

Христо Маринов

КОНТРОЛ НА ТРЕПТЕНЕТО НА ИНДУСТРИАЛНИ КОМИНИ ПРИ ВЕТРОВО ВЪЗДЕЙСТВИЕ



Магистърска дипломна работа (теза)

2025г.

Съдържание

1.	Въведение.....	5
1.1.	Цел на работата	5
1.2.	Актуалност на темата.....	9
1.3.	Обхват и ограничения.....	10
1.4.	Структура на работата	11
2.	Конструкция и софтуерен анализ	12
2.1.	Основни предпоставки	12
2.1.1.	Материали и конструкции	12
2.1.2.	Изчислителни модели	13
2.2.	Теоретична основа	14
3.	Изчисления по Еврокод	18
3.1.	Входни данни.....	18
3.2.	Базови стойности (Eurocode 4.2.).....	18
3.3.	Осреднен вятър (Eurocode 4.3.)	18
3.4.	Турбулентност на вятъра (Eurocode 4.4.)	19
3.5.	Пиково налягане на скоростта (Eurocode 4.5.)	19
3.6.	Определяне на коефициент c_{sCd} по процедура 1.....	20
3.6.1.	Турбулентност на вятъра (Eurocode B.1.)	20
3.6.2.	Конструктивен коефициент.....	20
3.6.3.	Кръгови цилиндри - коефициент за сила (Eurocode 7.9.) 21	
3.7.	Вихрово възбуждане и аероеластична неустойчивост	22
3.7.1.	Вихрово възбуждане (Eurocode E.1.).....	22
4.	Методи за намаляване на вибрациите.....	27
4.1.	Масов виброгасител.....	27
4.1.1.	Принцип на работа.....	27
4.1.2.	Оразмеряване.....	28
4.1.3.	Примери от практика.....	31
4.2.	Флуиден виброгасител	33
4.2.1.	Принцип на работа.....	33
4.2.2.	Оразмеряване и настройка	34

4.2.3.	Примери от практика.....	35
4.3.	Аеродинамични модификатори	36
4.3.1.	Спирали и други форми	36
4.3.2.	Принцип на работа.....	38
4.3.3.	Ефективност на аеродинамичните модификатори	38
5.	Анализ на съществуващата конструкция	40
5.1.	Геометричен модел на коминната тръба	40
5.2.	Динамични характеристики	42
5.2.1.	Определяне на еквивалентна маса	42
5.2.2.	Определяне на основната честота.	43
5.2.3.	Анализ на вибрационното поведение.....	45
6.	Оразмеряване и оптимизация на TMD и TLD	50
6.1.	Масов виброгасител (Connor, 2002).....	50
6.1.1.	Изчисления за оразмеряване на масовия виброгасител .	50
6.1.2.	Числено моделиране в RFEM	51
6.1.3.	Аналитично решение.....	58
6.1.4.	Анализ на резултатите	63
6.2.	Флуиден виброгасител (Sun, 1992)	65
6.2.1.	Изчисления за оразмеряване на флуидния виброгасител	65
6.2.2.	Числено моделиране в RFEM	67
6.2.3.	Аналитично решение.....	74
6.2.4.	Анализ на резултатите	80
7.	Числен анализ чрез CFD	82
7.1.	Основи на CFD	82
7.2.	Моделиране на коминната тръба.....	82
7.2.1.	Геометричен модел.	82
7.2.2.	Гранични условия.	83
7.3.	Анализ на резултатите	84
7.3.1.	Сравнение на различни сценарии.....	84
7.3.2.	Анализ на резултатите от CFD-изследване.	88
8.	Сравнителен анализ и препоръки.....	89

8.1.	Сравнение на методите за намаляване на вибрациите	89
9.	Заклучение.....	94
9.1.	Обобщение на основните резултати	94
9.1.1.	Ефективност на различни методи:	94
9.1.2.	Влияние на масата/обема:	94
9.1.3.	Сравнителен анализ:.....	94
9.1.4.	Препоръки за приложение:.....	95
9.1.5.	Dlubal RWIND.....	95
10.	Приложения	96
10.1.	Списък на използваните софтуерни инструменти	96
	Литература	97

1. Въведение

1.1. Цел на работата

Предмет на настоящата дипломна работа е изследването на комин с коминно тяло от стъклопласт (GFRP) и стоманена носеща конструкция, решена като решетъчна кула (Фигура 3), част от производствената инфраструктура на металургичния завод „Аурубис България“ АД, разположен в района на град Пирдоп. Заводът е ключово звено в европейската мрежа за производство и рафиниране на мед, като основната му дейност включва преработка на медни концентрати, производство на анодна и катодна мед, както и на странични продукти като сярна киселина.

Коминът, който е с височина 120 метра, играе съществена роля в отвеждането в атмосферата на технологични газове, отделяни при металургичните процеси, като по този начин осигурява безопасна експлоатация и съответствие с екологичните норми за опазване на атмосферния въздух.

Височината и диаметъра на коминното тяло са съобразени с изискванията, ограничаващи концентрацията на вредни вещества в приземния слой на атмосферата и максималното използване на естествена тяга за извеждането на газовете. Материалът, от който е изградена тръбата (GFRP) е съобразен със състава на отвежданите газове. Носещата конструкция на коминното тяло представлява стоманена решетъчна кула, изпълнена от тръбни сечения. На няколко нива са изпълнени обслужващи площадки от 2Т сечения. Основното стъпване на коминното тяло върху решетъчната кула е на коти +17,700m и +90,200m. В допълнение на тази връзка на седем нива (+17,700m; +24,500m; +32,000m; +55,500; +73,400m; +90,200m и +105,000m) има подпирания във хоризонтално направление за предаване на хоризонтални товари от тръбата към решетката на кулата. Описаните връзките също са изпълнени от 2Т профили.

След въвеждане в експлоатация на комина през 2015 г. се наблюдават значителни трептения при ветрово въздействие, при скорости на вятъра по-ниски от проектно зададените. Това в дългосрочен план би довело до сериозни производствени проблеми и съответно материални загуби.

13-12-2016 07:24:43



Фигура 2: Общ изглед на вертикално отклонение на комина

Основната цел на тази дипломна работа е да се изследват и оценят ефективните методи за намаляване на деформирането, причинени от вихрово възбуждане в следствие на ветрово натоварване. Стоманената решетъчна конструкция държи и стабилизира тръбата, но въпреки това, коминът показва значителни деформации при ветрово въздействие.

Конкретните задачи, които ще бъдат разгледани включват:

- **Анализ на съществуващата конструкция:**

Изследване на динамичните характеристики на съществуващата конструкция . Това включва определяне на основната честота на конструкцията и анализ на нейното поведение.

- **Изследване на потенциални решения:**

Разглеждане и оценяване на различните методи за намаляване на деформациите, включително Tuned Mass Damper (TMD), Tuned Liquid Damper (TLD) и аеродинамични модификации като спирала около коминната тръба.

- **Оразмеряване и оптимизация на TMD и TLD:**

Избор и оптимизиране на параметрите на TMD и TLD, за да се постигне максимална ефективност за намаляване на вибрациите.

- **Числен анализ чрез CFD:**

Използване на Computational Fluid Dynamics (CFD), за да се моделира поведението на флуида при различни конструктивни положения. Чрез CFD симулациите ще се оцени ефективността на предложените решения.

- **Сравнителен анализ и препоръки:**

Провеждане на сравнителен анализ на резултатите от различните методи за намаляване на деформациите и даване на препоръки за прилагане на ефективните решения.



Фигура 3: Общ изглед на комин

1.2. Актуалност на темата

Високите конструкции, като комини, кули и небостъргачи, са неразделна част от съвременната инфраструктура. Тези съоръжения често са изложени на значителни ветрови натоварвания, които могат да предизвикат сериозни деформации. Този ефект може да доведе до сериозни конструктивни натоварвания, умора на материала и дори до повреди, които застрашават безопасната функция на дадена конструкция.

В контекста на тази дипломна работа, 120-метровия комин, представлява типичен пример за високо съоръжение, което изпитва значително деформиране, породено от ветрово въздействие. Изследването на ефективни методи за намаляването на вибрациите е от критично значение за осигуряване на дълготрайната стабилност и безопасност на конструкцията. Разработването на Масов виброгасител (Tuned Mass Damper, TMD), Флуиден виброгасител (Tuned Liquid Damper, TLD) и аеродинамични устройства, може значително да подобри поведението на тези съоръжения при ветрови въздействия. Така, актуалността на темата се корени в необходимостта от намиране на ефективни и надеждни решения за намаляване на трептенето при високи конструкции, които са изложени на ветрови натоварвания.

1.3. Обхват и ограничения

Обхват:

Това изследване се концентрира върху теоретичен анализ и числена оптимизация на методи за намаляване на деформациите при високи конструкции. Основното внимание е насочено към:

- Разработване на изчислителни модели за оценка на динамичното поведение на коминната конструкция
- Теоретично оразмеряване на гасителни системи (TMD/TLD)
- CFD симулации на аеродинамични модификации
- Сравнителен анализ на различни подходи за контрол на деформациите

Ограничения:

- **Теоретичен характер:** Липса на експериментално потвърждение на резултатите
- **Моделни предположения:** Използване на идеализирани модели на конструкцията и натоварванията
- **Специфичност на решенията:** Резултатите са валидни за конкретната разглеждана конструкция
- **Времеви рамки:** Ограничен обхват на изследването поради сроковете на дипломната работа

Въпреки тези ограничения, изследването предоставя основи за разработката на ефективни решения.

1.4. Структура на работата

Дипломната работа е организирана в осем основни глави, които последователно развиват темата и предоставят резултатите от изследването:

1. Въведение

- Представя целта, актуалността, обхвата и структурата на работата.

2. Теоретични основи

- Разглежда основни принципи на динамиката на конструкциите
- Анализ на ефекта „вихрово възбуждане“ и неговото влияние върху високи съоръжения

3. Методи за намаляване на вибрациите

- Представя теоретични основи на TMD, TLD и аеродинамични модификации
- Разглежда принципи на работа и приложимост на различни методи

4. Анализ на съществуваща конструкция

- Описва геометричния модел на коминната тръба
- Представя динамични характеристики и проблемни аспекти

5. Оразмеряване на гасителни системи

- Представя методи за оразмеряване на TMD и TLD
- Включва теоретични изчисления и оптимизационни подходи

6. Числен анализ чрез CFD

- Описва методологията на CFD симулациите
- Представя резултати от моделиране на аеродинамични модификации

7. Сравнителен анализ и препоръки

- Сравнява ефективността на различни методи

8. Заключение

- Обобщава основните резултати и изводи

2. Конструкция и софтуерен анализ

2.1. Основни предпоставки

2.1.1. Материали и конструкции

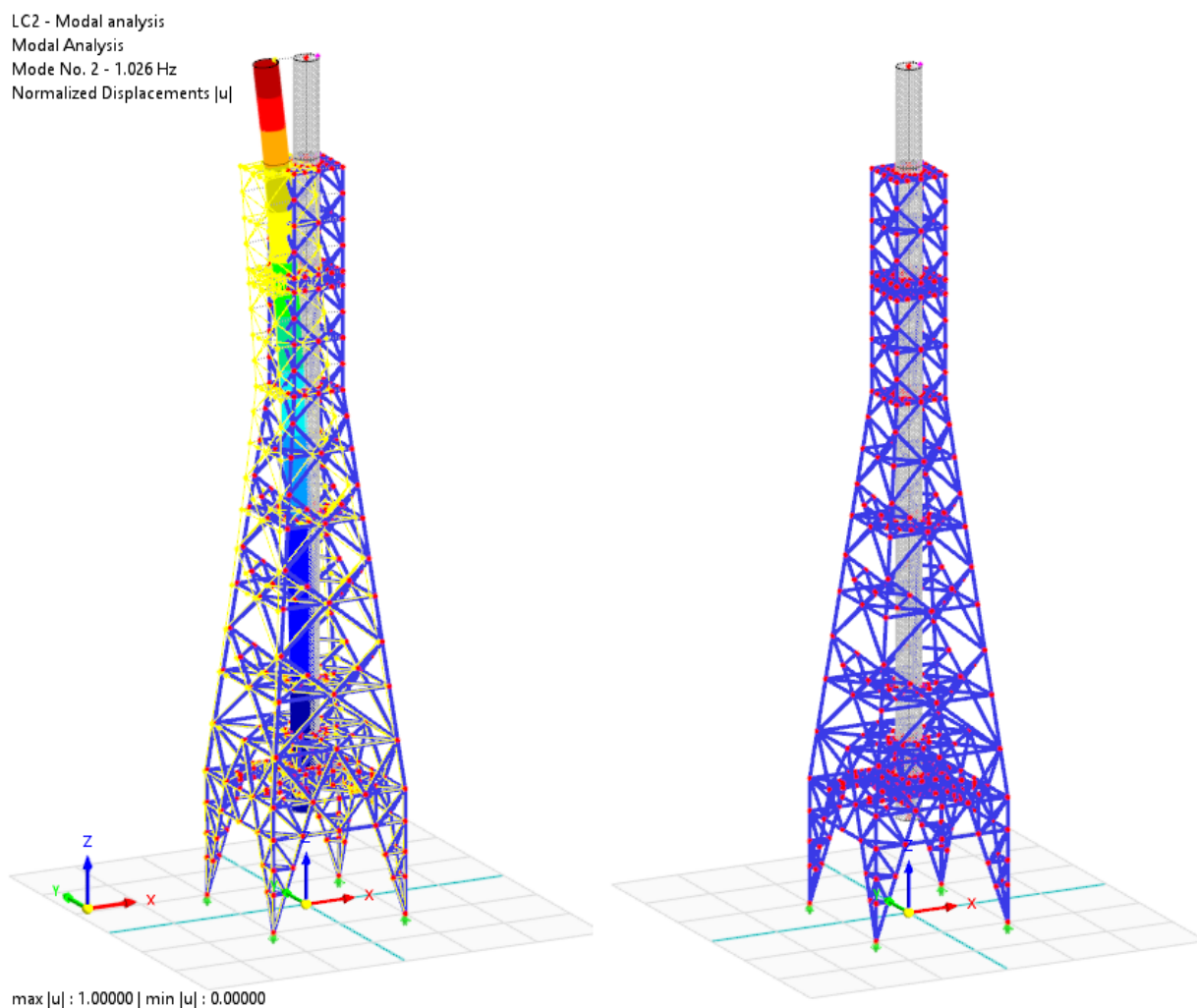
- Конструктивна стомана S235:
 - Модул на еластичност (модул на Young) – $E = 210000 \text{ MPa}$
 - Коефициент на напречни нормални деформации (коефициент на Poisson) – $\nu = 0.3$
 - Обемно тегло – $\rho = 78.50 \text{ kN/m}^3$
- Композитен материал, който се състои от стъклени влакна, дисперсно армираща матрица от полимер на база епоксидна смола (стъклопласт). Приети са хомогенни и изотропни свойства на материала, със следните характеристики:
 - Модул на еластичност (модул на Young) – $E = 11000 \text{ MPa}$
 - Коефициент на напречни нормални деформации (коефициент на Poisson) – $\nu = 0.3$
 - Обемно тегло – $\rho = 18.00 \text{ kN/m}^3$
- Напречни сечения:

