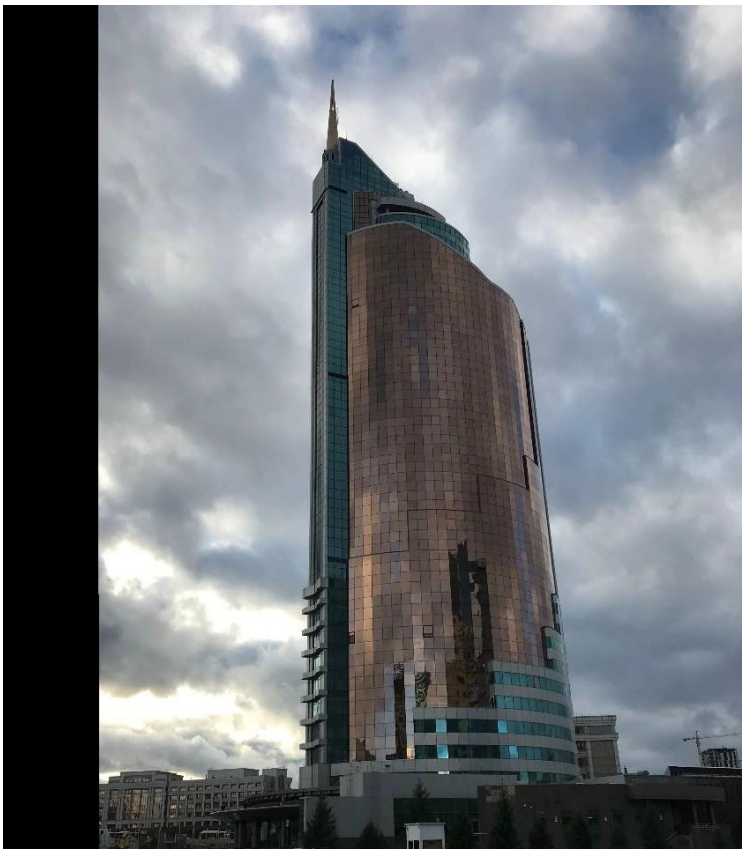
Настраиваемые динамические гасители MAURER

для здания административно-технологического комплекса "Transport Tower"

в г. Нур-Султан,

Республика Казахстан



4 ноября 2021г.

Др. технических наук Феликс Вебер Maurer Швейцария ГмбХ Гроссплатцштрассе 24 CH-8118 Пфаффхаузен Швейцария Email: F.Weber@maurer.eu Тел.: +41 44 520 80 69	Дипломированный инженер, MBA, Питер Хубер MAURER SE Франкфуртерское кольцо 193 D-80807 Мюнхен Германия Email: P.Huber@maurer.eu Тел.: +49 89 323 94 322

Оглавление

1. Краткая информация 4
1.1. Рассматриваемые предельные ускорения 4
1.2. Вводные данные по ветру и конструкции 4
1.3. Критерий оптимизации 4
1.4. Результаты 4
1.5. Предлагаемое решение 6
2. Область применения 8
3. Данные по зданию 8
3.1. Картотека данных 8
3.2 Замеренные вибрации 8
3.2.1 В направлении оси Y 8
3.2.2 В направлении оси X 8
3.3. Данные по конструкции 9
3.3.1. Собственные колебания первого тона изгибных колебаний 9
3.3.2. Модальные массы первого тона изгибных колебаний 9
3.3.3. Расчётный коэффициент демпфирования 10
4. Проектирование с применением модели настраиваемого динамического гасителя . 11
4.1. Динамическое моделирование строения с применением демпфера *AdaptiveTMD* и нагрузки ветра 11
4.2. Конструкция с элементом линейного вязкостного демпфирования, предусмотренного в настраиваемом динамическом гасителе 11
4.3. Конструкция с элементом квадратичного вязкостного демпфирования, предусмотренного в настраиваемом динамическом гасителе 12
4.4. Конструкция с самонастраивающимся динамическим гасителем MAURER *AdaptiveTMD* 12
4.4.1. Самонастраивающийся вязкостный демпфер внутри в самонастраивающемся динамическом гасителе *AdaptiveTMD* 12
4.4.5. Безотказная система и незначительное энергопотребление 14
4.4.6. Уравнения движения 14
4.5. Оптимизация настраиваемого динамического гасителя 14
5. Ветровая нагрузка 15
5.1. Моделирование ветровой нагрузки 15
5.2. Калибровка ветровой нагрузки 15
5.3. Проверка ветровой нагрузки 15
6. Пределы ускорения 17
6.1. ПП ветра 1 год 17
6.1.1. Стандарт ISO 10137:2007 17

6.1.2. Российский стандарт 17
6.2. ПП ветра 10 лет 17
7. Оценка вибрации 18
7.1. Пиковое значение (предельное значение) 18
7.2. Пиковое динамическое значение 18
8. Результаты 19
8.1. Направление оси У 19
8.2. Направление оси Х....20
9. Расчетные характеристики, расположение и размер.... 21
Справочные документы 23
Приложение 24
Ось У, период повторяемости ветра 1 год....25
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 135 т....25
Линейный вязкостный динамический гаситель с 220 т 27
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 139 т....29
Ось У, период повторяемости ветра 10 лет....37
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 135 т....37
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 220 т....39
Ось У, период повторяемости ветра 50 лет....49
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 135 т....49
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 220 т....51
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 139 т....53
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 232 т....55
Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 118 т 57
Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 197 т 59

1. Краткая информация

В настоящем отчете описывается оптимизация, на основе модели, самонастраивающихся динамических гасителей MAURER ***AdaptiveTMD*** для здания Министерства транспорта в г. Нур-Султан, Республика Казахстан.

1.1. Рассматриваемые предельные ускорения

Самонастраивающиеся динамические гасители MAURER предназначены для обеспечения следующих предельных ускорений конструкции в зависимости от периода повторяемости (ПП) ветра в соответствии с главой 6:

- ПП ветра 1 год:
  - i) 0,089 м/с^2 в соответствии с ИСО ISO 10137:2007 для административных зданий по уровню комфортности (a)
  - ii) 0,080 м/с^2 в соответствии с российским стандартом по уровню комфортности (b)
- ПП ветра 10 лет: 0,147 м/с^2 (15 мГал) в соответствии с рекомендациями Совета по высоким зданиям и городской среде обитания (c).

1.2. Вводные данные по ветру и конструкции

Данные по ветру и обусловленные ветром деформации, частота и ускорение конструкции рассматривались на основании отчета «**Отчет по результатам мониторинга**», предоставленного компании MAURER в марте 2020 года. **Для расчета демпферной системы зарегистрированные ветровые явления учитывались с периодом повторяемости в 1 год. 10-летний период повторяемости ветра был принят равным 0,235 м/с², а 50-летний период повторяемости ветра - 0,313 м/с² (см. главу 8; Таблица 2).**

! Для данных по распределению массы использовались “масса здания по высоте”. Также см. Главу

1.3. Критерий оптимизации

Самонастраивающиеся динамические гасители MAURER (TMD) оптимизированы под минимальную массу маятника, обеспечивая пределы ускорения, указанные выше за 1-годичный и 10-летний периоды повторения ветров.

1.4. Результаты

Таблица 1. Основные результаты рассмотренных видов демпферов.

Вид демпфера	**Масса маятника**	Максимальное ускорение конструкции при ПП ветра 1 год	Максимальное ускорение конструкции при ПП ветра 10 лет	Относительное колебание демпфера при ПП ветра 50 лет
Пассивный демпфер с оптимальным линейным гашением	**135 т** **220 т**	a: 0,089 м/с^2 b: 0,080 м/с^2	c: 0,127 м/с^2 c: 0,116 м/с^2	±0,102 м ±0,074 м

Пассивный демпфер с оптимальным квадратичным гашением колебаний	**139 т** **232 т**	**a: 0,089 м/с^2** **b: 0,080 м/с^2**	**c: 0,147 м/с^2** **c: 0,147 м/с^2**	**±0,062 м** **±0,041 м**
Самонастраивающийся демпфер MAURER	**118 т** **197 т**	**a: 0,089 м/с^2** **b: 0,080 м/с^2**	**c: 0,147 м/с^2** **c: 0,147 м/с^2**	**±0,068 м** **±0,046 м**

a: в соответствии с ИСО ISO 10137:2007 для административных зданий / b: в соответствии с российским стандартом c: 0,147 м/с^2 (15 мГал) в соответствии с рекомендациями Совета по высоким зданиям и городской среде обитания

1.5. Предлагаемое решение

На этапе оценки проекта перед началом каких-либо записей и выполнением каких-либо измерений здания на 38 этаже (126,15 м), была предложена масса демпфера в 138 тонн в сочетании с системой самонастраивающегося динамического гасителя**,** исходя из опыта предыдущих проектов компании MAURER.

Согласно приведенной выше Таблице 1, демпфер массой 138 тонн с системой самонастраивающегося динамического гасителя даст приблизительное ускорение равное 0,087 м/с^2 на нижний предел гасителя. Таким образом, в зависимости от конечных требований к предельному ускорению, которое должно быть достигнуто, **предыдущая оценка массы 138 тонн уже находится в пределах окончательно требуемого и подлежащего обсуждению диапазона масс от 118 тонн до 197 тонн (зеленые значения в таблице 1).**

Таким образом, конечная масса демпфера привязана к конечным требованиям к пределам ускорения!

Предлагается следующее решение:

1. **Для достижения меньших конструкционных деформаций,** которые в прошлом приводили к трещинам и повреждениям конструкции, предлагается **демпфер массой 138 тонн**, но не менее 118 т. Поскольку эффект от затрат незначителен, MAURER по-прежнему предлагает использовать демпфер массой 138 тонн, что, в данном случае, обеспечит некоторую безопасность системе.

2. **Для достижения максимального уровня комфортности и соответствия критериям** комфорта, согласно российским стандартам, предлагается использовать **демпфер *AdaptiveTMD* массой 197 тонн (зеленые значения в таблице 1).** Данная маятниковая масса обеспечивает наименьшее ускорение равное 0,080 м/с^2 для ПП ветра в 1 год.

3. Предлагается **использовать квадратичное вязкостное демпфирование в рамках системы настраиваемого динамического демпфирования.** В случае применения линейного вязкостного демпфирования, относительное движение массы маятника не сможет быть достаточно управляемым при 50-летнем ПП ветра **(зеленые и синие значения в таблице 1 в сравнении с красными значениями).**

4. Предлагается использовать демпфер ***AdaptiveTMD*** MAURER **(зеленые значения в Таблице 1),** так как они обеспечивают адаптацию частоты и гашения в реальном времени по отношению к фактическому значению вибрации, что позволит уменьшить массу маятника на 15% по сравнению с обычными пассивными демпферами **(синие значения в таблице 1).**

Таким образом, MAURER предлагает использовать демпфер *AdaptiveTMD* массой 138 тонн для снижения ускорения до 0,089 м/с² для улучшения показателей усталостной прочности конструкции.

В случае необходимости повышения комфорта до уровня ускорения равного 0,08м/с^2, массу *AdaptiveTMD* следует увеличить до 197 тонн.

ПРИМЕЧАНИЕ:

Компания MAURER не исследовала, приводят ли какие-либо возникающие ветровые явления к

проблемам усталости или повреждению самой конструкции здания. В этом отчете показано, что с помощью предлагаемой специальной системы самонастраивающегося демпфирования AdaptiveTMD можно достичь пределов комфортного ускорения, если предположить, что данные о ветре соответствуют ПП ветра в один год. Предполагалось, что эти требования к комфорту также приводят к значительному улучшению усталостных характеристик конструкции. Тем не менее, следует проверить конструктивную систему еще раз со значительно уменьшенными значениями ускорения и деформации конструкции здания, если теперь вибрация здания приемлема и можно избежать усталости!

2. Область применения

В данном отчете описан процесс оптимизации самонастраивающихся динамических гасителей Maurer для здания в городе Нур-Султан, Республика Казахстан.

3. Данные по зданию

3.1. Картотека данных

Данные представлены в следующих папках:

1. Документ, описывающий проект «Описание» (формат word #1)
2. Отчет с данными о системе автоматического мониторинга, установленной на следующих этажах здания: 20, 27 и 30 от 27.11.2019г. Эта система записывала частоты, смещения и нагрузки на здание до 27.02.2020г; документ «Infrastrukturministerium_Messungen_Bericht_16-03-20 Übersetzung» (формат word #2)
3. Документ с описанием распределения массы «масса здания по высоте» (формат word #1)

3.2 Замеренные вибрации

3.2.1 В направлении оси Y

Измерение с наибольшим пиковым ускорением конструкции в направлении оси y показывает следующие значения на 32 этаже (сбор данных №1, слово №2):

- Пиковое (максимальное абсолютное значение) ускорение конструкции = 0,19 м / с2.
- Пиковая (максимальное абсолютное значение) скорость конструкции = 0,073 м / с.
- Пиковое (максимальное абсолютное значение) ускорение конструкции = 0,027 м.

Это:

- приблизительно 238% от максимально допустимого пикового ускорения конструкции за период повторяемости ветра 1 год в соответствии с российскими нормативами (0,08 м / с2).
- приблизительно 213% максимально допустимого пикового ускорения конструкции за период повторяемости ветра 1 год в соответствии со стандартом ISO 10137: 2007 для офисных зданий (0,089 м / с2).

Поэтому в направлении оси y необходимо обеспечить дополнительное демпфирование.

3.2.2 В направлении оси X

Максимальное измеренное пиковое ускорение конструкции в направлении оси X составляет 0,045 м / с2 (сбор данных №12, документ в формате word №2). Это:

- приблизительно 56% максимально допустимого пикового ускорения конструкции за период повторяемости ветра 1 год в соответствии с российскими нормативами (0,08 м / с2).
- приблизительно 51% максимально допустимого ускорения конструкции за период повторяемости ветра 1 год в соответствии со стандартом ISO 10137: 2007 для офисных зданий (0,089 м / с2).

Таким образом, направление оси X не требует дополнительного демпфирования. Однако динамический гаситель разработан также для работы в направлении оси X, что важно для правильного движения маятника в направлении оси У (отсутствие трения из-за направляющей системы в направлении оси У).

3.3. Данные по конструкции

3.3.1. Собственные колебания первого тона изгибных колебаний

Собственные колебания первого тона изгибных колебаний в направлении оси У и оси Х следующие (word №2):

- Ось У: $f1y$ = 0,41 Гц
- Ось Х: f_{1x} = 0,59 Гц

3.3.2. Модальные массы первого тона изгибных колебаний

Модальные массы первого тона изгибных колебаний в направлении оси У являются расчетными, основанными на заданном виде колебаний (смотрите word #2) и на поэтажных массах (документ excel #1). Вид колебаний определен на основе следующих данных, указанных в отчете о замерах вибраций (документ word #2):

- Уровень 1: 0
- Уровень 7: 0,11
- Уровень 14: 0,25
- Уровень 20: 0,41
- Уровень 27: 0,75
- Уровень 32: 1,00

Этот вид колебаний применяется к 39 этажам, которые отображены на рисунке 1. Модальная масса затем была рассчитана как сумма стандартных значений видов колебаний в квадрате, умноженная на соответствующие массы конструкции

$$m_{1y} = \sum_{i} m_i \, (\varphi_i)^2 \qquad (1)$$

Это дает следующие данные:

- m_{1y} = 5299,937 т ≈ 5300 т
- Общая масса конструкции: 52603 т
- (модальная масса) / (общая масса конструкции) = 10,08%

Модальная масса первого тона изгибных колебаний на оси Х не была рассчитана, поскольку в этом нет необходимости для динамического гасителя при расчете для оси У.

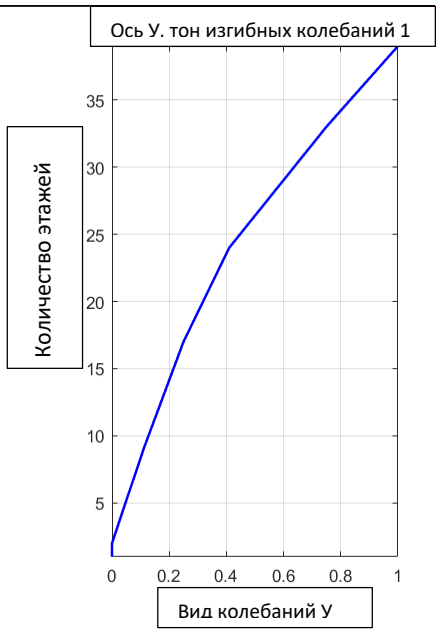


Рисунок 1. Заданный вид колебаний, примененный к 39 этажам.

3.3.3. Расчётный коэффициент демпфирования

Для моделирования конструкции здания с динамическим гасителем, необходимо знать коэффициент демпфирования первого тона изгибных колебаний. Поскольку коэффициент демпфирования неизвестен, были учтены следующие общепризнанные формулы:

3.3.3.1. Вибрации за счет периода повторяемости (ПП) ветра в 1 год: ξ_{1y} = 1 %

3.3.3.2. Вибрации за счет периода повторяемости (ПП) ветра в 10 лет: ξ_{1y} = 1,5 %

3.3.3.3. Вибрации за счет периода повторяемости (ПП) ветра в 50 лет: ξ_{1y} = 1,5 %

4. Проектирование с применением модели настраиваемого динамического гасителя

4.1. Динамическое моделирование строения с применением демпфера *AdaptiveTMD* и нагрузки ветра

Настраиваемый динамический гаситель спроектирован с помощью динамического моделирования конструкции с настраиваемым динамическим гасителем:

- Конструкция, смоделированная в модальных координатах.
- Нелинейное моделирование динамического гасителя (квадратичное вязкостное гашение для элемента демпфирования динамического гасителя = c_2 ниже на рисунке 2, самонастраивающийся демпфер MAURER ***AdaptiveTMD***).
- Модель нагрузки ветра согласно описанию, в разделе 5.
- Система уравнений движения рассчитана во временном промежутке.
- Решатель ode45 (Дорманд принц) с различными размерами временных шагов с верхним значением 1 мс и относительной допустимой погрешностью 0,001 применяется для решения дифференциальных уравнений.

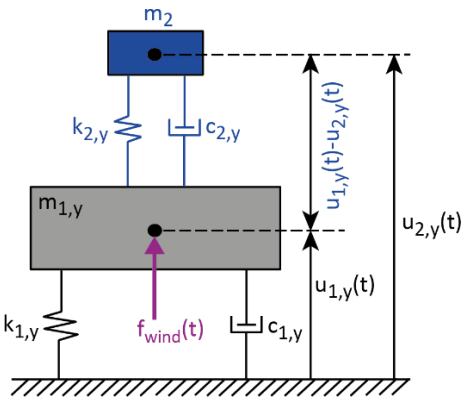


Рисунок 2. Схема 1-координатной модели здания с линейным демпфером (на данном рисунке для оси У).

4.2. Конструкция с элементом линейного вязкостного демпфирования, предусмотренного в настраиваемом динамическом гасителе

Система уравнений движения строения с использованием элемента линейного вязкостного демпфирования (показатель гашения «1» = линейный вязкостный) внутри динамического гасителя в главном направлении (здесь направлении оси У), следующая (рисунок 2):

$$m1,y\ddot{u}1,y + c1,y\dot{u}1,y + k1,yu1,y = fwind,y - c2,y(\dot{u}1,y - \dot{u}2,y) - (\,m2g\,/\,L2,y\,)\,(u1,y - u2,y) \quad (2)$$

$$m2\ddot{u}2,y = c2,y(\dot{u}1,y - \dot{u}2,y) + (\,m2g\,/\,L2,y\,)\,(u1,y - u2,y) \quad (3)$$

Где: нижний индекс 1 используется для зданий

Нижний индекс 2 используется для динамического гасителя

$c1,y = 2\,\xi 1,y\,\sqrt{k1,y\,m1,y}$: коэффициент вязкостного демпфирования конструкции

$k1,y$: коэффициент жесткости конструкции

$fwind,y$: динамическая сила ветра

$u1,y$: модальное смещение конструкции

$\dot{u}1,y$: модальная скорость конструкции

$\ddot{u}1,y$: модальное ускорение конструкции

$m2g$ / $L2,y$ = $k2,y$: жесткость динамического гасителя заданное по длине маятника $L2,y$ (g=9,81 м/с2

$c2,y$: коэффициент вязкости элемента вязкостного демпфирования, предусмотренного в динамическом гасителе (показатель гашения «1»)

$m2$: переменная масса динамического гасителя

($u1,y$ – $u2,y$): относительное движение переменной массы динамического гасителя

($\dot{u}1,y$ – $\dot{u}2,y$): относительное движение переменной массы динамического гасителя

$\ddot{u}2,y$: ускорение переменной массы динамического гасителя

Настраиваемый динамический гаситель с линейным вязкостным демпфированием оптимизирован под минимальное ускорение конструкции согласно следующим решениям в закрытой форме (1) (в данном примере для оси У):

- коэффициент массы: $\mu y = m2/m1,y$ (4)
- естественная частота: $f2,y = f1,y$ / √1+μ (5)
- длина маятника: $L2,y = g$ / $(2\pi f2,y)^2$ (6)
- коэффициент демпфирования: $\xi 2,y$ = √ $3\mu y$ / 4(2+μy) (1+μy) (7)
- коэффициент вязкостного демпфирования: $c2,y = 2\ \xi 2,y\ m2\ (2\ \pi\ f1,y)$ (8)

4.3. Конструкция с элементом квадратичного вязкостного демпфирования, предусмотренного в настраиваемом динамическом гасителе

Обычно в демпфирующем элементе внутри динамического гасителя создают квадратичное вязкостное демпфирование (показатель демпфирования «2») для непропорционального уменьшения больших относительных движений маятника в периоды повторяемости ветра более 10 лет. Система уравнений движения строения с квадратичным вязкостным настраиваемым динамическим гасителем следующая:

$m1,y\ddot{u}1,y + c1,y\dot{u}1,y + k1,yu1,y = fwind,y$ …

$$-c2,y(|\dot{u}1,y - \dot{u}2,y|)\ 2\ sign(\dot{u}1,y - \dot{u}2,y) - (\ m2g\ /\ L2,y\ )\ (u1,y - u2,y) \quad (9)$$

$$m2\ddot{u}2,y = c2,y(|\dot{u}1,y - \dot{u}2,y|)\ 2\ sign(\dot{u}1,y - \dot{u}2,y) + (\ m2g\ /\ L2,y\ )\ (u1,y - u2,y) \quad (10)$$

Настройка частоты дана в (5). Коэффициент вязкости c_2 оптимизирован в численном отношении для обеспечения оптимальной настройки демпфирования динамического гасителя.

4.4. Конструкция с самонастраивающимся динамическим гасителем MAURER *AdaptiveTMD*

4.4.1. Самонастраивающийся вязкостный демпфер внутри в самонастраивающемся динамическом гасителе *AdaptiveTMD*

Для настоящего проекта был предложен демпфер MAURER ***AdaptiveTMD*** с целью:

4.4.3. Увеличения эффективности самонастраивающегося гасителя при более низких ускорениях для любых случаев нагрузки (лучше на 10-70%) и

4.4.4. Получения массы гасителя на 15% меньше, при этом достигая такие же максимальные ускорения в периоды повторяемости ветра в 1 год.

По сравнению с обычным пассивным вязкостным демпфером, самонастраивающийся

вязкостный демпфер, поставляемый MAURER [2, 3], управляется в реальном времени непрерывно управляемым отводным клапаном № 1 (клапан № 2 закрыт, Рисунок 3). При выходе из строя сети, клапан № 1 закрывается (0 А), а клапан № 2 открывается (0 А), создавая оптимальное квадратичное вязкостное демпфирование (показатель демпфирования «2»). Диапазон управляющих сил фактической адаптивной силы демпфера ограничен минимальными и максимальными квадратичными вязкими силами из-за полностью закрытого и полностью открытого отводного клапана № 1 (Рисунок 4). Тест, изображенный на Рисунке 4, показывает создание вязкостного демпфирования с отрицательной жесткостью для онлайн-настройки частоты самонастраивающегося демпфера MAURER ***AdaptiveTMD***. Самонастраивающийся вязкостный демпфер MAURER с максимальной силой 100 кН изображен на рисунке 5.

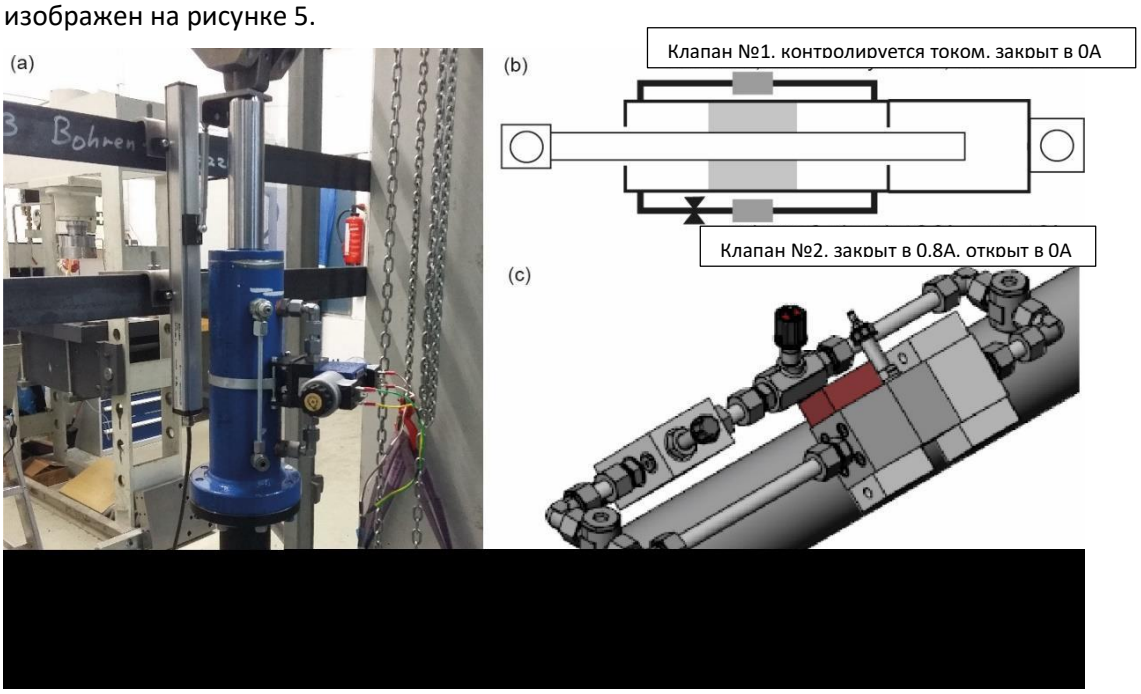


Рисунок 5. Пример самонастраивающегося вязкостного демпфера MAURER во время гибридных испытаний (слева) и схема самонастраивающегося вязкостного демпфера MAURER с системой предохранительных клапанов (справа).

Рисунок 4. Измеренное динамическое поведение силы самонастраивающегося вязкостного демпфера MAURER: сравнение между желаемой силой самонастраивающегося (полуактивного) вязкостного демпфера и фактической силой самонастраивающегося (полуактивного) вязкостного демпфера.

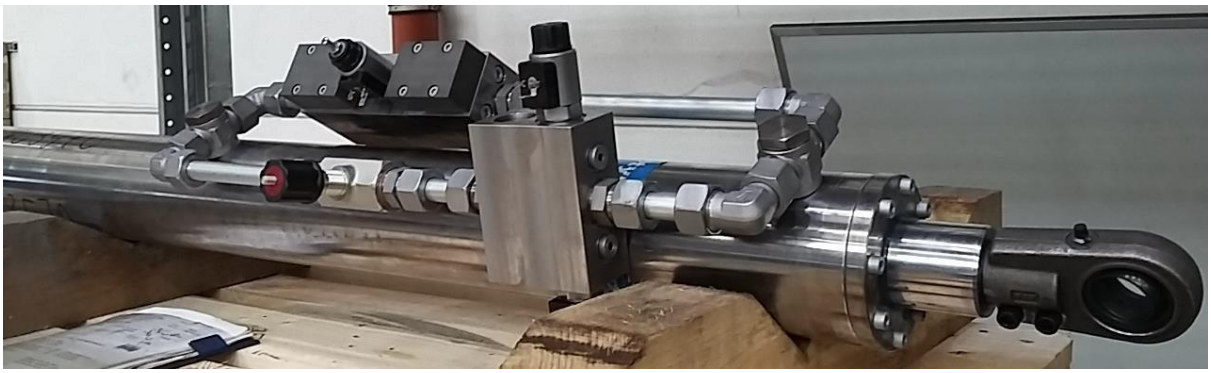


Рисунок 5. Разработанный более крупный самонастраивающийся вязкостный демпфер MAURER.