Section Name	Material	Section Areas [cm ²]			Area Moments of Inertia [cm ⁴]		
		Axial A	Shear Ay	Shear Az	Torsion J	Bending Iy	Bending Iz
CHS 508.0x12.5	S235J2	195	97.2	97.2	119500	59760	59760
CHS 139.7x5.0	S235J2	21.2	10.62	10.62	961	481	481
CHS 114.3x4.0	S235J2	13.9	6.94	6.94	422	211	211
CHS 168.3x5.0	S235J2	25.7	12.84	12.84	1712	856	856
CHS 457.0x10.0	S235J2	140	70.06	70.06	70180	35090	35090
CHS 406.4x10.0	S235J2	125	62.22	62.22	48950	24480	24480
CHS 101.6x5.0	S235J2	15.2	7.58	7.58	355	177	177
CHS 355.6x8.0	S235J2	87.4	43.59	43.59	26400	13200	13200
CHS 273.0x10.0	S235J2	82.6	41.4	41.4	14310	7154	7154
CHS 219.1x6.3	S235J2	42.1	21.06	21.06	4772	2386	2386
CHS 323.9x8.0	S235J2	79.4	39.65	39.65	19820	9910	9910
CHS 244.5x6.3	S235J2	47.1	23.56	23.56	6692	3346	3346
CHS 139.7x5.0	S235J2	21.2	10.62	10.62	961	481	481
CHS 88.9x3.2	S235J2	8.62	4.32	4.32	158	79.2	79.2
CHS 193.7x6.3	S235J2	37.1	18.57	18.57	3260	1630	1630
IPE 200	S235J2	28.48	10000	10000	6.98	1943	142.4
CHS 177.8x6.3	S235J2	33.9	17.01	17.01	2499	1250	1250
CHS 273.0x6.3	S235J2	52.8	26.35	26.35	9392	4696	4696
HE 140 B	S235J2	43	28.14	8.25	20.06	1509	549.7
CHS 101.6x5.0	S235J2	15.2	7.58	7.58	355	177	177
HE 160 B	S235J2	54.3	34.84	10.79	31.24	2492	889.2

Таблица 1: Сечения и материали

2.1.2. Изчислителни модели

Разработените изчислителни модели имат за цел определяне на динамичните характеристики на конструкцията – естествени честоти, периоди и собствени форми на свободно трептене, които са основа за направените теоретични изчисления на ветровите въздействия. Създаден е изчислителен модел – с характеристики на материалите и елементите, определени според производствените чертежи на стоманената конструкция и стъклопластовата тръба. На Фигура 4 са показани някои основни резултати от динамичния анализ.



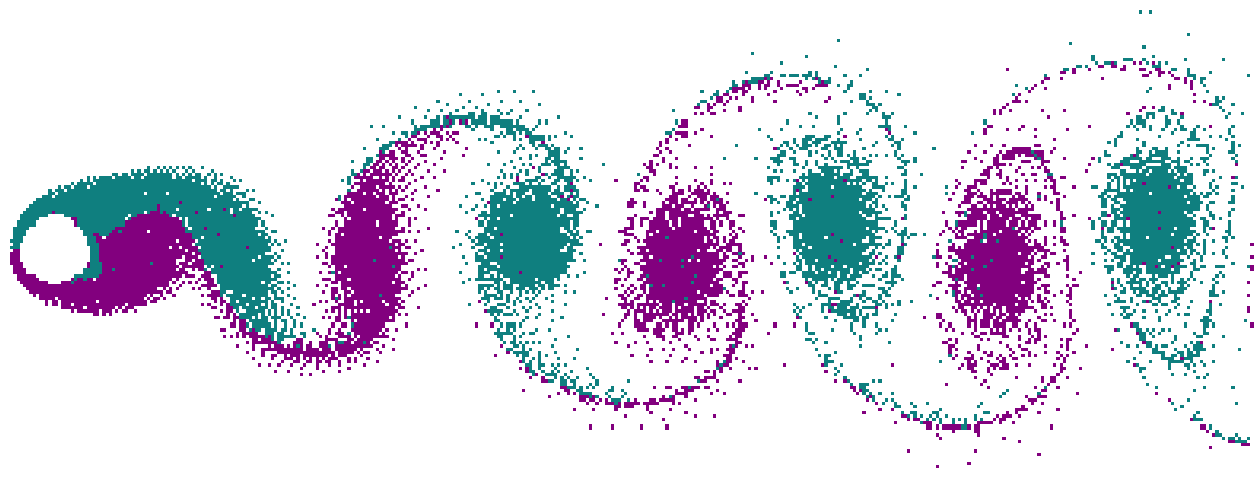
Фигура 4: Изчислителен модел и основна форма на свободно трептене

2.2. Теоретична основа

Ветровото въздействие върху високи и стройни цилиндрични съоръжения се състои от две основни компоненти, които се анализират поотделно. Първата компонента представлява натоварването от вятъра в посоката на неговото действие, а втората - трептенията в напречно направление, предизвикани от вихрово възбуждане.

Ветровото натоварване върху съоръжението в посоката на вятъра се определя според Еврокод на базата на модела на Davenport. Според този модел ветровото натоварване се състои от средна (статична) и пулсационна компонента.

Резонансните трептения на конструкциите в напречно направление, предизвикани от вихрово възбуждане, са резултат от взаимодействието на няколко фактора. Основните механизми, довели до появата на напречни трептения, включват турбулентността на въздушния поток, вихровото възбуждане и взаимодействието между движението на конструкцията и въздушния поток. Възбуждането на трептения в напречна посока поради турбулентността на вятъра е значително само при конструкции с голяма дължина след точка на отделяне на въздушния поток (afterbody), като мостове, плоски покриви и самолетни крила, и няма практическо значение в разглеждания случай. От значение са вихровото възбуждане и взаимодействието между конструкцията и въздушния поток.



Фигура 5: Вихрово възбуждане (Wikipedia – vortex shedding. Courtesy, Cesareo de La Rosa Siqueira.)

При последователното образуване на вихри от двете страни на съоръжението се създава хармонично променливо хоризонтално натоварване в направление, перпендикулярно на посоката на вятъра. Това натоварване предизвиква принудени трептения на конструкцията в напречна посока. Когато честотата на образуване на вихрите съвпадне със собствената честота на свободните трептения на конструкцията, амплитудата на трептенията значително нараства. Това явление се наблюдава при т.нар. критична скорост на вятъра (Райков, Рангелов, & Динев, 2021).

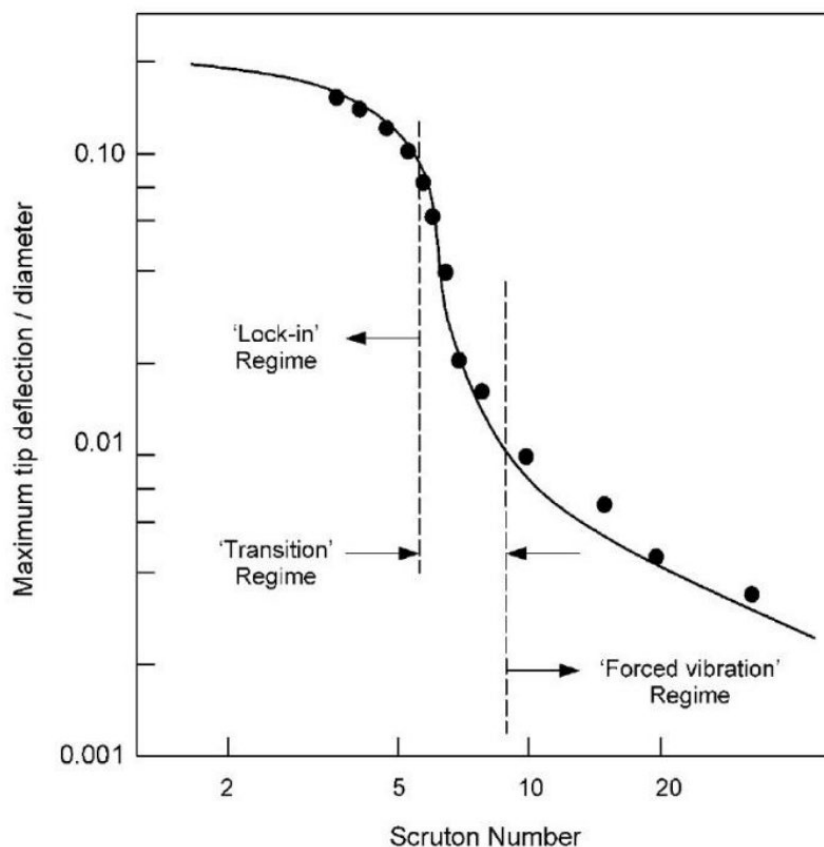
$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_1}{St}$$

Основен показател, определящ предразположеността на конструкцията към резонансни трептения, предизвикани от вихрово възбуждане, както и големината на амплитудата на тези трептения, е числото на Scruton:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$$

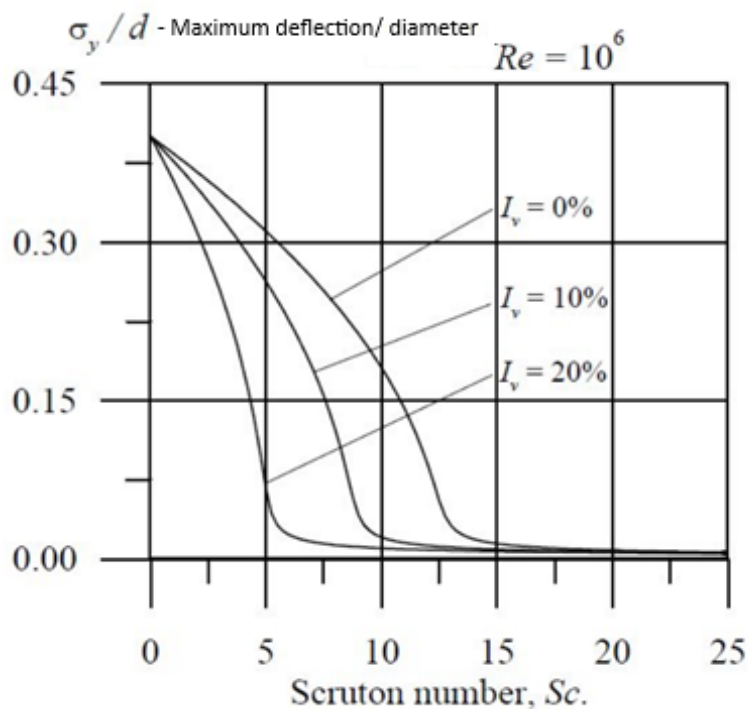
То е функция на логаритмичния декремент на затихване δ_s , еквивалентната маса $m_{i,e}$, плътността на въздуха ρ и диаметъра на съоръжението b .

Съгласно (Vickery, 1983), при ниски стойности на числото на Scruton се наблюдават трептения с големи амплитуди в широк диапазон от ветрени скорости около критичната. Това явление се дължи на комбинирано действие на отрицателно аеродинамично затихване и lock-in ефекта (Фигура 6).



Фигура 6: Режими на трептения в напречна посока за кръгли кули и комини

Интензивността на турбулентността на вятъра $I_v(z)$ е друг важен параметър, който значително влияе на поведението на конструкцията в напречно направление при ветрово въздействие. Това влияние е подробно разглеждано в литературата (Hansen, November 2-7, 2007). Изследванията показват, че при наличие на ламинарен въздушен поток с ниска турбулентност се наблюдават по-големи амплитуди на трептенията при равни други условия (Фигура 7).



Фигура 7: Влияние на $I_v(z)$ върху амплитудата на трептенията

В БДС EN 1991-1-4 са представени два подхода за оценка на амплитудите на трептенията, предизвикани от вихрово възбуждане. Според Националния анекс към (Eurocode, 2008) трябва да се използва т.нар. подход 1, който е прехвърлен без изменения от (DIN 4133, 1991., 1991) в Еврокода и се базира на модела на Ruscheweyh (Ruscheweyh, Ein verfeinertes, praxisnahes Berechnungsverfahren wirbelerregter Schwingungen von schlanken Baukonstruktionen im Wind. , 1986). Различни изследвания (Niemann, 2014) и (Verboom, 2010) демонстрират, че този теоретичен модел подценява амплитудите на трептенията, особено при ниски стойности на интензивността на турбулентността $I_v(z)$. Поради тази причина в настоящата работа се използва и алтернативният подход 2, който дава стойности по-близки до реалните наблюдавани амплитуди на трептенията.

3. Изчисления по Еврокод

3.1. Входни данни

$h = 120$ m – височина на комина

$b = 3.5$ m – диаметър на комина

$\xi_s = 0.00826$ - приет коефициент на затихване

$\delta_s = 2 \cdot \pi \cdot \xi_s = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.00826 = 0.0519$ - логаритмичен декремент на затихване на конструкцията

$n_1 = 1.026$ Hz – базова честота

$z_s = 0.6 \cdot h = 0.6 \cdot 120 = 72$ m – референтна височина на комина

$z = z_s = 72$

3.2. Базови стойности (Eurocode 4.2.)

$v_{b0} = 28.0$ m/s - основна стойност на базовата скорост на вятъра

$c_{dir} = 1$ - коефициент за посока

$c_{season} = 1$ - коефициент за сезонност

$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b0} = 1 \cdot 1 \cdot 28 = 28$ m/s - базова скорост на вятъра

$\rho = 1.25$ kg/m³

$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 28^2 = 490$ N/m² - базов скоростен напор

3.3. Осреднен вятър (Eurocode 4.3.)

$z_0 = 0.05$ - параметър за грапавост

$z_{0,II} = 0.05$ - терен от категория II

z_{min} е минималната височина определена от таблицата

z_{max} се приема равна на 200m

Категория на терена	z_0 , m	$z_{\min}$, m
0 Море или крайбрежни местности с изложение към открито море	0,003	1
I Езера или равнинна хоризонтална местност с пренебрежимо малка растителност и без препятствия	0,01	1
II Местност с ниска растителност, например трева, и отделни препятствия (дървета, сгради), които са отдалечени на разстояние, най-малко 20 пъти височината на препятствието.	0,05	2
III Местност, която е равномерно покрита с растителност или сгради или с изолирани препятствия, отдалечени на разстояние най-много 20 пъти височината на препятствията (например села, крайградски зони, гори)	0,3	5
IV Местност, най-малко 15 % от повърхността на която е покрита със сгради, чиято средна височина превишава 15 m	1,0	10
ЗАБЕЛЕЖКА : Категориите терени са показани в А.1.		

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19 \cdot \left(\frac{0.05}{0.05} \right)^{0.07} = 0.19 \quad - \text{ коефициент за вида на терена}$$

$$c_0(z) = 1 \quad - \text{ коефициент за релеф}$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ за } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$c_r(z) = c_r(72) = 1.38 \quad - \text{ коефициент за грапавост}$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

$$v_m(z) = v_m(72) = 38.69 \text{ m/s} \quad - \text{ средна скорост на вятъра на височина } z$$

3.4. Турбулентност на вятъра (Eurocode 4.4.)

$$k_I = 1 \quad - \text{ коефициент за турбулентност}$$

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \text{ за } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(72) = 0.138$$

3.5. Пиково налягане на скоростта (Eurocode 4.5.)

$$q_p(z) = (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2$$

$$q_p(z) = q_p(72) = 1836.02 \text{ Pa}$$

3.6. Определяне на коефициент $c_s c_d$ по процедура 1

3.6.1. Турбулентност на вятъра (Eurocode B.1.)

$$z_t = 200 \text{ m} - \text{базова височина}$$

$$L_t = 300 \text{ m}$$

$$\alpha = 0.67 + 0.05 \cdot \ln(z_0) = 0.67 + 0.05 \cdot \ln(0.05) = 0.52$$

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha$$

$$L(z) = L(72) = 176.32$$

$$n = n_1 = 1.03 \text{ Hz}$$

$$f_L(z; n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)}$$

$$f_L(z; n) = f_L(72; 1.03) = 4.68 - \text{бездименсионна честота}$$

$$S_L(z; n) = \frac{6.8 \cdot f_L(z; n)}{(1 + 10.2 \cdot f_L(z; n))^{\frac{5}{3}}}$$

$$S_L(z; n) = S_L(72; 1.03) = 0.049 - \text{функция на спектралната плътност}$$

3.6.2. Конструктивен коефициент

$$\eta_h = \frac{4.6 \cdot h}{L(z)} \cdot f_L(z; n) = \frac{4.6 \cdot 120}{L(72)} \cdot f_L(72; 1.03) = 14.64$$

$$\eta_b = \frac{4.6 \cdot b}{L(z)} \cdot f_L(z; n) = \frac{4.6 \cdot 3.5}{L(72)} \cdot f_L(72; 1.03) = 0.427$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{14.64} - \frac{1}{2 \cdot 14.64^2} \cdot (1 - 2.72^{-2 \cdot 14.64}) = 0.066$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{0.427} - \frac{1}{2 \cdot 0.427^2} \cdot (1 - 2.72^{-2 \cdot 0.427}) = 0.767$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z)}\right)^{0.63}} = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{3.5+120}{L(72)}\right)^{0.63}} = 0.582 - \text{коефициент за реагиране без резонанс}$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta_s} \cdot S_L(z; n) \cdot R_h \cdot R_b = \frac{3.14^2}{2 \cdot 0.0519} \cdot S_L(72; 1.03) \cdot 0.066 \cdot 0.767 = 0.236 \quad -$$

коэффициент за реагиране при резонанс

$$v = n_1 \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 1.03 \cdot \sqrt{\frac{0.236}{0.582 + 0.236}} = 0.551 \quad - \text{ достигната честота}$$

$T = 600$ s - време за осредняване на скоростта на вятъра

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} = \sqrt{2 \cdot \ln(0.551 \cdot 600)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0.551 \cdot 600)}} = 3.58$$

$$c_s = \frac{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 7 \cdot I_v(72) \cdot \sqrt{0.582}}{1 + 7 \cdot I_v(72)} = 0.884 \quad - \text{коэффициент за размери}$$

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}} = \frac{1 + 2 \cdot 3.58 \cdot I_v(72) \cdot \sqrt{0.582 + 0.236}}{1 + 7 \cdot I_v(72) \cdot \sqrt{0.582}} = 1.09 \quad - \text{коэффициент за динамичност}$$

$c_s \cdot c_d = 0.884 \cdot 1.09 = 0.963$ - конструктивен коэффициент за IIра теренна категория

3.6.3. Кръгови цилиндри - коэффициент за сила (Eurocode 7.9.)

$k = 0.02$ - еквивалентна повърхностна грапавост

Вид на повърхността	Еквивалентна грапавост k mm	Вид на повърхността	Еквивалентна грапавост k mm
Съкло	0,0015	Загладен бетон	0,2
Полиран метал	0,002	Загладено дърво	0,5
Фина боя	0,006	Неравен бетон	1,0
Пръскана боя	0,02	Грубо отрязано дърво	2,0
Светла стомана	0,05	Ръжда	2,0
Чугун	0,2	Зидария	3,0
Галванизирана стомана	0,2		

$\nu = 15 \cdot 10^{-6} = 1.5 \times 10^{-5}$ - кинематичен вискозитет на въздуха

$$v(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z)}{\rho}}$$

$v(h) = v(120) = 57.07$ m/s - върхова скорост на вятъра

$$Re(z) = \frac{b \cdot v(z)}{\nu}$$

$Re(h) = Re(120) = 13315355$ - числото на Reynolds

$$c_{f,0}(z) = 1.2 + \frac{0.18 \cdot \log\left(\frac{10 \cdot k}{b}\right)}{1 + 0.4 \cdot \log\left(\frac{Re(z)}{10^6}\right)}$$

$c_{f,0}(h) = c_{f,0}(120) = 1.05$ - коефициент за сила при цилиндри без открит слой между обшивките

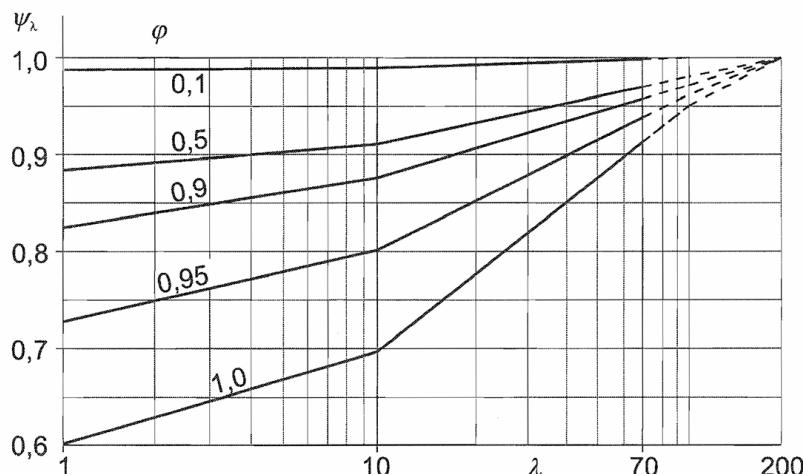
$$\lambda = \frac{2 \cdot h}{b} = \frac{2 \cdot 120}{3.5} = 68.57 \text{ - ефективна стройност}$$

$A = h \cdot b = 120 \cdot 3.5 = 420 \text{ m}^2$ - сума от площите на проекциите на елементите

$A_c = 525 \text{ m}^2$ - е оградената от контура площ

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{420}{525} = 0.8 \text{ - коефициент за запълване}$$

$\psi_\lambda = 0.95$ - коефициент за краев ефект



$$c_f(z) = c_{f,0}(z) \cdot \psi_\lambda$$

$$c_f(h) = c_f(120) = 0.993 \text{ - коефициент за сила}$$

3.7. Вихрово възбуждане и аероеластична неустойчивост

3.7.1. Вихрово възбуждане (Eurocode E.1.)

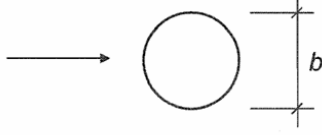
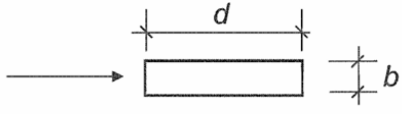
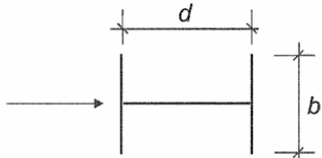
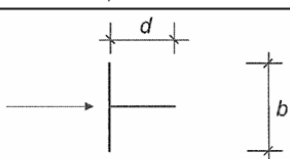
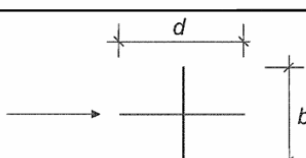
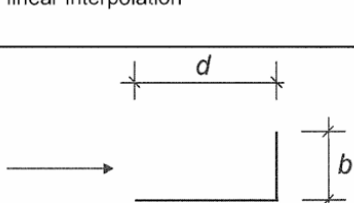
• E.1.2. Критерии за възбуждане от завихряне

Ефектът от завихрянето трябва да се изследва, когато отношението между най-големия и най-малкия размер на конструкцията в направление, напречно на посоката на вятъра, превишава 6.

$$\frac{h}{b} = \frac{120}{3.5} = 34.29 > 6$$

• Е.1.3. Основни параметри при завихряне

St = 0.18 - числото на Strouhal

Cross-section	St
 for all Re-numbers	0,18
 $0,5 \leq d/b \leq 10$	from Figure E.1
 linear interpolation	$d/b = 1$ 0,11 $d/b = 1,5$ 0,10 $d/b = 2$ 0,14
 linear interpolation	$d/b = 1$ 0,13 $d/b = 2$ 0,08
 linear interpolation	$d/b = 1$ 0,16 $d/b = 2$ 0,12
 linear interpolation	$d/b = 1,3$ 0,11 $d/b = 2,0$ 0,07
NOTE Extrapolations for Strouhal numbers as function of d/b are not allowed.	

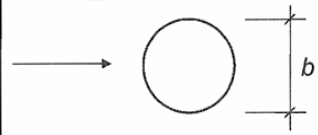
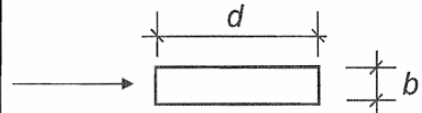
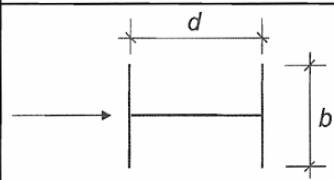
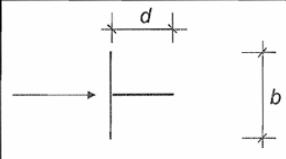
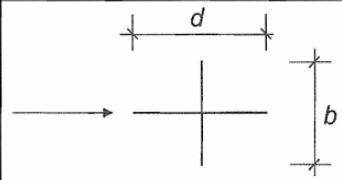
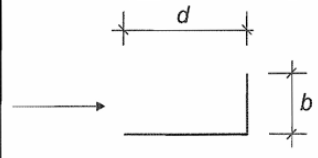
$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_1}{St} = \frac{3.5 \cdot 1.03}{0.18} = 19.95 \text{ m/s}$ - критичната скорост на вятъра за i-тата форма на трептене

$m_{i,e} = 874 \text{ kg/m}$ - еквивалентна маса на единица дължина

$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} = \frac{2 \cdot 0.0519 \cdot 874}{1.25 \cdot 3.5^2} = 5.92$ - число на Scruton

• **Е.1.5.2. Подход 1 за изчисляване на амплитудата по направление, перпендикулярно на посоката на вятъра**

$c_{lat} = 0.18$ - коефициент за странична сила

Cross-section	$c_{lat,0}$
 for all Re-numbers	from Figure E.2
 $0.5 \leq d/b \leq 10$	1,1
 linear interpolation	$d/b = 1$ 0,8 $d/b = 1,5$ 1,2 $d/b = 2$ 0,3
 linear interpolation	$d/b = 1$ 1,6 $d/b = 2$ 2,3
 linear interpolation	$d/b = 1$ 1,4 $d/b = 2$ 1,1
 linear interpolation	$d/b = 1,3$ 0,8 $d/b = 2,0$ 1,0
NOTE Extrapolations for lateral force coefficients as function of d/b are not allowed.	