4.4.5. Безотказная система и незначительное энергопотребление

Поскольку фактическое усилие регулируется отводным клапаном № 1, результирующая система управления является полуактивной. Это означает, что:

• Система полностью отказоустойчива благодаря инновационной системе клапанов (клапан №1, клапан №2), где клапан №2 обеспечивает оптимальное пассивное демпфирование во время неожиданного или незапланированного отключения основного оборудования.

• Система управления безусловно устойчива,

• самонастраивающийся демпфер MAURER ***AdaptiveTMD*** не может возбуждать конструкцию (стабильная система управления).

• Потребляемая мощность очень мала (2 кВт), потому что мощность требуется только для управляющего оборудования, а не для активного ускорения колеблющейся массы демпфера.

4.4.6. Уравнения движения

Система уравнений движения конструкции с адаптивным демпфером MAURER:

$$m1,y\ddot{u}1,y + c1,y\dot{u}1,y + k1,yu1,y = fwind,y - fadaptive,y - (m2g / L2,y) (u1,y - u2,y) \quad (11)$$

$$m2\ddot{u}2,y = fadaptive,y + (m2g / L2,y) (u1,y - u2,y) \quad (12)$$

Где $fadaptive,y$ обозначает полностью диссипативную силу адаптивных вязкостных демпферов.

4.5. Оптимизация настраиваемого динамического гасителя

Рассматриваемая система демпфирования **AdaptiveTMD** оптимизирована с целью обеспечения предела ускорения в один год с минимальной колеблющейся массой настраиваемого динамического гасителя.

$$min(m2\ ) \textit{ для обеспечения предела ускорения ПП ветра в один год} \quad (13)$$

5. Ветровая нагрузка

5.1. Моделирование ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка смоделирована следующим образом:

- Сигнал белого шума, продолжительность времени > 3600 с
- Фильтр нижних частот (масляный фильтр 2-го порядка) для получения типичных характеристик спада ветровых нагрузок

5.2. Калибровка ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка калибруется для получения максимально точных измеренных значений пикового ускорения, максимальной скорости и пикового смещения. Это достигается соответствующей частотой углового фильтра и амплитудой силы ветра:

- Угловая частота фильтра нижних частот: 2,2 × f1y
- Масляный фильтр второго порядка.
- Амплитуда силы ПП ветра за 1 год (в модальных координатах): 121,21 кН

5.3. Проверка ветровой нагрузки

Калиброванная ветровая нагрузка (согласно записям, word № 2) приводит к следующим пиковым значениям смоделированной конструкции в модальных координатах (Рисунок 6, Рисунок 7, Рисунок 8):

- Смоделированное пиковое ускорение конструкции: 0,190 м / с2 (измерено 0,19 м / с2)
- Смоделированная пиковая скорость конструкции: 0,072 м / с (измеренная: 0,073 м / с)
- Смоделированное пиковое смещение конструкции: 0,028 м (измерено: 0,027 м)

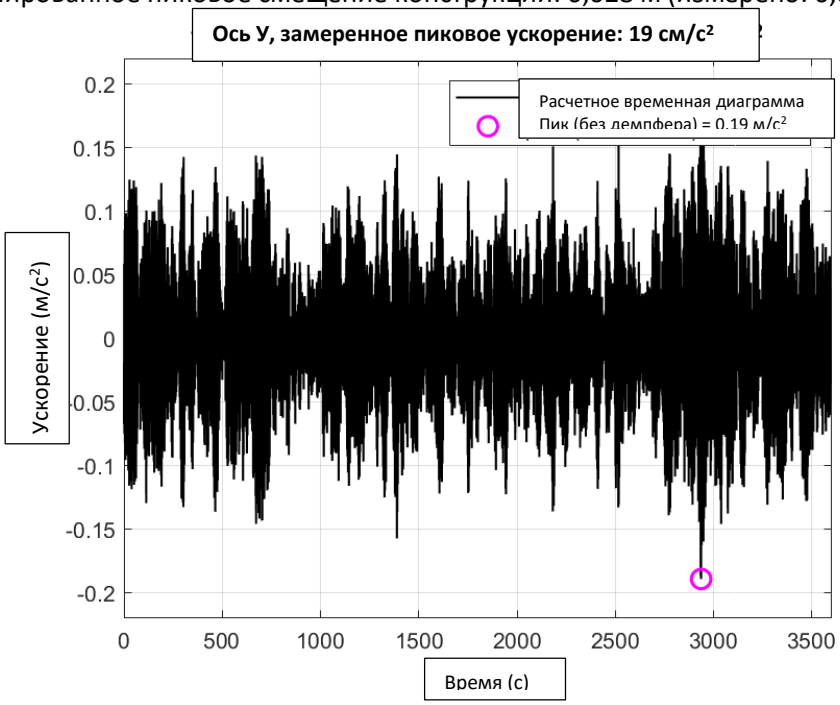


Рисунок 6. Смоделированная временная диаграмма ускорения конструкции с калиброванной ветровой нагрузкой.

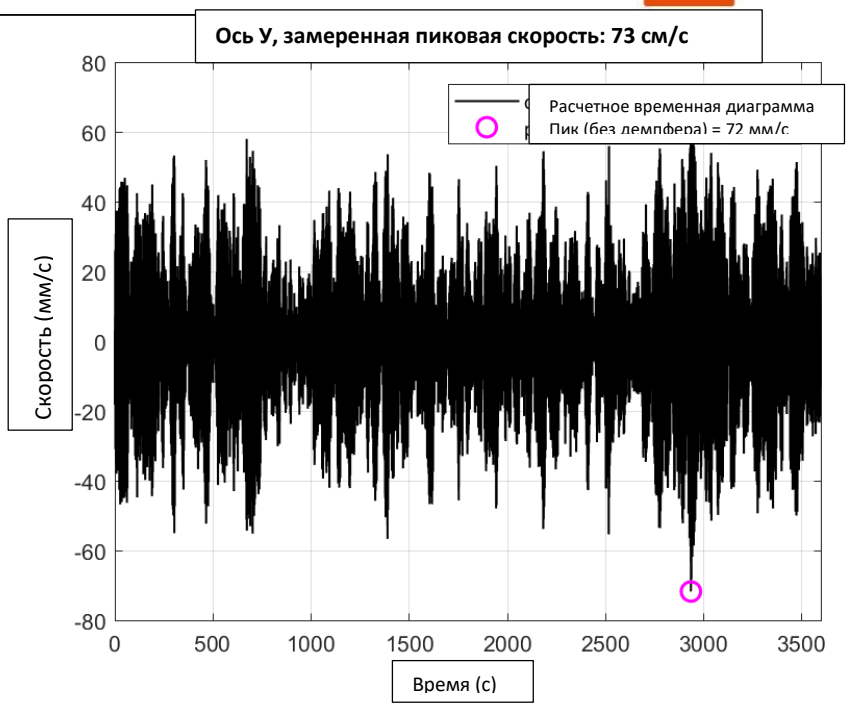


Рисунок 7. Смоделированная временная диаграмма скорости конструкции с калиброванной ветровой нагрузкой.

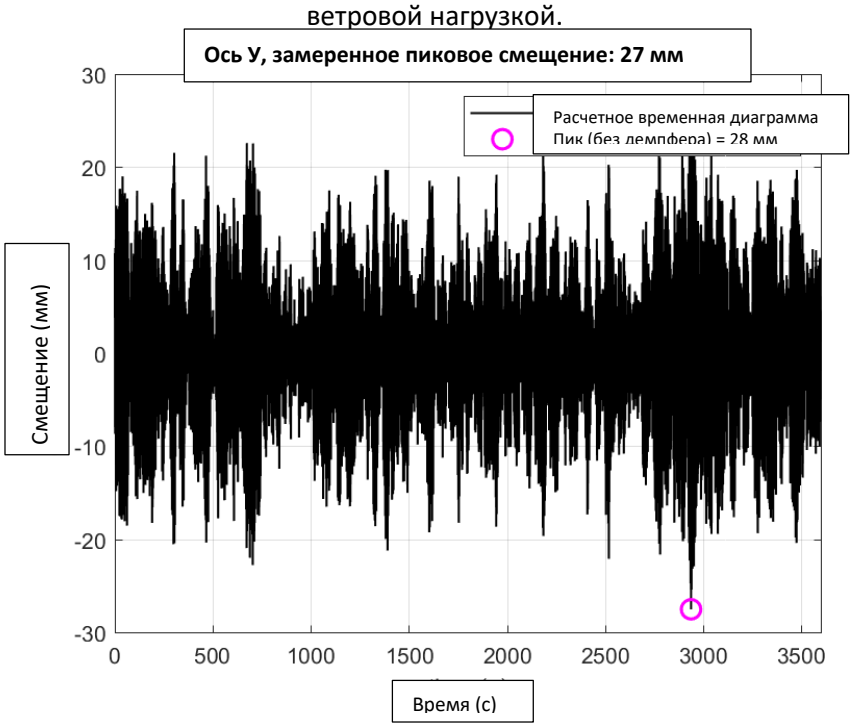


Рисунок 8. Смоделированная временная диаграмма смещения конструкции с калиброванной ветровой нагрузкой.

6. Пределы ускорения

6.1. ПП ветра 1 год

6.1.1. Стандарт ISO 10137:2007

Максимально допустимое пиковое ускорение конструкции высотных зданий указано в Стандарте ISO 10137: 2007 [4] для одногодичного ПП ветра:

$$const.* \, frequency^{-0,445} \, (milli - g) \tag{14}$$

с $const.$ = 4,08 для жилых домов, $const.$ = 6,12 для офисных зданий, а частота равна собственной частоте основного типа колебаний. Для рассматриваемого здания это дает:

- ПП ветра 1 год, ось y(f_{1y}=0,41 Гц), офисное здание: 0,089 м/с^2

6.1.2. Российский стандарт

Максимально допустимое пиковое ускорение конструкции высотных зданий в соответствии с Российским стандартом следующее:

- ПП ветра 1 год: 0,080 м/с^2

6.2. ПП ветра 10 лет

Максимально допустимое пиковое ускорение конструкции высотных зданий для ПП ветра 10 лет описано в рекомендации Совета по высоким зданиям и городской среде обитания:

- ПП ветра 10 лет: 0,147 м/с^2 (15 милли-г)

7. Оценка вибрации

7.1. Пиковое значение (предельное значение)

Замеряемые показатели ускорения, скорости и смещения конструкции (word №2) оцениваются по их пиковым значениям. Следовательно, моделирование оценивается также по пиковым значениям интересующих состояний. Максимумом абсолютного значения ускорения конструкции и смещения конструкции являются их предельные значения или пиковые значения.

$$peak(\ddot{u}1,y) = max\{abs(\ddot{u}1,y)\} \quad (15)$$

$$peak(u1,y) = max\{abs(u1,y)\} \quad (16)$$

Максимум абсолютного значения относительного движения массы демпфера является предельным значением или пиковым значением

$$peak(u1,y - u2,y) = max\{abs(u1,y - u2,y)\} \quad (17)$$

Максимум абсолютного значения силы гашения демпфера является предельным значением или пиковым значением

$$peak(fd\ ) = max\{abs(fd\ )\} \quad (18)$$

7.2. Пиковое динамическое значение

Обычно, реакция здания на ускорение с гасителем или без гасителя оценивается пиковым динамическим значением, которое применимо к воздействию широкого спектра

$$(\text{пиковое динамическое значение}) = mean(\ddot{u}1\ ) \pm g \cdot \sqrt{mean\{(\ddot{u}1)\ 2\}} \quad (19)$$

$$gp = \sqrt{2}\ ln(\ f1\ Tmax + 0{,}577\ \sqrt{2}\ ln(f1\ Tmax \quad (20)$$

где gp, y обозначает пиковый фактор, который обычно принимается равным 3, а $Tmax$ - длина хронологии ускорения, используемой для оценки. Метод оценки пикового динамического значения не применяется к рассматриваемому моделированию, потому что измеренные состояния (word № 2) оцениваются по их пиковым значениям (см. 7.1), при этом методы оценки совпадают.

8. Результаты

8.1. Направление оси У

Пассивный настраиваемый динамический гаситель: коэффициент вязкости элемента квадратичного вязкостного демпфирования (синий в таблице 3) по сравнению с элементом линейного вязкостного демпфирования (красный в таблице 2) пассивного динамического гасителя оптимизирован для минимизации относительного движения и обеспечения предела ускорения в 14,32 милли-г для ПП ветра 1 год в соответствии с ISO 10137: 2007 (Таблица 2).

Таблица 2. Основные результаты без динамического гасителя и с линейным вязкостным демпфирующим элементом в динамическом гасителе.

Тип динамического гасителя	Масса маятника	Период повторяемости ветра	Предел ускорения	Пиковое ускорение конструкции	Пиковое смещение конструкции	Пиковое относительное движение демпфера	Пиковая сила динамического гасителя
	(тонн)	лет	(м/с^2)	(м/с^2)	(м)	(м)	(кН)
без	Н/П	1	a or b	0,190	0,028	Н/П	Н/П
		10	0,147 [c]	0,235 [1]	0,034		
		50	NA	0,313 [2]	0,045		
Пассивное линейное вязкостное демпфирование	135	1	0,089 [a]	0,089	0,015	0,054	9,26
		10	0,147	0,127	0,022	0,076	13,13
		50	Н/П	0,170	0,029	0,102	17,51
	220	1	0,080 [b]	0,080	0,014	0,039	13,88
		10	0,147	0,116	0,020	0,056	19,98
		50	Н/П	0,155	0,027	0,074	26,64

a: согласно ISO 10137: 2007 для офисных зданий / b: согласно российскому стандарту

c: 0,147 м / с2 (15 милли-г) согласно рекомендации Совета

1: ветровая нагрузка 150% ветровой нагрузки при ПП ветра 1 год

пиковое ускорение 124% от 0,190 м / с2 из-за повышенного внутреннего демпфирования конструкции (1y (ПП 10 лет) = 1,5%> 1y (ПП 1 год) = 1,0%, см. 3.4.3)

2: ветровая нагрузка 200% ветровой нагрузки при ПП ветра 1 год

пиковое ускорение 165% от 0,190 м / с2 из-за повышенного внутреннего демпфирования конструкции (1y (ПП 50 лет) = 1,5%> 1y (ПП 1 год) = 1,0%, см. 3.4.3)

AdaptiveTMD: коэффициент вязкости элемента самонастраивающегося вязкостного демпфирования в целом работает оптимально в зависимости от нагрузки (ПП ветра 1 год, 10, 50 лет) по сравнению с квадратичным пассивным вязкостным демпфирующим элементом (синий в таблице 3) пассивного динамического гасителя. Этот оптимизированный режим работы в реальном времени позволяет снизить массу динамического гасителя на 15% (см. значения зеленого цвета в Таблице 23).

Таблица 3. Основные результаты с элементом квадратичного вязкостного демпфирования внутри настраиваемого динамического демпфера и демпфера MAURER ***AdaptiveTMD***.

Тип динамического гасителя	Масса маятника	Период повторяемости ветра	Предел ускорения	Пиковое ускорение конструкции	Пиковое смещение конструкции	Пиковое относительное движение демпфера	Пиковая сила демпфера
	(тонн)	лет	(м/с^2)	(м/с^2)	(м)	(м)	(кН)
Пассивное квадратичное вязкостное демпфирование	**139**	**1**	**0,089 [a]**	**0,089**	**0,015**	**0,042**	**13,98**
		10	**0,123 [c]**	**0,147**	**0,022**	**0,052**	**20,81**
		50	**Н/П**	**0,188**	**0,030**	**0,062**	**29,71**
	232	**1**	**0,080 [b]**	**0,080**	**0,014**	**0,028**	**21,36**
		10	**0,123 [c]**	**0,147**	**0,021**	**0,034**	**33,34**
		50	**NA**	**0,175**	**0,028**	**0,041**	**47,36**
Адаптивное вязкостное демпфирование	**118 (85 % из 139)**	**1**	**0,089 [a]**	**0,089**	**0,015**	**0,048**	**16,02**
		10	**0,123 [c]**	**0,147**	**0,022**	**0,059**	**23,54**
		50	**NA**	**0,190**	**0,030**	**0,068**	**50,09**
	197 (85 % из 232)	**1**	**0,080 [b]**	**0,080**	**0,014**	**0,032**	**22,51**
		10	**0,123 [c]**	**0,147**	**0,020**	**0,040**	**34,74**
		50	**Н/П**	**0,176**	**0,029**	**0,046**	**66,19**

a: согласно ISO 10137: 2007 для офисных зданий / b: согласно российскому стандарту

c: 0,147 м / с2 (15 милли-г) согласно рекомендации Совета

8.2. Направление оси X

Направление X не требует дополнительного демпфирования, так как предельные ускорения не будут превышены из-за довольно жесткого поведения конструкции в этом направлении - см. Главу 3.3. Однако настраиваемый динамический гаситель разработан также для работы в направлении оси X, что важно для правильного движения маятника в направлении оси У (отсутствие трения из-за направляющей системы в направлении оси У).

9. Расчетные характеристики, расположение и размер.

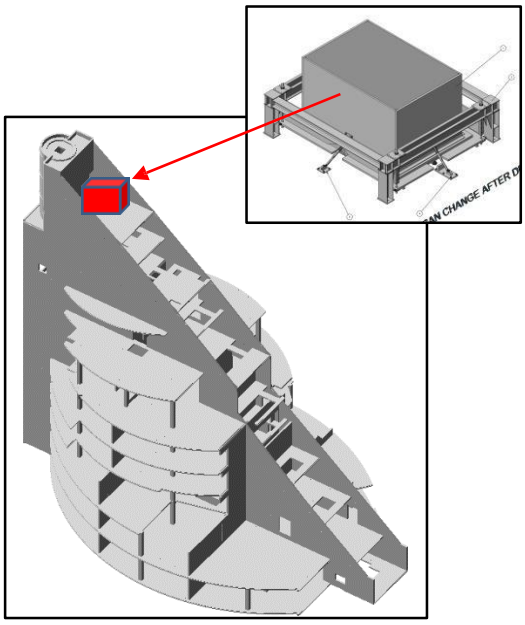
Расчетные характеристики рассматриваемых типов настраиваемых динамических гасителей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные характеристики рассматриваемых типов настраиваемых динамических гасителей.

Тип динамического гасителя	Масса маятника / коэффициент массы	Естественная частота / длина маятника	Коэффициент вязкого демпфирования / показатель демпфирования	Максимальное относительное движение (10 % запас)
Линейный вязкостный пассивный настраиваемый динамический гаситель	135 t / 2,55 % 220 t / 4,15 %	0,405 Hz / 1,515 м 0,402 Hz / 1,539 м	66,706 кНс/м / α=1 137,16 кНс/м / α=1	0,112 м 0,081 м
Квадратичный вязкостный пассивный настраиваемый динамический гаситель	139 t / 2,62 % 232 t / 4,38 %	0,405 Гц / 1,517 м 0,401 Гц / 1,542 м	1184,1 кНс/м / α=2 4330,3 кНс/м / α=2	0,045 м 0,068 м
Самонастраивающийся динамический гаситель MAURER ***AdaptiveTMD***	118 t / 2,23 % 197 t / 3,72 %	0,41 Hz / 1,478 м 0,41 Hz / 1,478 м	Задается законом самонастраивающегося управления	0,075 м 0,051 м

Предлагаемое решение описано в разделе 1.5.

Самонастраивающийся демпфер MAURER ***AdaptiveTMD*** следует установить после разъяснительного обсуждения с инженером-строителем на уровне этажа 32 (126,1 м).



Приблизительный размер 138-тонного самонастраивающегося маятникового демпфера, включая систему мониторинга:

6,04 x 6,04 x 3,0 м

Более подробные разъяснения предлагаемого **самонастраивающегося демпфера *AdaptiveTMD*** можно найти в документе «V211110 Здание Министерства транспорта - самонастраивающийся AdaptiveTMD -инфофо - MAURER - Системные решения» от 21.09.2021.

Справочные документы

[1] Асами Т. и Нишихара О. Точное решение в закрытой форме для оптимизации динамических поглотителей вибрации (применение к различным передаточным функциям и демпфирующим системам). *Журнал вибрации и акустики*, Технические обзоры, 2003, 125, 398-411.

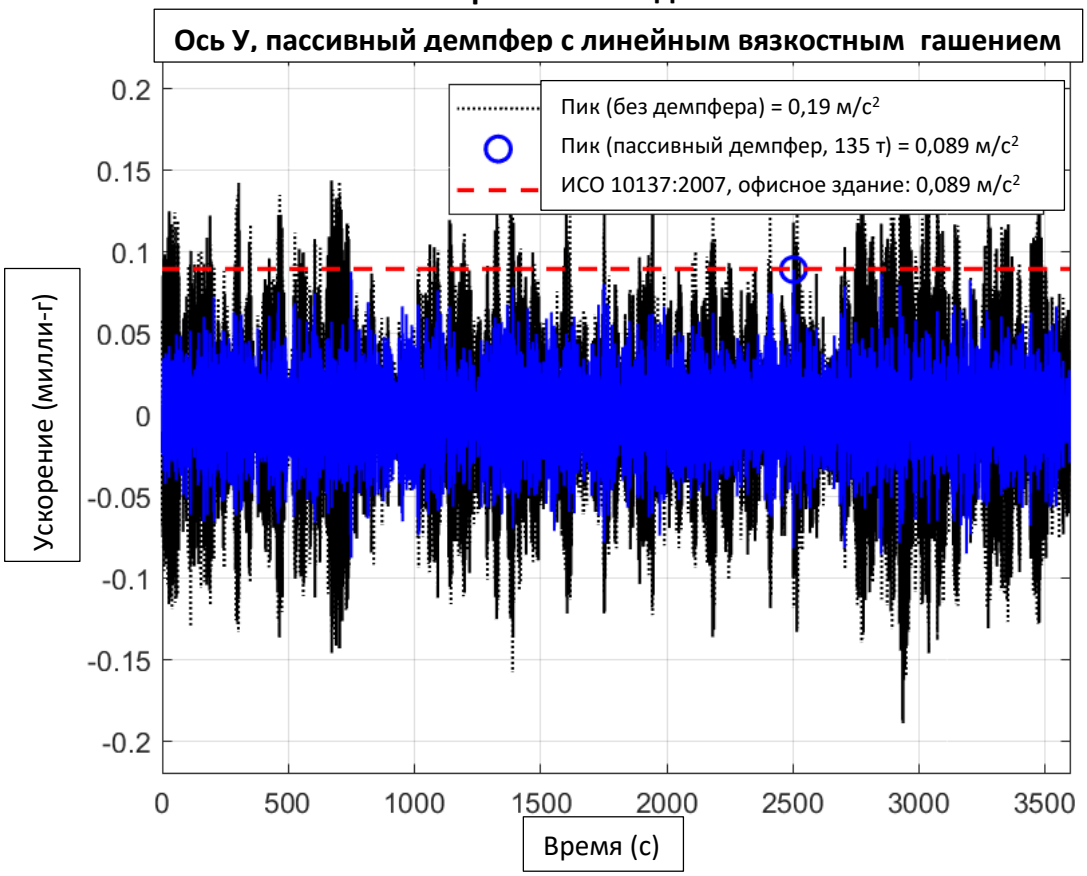
[2] Вебер Ф., Дистл Х., Спенсбергер С., Бенике О., Хубер П. и Браун К. Новый управляемый в реальном времени полуактивный настраиваемый демпфер масс для человеческих, вихревых и ветровых воздействий. Международная пешеходная конференция, Берлин, Германия, 6-8 сентября 2017 г.

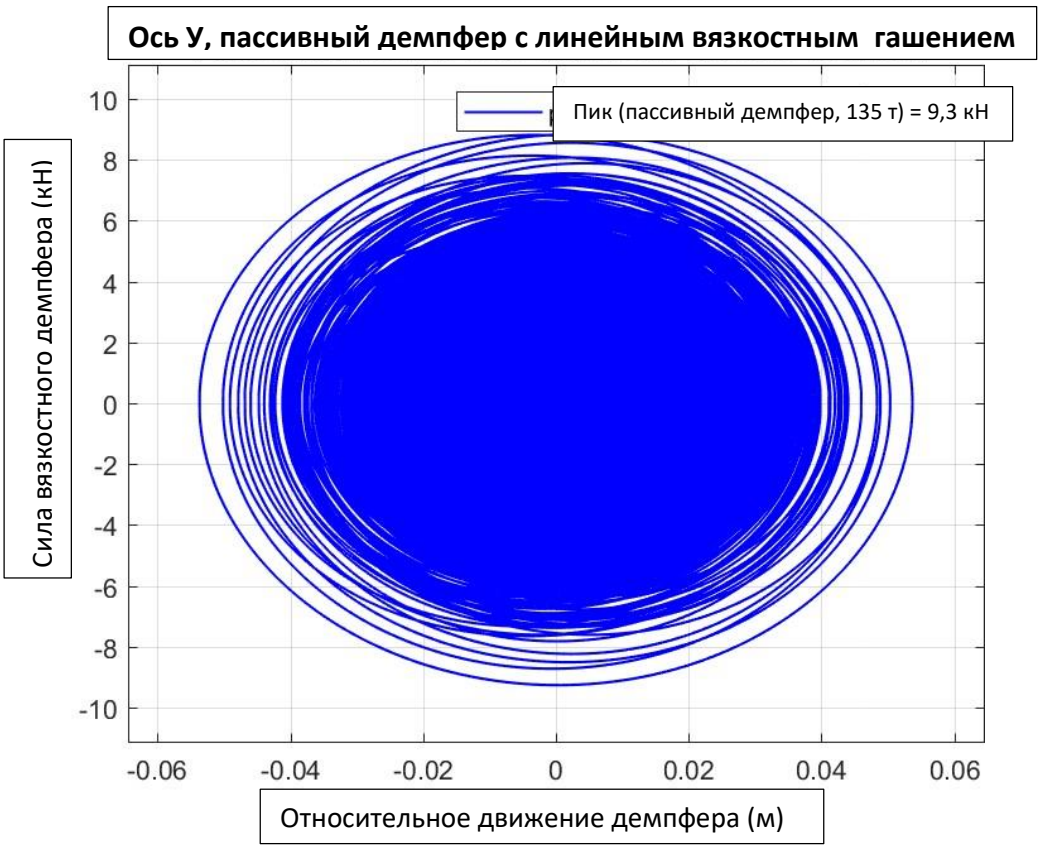
[3] Вебер Ф., Хубер П., Михальски А., Дистл Дж. И Браун С. Новый управляемый настраиваемый динамический гаситель с уменьшенной массой для снижения вибрации в высотных зданиях. Протоколы CTBUH (Совета по высотным зданиям и городской среде обитания) Конференция по Ближнему Востоку 2018 г., Дубай и Абу-Даби, ОАЭ, 20-25 октября 2018 г.