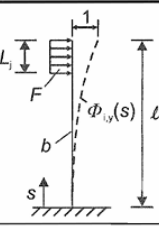
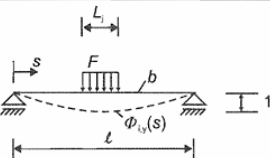
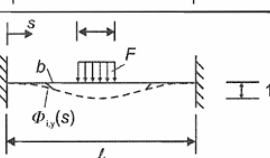
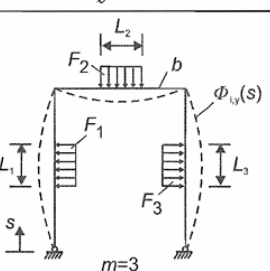
$L_{jb} = 6$ - ефективна корелационна дължина

$y_F(s_j) / b$	L_i / b
< 0,1	6
От 0,1 до 0,6	$4,8 + 12 \frac{y_F(s_j)}{b}$
> 0,6	12

$$\lambda_K = \frac{h}{b} = \frac{120}{3.5} = 34.29$$

$$K = 0.13$$

$$K_W = 3 \cdot \frac{L_{jb}}{\lambda_K} \cdot \left(1 - \frac{L_{jb}}{\lambda_K} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L_{jb}}{\lambda_K} \right)^2 \right) = 3 \cdot \frac{6}{34.29} \cdot \left(1 - \frac{6}{34.29} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{6}{34.29} \right)^2 \right) = 0.438$$

Structure	mode shape $\phi_{i,y}(s)$	K_W	K
	see F.3 with $\zeta = 2.0$ $n = 1; m = 1$	$3 \cdot \frac{L_1/b}{\lambda} \cdot \left[1 - \frac{L_1/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L_1/b}{\lambda} \right)^2 \right]$	0,13
	see Table F.1 $n = 1; m = 1$	$\cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{L_1/b}{\lambda} \right) \right]$	0,10
	see Table F.1 $n = 1; m = 1$	$\frac{L_1/b}{\lambda} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin \left[\pi \cdot \left(1 - \frac{L_1/b}{\lambda} \right) \right]$	0,11
	modal analysis $n = 3$ $m = 3$	$\frac{\sum_{i=1}^n \int_{L_i} \phi_{1,y}(s) ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} \phi_{1,y}(s) ds}$	0,10
NOTE 1 The mode shape, $\phi_{1,y}(s)$, is taken from F.3. The parameters n and m are defined in Expression (E.8) and in Figure E.3 NOTE 2 $\lambda = l/b$			

$$y_{F,max} = \frac{1}{s_t^2} \cdot \frac{1}{s_c} \cdot K \cdot K_W \cdot c_{lat} \cdot b = \frac{1}{0.18^2} \cdot \frac{1}{5.92} \cdot 0.13 \cdot 0.438 \cdot 0.18 \cdot 3.5 = 0.187 \text{ m} - \text{най-голямото преместване}$$

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{0.187}{3.5} = 0.0535$$

- Е.1.5.3. Подход 2 при изчисляване на амплитудите в направление, перпендикулярно на посоката на вятъра**

$C_c = 0.01$ - аеродинамична константа, зависи от числото на Reynolds от т.Е.1.3.

$K_a = 1$ - параметър на аеродинамичното затихване, $K_a = K_{a,max}$

$a_L = 0.4$ - нормализирана гранична амплитуда

$m_e = m_{i,e} = 874 \text{ kg/m}$ - еквивалентна маса на единица дължина

Константа	Кръгов цилиндър $Re \leq 10^5$	Кръгов цилиндър $Re = 5 \cdot 10^5$	Кръгов цилиндър $Re \geq 10^6$	Квадратно напречно сечение
C_c	0,02	0,005	0,01	0,04
$K_{a,max}$	2	0,5	1	6
a_L	0,4	0,4	0,4	0,4

ЗАБЕЛЕЖКА: При кръгови цилиндри константите C_c и $K_{a,max}$ се разглеждат като линейно зависещи от логаритъма на числото на Reynolds, съответно при $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ и при $5 \cdot 10^5 < Re < 10^6$.

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right) = \frac{0.4^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{5.92}{4 \cdot 3.14 \cdot 1}\right) = 0.0423$$

$$c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{S_t^4} \cdot \frac{b}{h} = \frac{1.25 \cdot 3.5^2}{874} \cdot \frac{0.4^2}{1} \cdot \frac{0.01^2}{0.18^4} \cdot \frac{3.5}{120} = 7.79 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_y = \sqrt{c_1^2 + c_1^2 + c_2} \cdot b = \sqrt{0.0423^2 + 0.0423^2 + 7.79 \times 10^{-6}} \cdot 3.5 = 0.21$$

стандартно отклонение на преместването

$$k_p = \sqrt{2} \cdot \left(1 + 1.2 \cdot \text{atan}\left(0.75 \cdot \left(\frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right)^4\right)\right) = \sqrt{2} \cdot \left(1 + 1.2 \cdot \text{atan}\left(0.75 \cdot \left(\frac{5.92}{4 \cdot 3.14 \cdot 1}\right)^4\right)\right) = 5.02$$

- коефициент за върхова стойност

$$y_{max} = \sigma_y \cdot k_p = 0.21 \cdot 5.02 = 1.05 \text{ m}$$

- най-голямо преместване

4. Методи за намаляване на вибрациите

4.1. Масов виброгасител

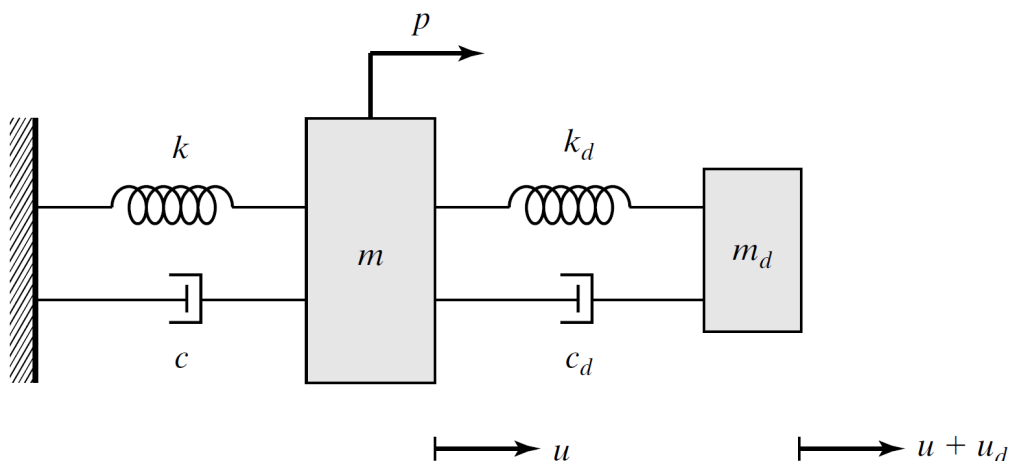
Масовият виброгасител представлява устройство, дефинирано като, пружина и демпфер, което се монтира към конструкцията с цел намаляване на нейната динамична реакция. Честотата на виброгасителя се настройва към определена честота на конструкцията, така че при възбуждане на тази честота устройството трепти в противофаза с движението на конструкцията. По този начин енергията се разсейва чрез инерционната сила на виброгасителя, действаща върху конструкцията.

4.1.1. Принцип на работа

Масовия виброгасител е пасивна система за контрол на вибрациите, състояща се от:

- Маса (m_d) – обикновено 1-5% от масата на основната конструкция
- Пружина (k_d) – осигуряваща еластична връзка с основната конструкция
- Демпфер (c_d) – дисипира взаимното преместване между добавената маса и конструкцията

В този раздел концепцията за масов виброгасител се илюстрира чрез двумасовата система, показана на Фигура 8. Индексът "d" се отнася до демпфера с настройваема маса, докато конструкцията е идеализирана като едномасова система.



Фигура 8: Система с една степен на свобода и масов виброгасител

4.1.2. Оразмеряване

В последващото изложение се анализират различни случаи - от напълно недемпфирани до напълно демпфирани условия, и се представят процедури за проектиране. Описаната методология е дадена от (Connor, 2002).

- **Недемпферирана конструкция: Недемпфериран виброгасител**

На Фигура 9 е показана система с една степен на свобода с маса m и коравина k , подложена на външно въздействие и движение на основата. Към основната маса е монтиран масов виброгасител, притежаващ маса m_d и коравина k_d . Различните параметри на преместване са:

u_g : абсолютно движение на основата;

u : относително преместване между основната маса и основата;

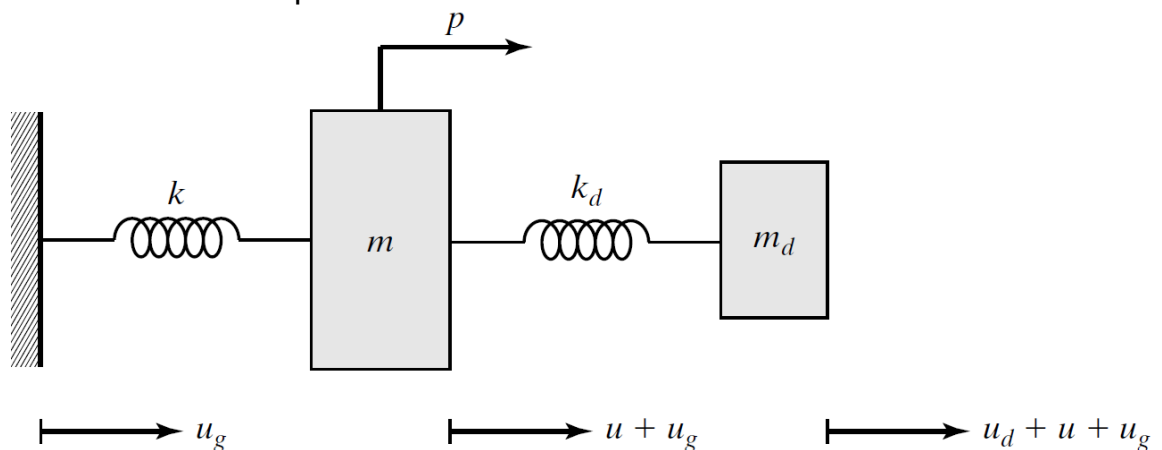
u_d : относително преместване между виброгасителя и основната маса.

С тези означения, управляващите уравнения приемат следния вид:

$$m_d[\ddot{u}_d + \ddot{u}] + k_d u_d = -m_d a_g$$

$$m\ddot{u} + ku - k_d u_d = -ma_g + p$$

където a_g е абсолютното ускорение на основата, а p е силата, приложена към основната маса.



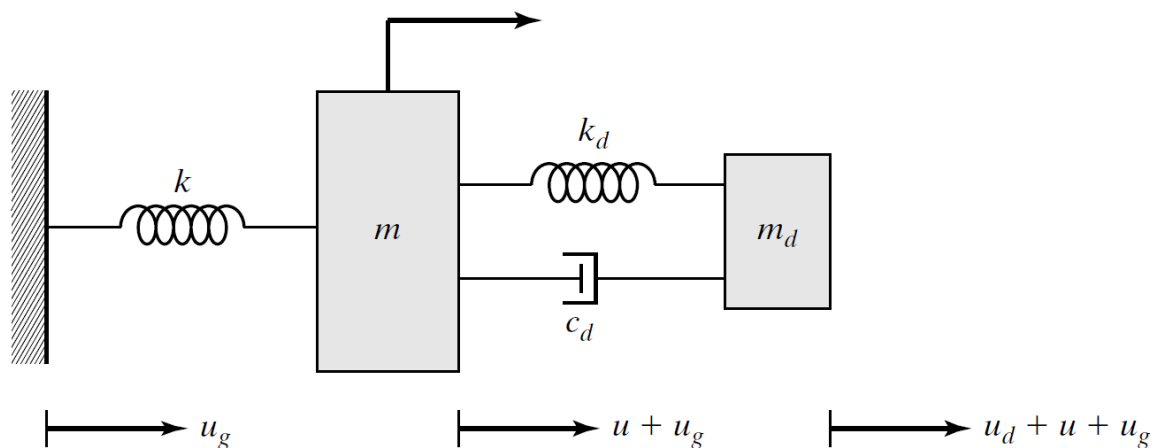
Фигура 9: Система с една степен на свобода свързана с масов виброгасител

- Недемпферирана конструкция: Демпфериран виброгасител**

Следващото ниво на сложност включва демпфиране в масов виброгасител, както е показано на Фигура 10. Уравненията на движение за този случай са:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g$$

$$m \ddot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p$$



Фигура 10: Недемпферирана система с една степен на свобода свързана с демпфериран масов виброгасител

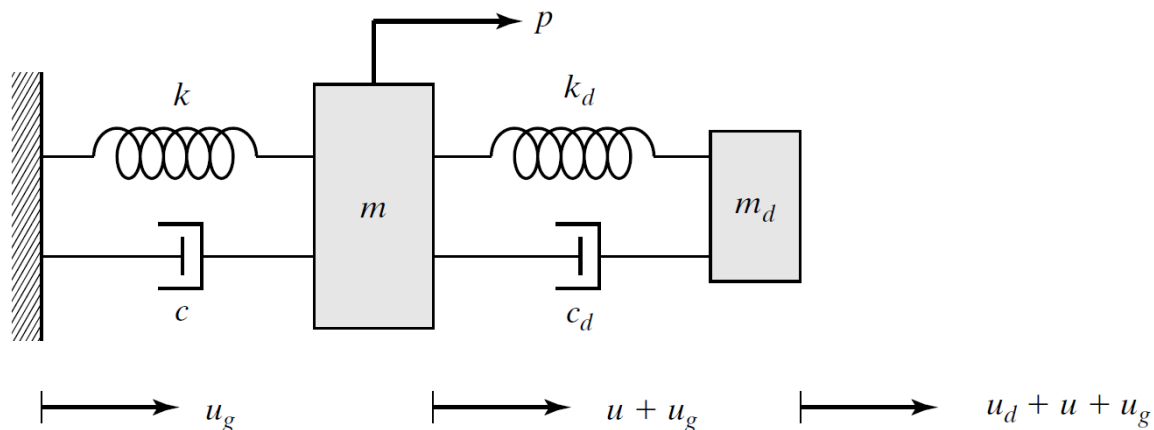
- Демпферирана конструкция: Демпфериран виброгасител**

Всички реални системи притежават известно демпфиране. Въпреки че виброгасителите се монтират предимно върху слабо демпфирани системи, оценката на влиянието на демпфирането в реалната система върху оптималната настройка на виброгасителя е от съществено значение за проектирането.

Основната система, показана на Фигура 11, се състои от маса m , коравина на пружината k и вискозно демпфиране c . Системата на масовия виброгасител включва маса m_d , коравина k_d и вискозно демпфиране c_d . При условие, че система е подложена едновременно на външно въздействие и движение на основата, уравненията на движение са:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p$$



Фигура 11: Демпферирана система с една степен на свобода свързан с демпфериран масов виброгасител

Основни параметри:

- **Маса на TMD (m_d):**

$$m_d = m_{bar} \cdot m$$

m_d - масата на виброгасителя

m_{bar} - отношение на масата на виброгасителя към основната маса (приема се в диапазона от 0.01 до 0.05)

m - основна маса

- **Честота на виброгасителя (ω_d):**

$$\omega_d = \frac{1}{1 + m_{bar}} \cdot \omega$$

ω - основната честота на конструкцията в rad/sec

- **Коравина на пружината (k_d)**

$$k_d = m_d \cdot \omega_d^2$$

4.1.3. Примери от практика

- **Taipei 101 (Тайван):**

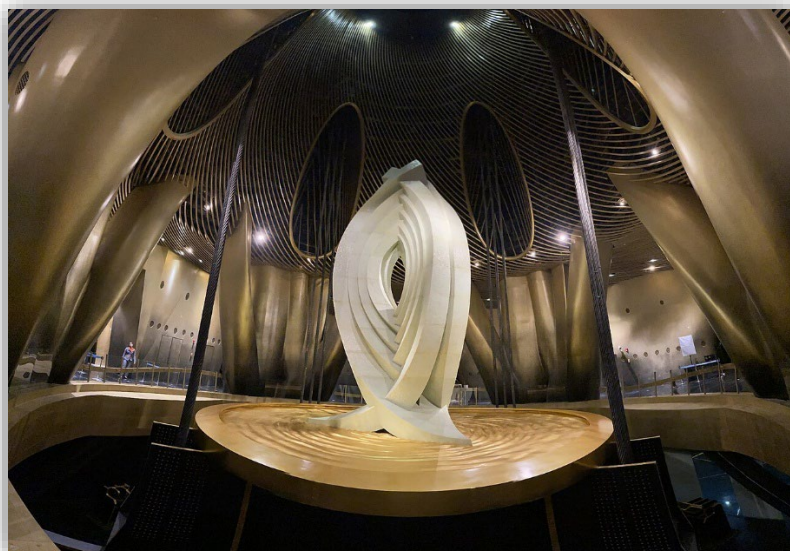
- Тежи около 660 тона
- Диаметър 5.5m, изработен от стомана
- Намалява вибрациите с 30-40%



Фигура 12: Taipei 101 TMD

- **Shanghai Tower (Шанхай):**

- Тежи около 1000 тона
- Разположен между етажи 125 и 126
- Намалява вибрациите с до 40%



Фигура 13: Shanghai Tower TMD

- **Мост „Милениум“ (Лондон):**

- 37 МВ с маса 1-2 тона всеки
- Инсталирани след откриването за намаляване на вибрации породени от пешеходци



Фигура 14: Мост "Милениум" TMD

Масовите виброгасители продължават да се развиват, като съвременните решения комбинират пасивни, полуактивни и активни елементи за по-ефективен контрол на вибрациите.

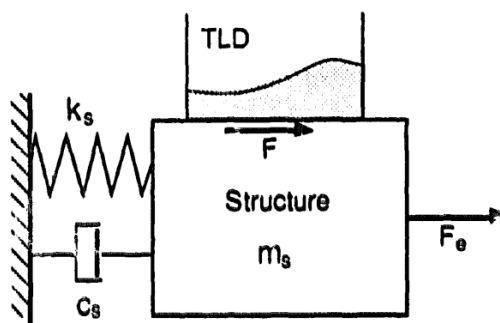
4.2. Флуиден виброгасител

Флуидния виброгасител е пасивен демпфер, който използва плитко плискането на течност в корав резервоар, за да потиска хоризонталните вибрации на конструкцията, предизвикани от вятър или други динамични натоварвания. Демпфери, използващи движението на течности, са били приложени в космически сателити и морски съдове. Нарастващият интерес към този тип демпфери за приложение в наземни конструкции се дължи на няколко потенциални предимства, включително: ниски разходи за производство и поддръжка; лесен монтаж в съществуващи конструкции; приложимост за временно използване; липса на ограничение за едноразовно възбуждане; и ефективност дори при вибрации с малка амплитуда. Описаната методология е дадена от (Sun, 1992).

4.2.1. Принцип на работа

Теорията на плитководните вълни е разработена в областта на крайбрежното инженерство. Вълните се считат за плитководни, когато съотношението между дълбочината на водата h и дължината на вълната L е в диапазона $1/2 > h/L > 1/20 \div 1/25$. При флуидните виброгасители това съотношение обикновено попада в този диапазон, за да се постигне високо демпфиране на плискането на течността и ефективна подвижна маса.

Аналитичен модел на флуиден виброгасител, използващ правоъгълен резервоар, е предложен на базата на нелинейната теория на плитководните вълни. Моделът включва линейно пропорционално демпфиране на скоростта, дължащо се както на триене в граничните слоеве близо до коравите стени на резервоара на флуидния виброгасител, така и на замърсявания по свободната повърхност на течността.



Фигура 15: Система с една степен на свобода и флуиден виброгасител

4.2.2. Оразмеряване и настройка

Основни параметри:

- **Честота на виброгасителя (f_w):**

$$f_w = \frac{1}{2 * \pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi * g}{L} * \tanh\left[\frac{\pi * h_w}{L}\right]}$$

L – дължина на контейнера

h_w – дълбочина на водата

$g = 9.81$ – земно ускорение

- **Маса на TMD (m_d):**

$$m_d = n_{cells} \cdot m_{w1}$$

m_d – масата на виброгасителя

n_{cells} – брой контейнери

m_{w1} – маса на един контейнер

$$m_{w1} = \frac{8 * p * b * L^2}{\pi^3} * \tanh\left[\frac{\pi * h_w}{L}\right]$$

b – широчина на контейнера

- **Коравина на пружината (k_d)**

$$k_d = n_{cells} \cdot k_{w1}$$

k_{w1} – коравина за 1 контейнер

$$k_{w1} = \frac{8 * p * b * L * g}{\pi^2} * \left(\tanh\left[\frac{\pi * h_w}{L}\right]\right)^2$$

4.2.3. Примери от практика

- **One Rincon Hill South Tower (Сан Франциско):**
 - Огромен воден резервоар заемащ последните етажи от сградата



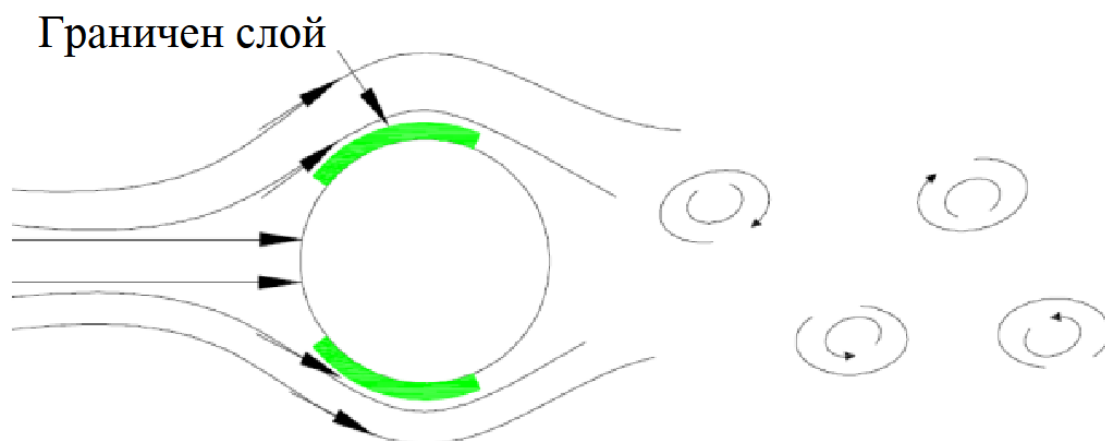
Фигура 16: One Rincon Hill South Tower

4.3. Аеродинамични модификатори

Аеродинамичните модификатори представляват ефективни решения за намаляване на вихровото възбуждане и резонансните трептения във високи цилиндрични конструкции като комини. Техният принцип на действие се основава на нарушаване на ламинарния въздушен поток и потискане на организираното вихрообразуване.

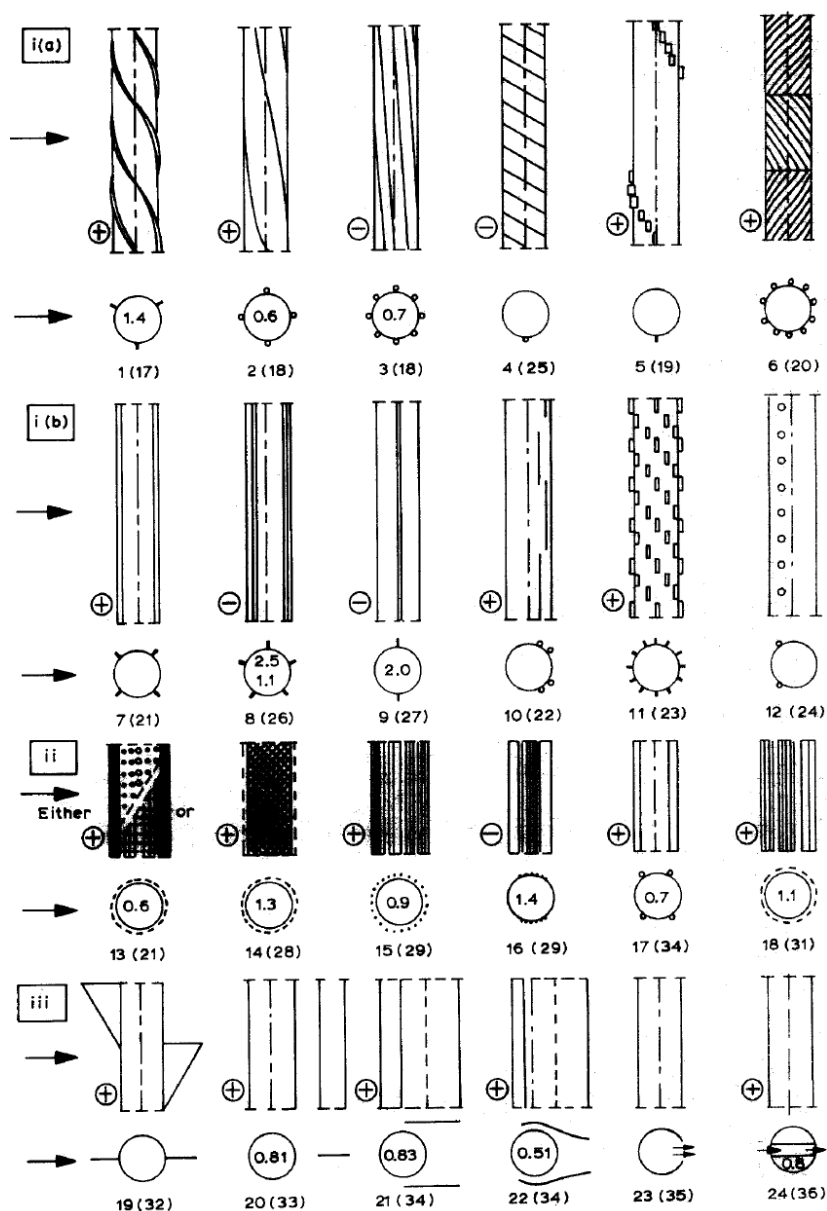
4.3.1. Спирали и други форми

Съвременните изследвания в областта на аеродинамиката на цилиндрични конструкции разкриват нови концепции за обяснение на механизмите на вихрообразуване. Две нови концепции - "entrainment layer" (слой на увличане) и "confluence point" (точка на сливане) - предоставят по-дълбоко разбиране на процесите на вихрообразуване около цилиндрични тела (Zdravkovich, 1979).