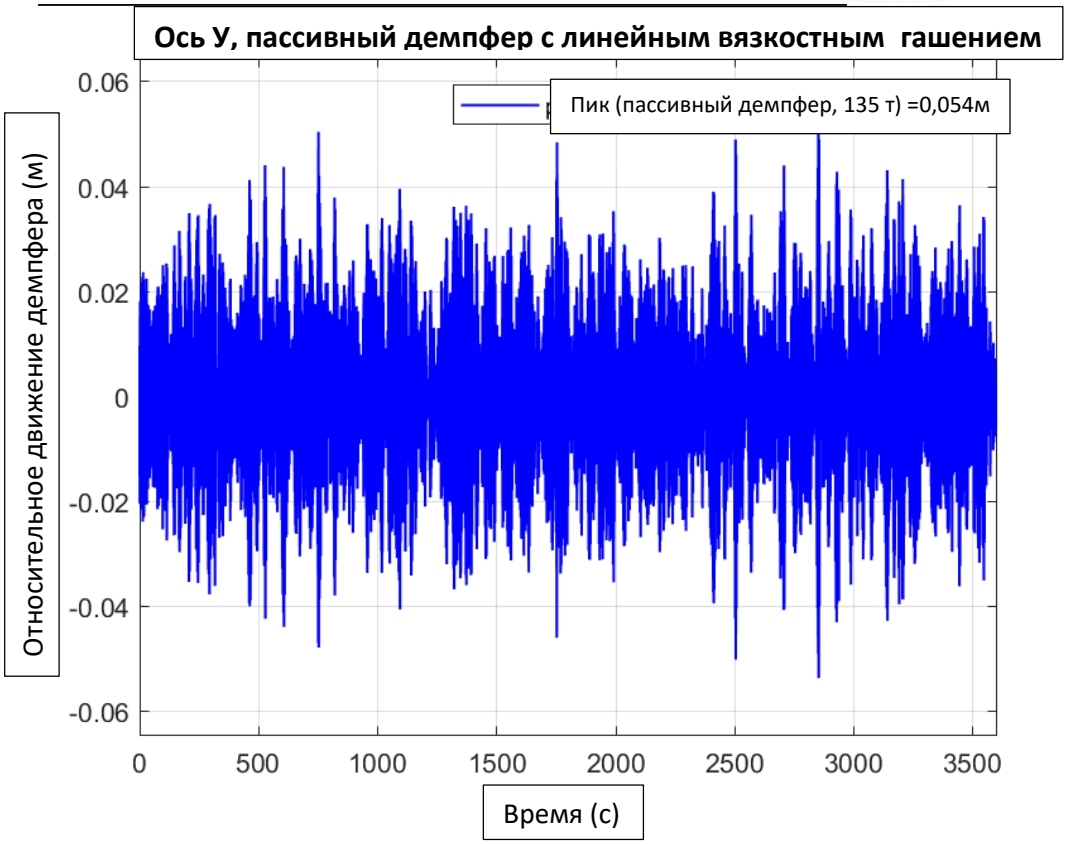
[4] ISO 10137: 2007. Основы проектирования конструкций – Пригодность к эксплуатации зданий и переходов в условиях вибрации.

Приложение

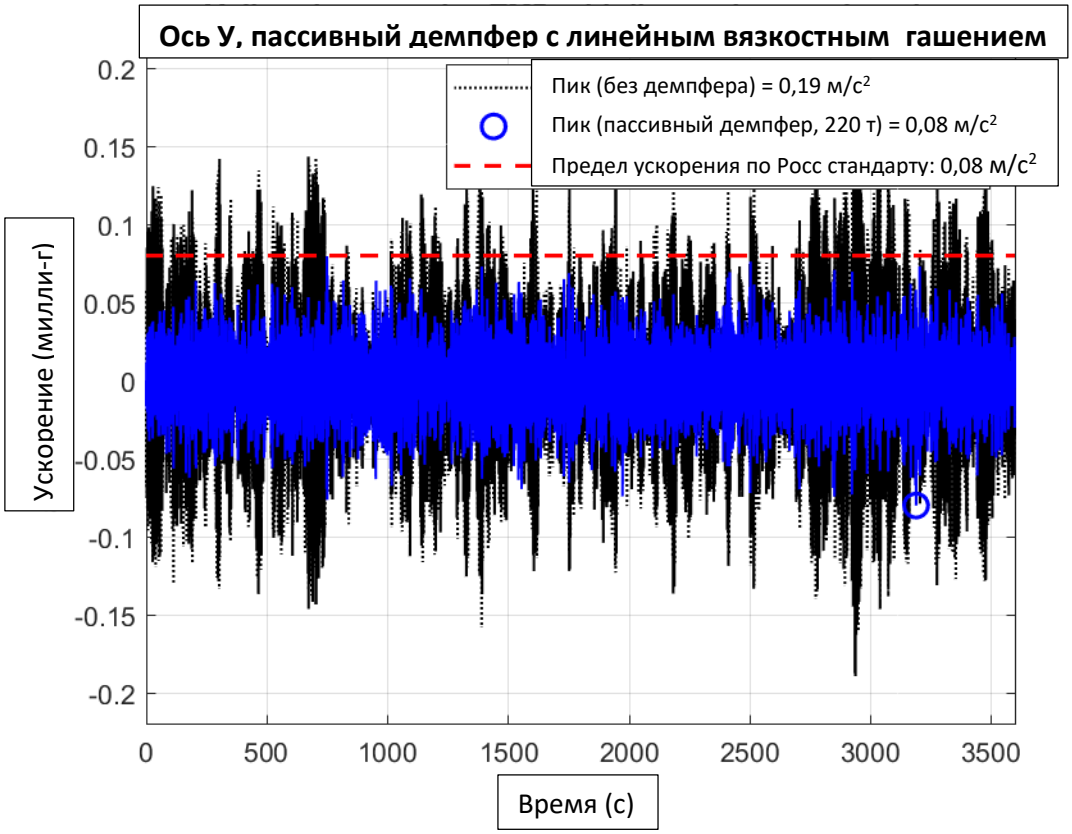
Ось У, период повторяемости ветра 1 год
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 135 т

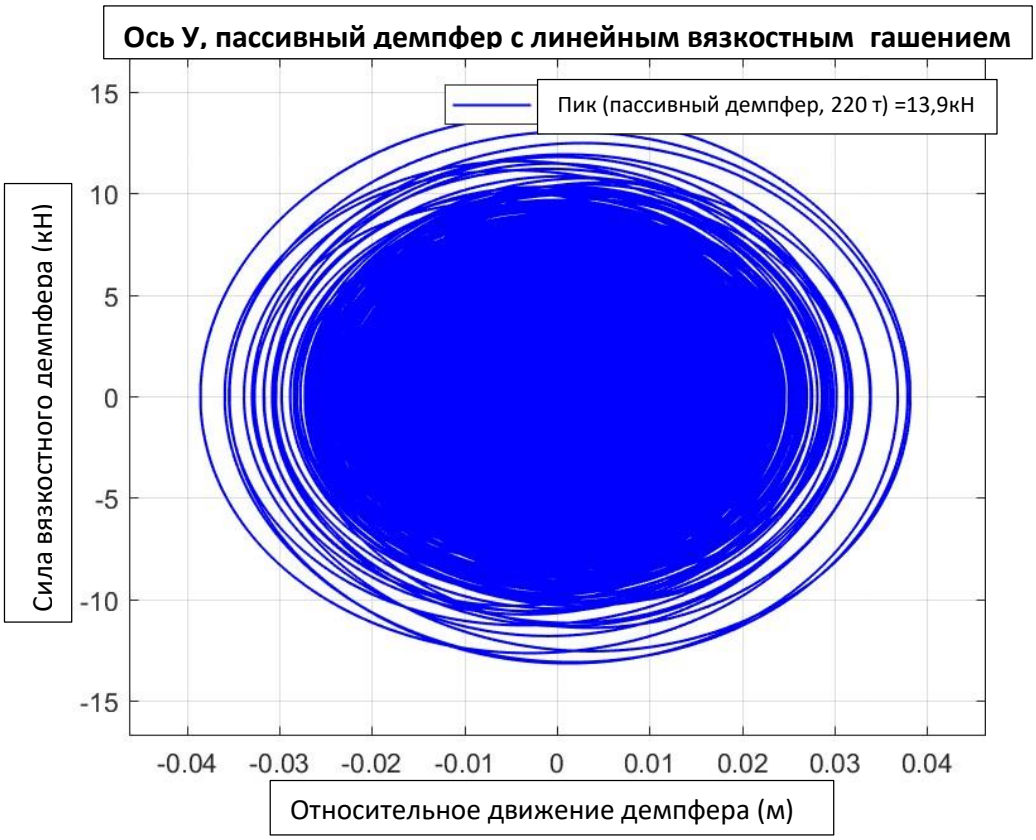


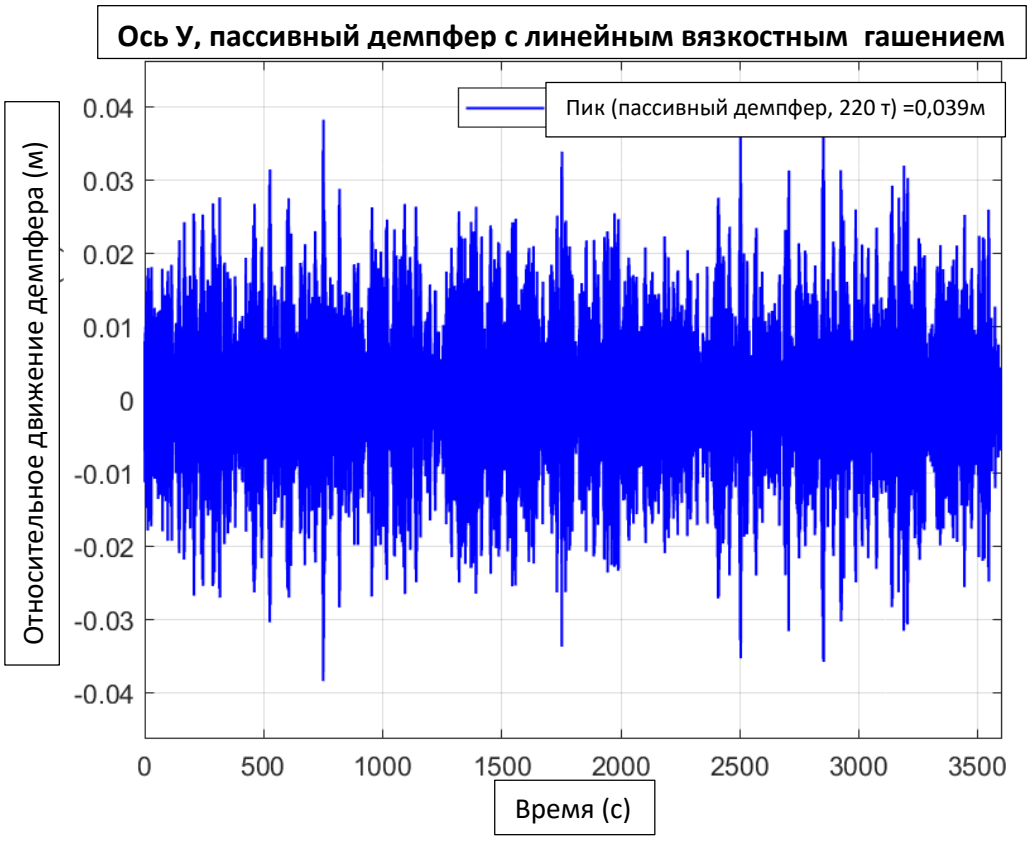



Ось У, пассивный демпфер с линейным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 135 т) =0,054м
Относительное движение демпфера (м)
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

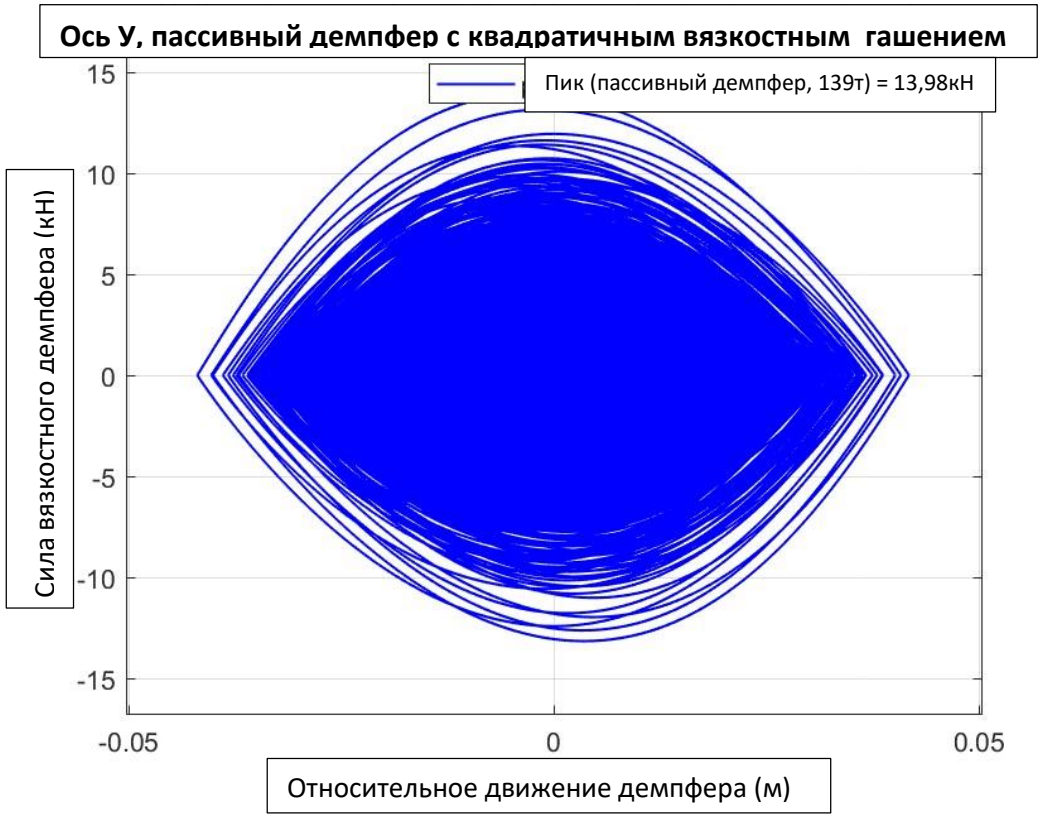
Линейный вязкостный динамический гаситель с 220 т

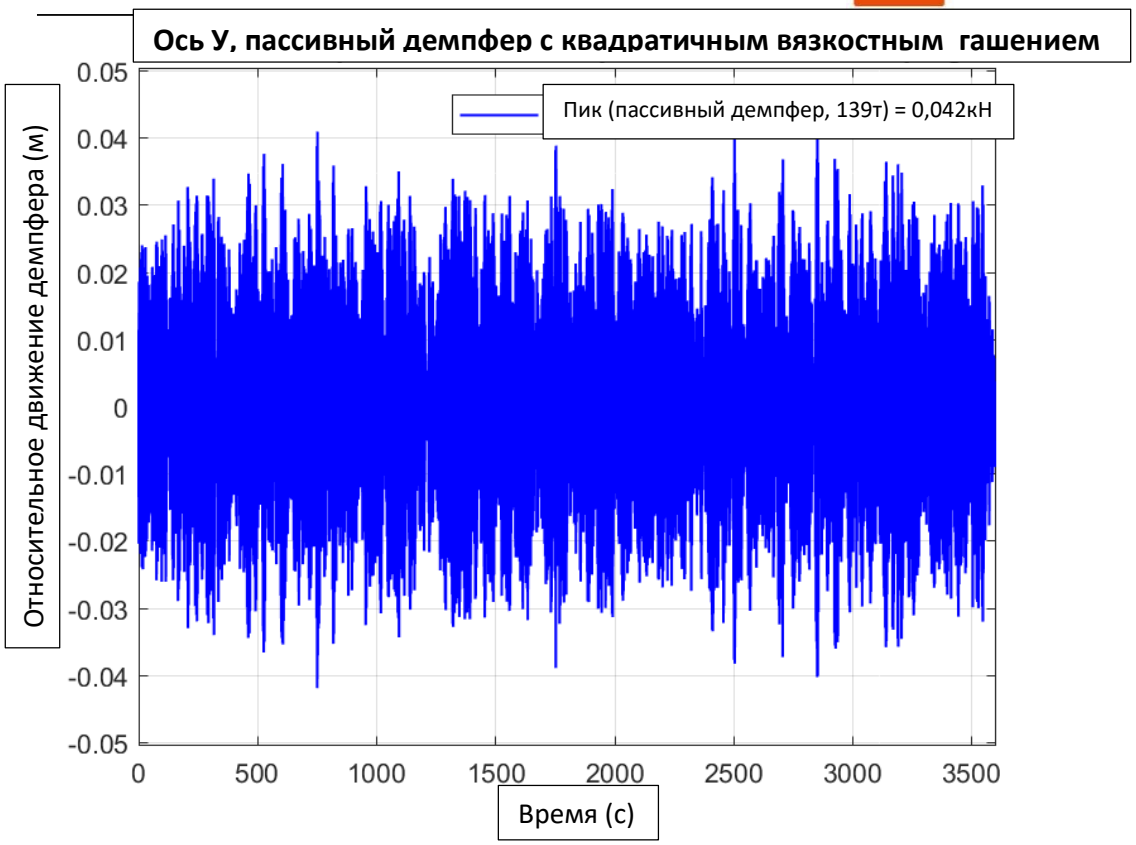




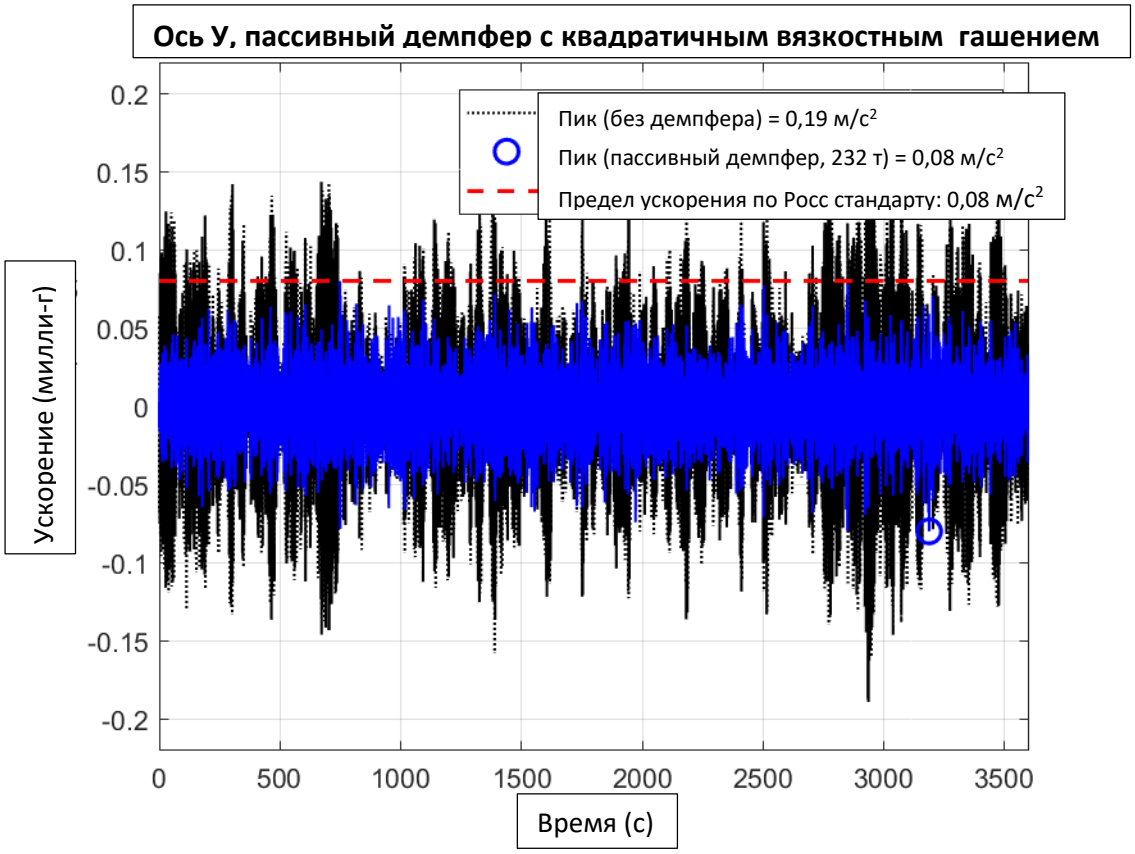

Ось У, пассивный демпфер с линейным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 220 т) =0,039м
Относительное движение демпфера (м)
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

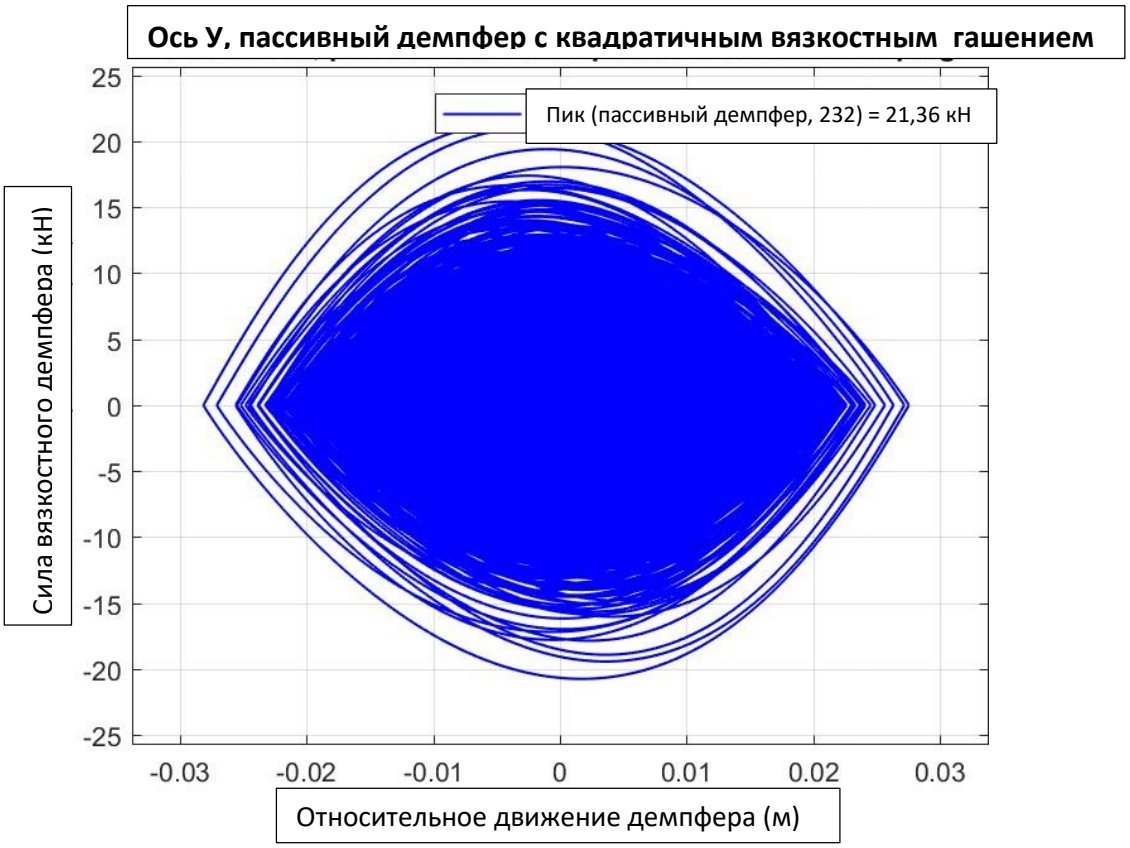
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 139 т

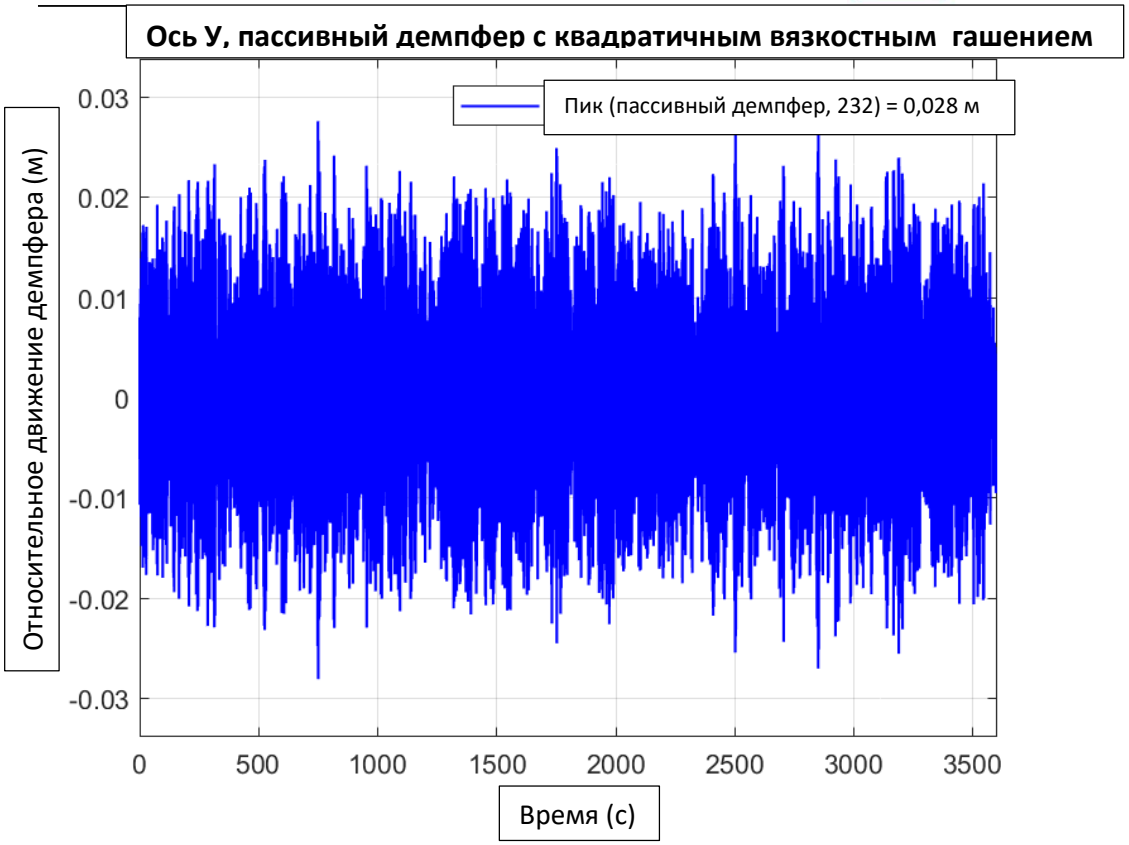



Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 139т) = 0,042кН
Относительное движение демпфера (м)
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.05
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

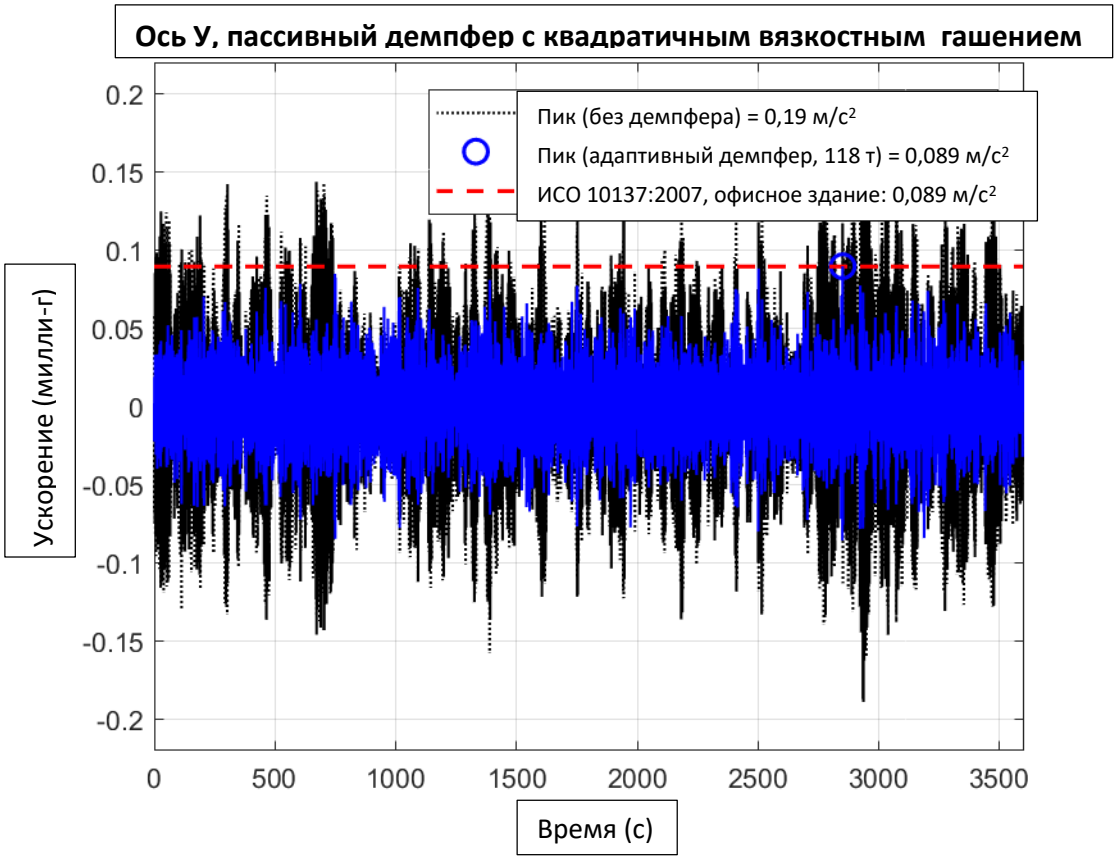
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 232 т

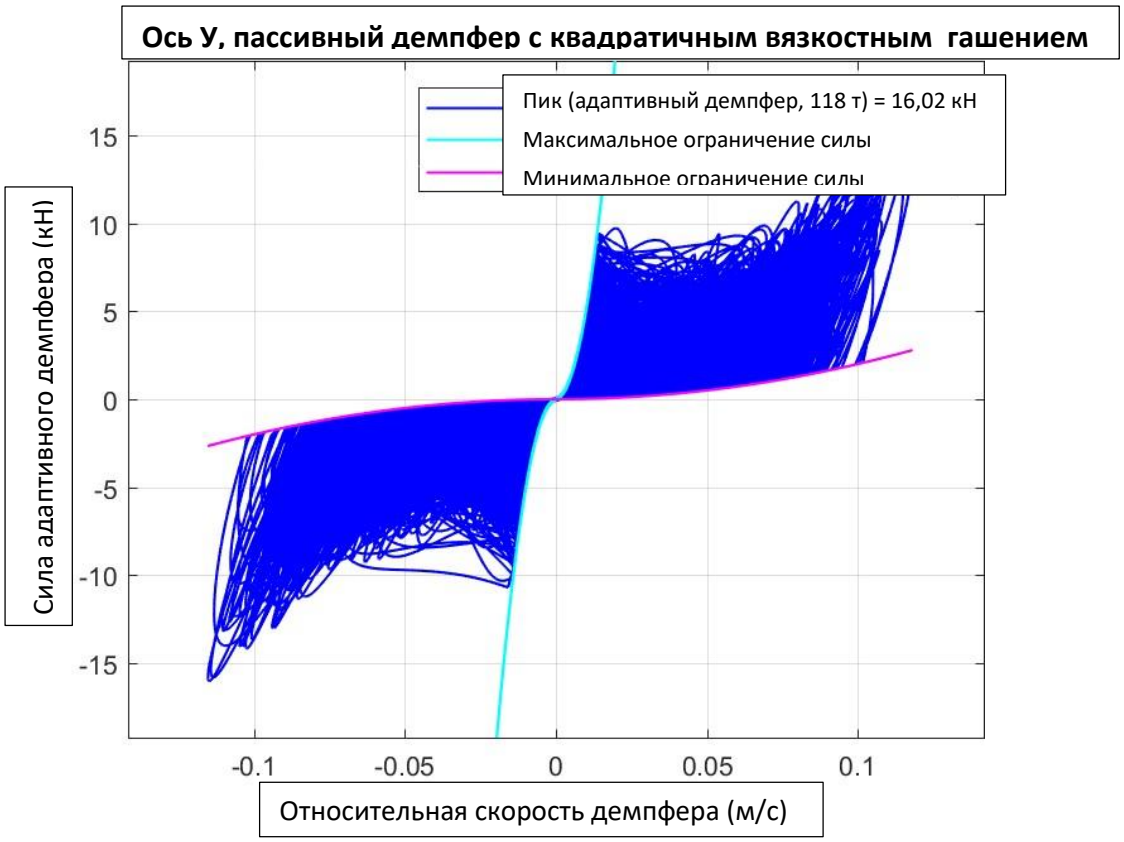


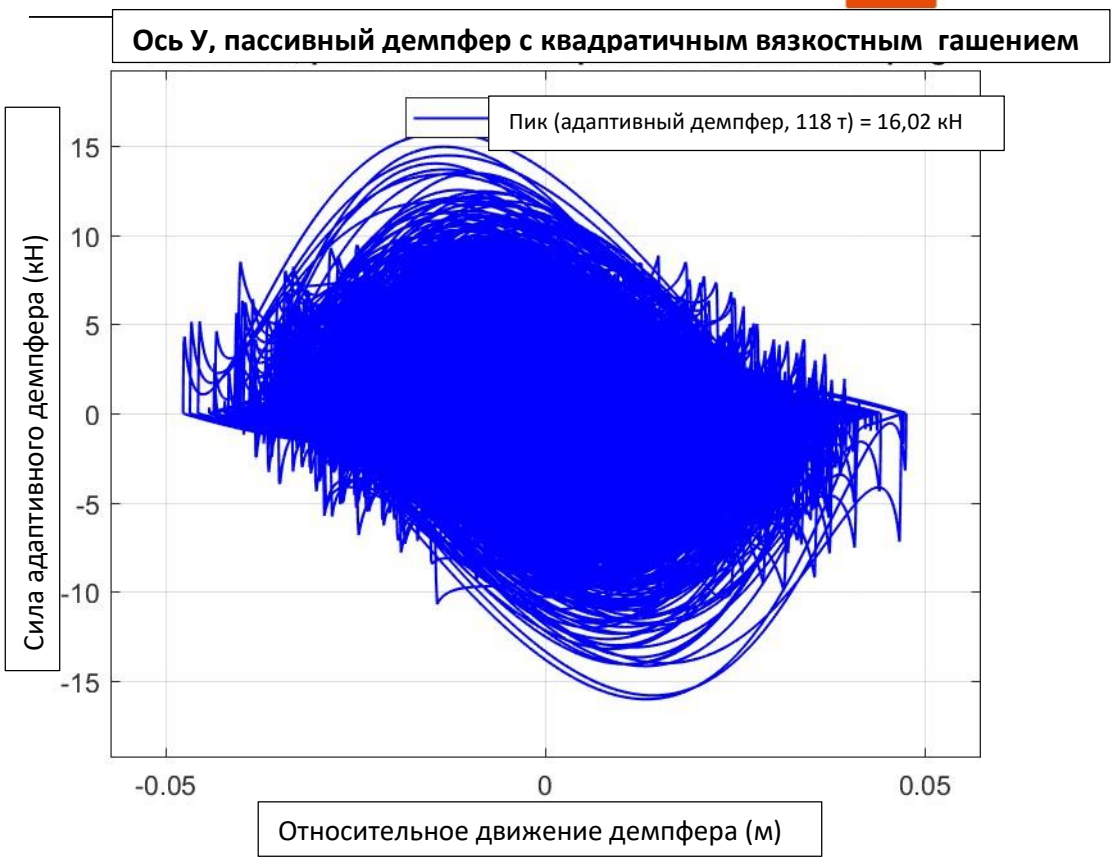


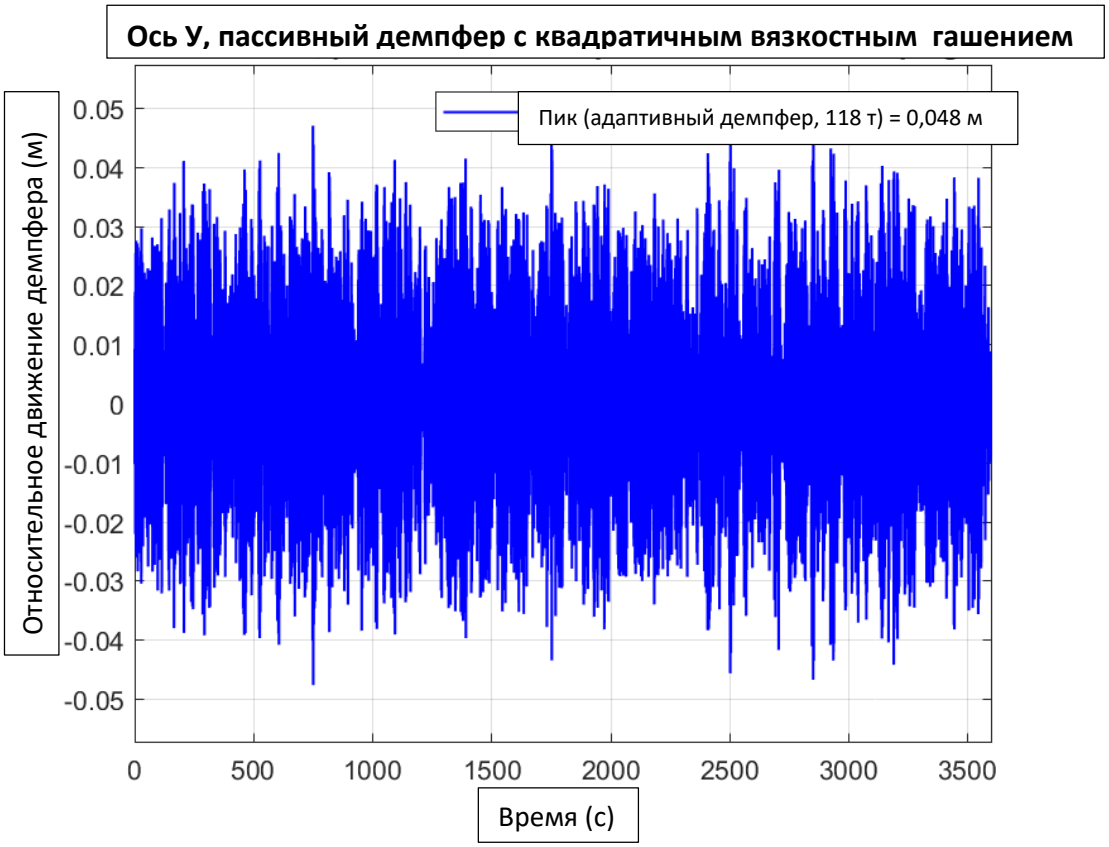

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 232) = 0,028 м
Относительное движение демпфера (м)
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

Самонастраивающийся динамический гаситель Maurer с 118 т

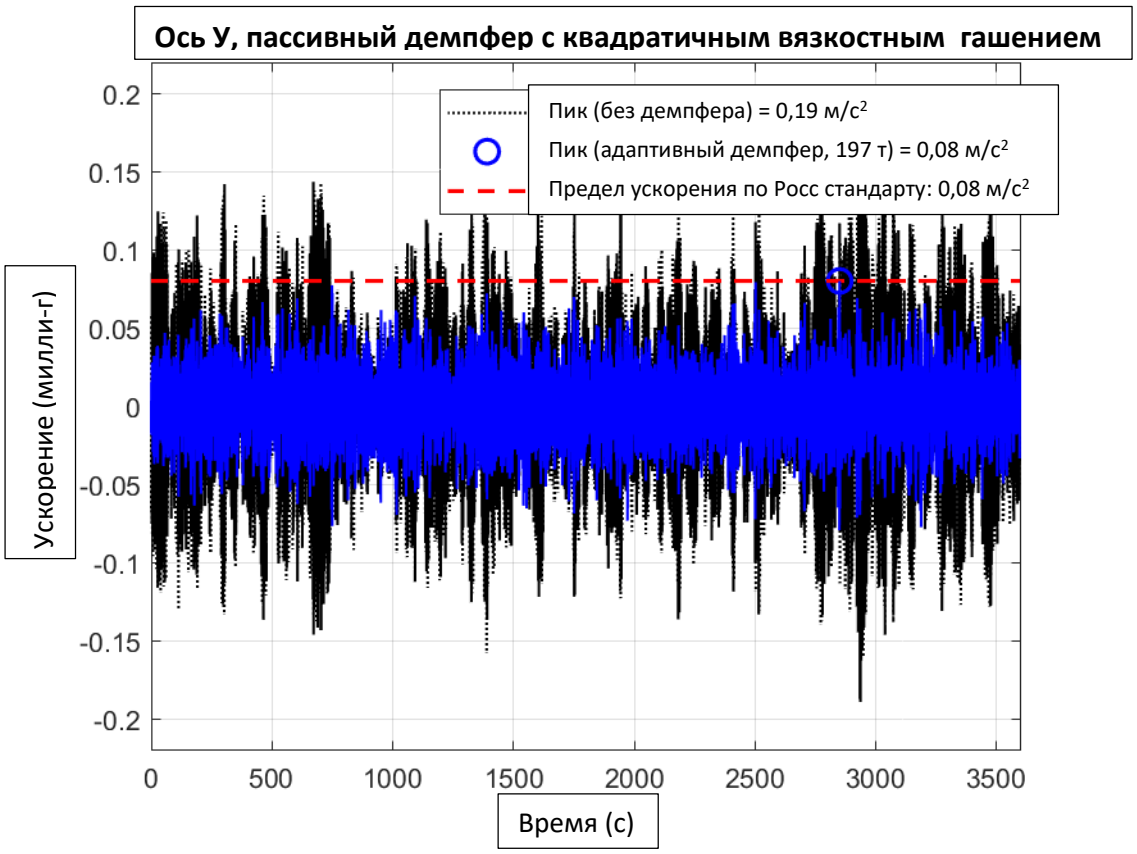


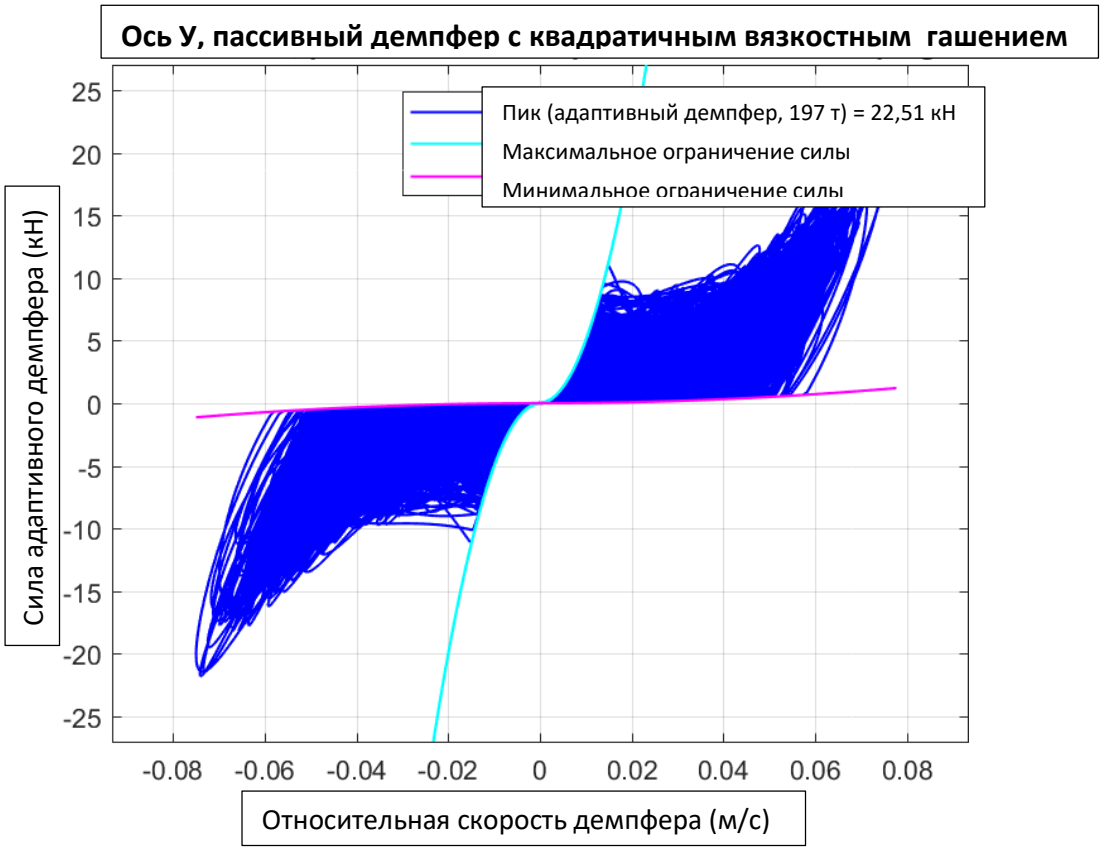


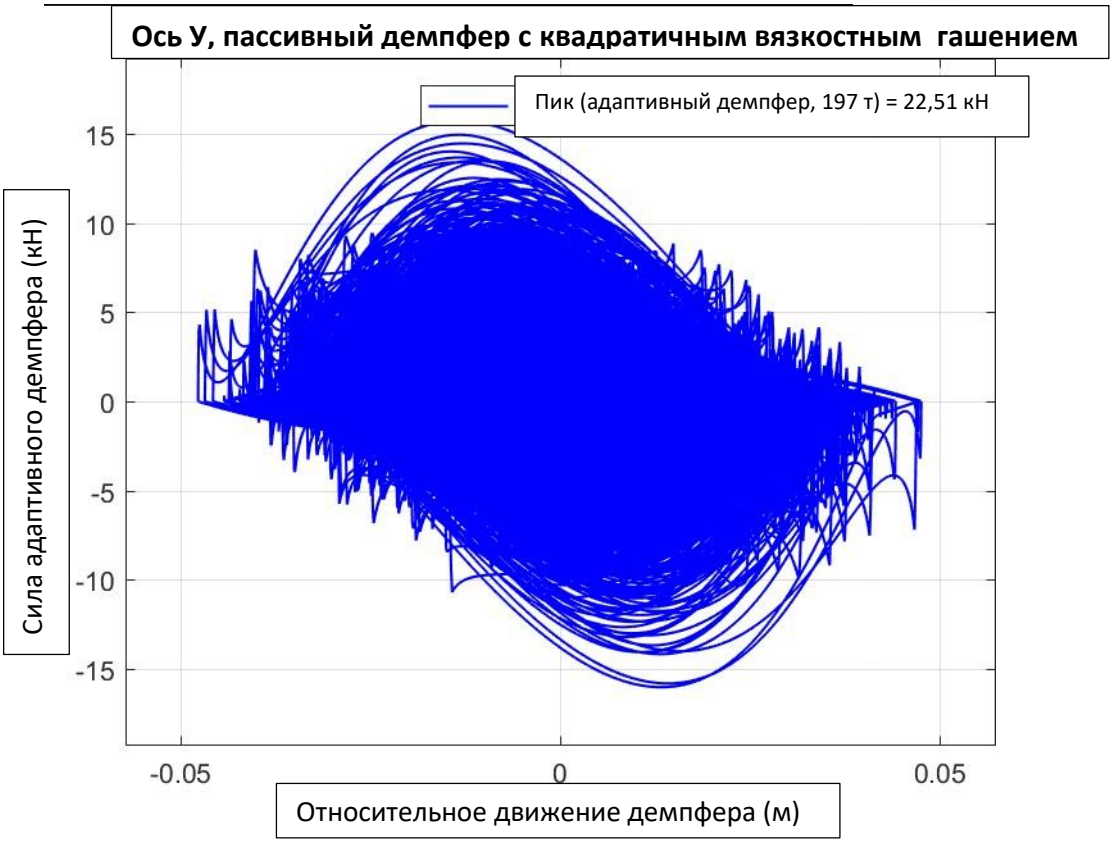

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 118 т) = 16,02 кН
Сила адаптивного демпфера (кН)
15
10
5
0
-5
-10
-15
-0.05
0
0.05
Относительное движение демпфера (м)

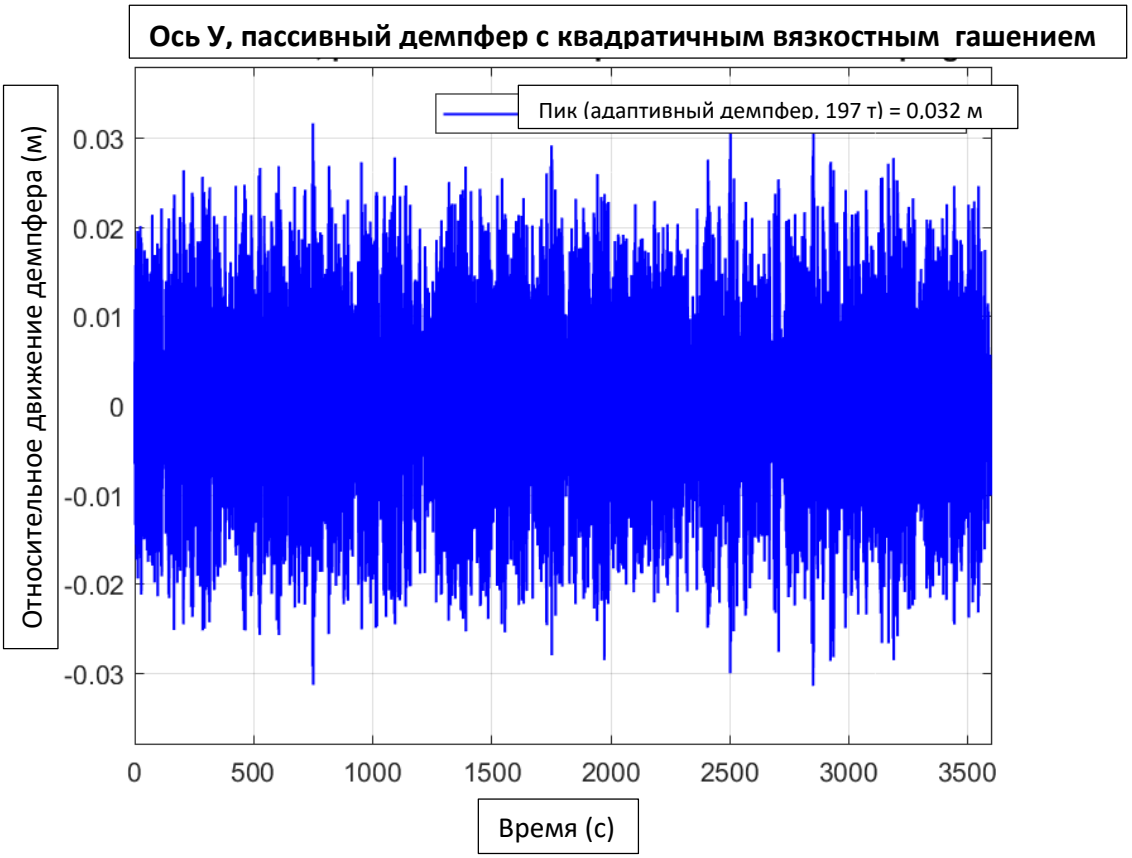

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 118 т) = 0,048 м
Относительное движение демпфера (м)
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.05
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 197 т

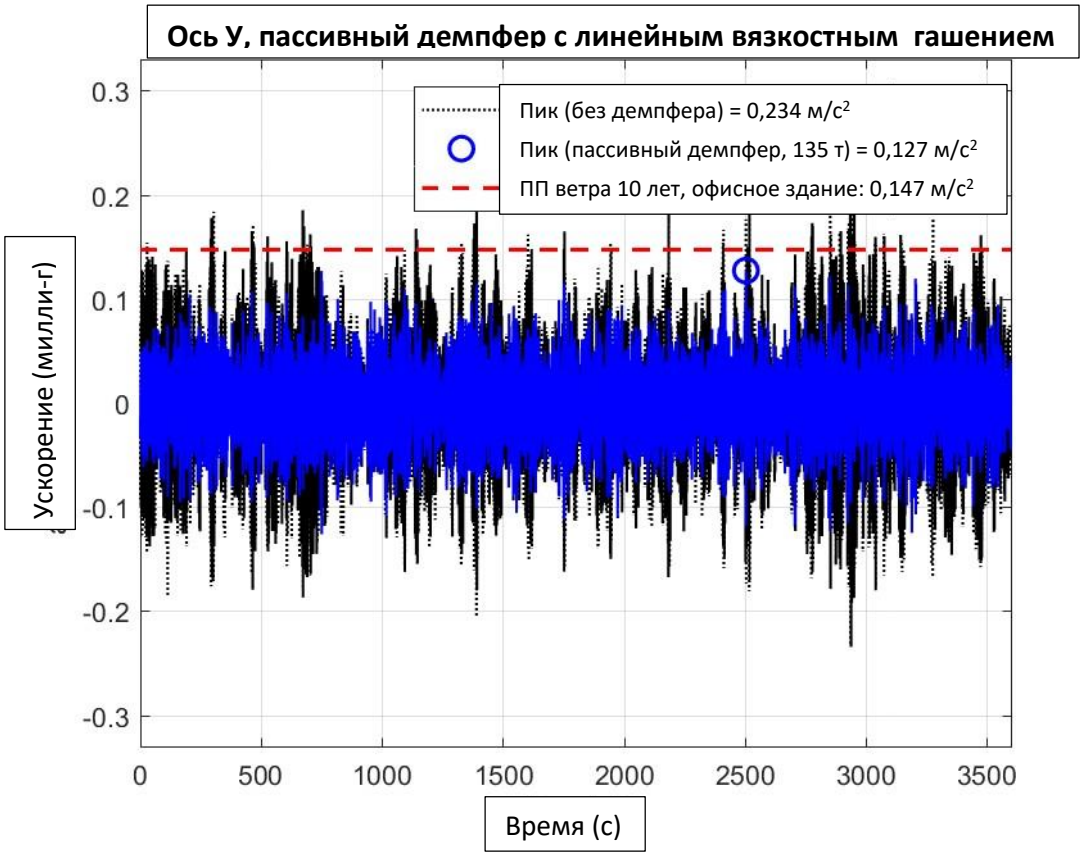


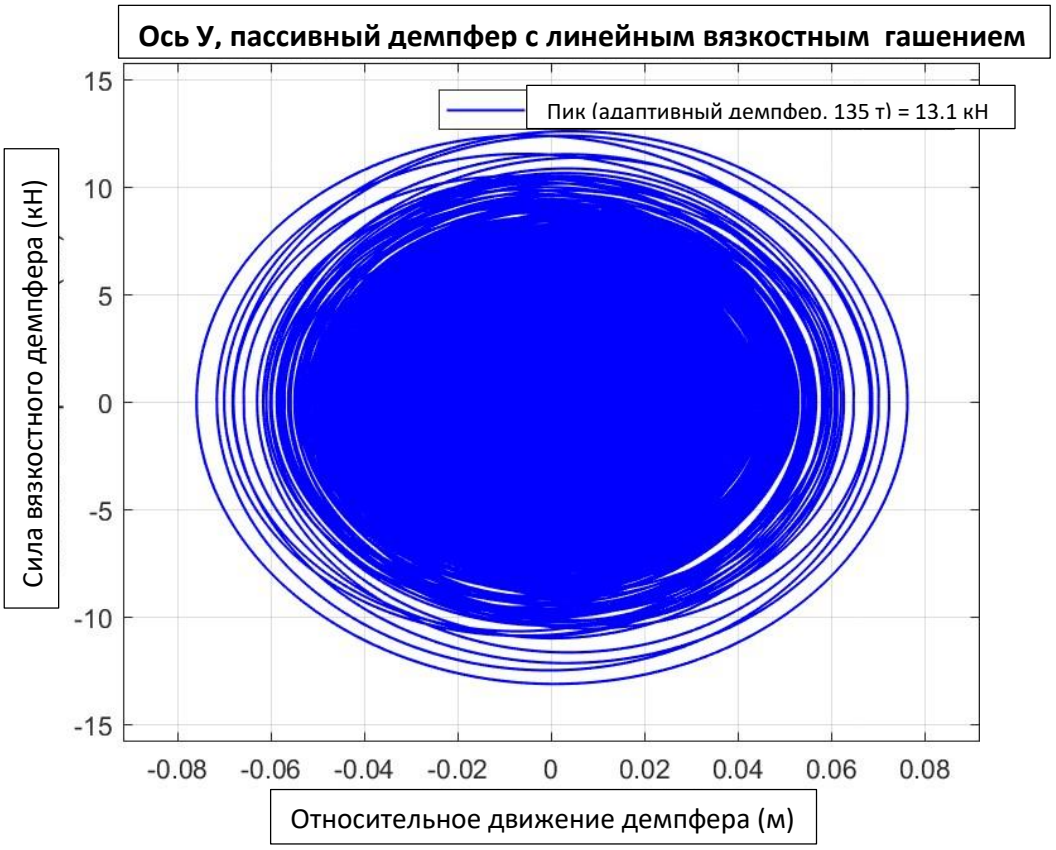


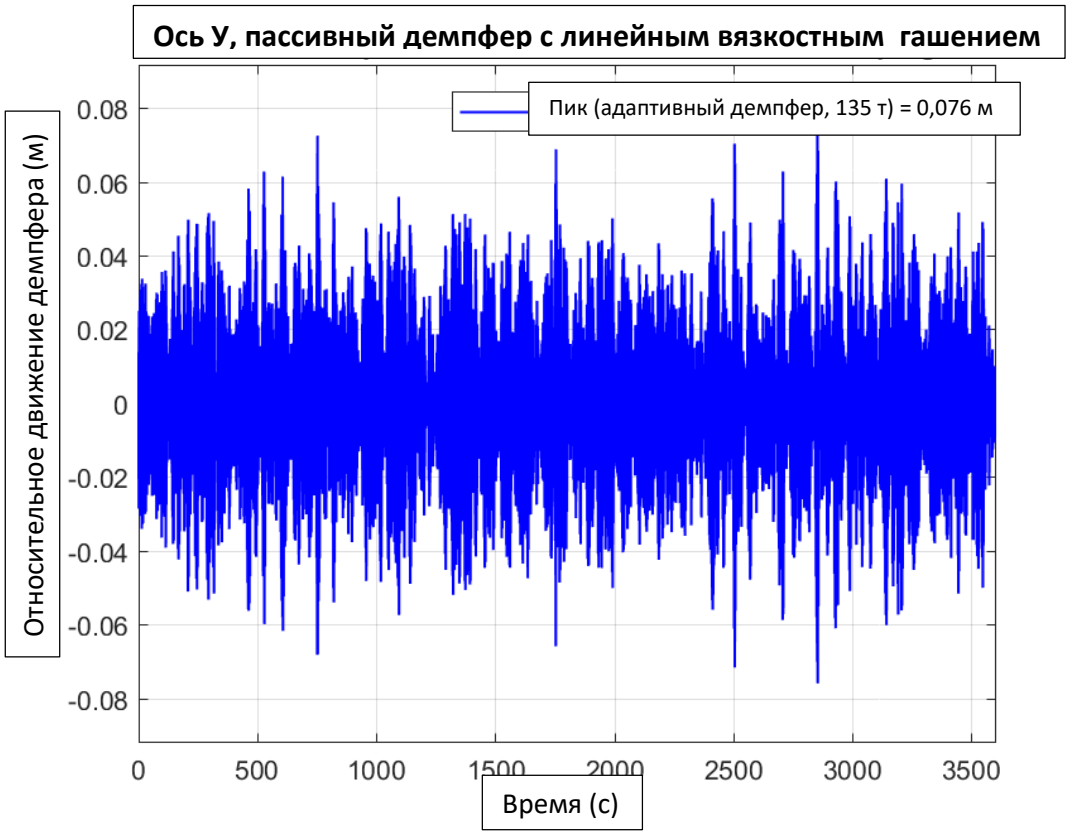

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 197 т) = 22,51 кН
Сила адаптивного демпфера (кН)
15
10
5
0
-5
-10
-15
-0.05
0
0.05
Относительное движение демпфера (м)


Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 197 т) = 0,032 м
Относительное движение демпфера (м)
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

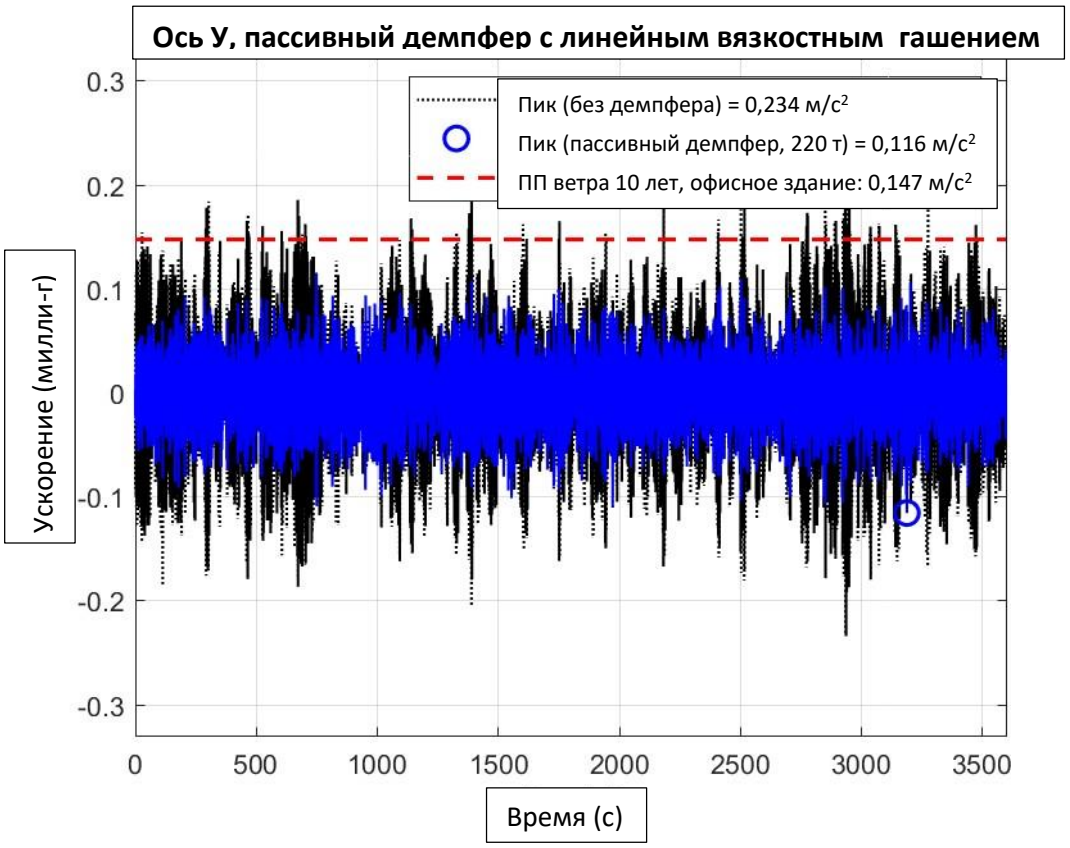
Ось У, период повторяемости ветра 10 лет
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 135 т

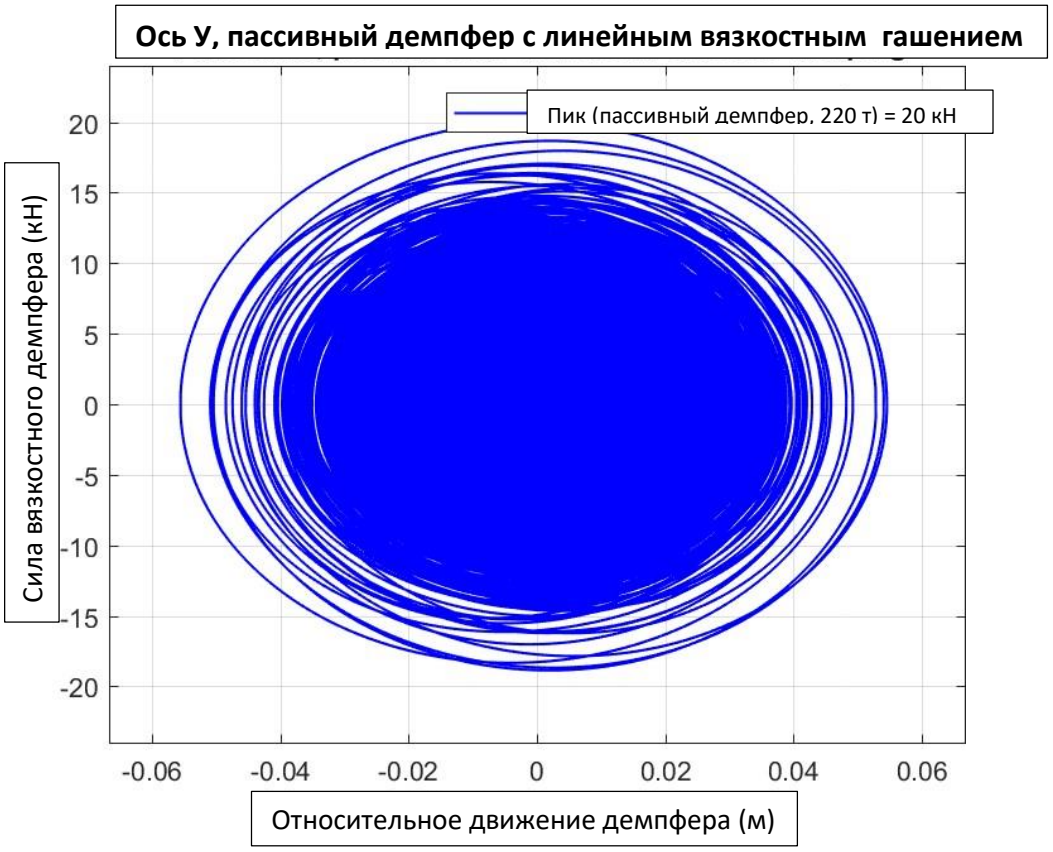


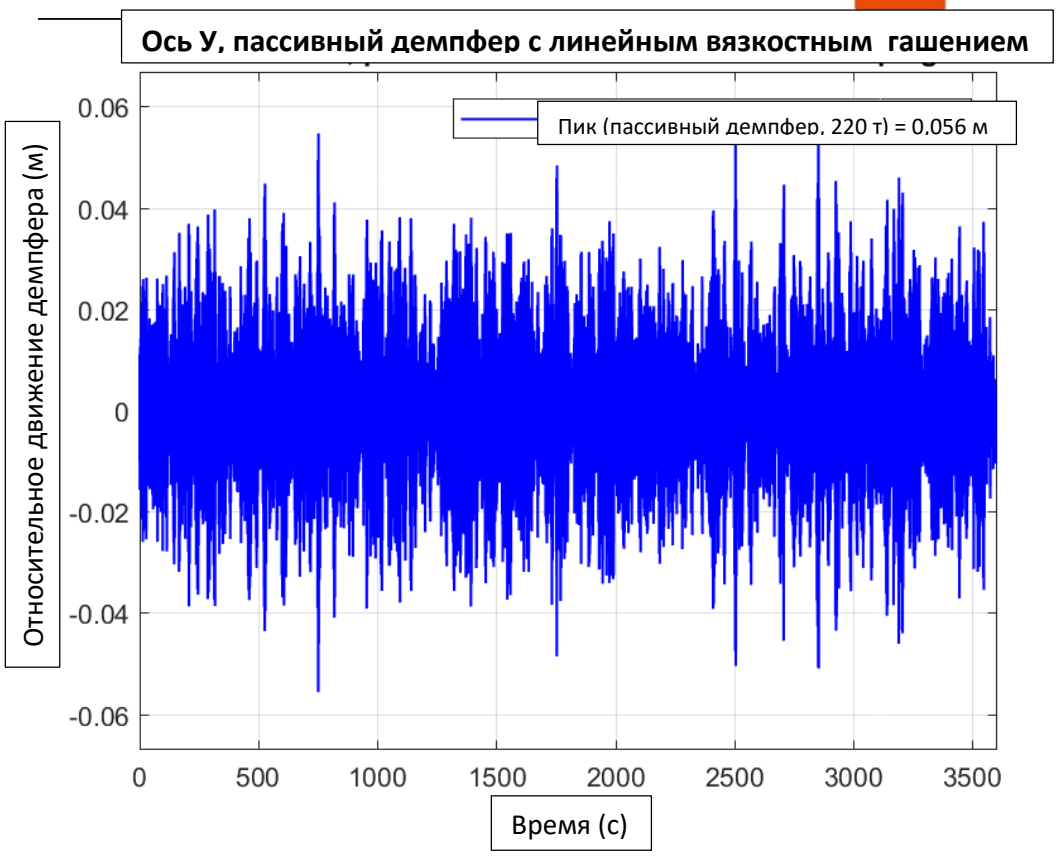



Ось У, пассивный демпфер с линейным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 135 т) = 0,076 м
Относительное движение демпфера (м)
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 220 т

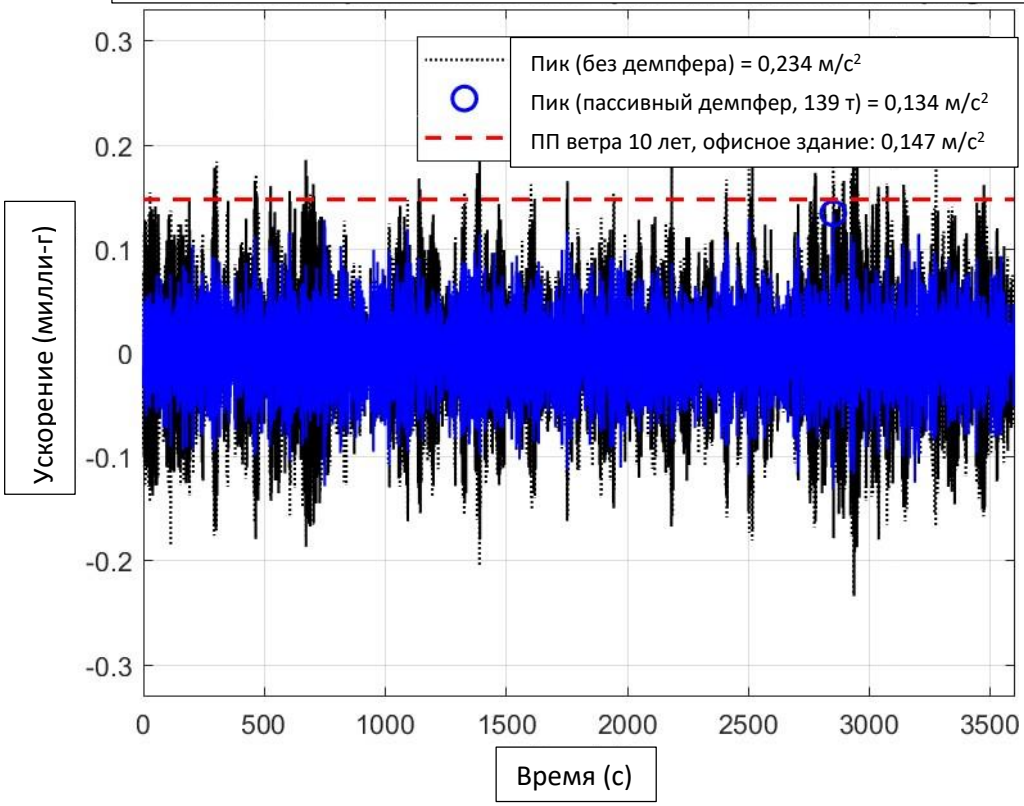




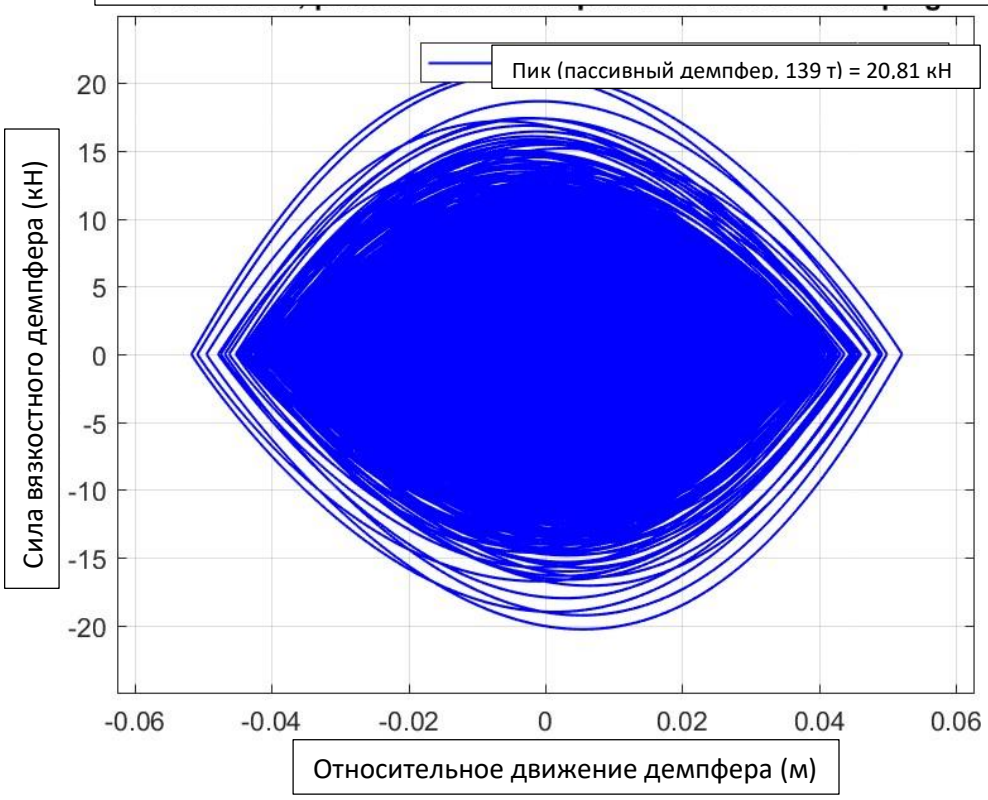

Ось У, пассивный демпфер с линейным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 220 т) = 0,056 м
Относительное движение демпфера (м)
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 139 т

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

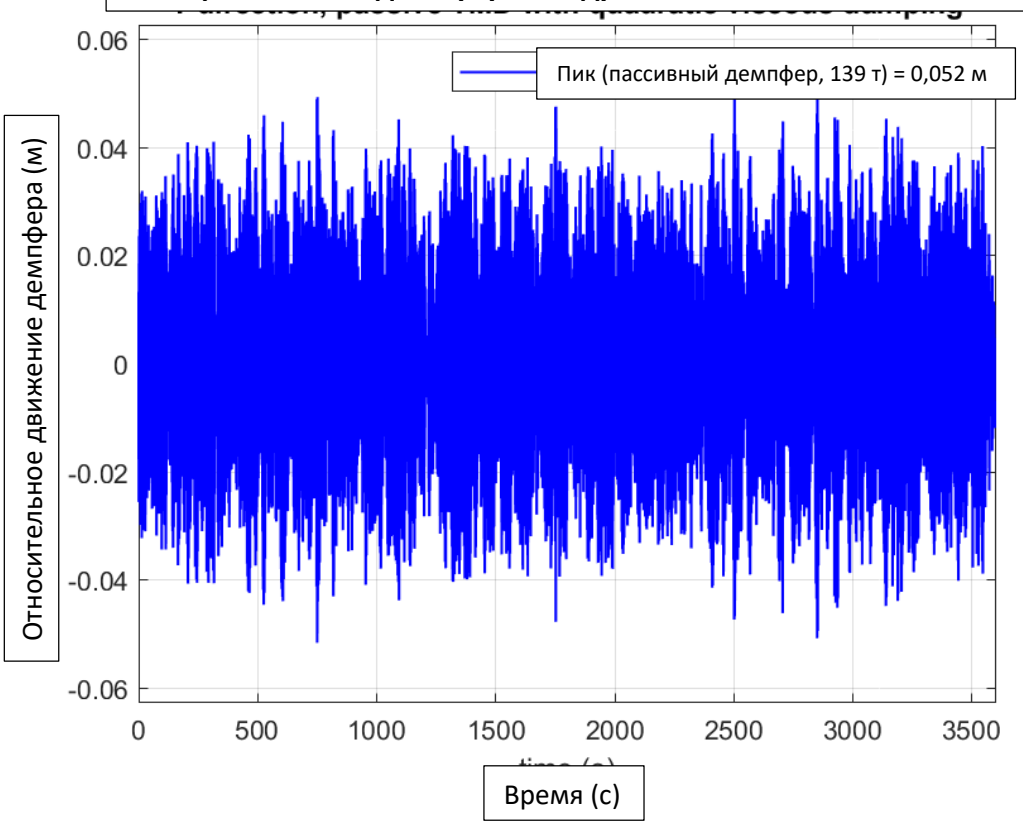


Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

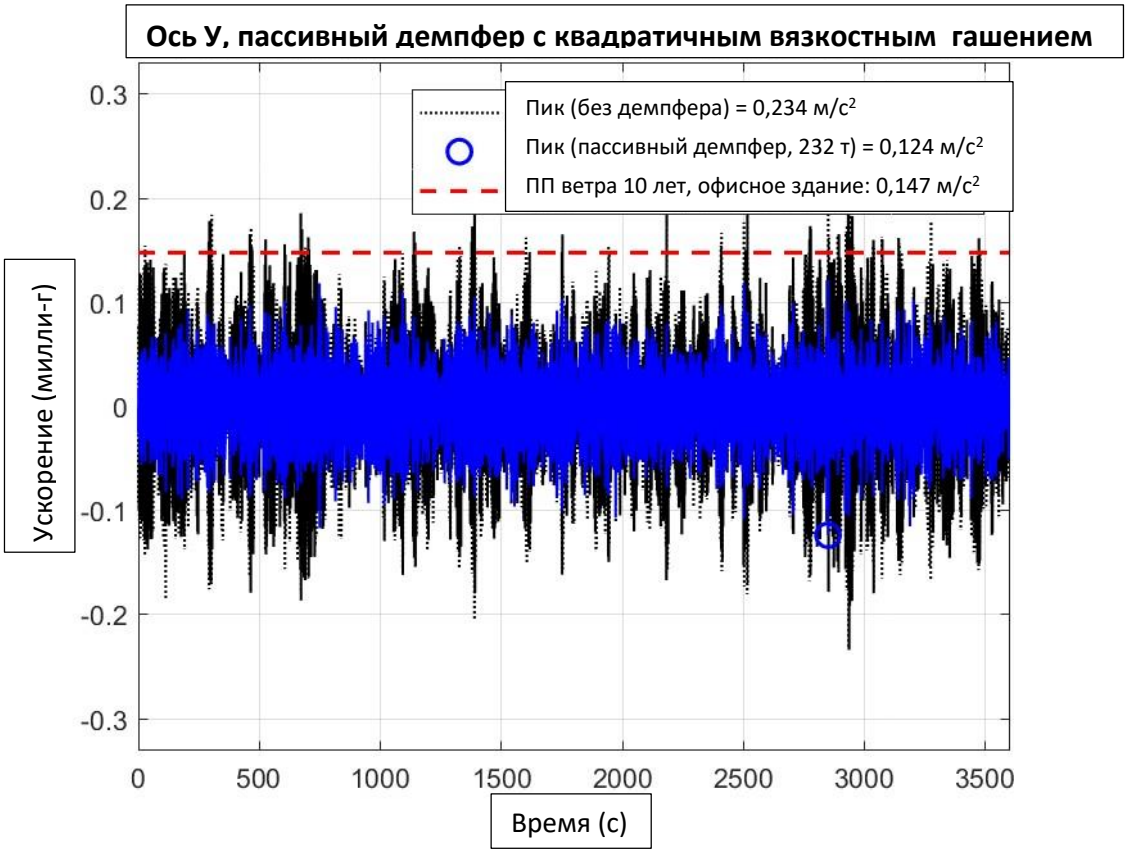


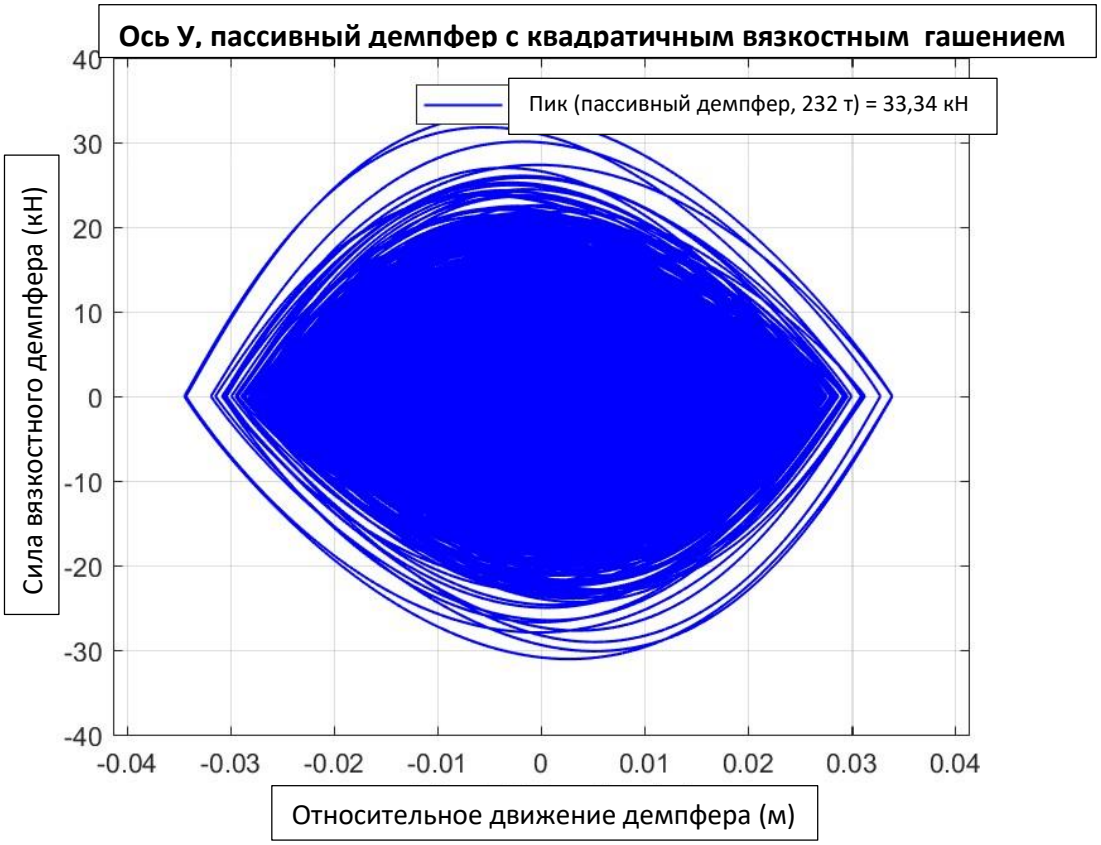
Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