Спиралните модификатори, известни още като спирални спойлери, представляват най-ефективния тип аеродинамични модификатори за потискане на вихровото възбуждане (Zdravkovich, 1981). Те се характеризират с:

- Омнидирекционална ефективност - Работят ефективно при вятър от всяка посока
- Равномерно разпределение - Осигуряват равномерна турбулизация по цялата периферия на конструкцията
- Висока ефективност - Намаляват амплитудите на вибрация с до 90%



Фигура 17: Аеродинамични и хидроаеродинамични средства за потискане на вихрообразуването

Най-разпространените типове спирални модификатори включват:

- Хеликоидни спойлери по Scruton и Walshe (Scruton & Walshe, 1957) (позиция 1 на Фиг. 1)
- Спирални въжета по Nakagawa и др. (1959) (Nakagawa, Fujino, Arita, Ogata, & Masaki, 1959) (позиция 2 на Фиг. 1)

4.3.2. Принцип на работа

Аеродинамичните модификатори действат чрез целенасочено нарушаване на ламинарния поток около цилиндричните конструкции, с цел потискане на вихрообразуването след цилиндричното препятствие. Основният принцип на работа се основава на три ключови механизма:

Турбулизация на граничния слой

Модификаторите създават контролирана турбулентност в граничния слой, което води до:

- Разрушаване на вихрови структури
- Нарушаване на синхронизираното отделяне на вихри от двете страни на конструкцията
- Промяна на честотата на вихрообразуване

Модифициране на процесите на увличане

Съгласно съвременните теории за вихрообразуване (Zdravkovich, 1979), модификаторите влияят на:

- Слоеве на увличане (entrainment layers), които доставят невихров флуид за растежа на вихрите
- Точката на сливане (confluence point), където се срещат слоевете на увличане от двете страни на цилиндъра
- Процеса на свиване на вихрите (rolling-up process)

Превключване на точка на сливане

Ефективните модификатори предотвратяват периодичното превключване на точка на сливане от една страна на друга на оста на следата, което е основен механизъм за синхронизираното вихрообразуване.

4.3.3. Ефективност на аеродинамичните модификатори

В различни изследвания са анализирани ефективността и оптималните параметри на спираловидните ребра (strakes) за намаляване на вибрациите на цилиндрични конструкции под въздействие на вятър. (Scruton & Walshe, 1957) са сред първите, които разработват ефективни повърхностни издатъци за потискане на вятърно възбудените вибрации. Те установяват, че три спираловидни ребра с правоъгълно напречно

сечение, навити около цилиндъра със стъпка $15D$, значително намаляват аеродинамичното възбуждане. Експерименталните резултати показват, че дори при сравнително ниска височина на ребрата $h=0.029D$ се постига добър ефект, а при увеличаване до $h=0.118D$ зоната на нестабилност се свежда до минимум.

Последващи изследвания на (Woodgate & Maybreу, 1959) оптимизират параметрите на ребрата, като установяват, че оптималната стъпка е $5D$ при височина $h=0.09D$. Интересен резултат е, че наличието на малък отстъп (до $0.005D$) между ребрата и повърхността на цилиндъра не влияе значително на ефективността. Практическият опит показва, че е достатъчно ребрата да бъдат монтирани само в горната трета на конструкцията, за да се предотврати нестабилността в основната форма.

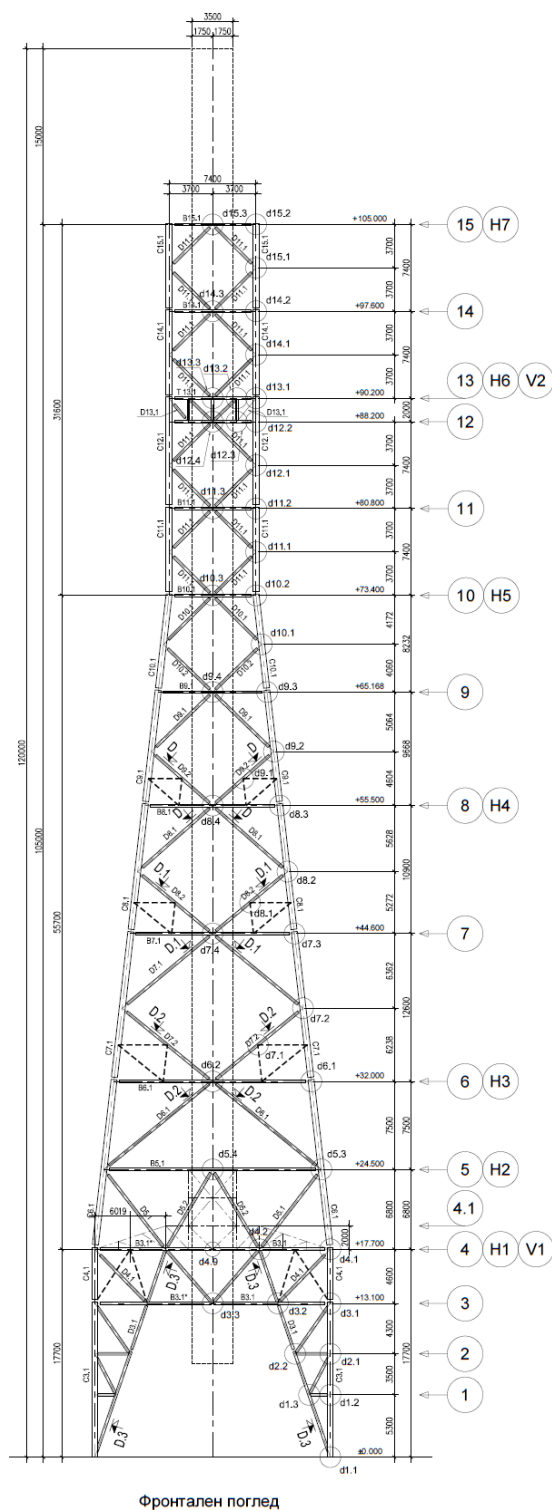
(Cowdrey & Lawes, 1959) изследват влиянието на спираловидните ребра върху коефициента на съпротивление и установяват, че той остава почти постоянен ($C_d \approx 1.35-1.45$) в широк диапазон на числа на Рейнолдс (от 1×10^5 до 4×10^6). Това показва, че потокът около цилиндъра с ребра запазва стабилна структура в този диапазон, макар че стойностите на коефициента на съпротивление са значително по-високи от тези за гладък цилиндър.

(Ruscheweyh, 1972) потвърждава оптималните параметри на ребрата и установява, че те са най-ефективни при покриване на около $1/3$ от височината на конструкцията за числа на Рейнолдс в диапазона 1.8×10^4 до 4×10^4 . Изследванията показват, че преместването на ребрата надолу по конструкцията води до намаляване на ефективността, особено когато горната непокрита част става равна по височина на покритата зона.

(Walshe & Wootton, 1970) отбелязват, че ефективността на спираловидните ребра може да намалява при наличие на паралелни тръби с малък диаметър, монтирани по дължината на основната конструкция. В тези случаи е необходимо провеждане на специфични изпитания в аеродинамична тръба, за да се оцени ефективността за конкретната конфигурация.

5. Анализ на съществуващата конструкция

5.1. Геометричен модел на коминната тръба

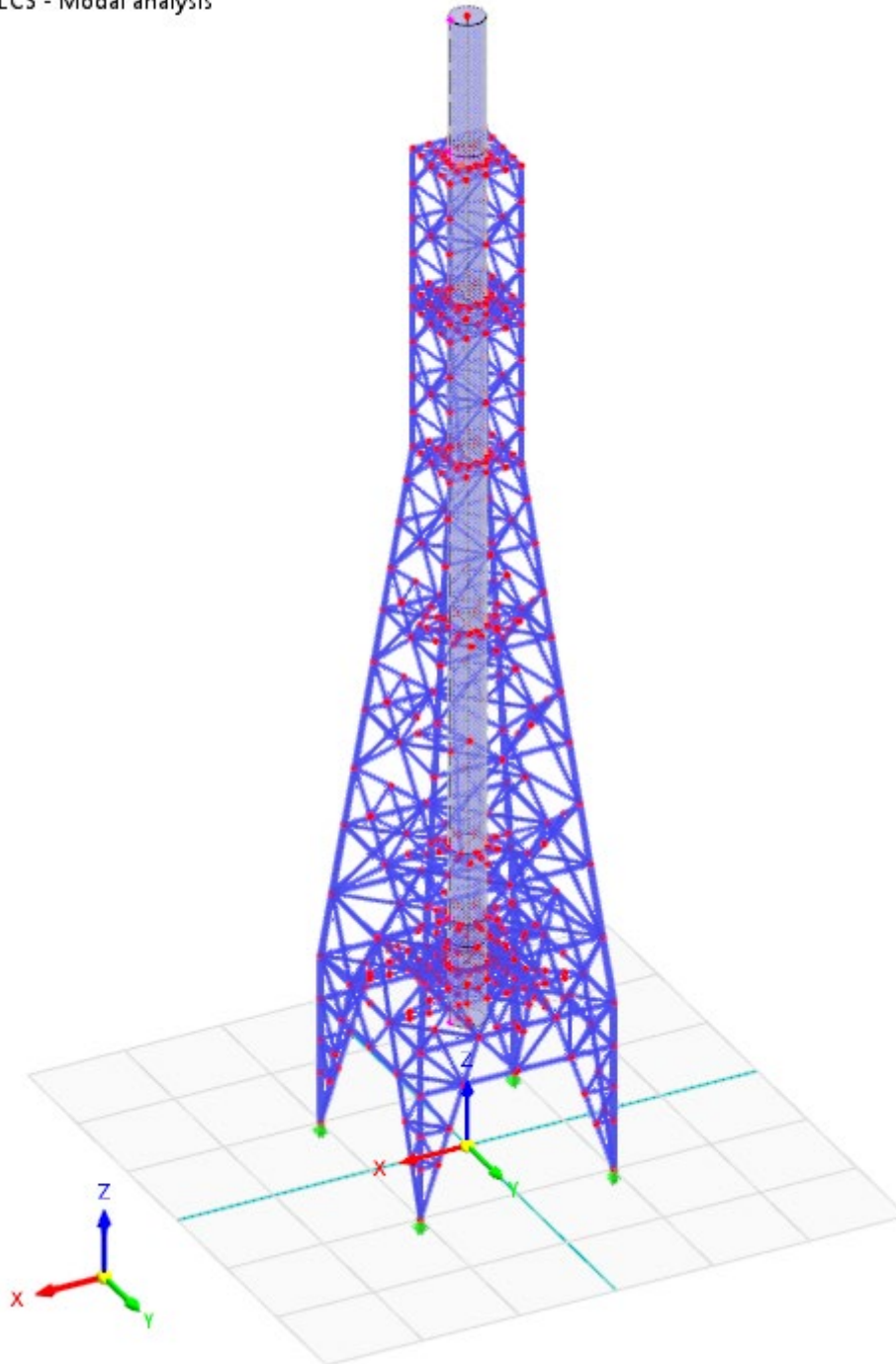


Фигура 18: Монтажен план на конструкцията

5.1.1. Описание на конструкцията.

Конструкцията на комина се състои от пространствена метална решетъчна конструкция и полимерна (стъклопластова) тръба, като тръбата се издига свободно на 15 метра над металната конструкция.

LC3 - Modal analysis



Фигура 19: Геометрия на изчислителния модел в RFEM

5.2. Динамични характеристики

За определяне на размерите на виброгасителите е необходимо да редуцираме модела до еквивалентна система с една степен на свобода, маса m и коравина k за погасяване на вибрациите при основна форма на трептене.

5.2.1. Определяне на еквивалентна маса

Еквивалентната маса се изчислява по формулата:

$$m_0 = \frac{\sum m_j(z) * u_{1,j}^2(z)}{\sum u_{1,j}^2(z) * dz}$$

Еквивалентна маса									
Участък (j)	z	dz	$u_{1,j}$	Стом. к-ция	GRP	m_j	$m_j(z)u_{1,j}^2(z)$	$u_{1,j}^2(z)dz$	m_0
	[m]	[m]	[m]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[m]	[kg/m]
1	13.10	13.10	0.0254	30600	0	30600	19.74	0.0085	873.9
2	24.50	11.40	0.0414	47160	3730	50890	87.22	0.0195	
3	38.25	13.75	0.0709	23400	4350	27750	139.49	0.0691	
4	49.88	11.63	0.1132	14240	3790	18030	231.04	0.1490	
5	60.11	10.23	0.1687	13030	3750	16780	477.55	0.2911	
6	69.23	9.12	0.2422	8040	3250	11290	662.28	0.5350	
7	77.10	7.87	0.3213	8350	3110	11460	1183.06	0.8124	
8	84.50	7.40	0.4215	5920	2800	8720	1549.21	1.3147	
9	93.90	9.40	0.5635	12580	4050	16630	5280.56	2.9848	
10	101.30	7.40	0.6836	5040	2800	7840	3663.70	3.4581	
11	108.70	7.40	0.7895	4440	2670	7110	4431.74	4.6125	
12	114.35	5.65	0.8080	0	1750	1750	1142.51	3.6887	
13	120.00	5.65	1.0000	0	1750	1750	1750.00	5.6500	
							20618.12	23.5935	

Таблица 2: Еквивалентна маса

5.2.2. Определяне на основната честота.

Основната честота на конструкцията е определена чрез модален анализ, проведен с помощта на програмата Dlubal RFEM.