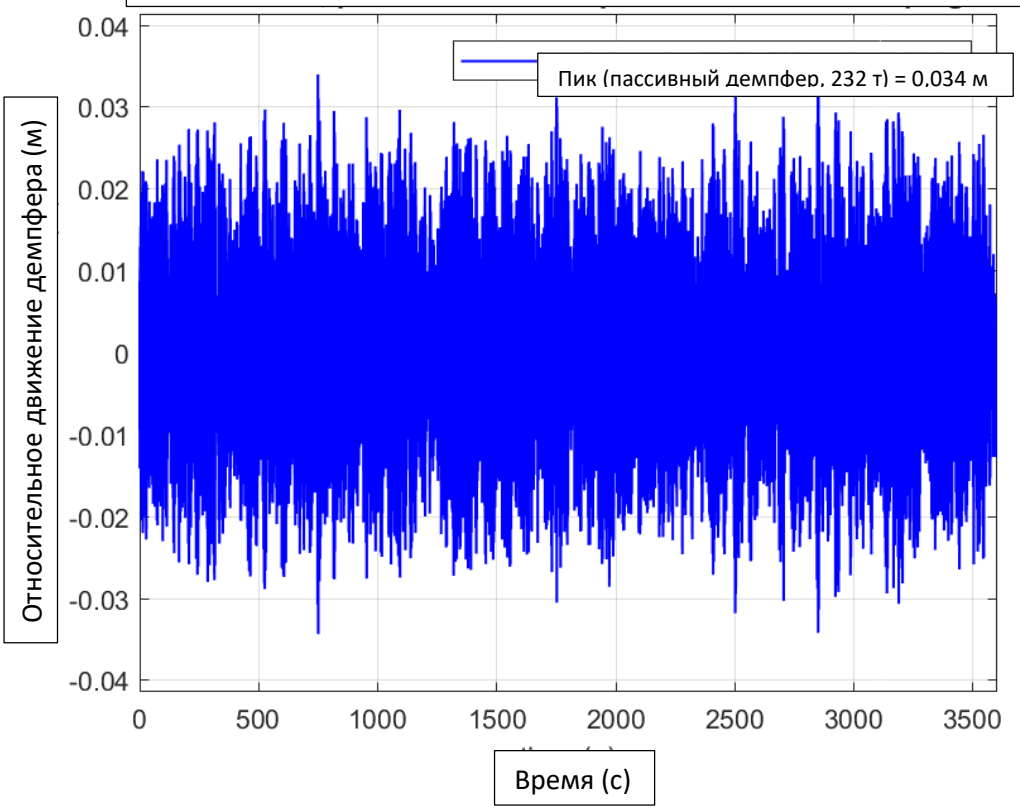


Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 232 т

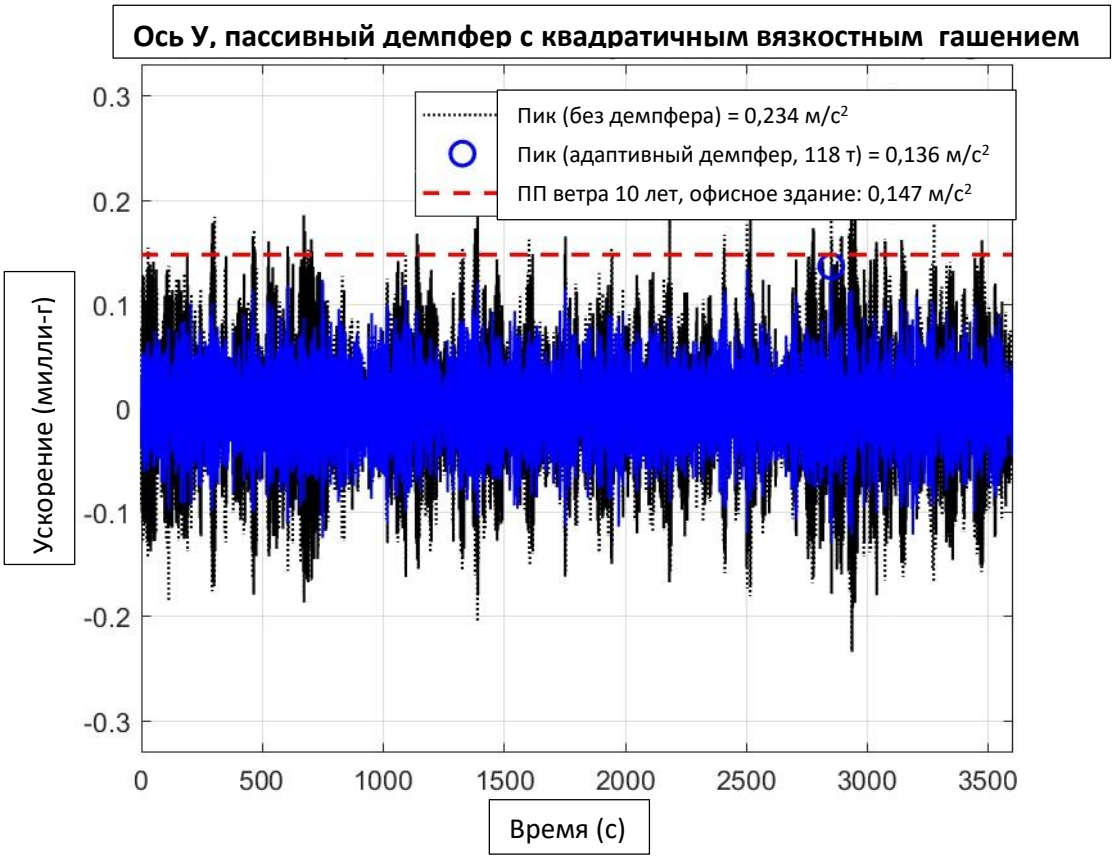


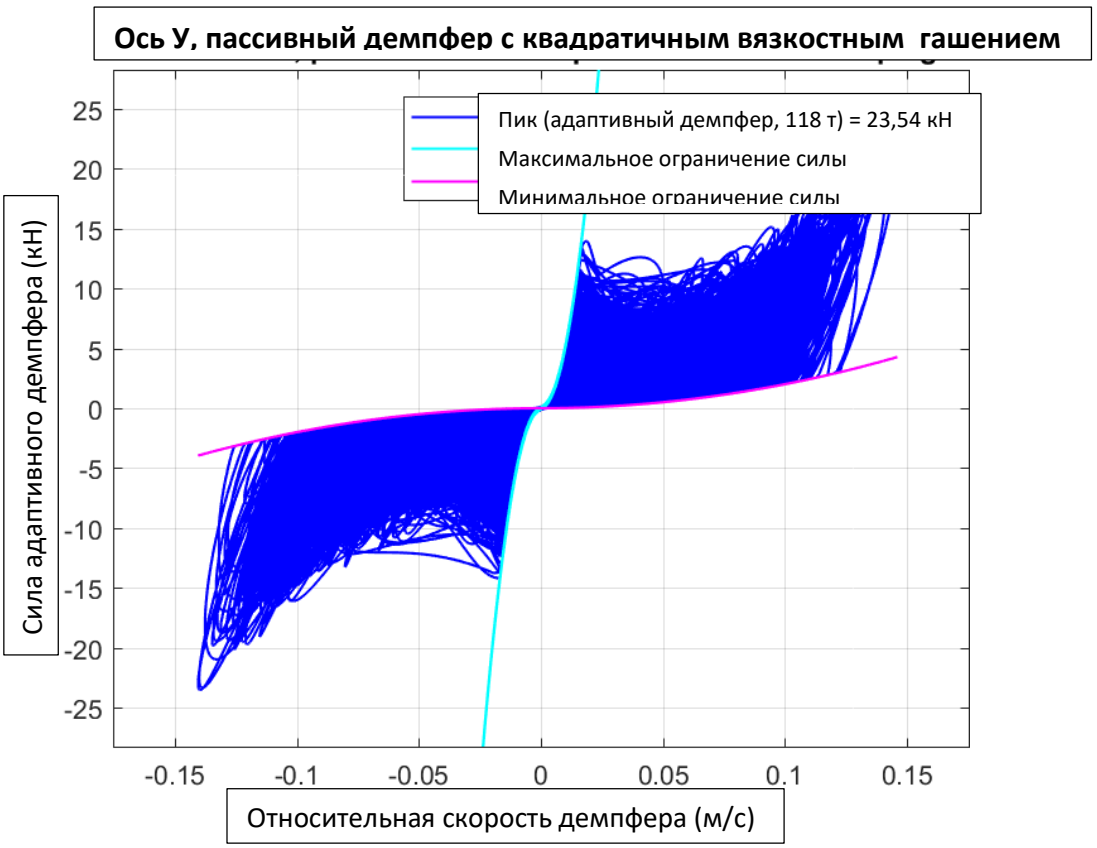


Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

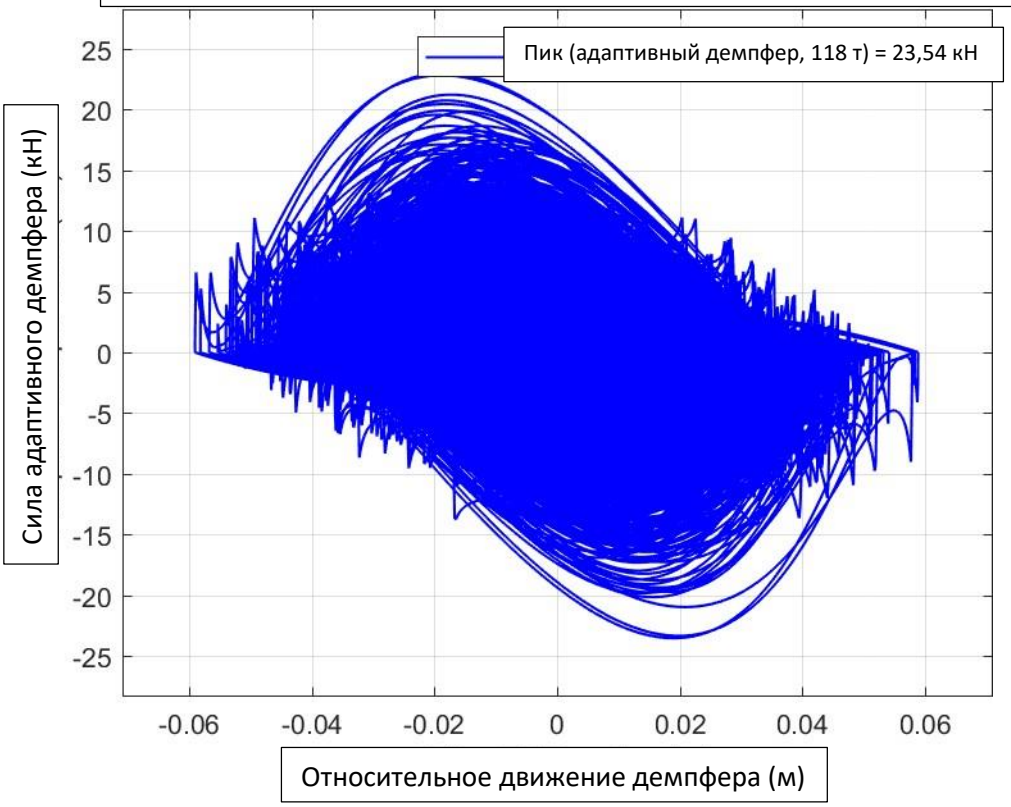


Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 118 т

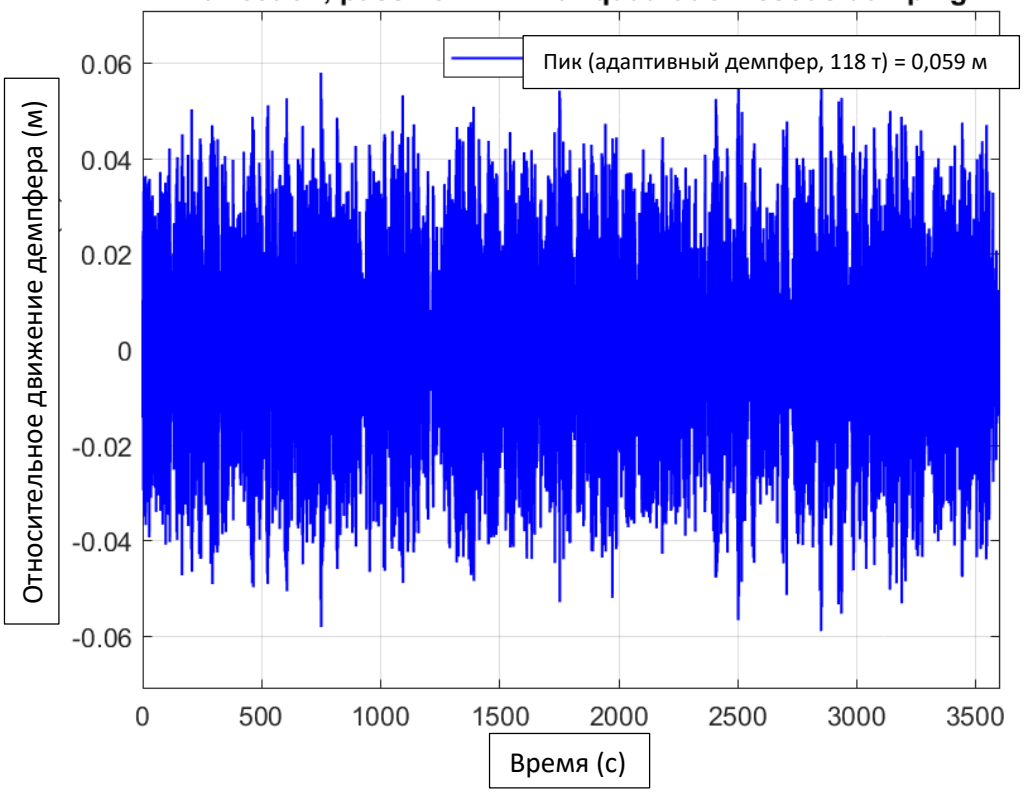




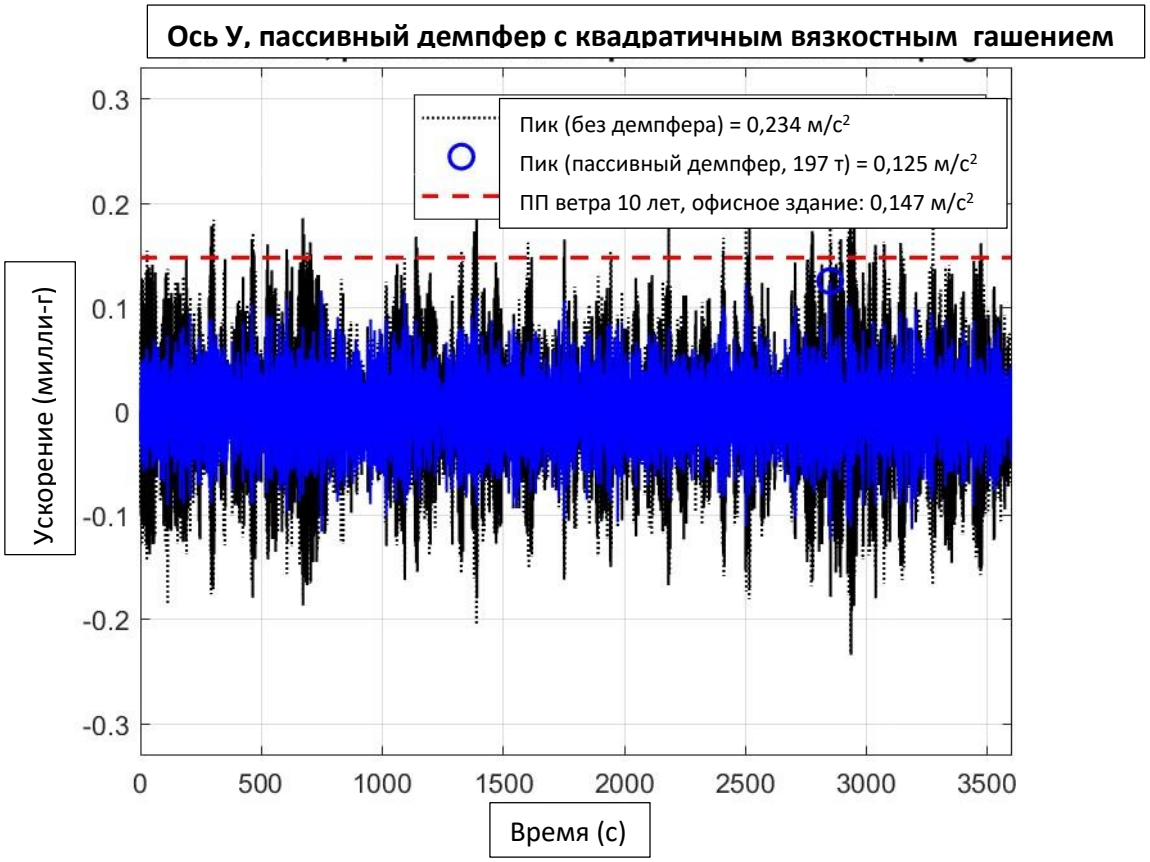
Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

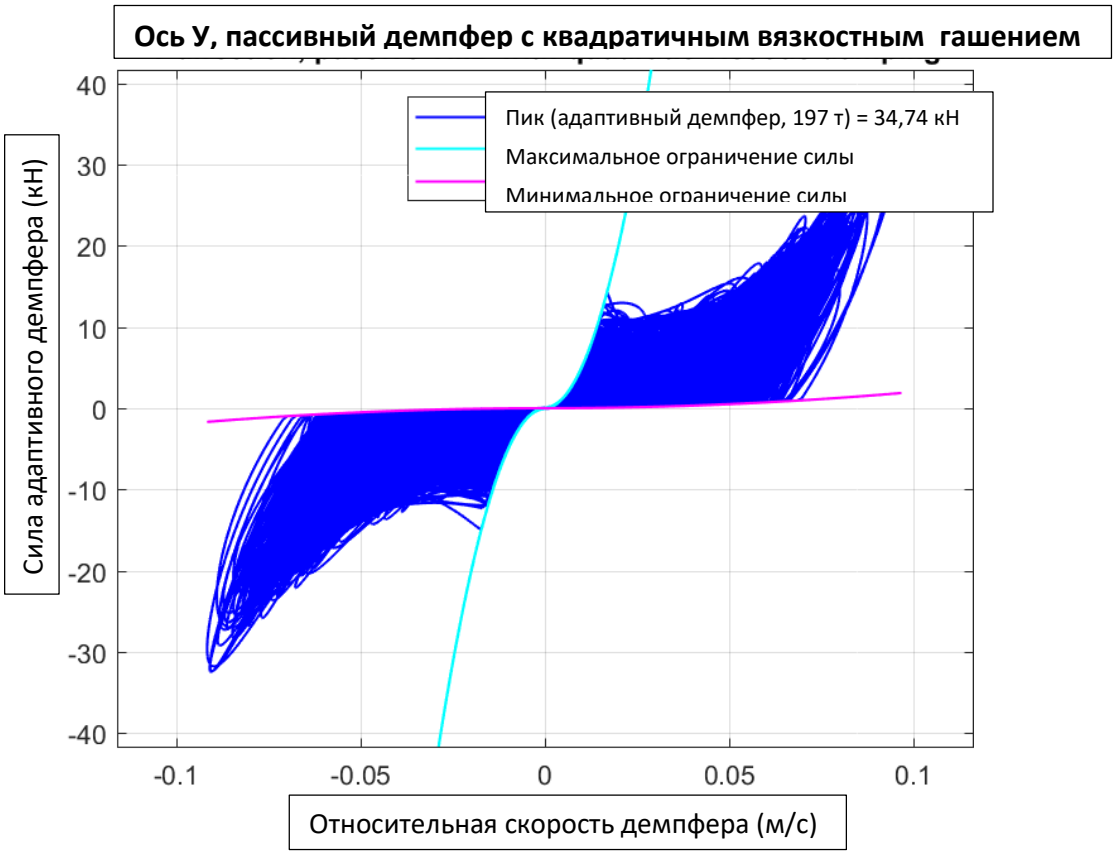


Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

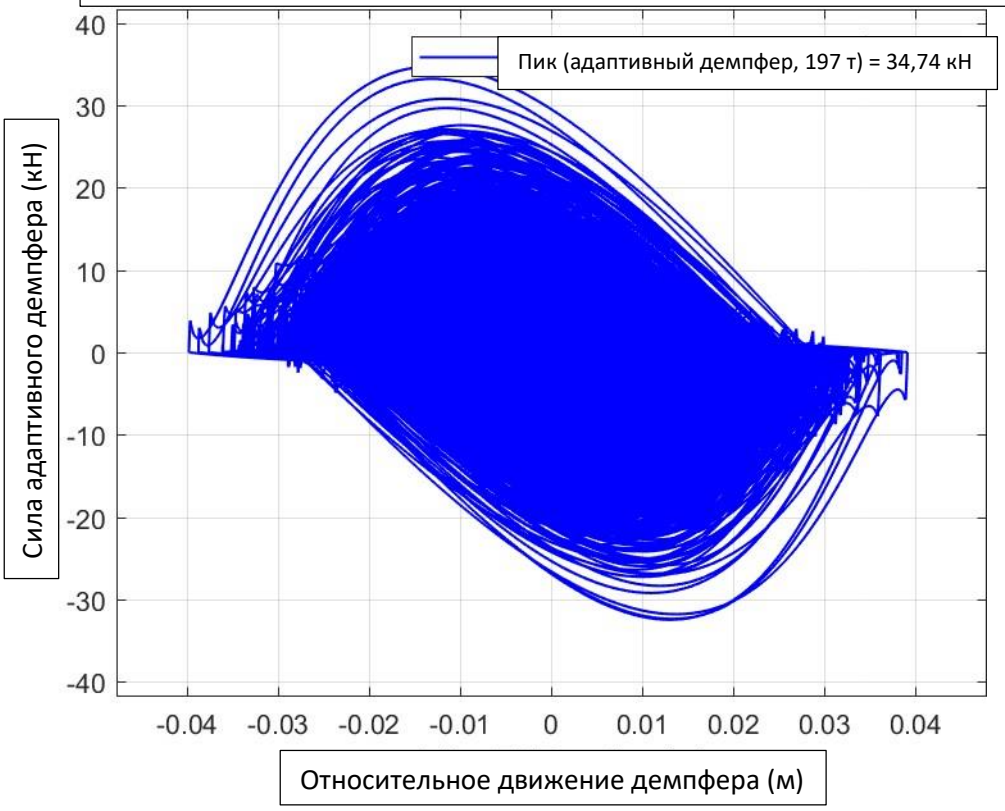


Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 197 т

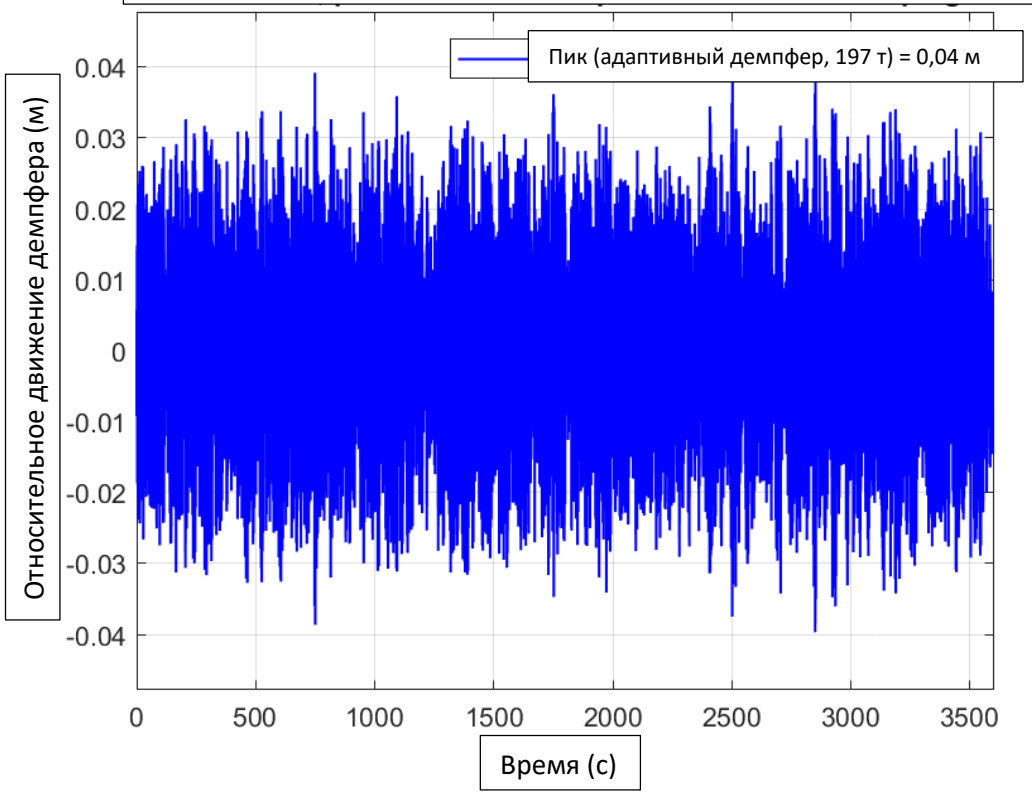




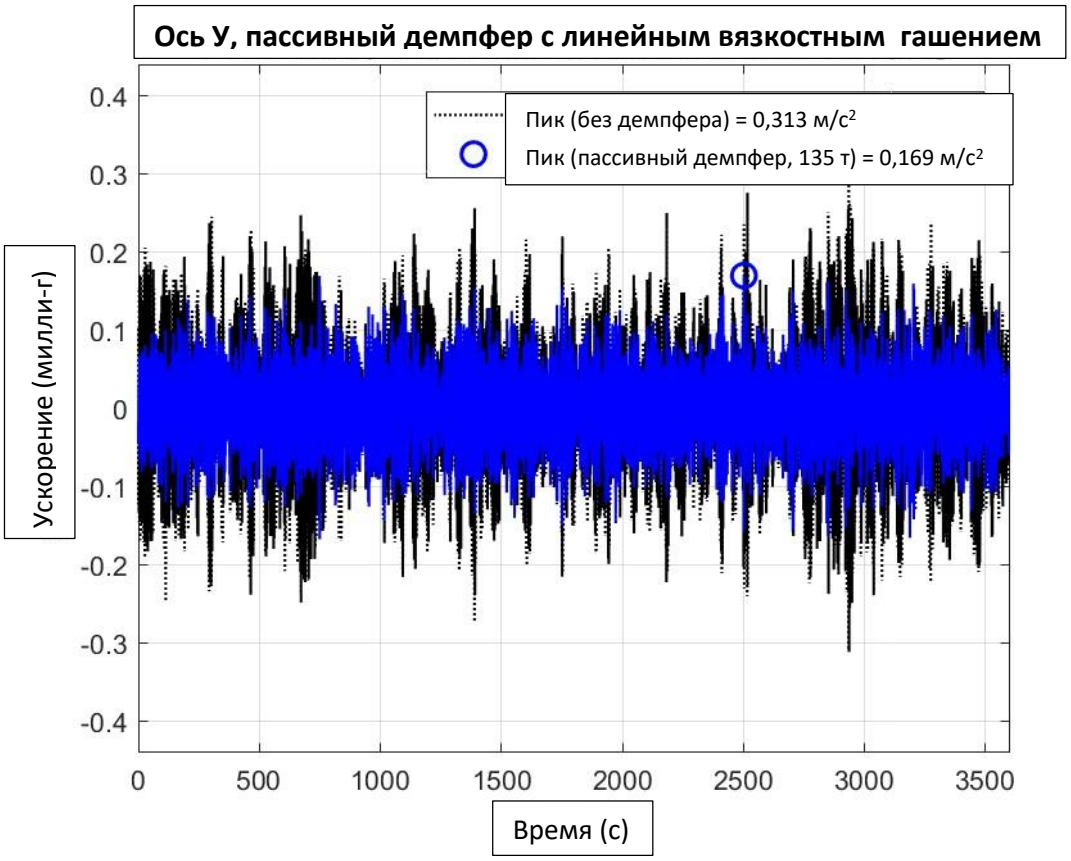
Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением

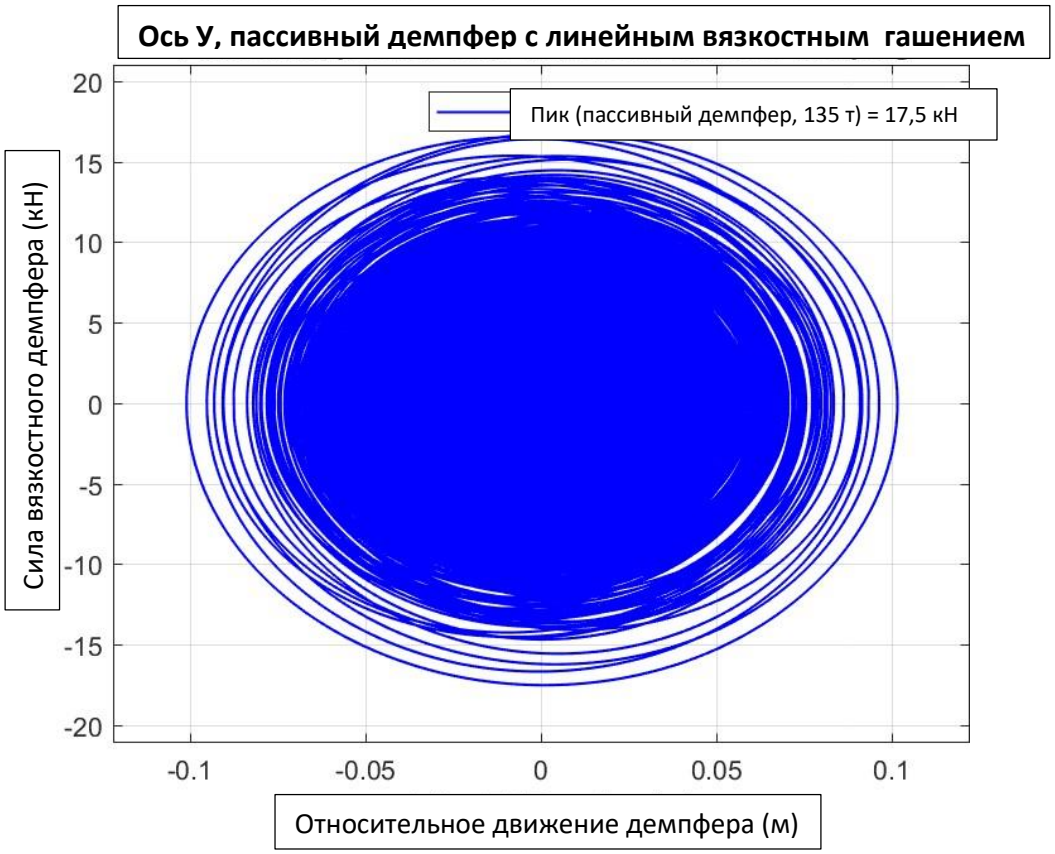


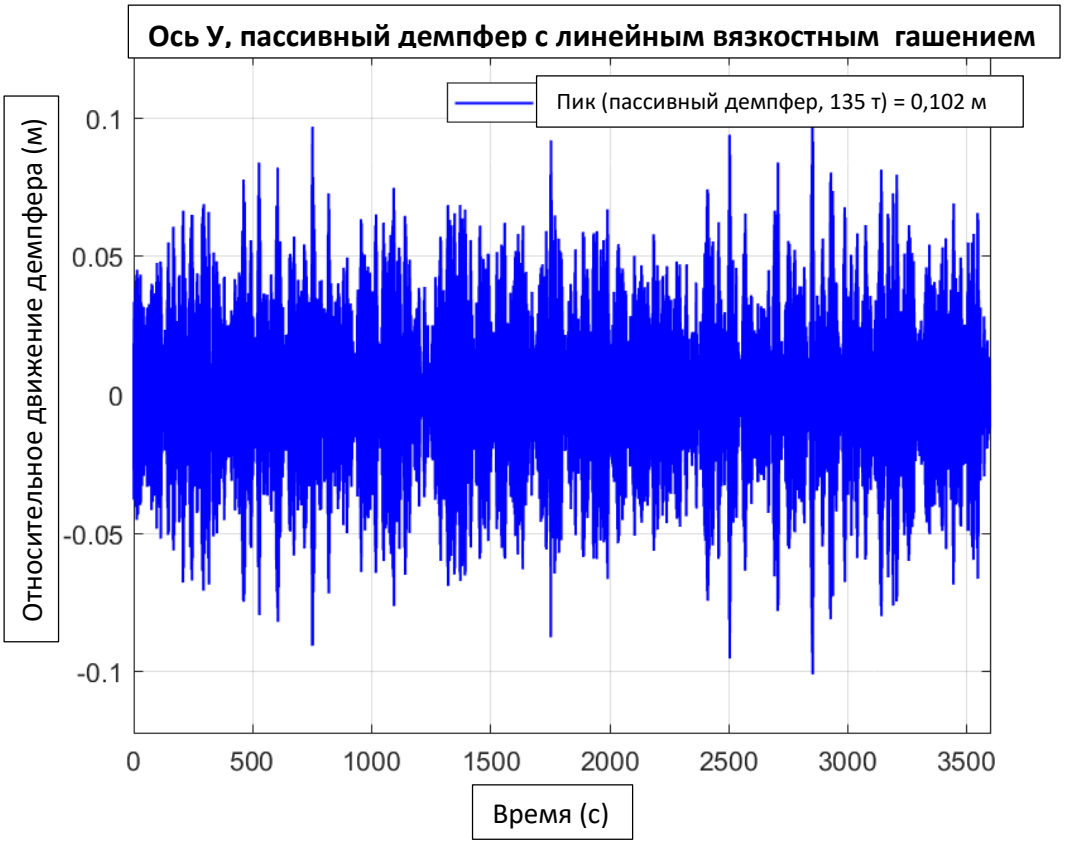
Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением



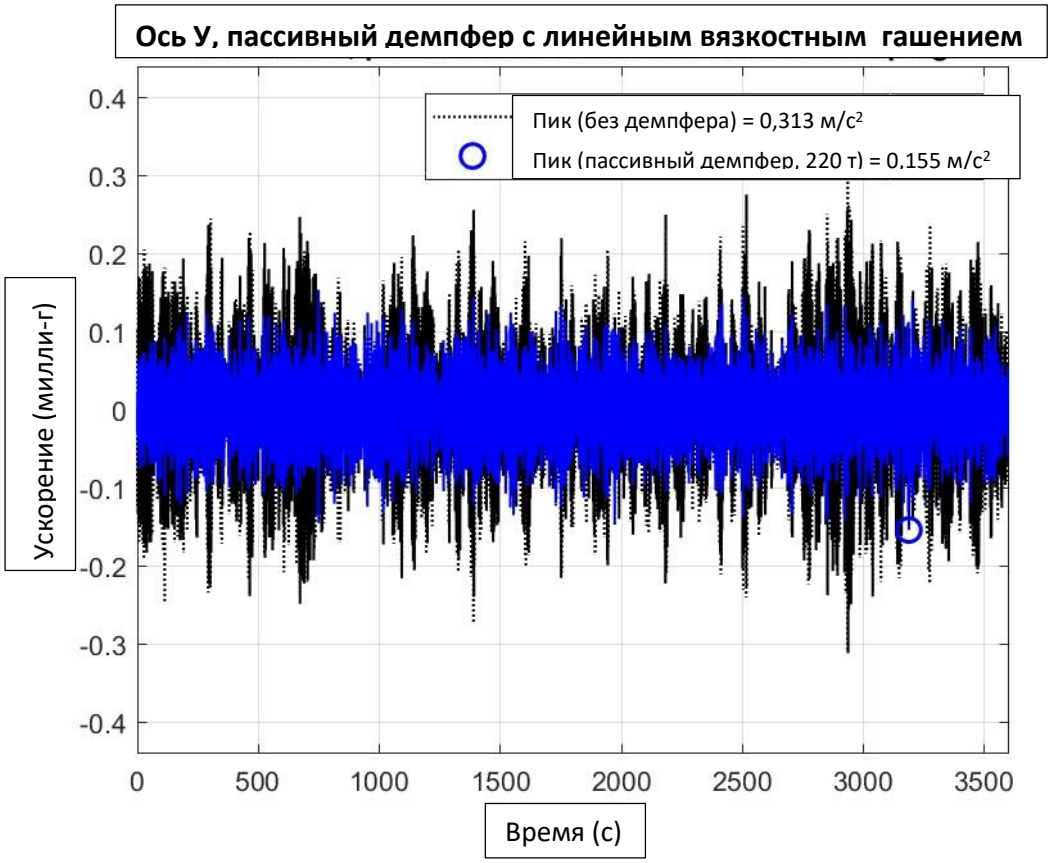
Ось У, период повторяемости ветра 50 лет
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 135 т

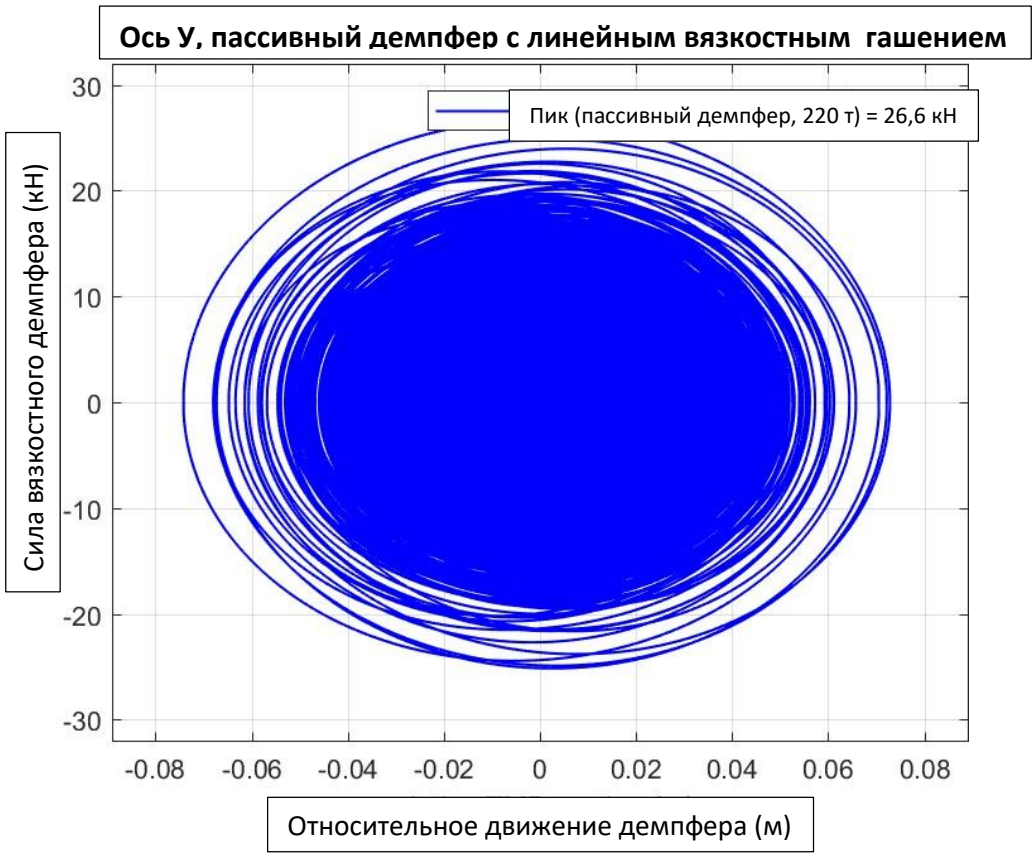


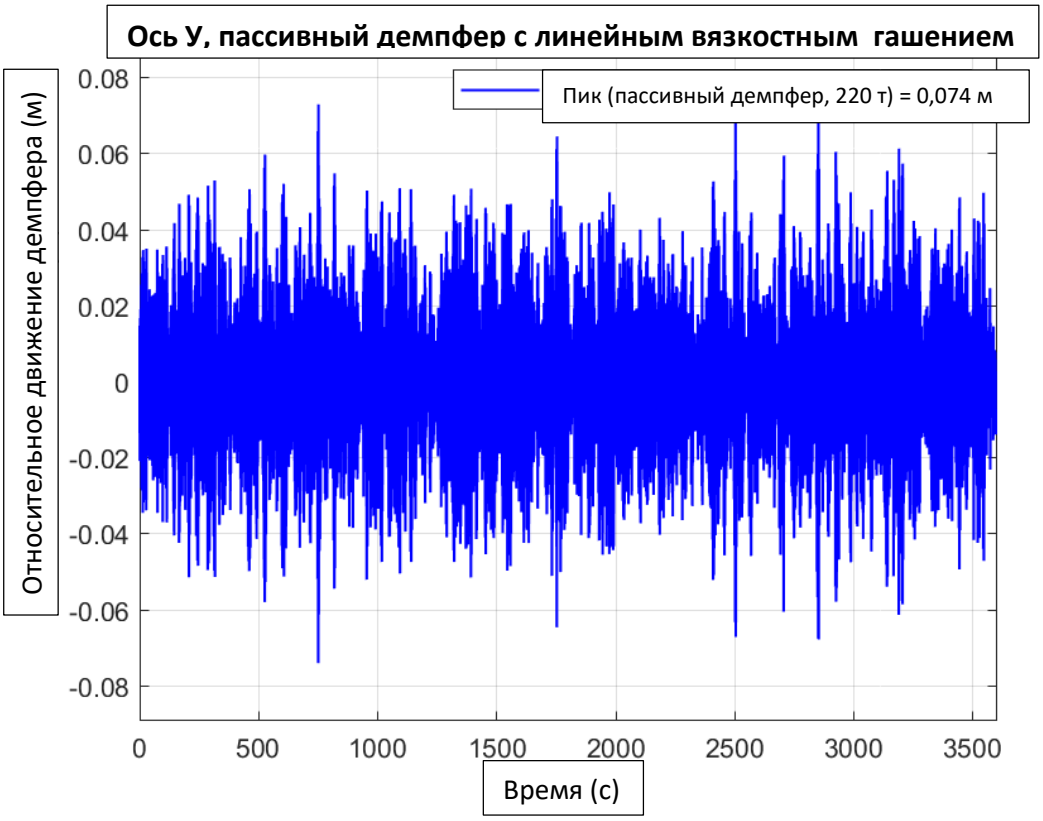



Ось У, пассивный демпфер с линейным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 135 т) = 0,102 м
Относительное движение демпфера (м)
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

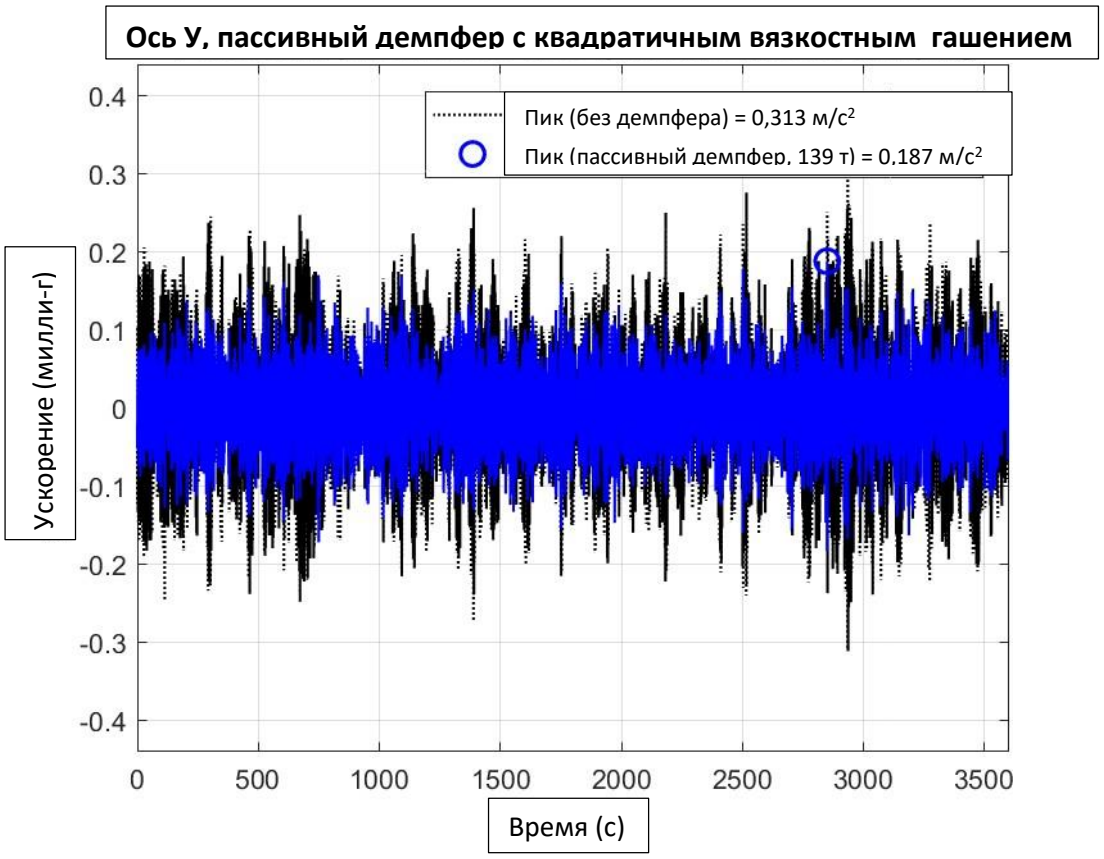
Линейный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 220 т

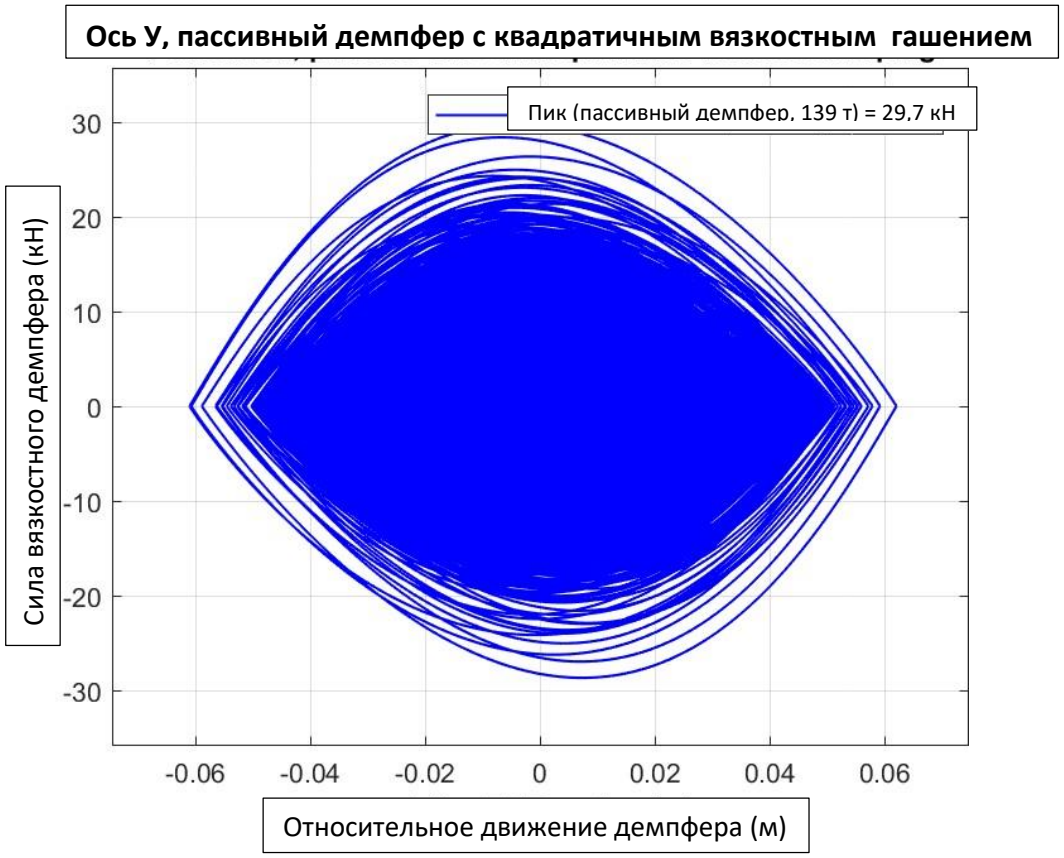


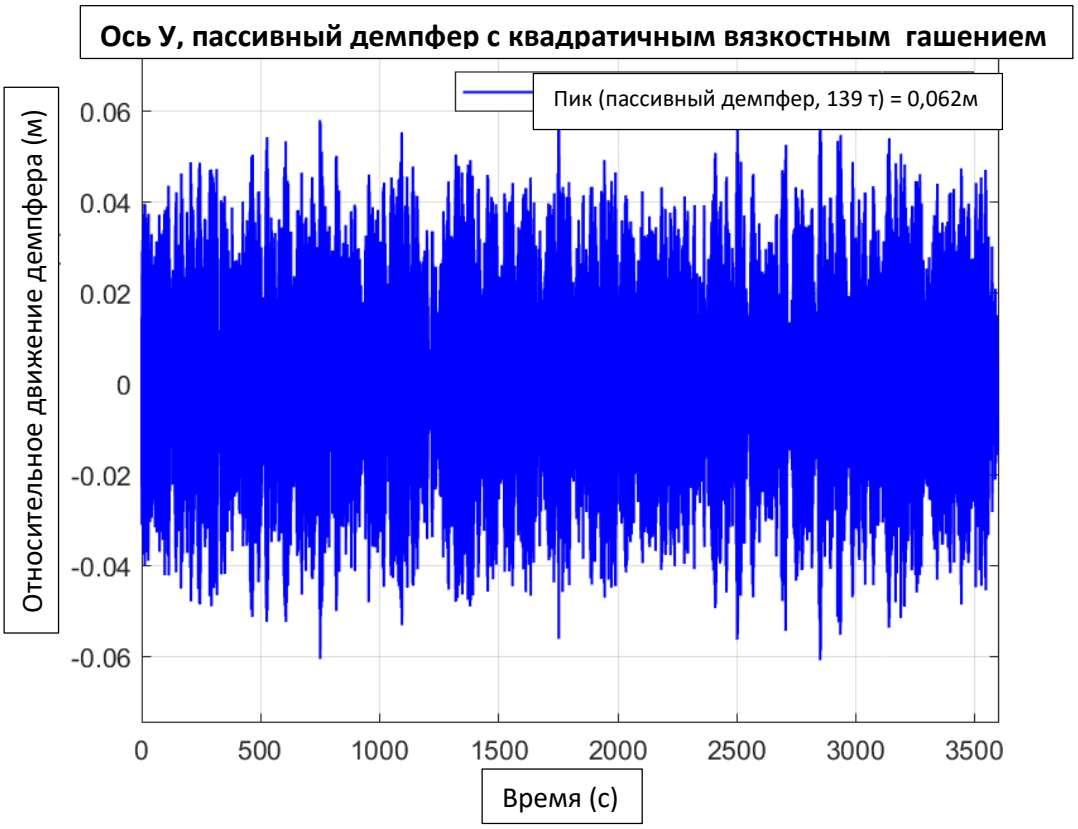



Ось У, пассивный демпфер с линейным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 220 т) = 0,074 м
Относительное движение демпфера (м)
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

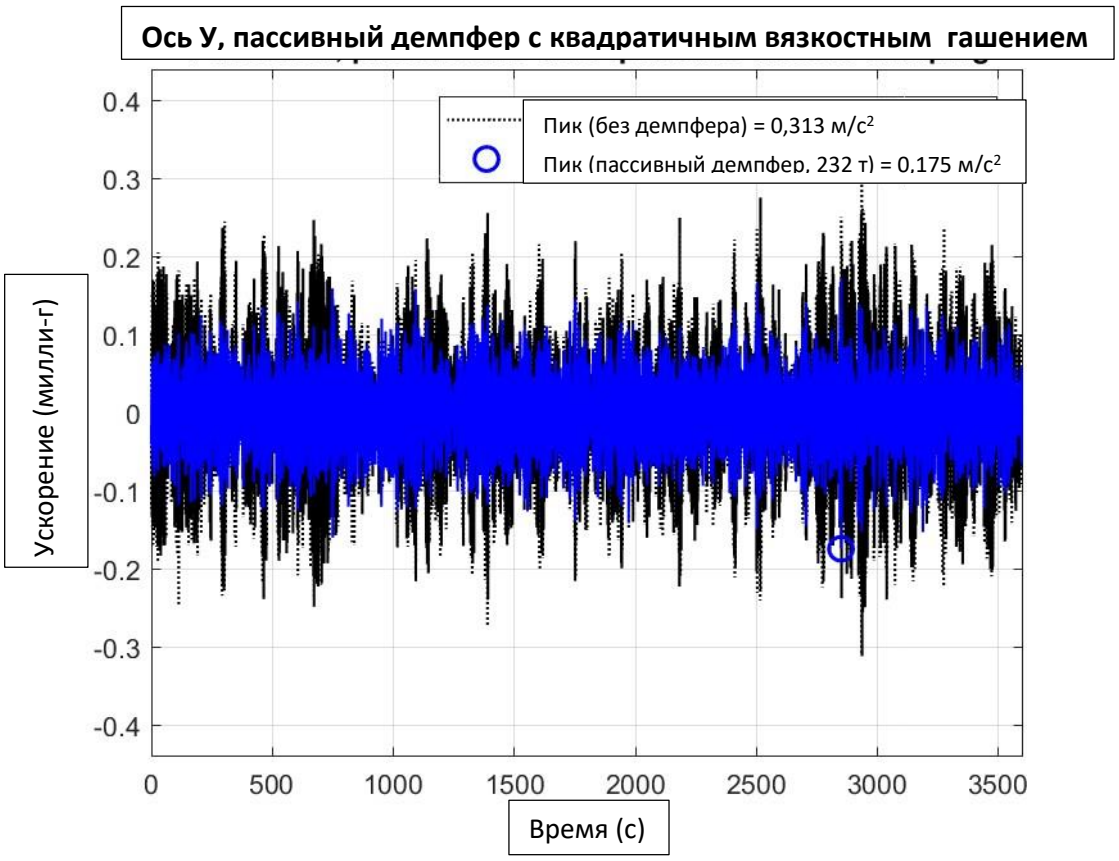
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 139 т