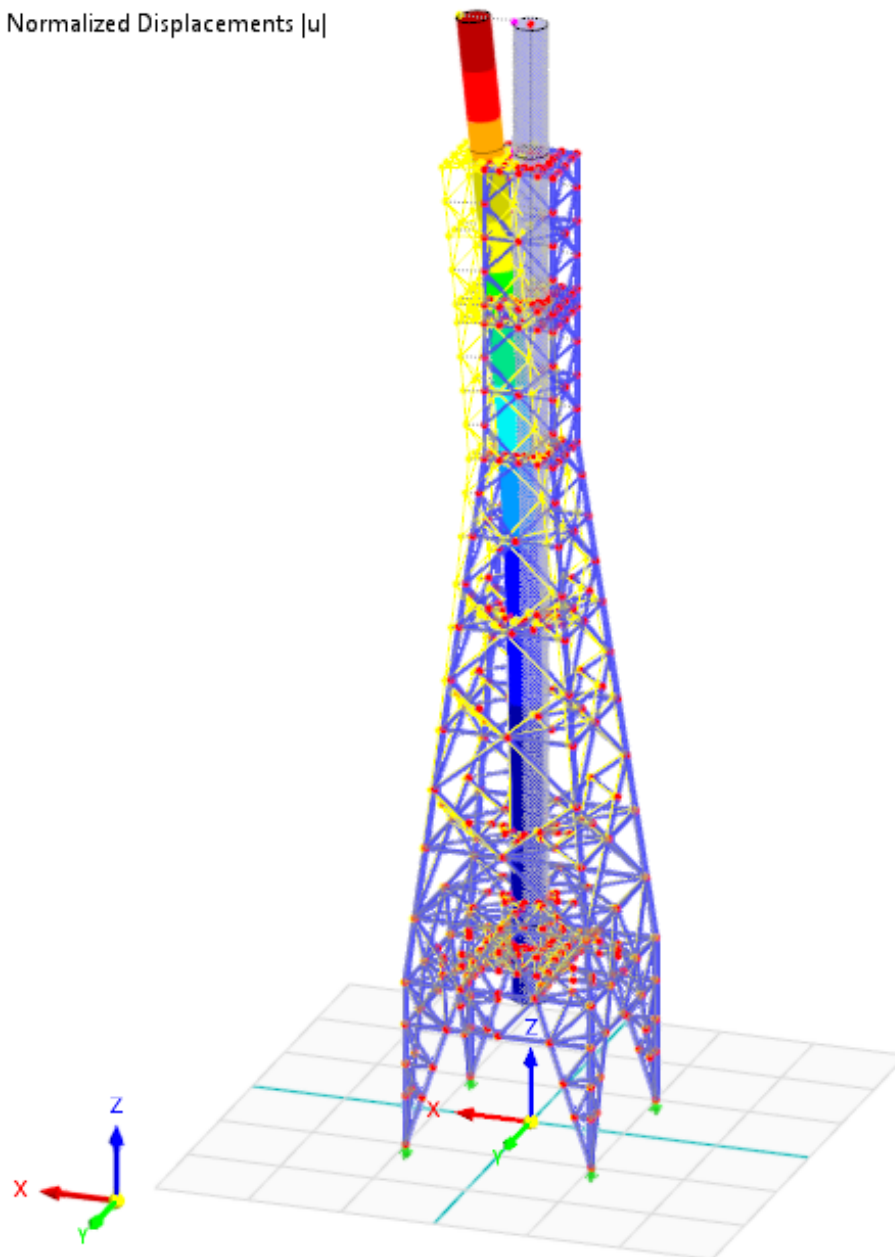
Чрез RFEM са извлечени собствените честотни форми на конструкцията, като основната честота е идентифицирана като най-ниската честота, при която конструкцията вибрира в първата си собствена форма. Тази честота е ключов параметър за настройването на виброгасителите, тъй като те трябва да бъдат оптимизирани да работят в синхрон с тази честота, за да се постигне максимален ефект на демпфиране.

Резултатите от модалния анализ показват, че основната честота на конструкцията е 1.026 Hz. Тази стойност е използвана за по-нататъшни изчисления и проектиране на виброгасителната система, за да се гарантира нейната ефективност при намаляване на вибрациите, предизвикани от ветрови натоварвания.

Mode No.	Eigenvalue λ [1/s ²]	Angular Frequency ω [rad/s]	Natural Frequency f [Hz]	Natural Period T [s]
1	41.582	6.448	1.026	0.974

Таблица 3: Основна форма на свободно трептене

LC3 - Modal analysis
Modal Analysis
Mode No. 1 - 1.026 Hz
Normalized Displacements |u|



max |u| : 1.00000 | min |u| : 0.00000

Фигура 20: Основна форма на свободно трептене

5.2.3. Анализ на вибрационното поведение.

За детайлно изследване на динамичното поведение на коминовата конструкция при резонансни условия, е необходимо да се създаде точна числена постановка в софтуерната среда RFEM. С тази цел се прилага специализиран подход за анализ във времето, известен като "Time History Analysis". Този метод позволява прецизно моделиране на реагирането на конструкцията при динамични натоварвания, вариращи във времето.

Методология на анализа:

Създаване на товарно състояние:

- В рамките на RFEM се конфигурира специално товарно състояние от тип "Time History Analysis".
- Това състояние позволява приложението на временно-променливи натоварвания и наблюдение на динамичното реагиране на конструкцията.

Дефиниране на външно възбуждане:

- За реалистично моделиране на резонансните условия се въвежда външна сила, чиято честота съвпада с основната честота на конструкцията.
- Тази сила се дефинира като хармонично възбуждане с амплитуда и честота, съответстващи на базовата честота на система, определена от предходния модален анализ.
- Амплитудната стойност на силата при резонансно трептене е:

$$F_w = m * (2 * \pi * n_1)^2 * 1 * y_{max}$$
$$F_w = 43400 * (2 * \pi * 1.026)^2 * 1 * 1.05 = 1.8934 * 10^6 \text{ kN}$$

Времева диаграма на натоварването:

- Създава се детайлна времева диаграма на приложеното натоварване, която точно отразява динамичния характер на възбуждането.
- Диаграмата се конструира така, че да обхваща достатъчно дълъг времеви интервал, позволяващ пълното развитие на резонансните процеси в конструкцията.

Times & Multipliers

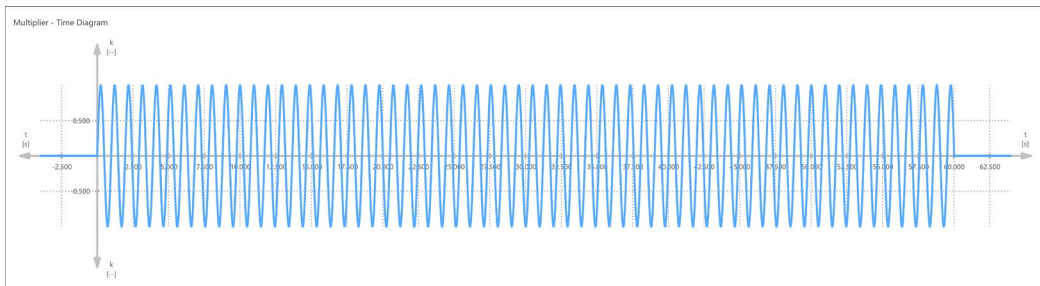
Multiplier function

$k(t): \sin(6.438 \cdot t)$



Time limit

$t_{\max}$ 60.000 [s]



Фигура 21: Времева диаграма на натоварването

Параметри на анализа:

- Дефинират се необходимите параметри за анализа във времето, включително стъпка на интегриране, метод на числено интегриране и критерии за затихване.

Time Steps

Maximum time

$t_{\max}$ 60.000 [s]

Saved time step

Δt 0.010 [s]

Time step for calculation

User-Defined

Split saved time steps by

4

Фигура 22: Параметри на временния анализ

В рамките на проведения динамичен анализ на конструкцията са получени две основни графики, илюстриращи динамичното ѝ поведение при различни условия. Тези графики могат да бъдат разделени, в зависимост от наличието на затихване на конструкцията.

Задаване на затихването на конструкцията в RFEM 6

Чрез динамични случаи:

- Константно демпфиране за всички честоти (Lehr's damping)

Damping	Parameters
Damping type Lehr's damping Constant	Lehr's damping constant D 0.008 [-]

- Честотно-зависимо демпфиране (Rayleigh damping)

Damping	Parameters
Damping type Rayleigh	Rayleigh damping parameters α 0.050 [-] β 0.001 [-]
☒ Calculate from Lehr's damping	
Parameters of two most dominant mode shapes	
Natural frequencies	Lehr's damping
f ₁ 0.900 [Hz]	D ₁ 0.008 [-]
f ₂ 1.100 [Hz]	D ₂ 0.008 [-]

Natural Frequencies - Damping diagram

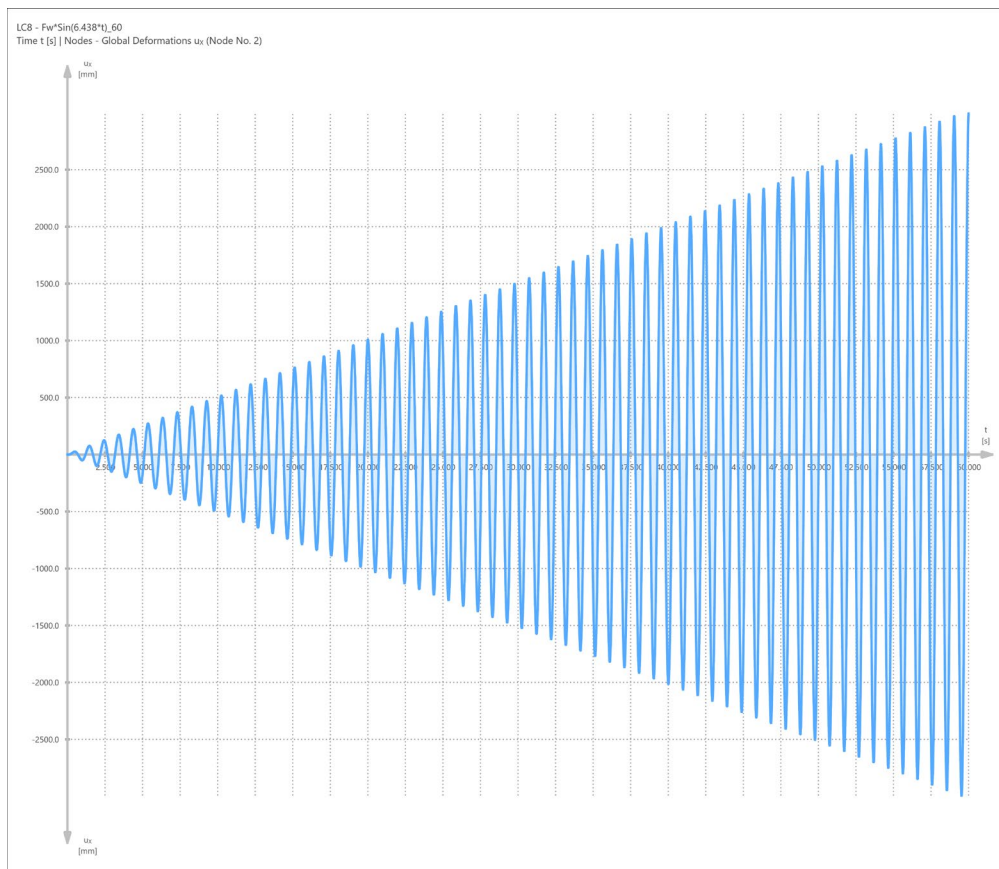
0.025

0.500 1.500 2.500 3.500 4.500 5.500 6.500 7.500 8.500 9.500

f [Hz]

Графики без конструктивно затихване на конструкцията

Фигура 23: Резултати при приложена сила, изчислена по теоретичния модел

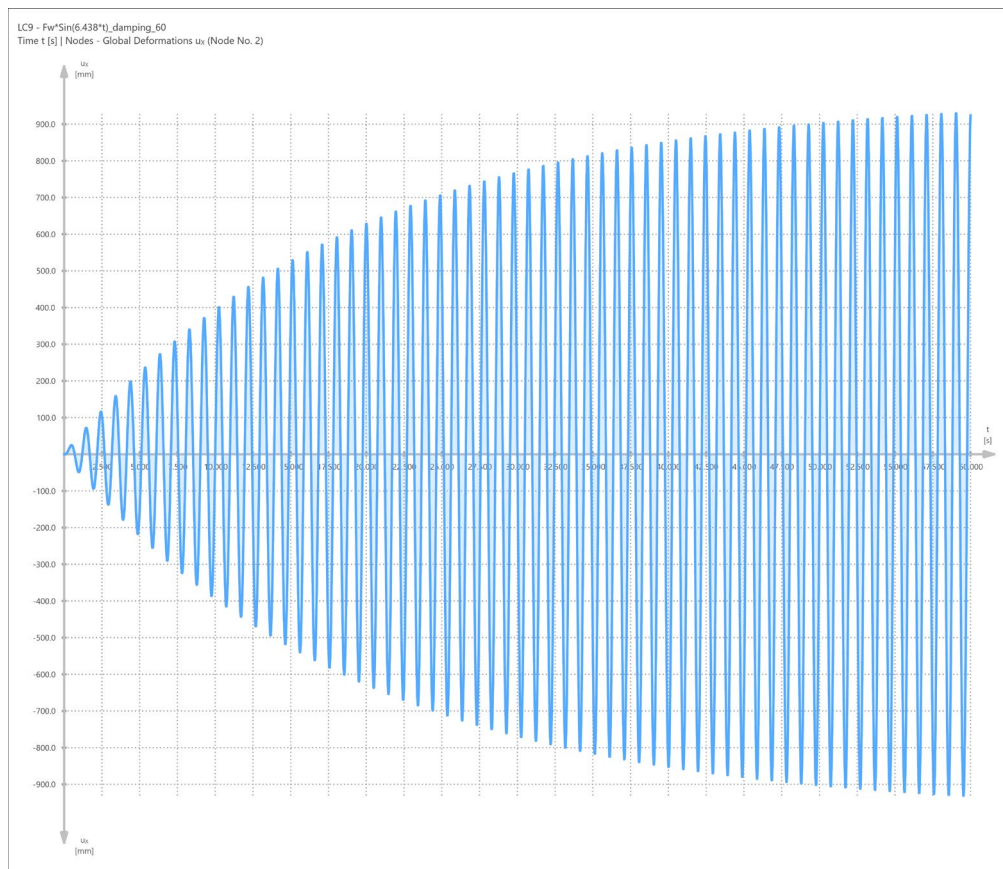


Фигура 23: Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване

- Тази графика показва преместванията на конструкцията при приложена сила.
- Резултатите показват премествания, които са близки до очакваните стойности, в съответствие с изискванията на Еврокод.