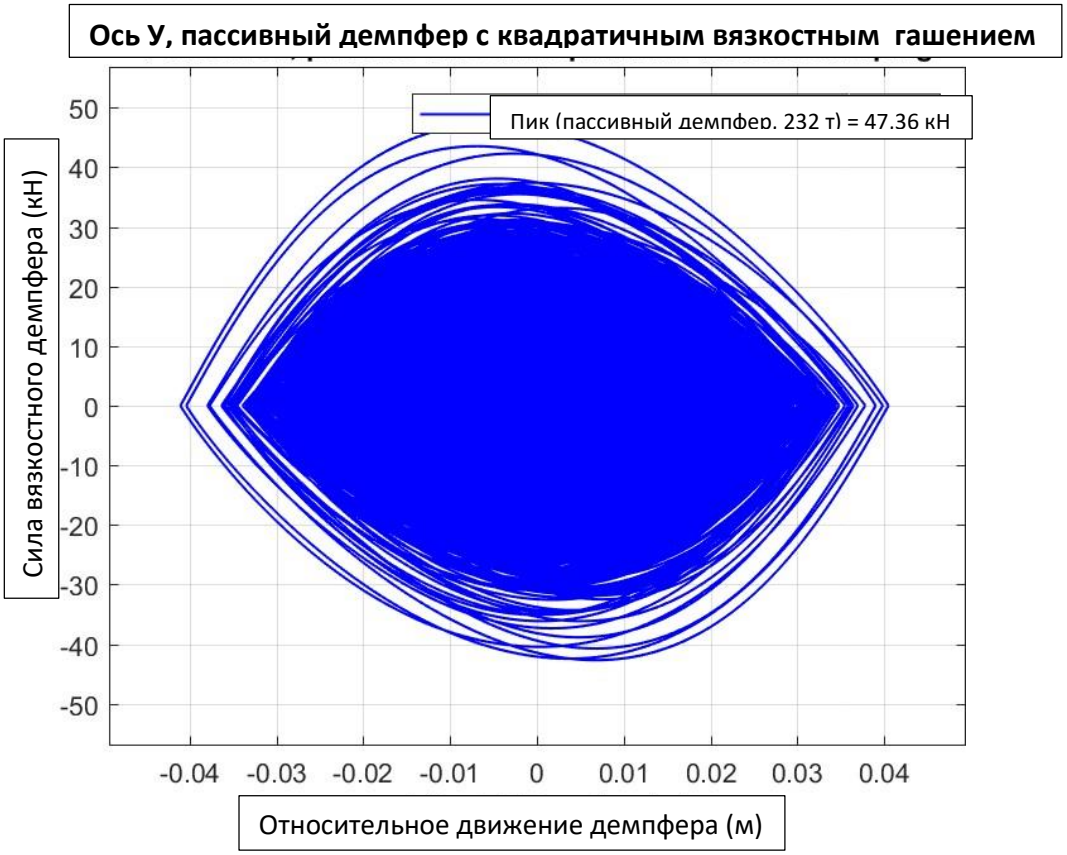


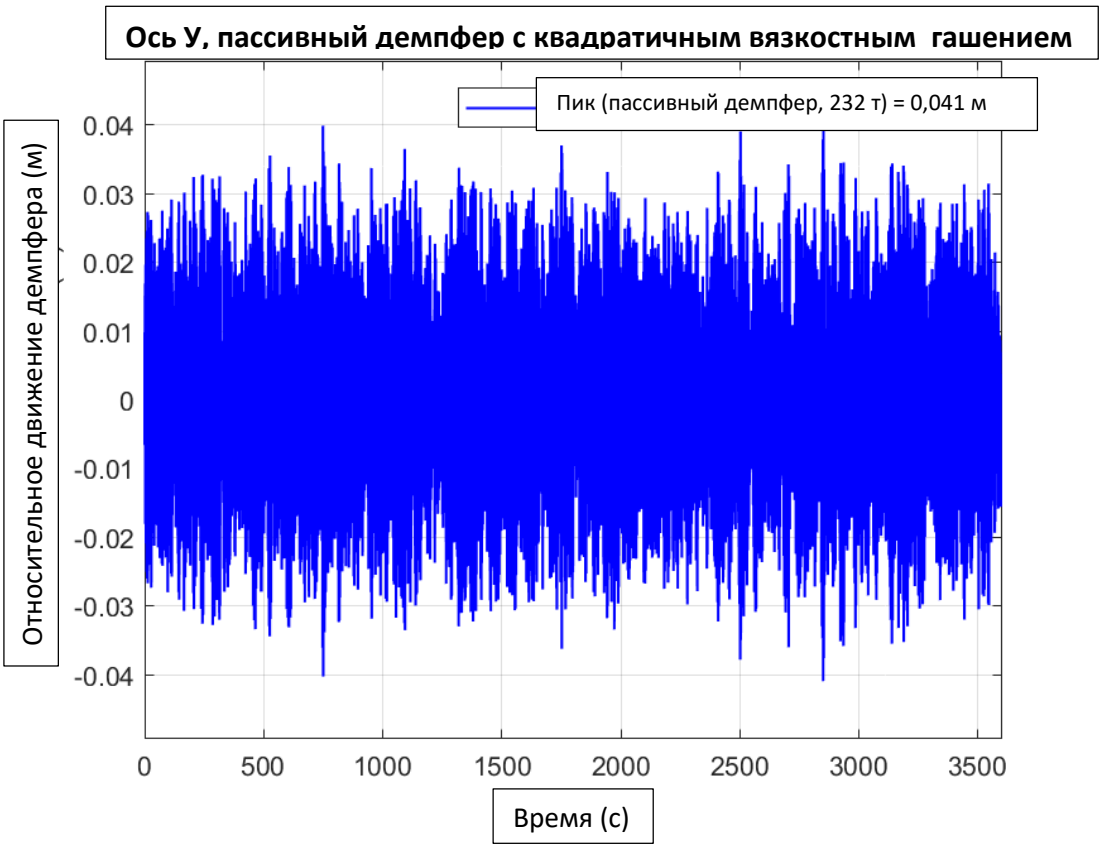



Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 139 т) = 0,062м
Относительное движение демпфера (м)
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

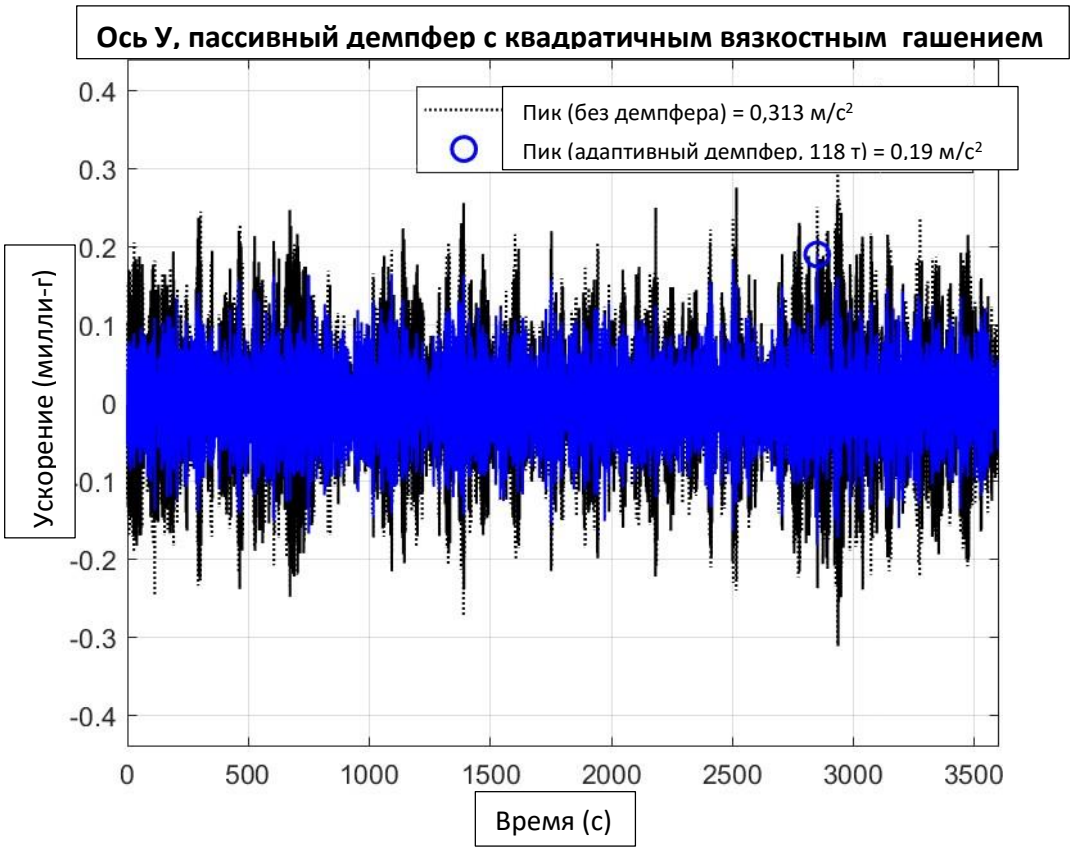
Квадратичный вязкостный настраиваемый динамический гаситель с 232 т

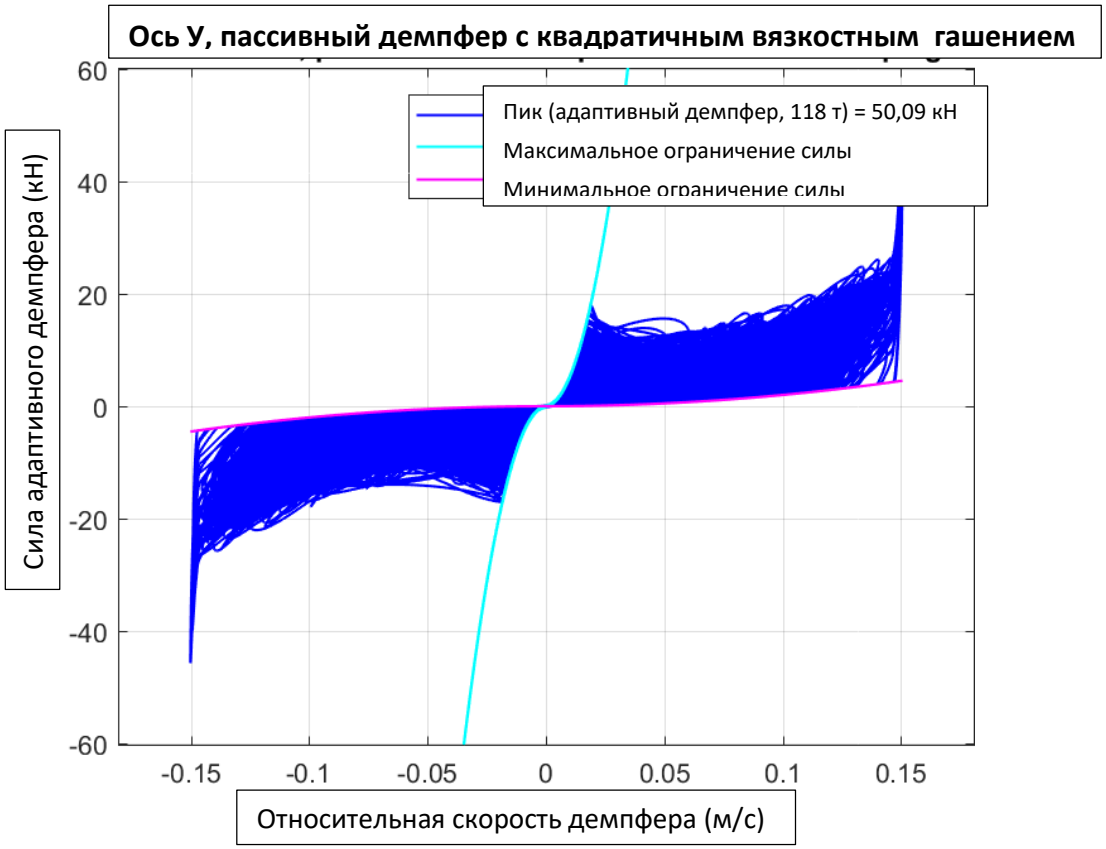


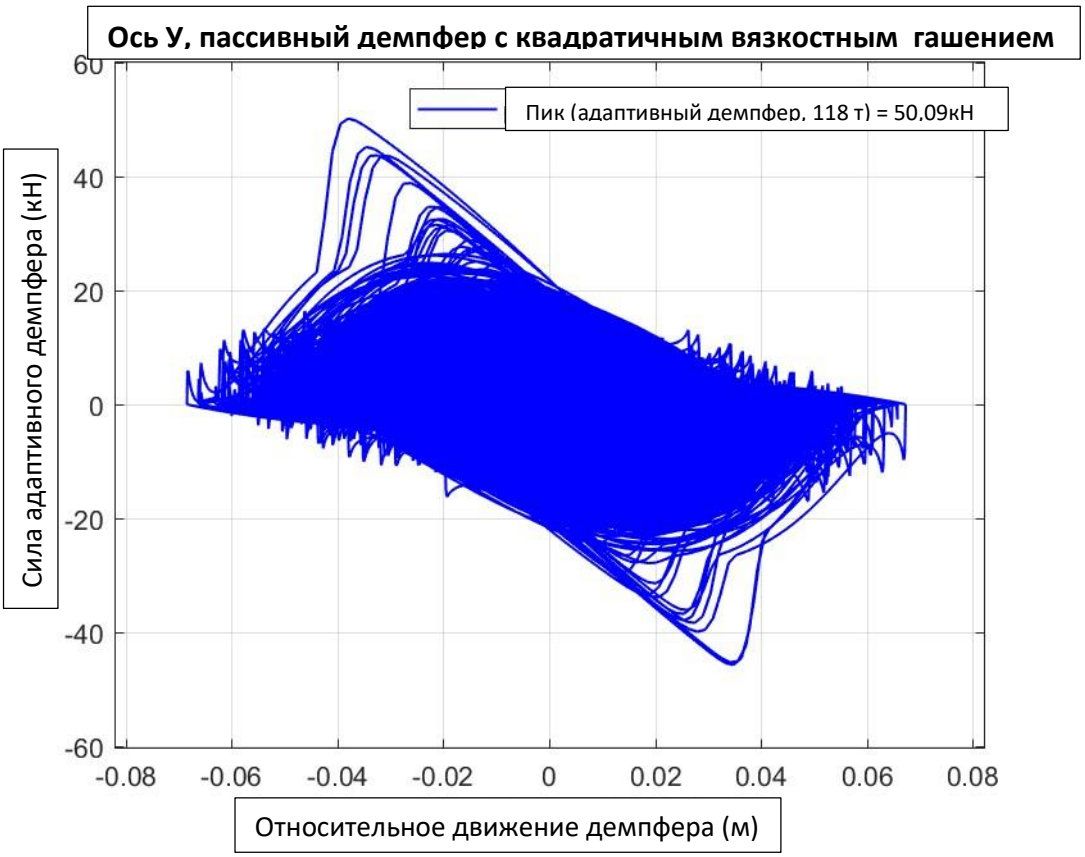


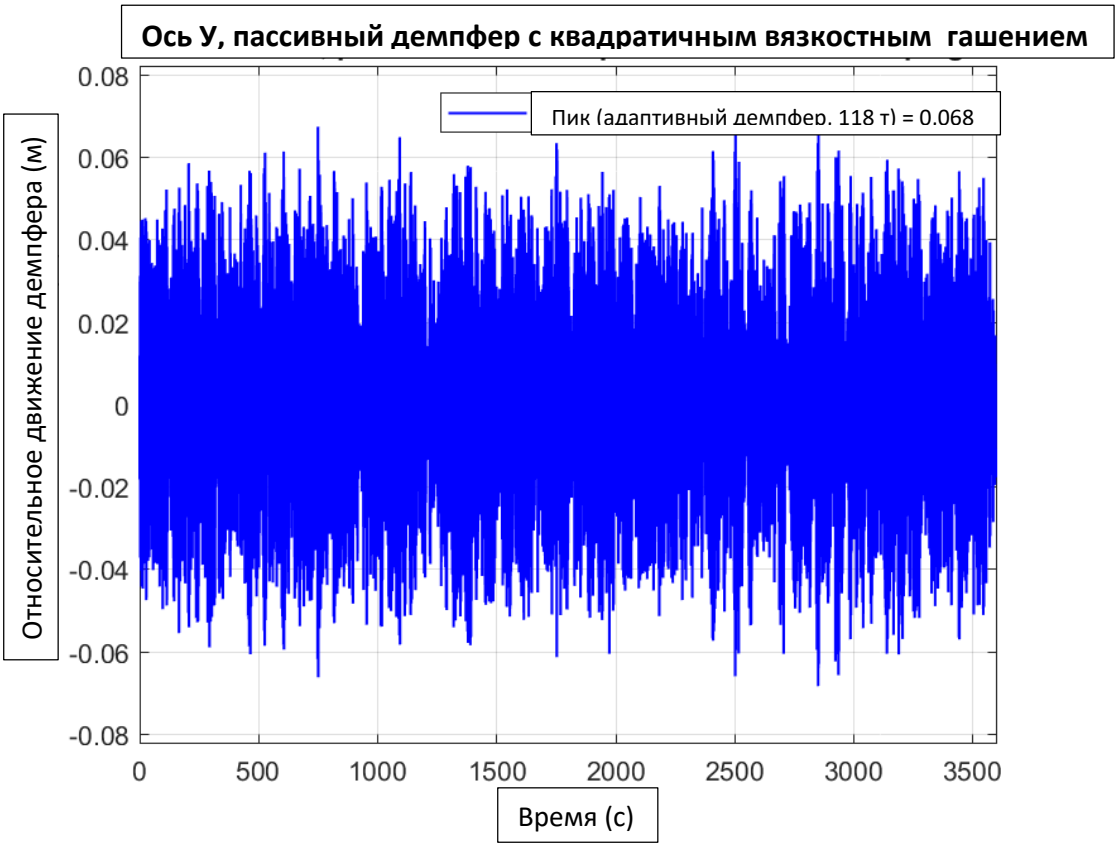

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (пассивный демпфер, 232 т) = 0,041 м
Относительное движение демпфера (м)
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 118 т

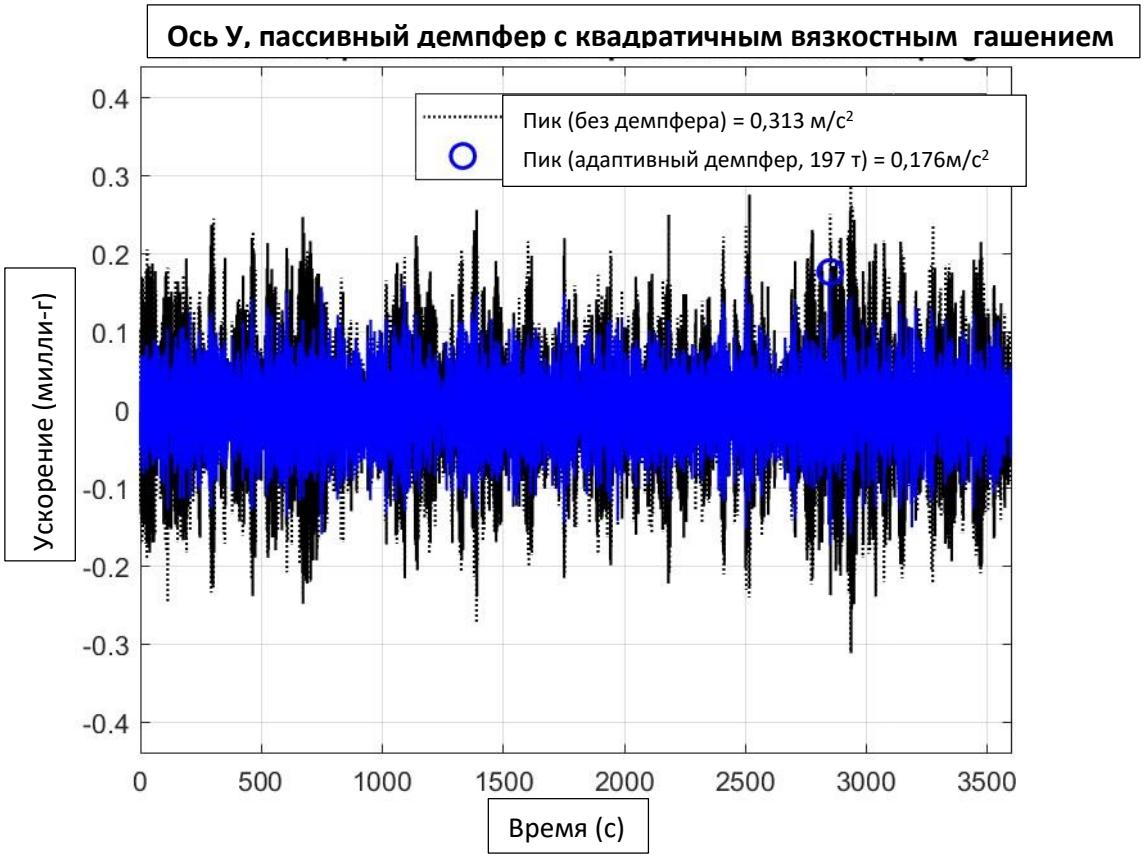


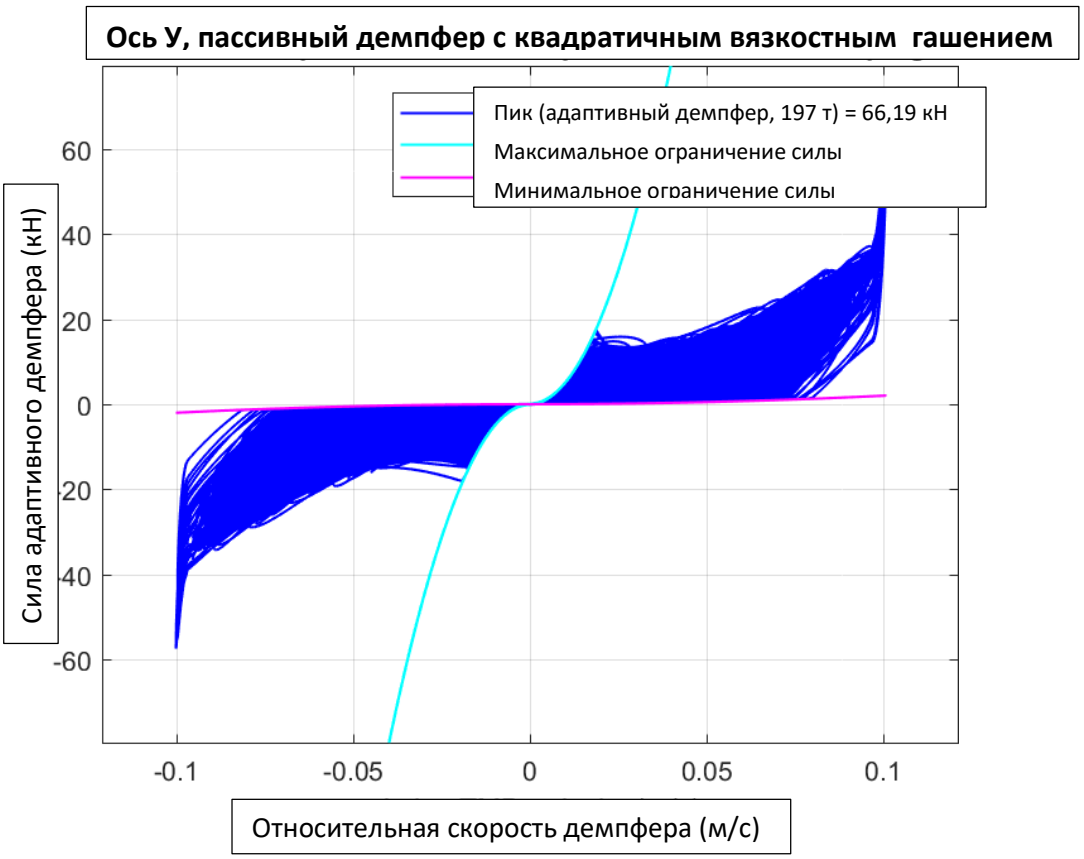


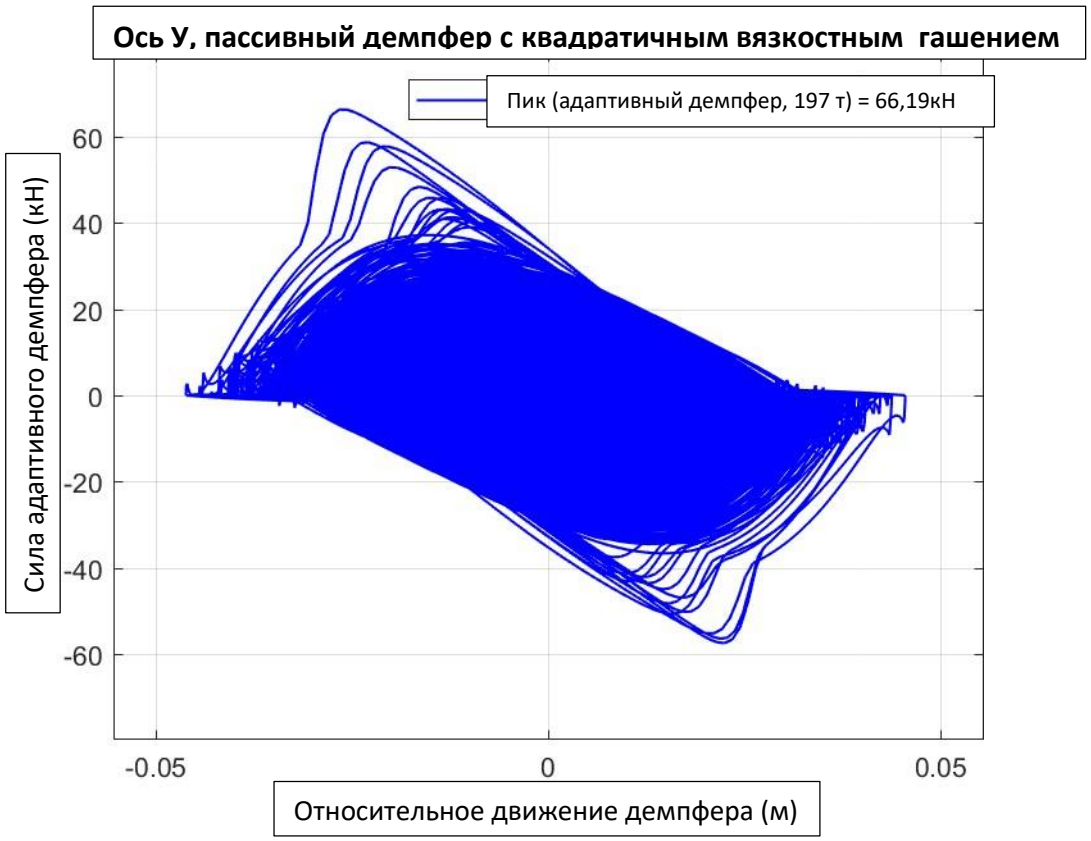

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 118 т) = 50,09кН
Сила адаптивного демпфера (кН)
60
40
20
0
-20
-40
-60
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
Относительное движение демпфера (м)

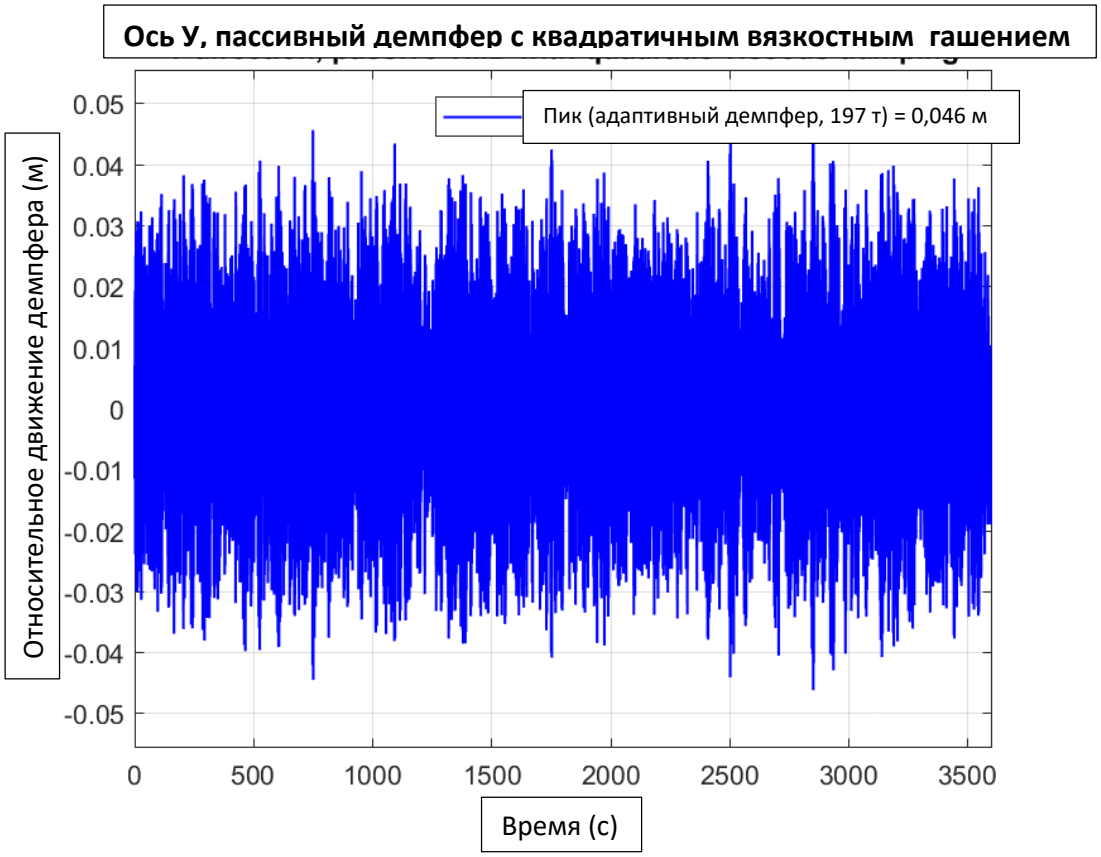

Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 118 т) = 0.068
Относительное движение демпфера (м)
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)

Самонастраивающийся настраиваемый динамический демпфер Maurer с 197 т






Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 197 т) = 66,19кН
Сила адаптивного демпфера (кН)
60
40
20
0
-20
-40
-60
-0.05
0
0.05
Относительное движение демпфера (м)


Ось У, пассивный демпфер с квадратичным вязкостным гашением
Пик (адаптивный демпфер, 197 т) = 0,046 м
Относительное движение демпфера (м)
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.05
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Время (с)