Графики с конструктивно затихване на конструкцията

Фигура 24: Резултати при приложена сила, изчислена по теоретичния модел



Фигура 24: Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване

- Тази графика показва преместванията на конструкцията при приложена сила, но с включено конструктивно затихване.
- Резултатите показват намаление на преместванията и установено трептене в сравнение с графика без конструктивно затихване, но все още са твърде големи.

6. Оразмеряване и оптимизация на TMD и TLD

6.1. Масов виброгасител (Connor, 2002)

6.1.1. Изчисления за оразмеряване на масовия виброгасител

Разглеждани са два варианта за масов виброгасител:

- Вариант 1: Маса 1% от масата на конструкцията (базови параметри)
- Вариант 2: Маса 2% от масата на конструкцията (увеличена маса)

Входни данни:

$m_{bar} = 0.01$ и 0.02 - съотношение на масата на масовия виброгасител към основната маса на конструкцията $m_{bar}=m_d/m$

$k = 1799000$ - модална коравина на конструкцията

$m = 43400$ kg – модална маса на конструкцията

Маса на масов виброгасител

$$m_d = m_{bar} \cdot m = 0.01 \cdot 43400 = 434 \text{ kg}$$

Честота на масовия виброгасител

$$\omega_d = \frac{1}{1 + m_{bar}} \cdot \omega$$

Оптимален коефициент на затихване на масовия виброгасител (Hartog, 1934)

$$\xi_d = \sqrt{\frac{3 \cdot m_{bar}}{8 \cdot (1 + m_{bar})^3}}$$

Коравина на масовия виброгасител

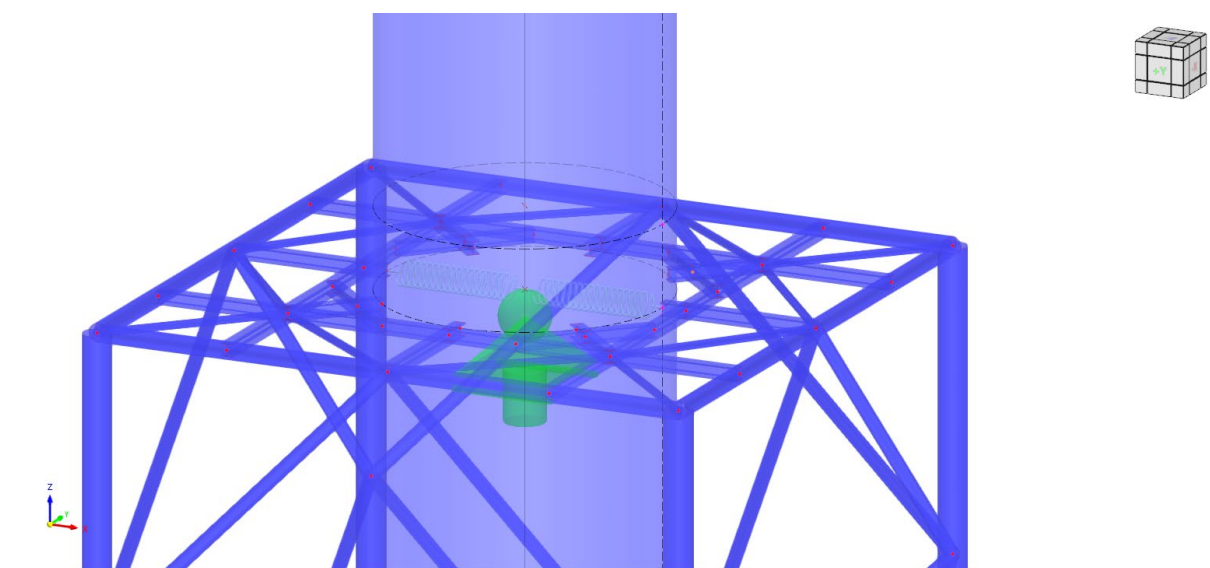
$$k_d = m_d \cdot \omega_d^2$$

Коефициент на демпфиране на виброгасителя

$$c_d = 2 \cdot \xi_d \cdot \omega_d \cdot m_d$$

6.1.2. Числено моделиране в RFEM

В този раздел се представя процесът на създаване и анализ на компютърни модели в RFEM за различни конфигурации на системата "конструкция-виброгасител". Виброгасителят в модела е представен като едномасова система, състояща се от маса, свързана с конструкцията чрез еластичен елемент (пружина), което е типично за масовите виброгасители. Разглеждани са три основни случая, които позволяват пълна оценка на влиянието на демпфирането както в основната конструкция, така и във виброгасителя.

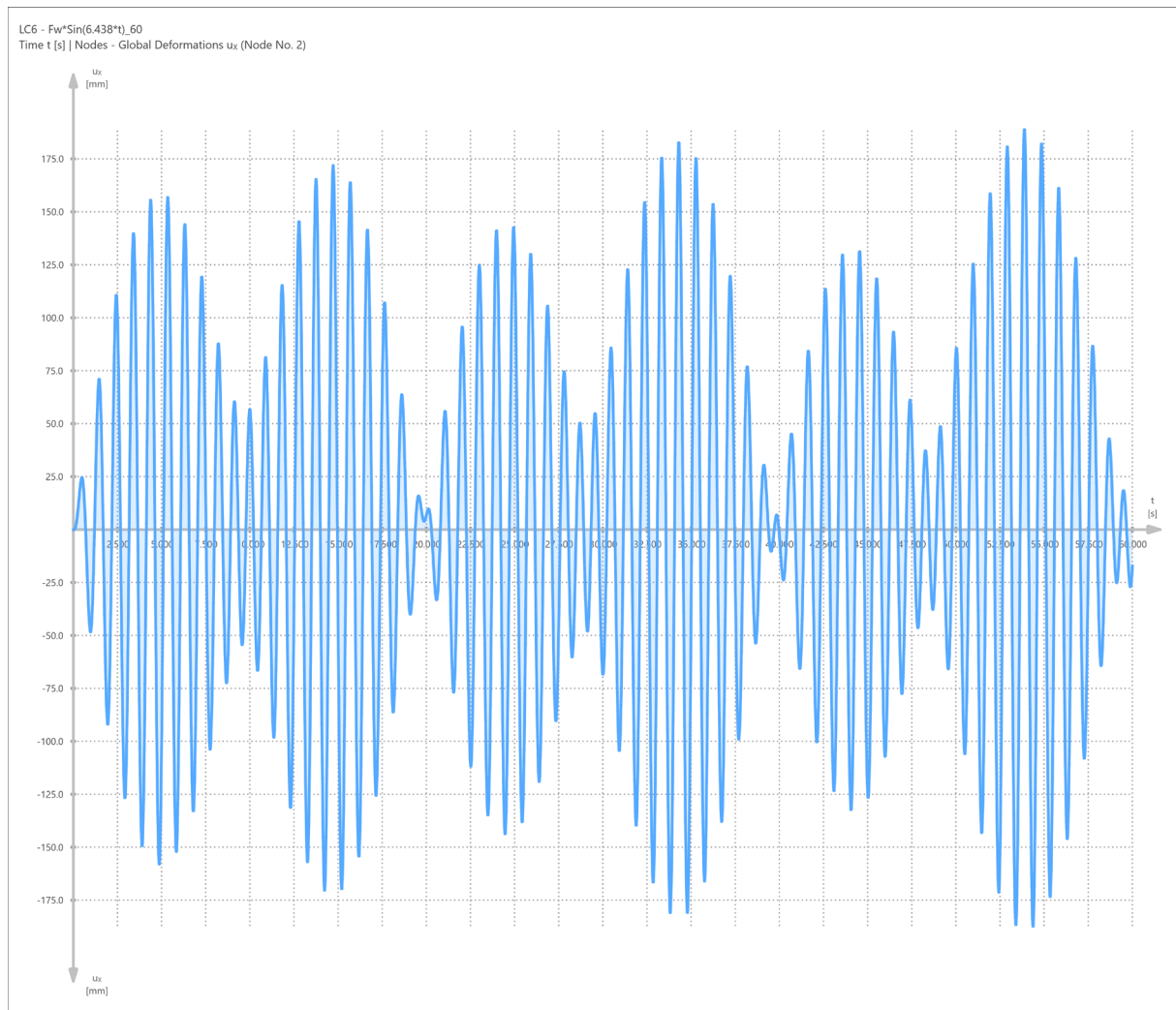


Фигура 25: Модел на масов виброгасител в RFEM

Вариант 1: Маса 1% от масата на конструкцията

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване

В този базов модел и конструкцията, и виброгасителят (представен като маса и пружина) са без демпфиращи елементи. Това позволява да се оцени чистото влияние на масово-инерционните характеристики на системата върху динамичното ѝ поведение.



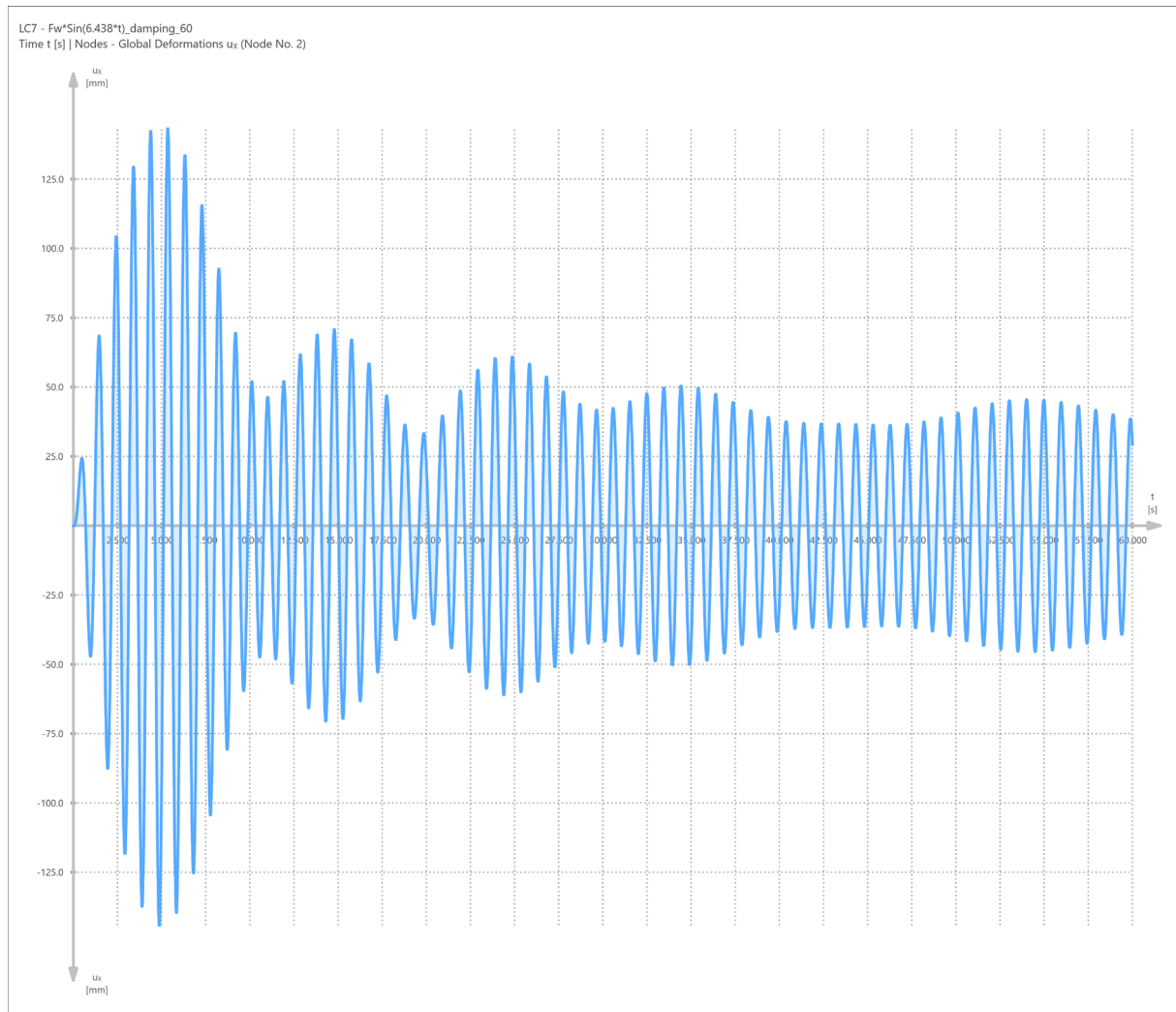
Фигура 26: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване и виброгасител без затихване

Характерни особености:

- Забелязва се явлението „биене“
- Бавно затихване на вибрациите след преустановяване на възбуждането
- Високи амплитуди на преместване в резонансните зони

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване

Тук е добавено затихването само в основната конструкция, докато виброгасителят остава без затихване, само като маса. Тази конфигурация демонстрира ефекта от затихването в основната конструкция върху общото динамично поведение на системата.



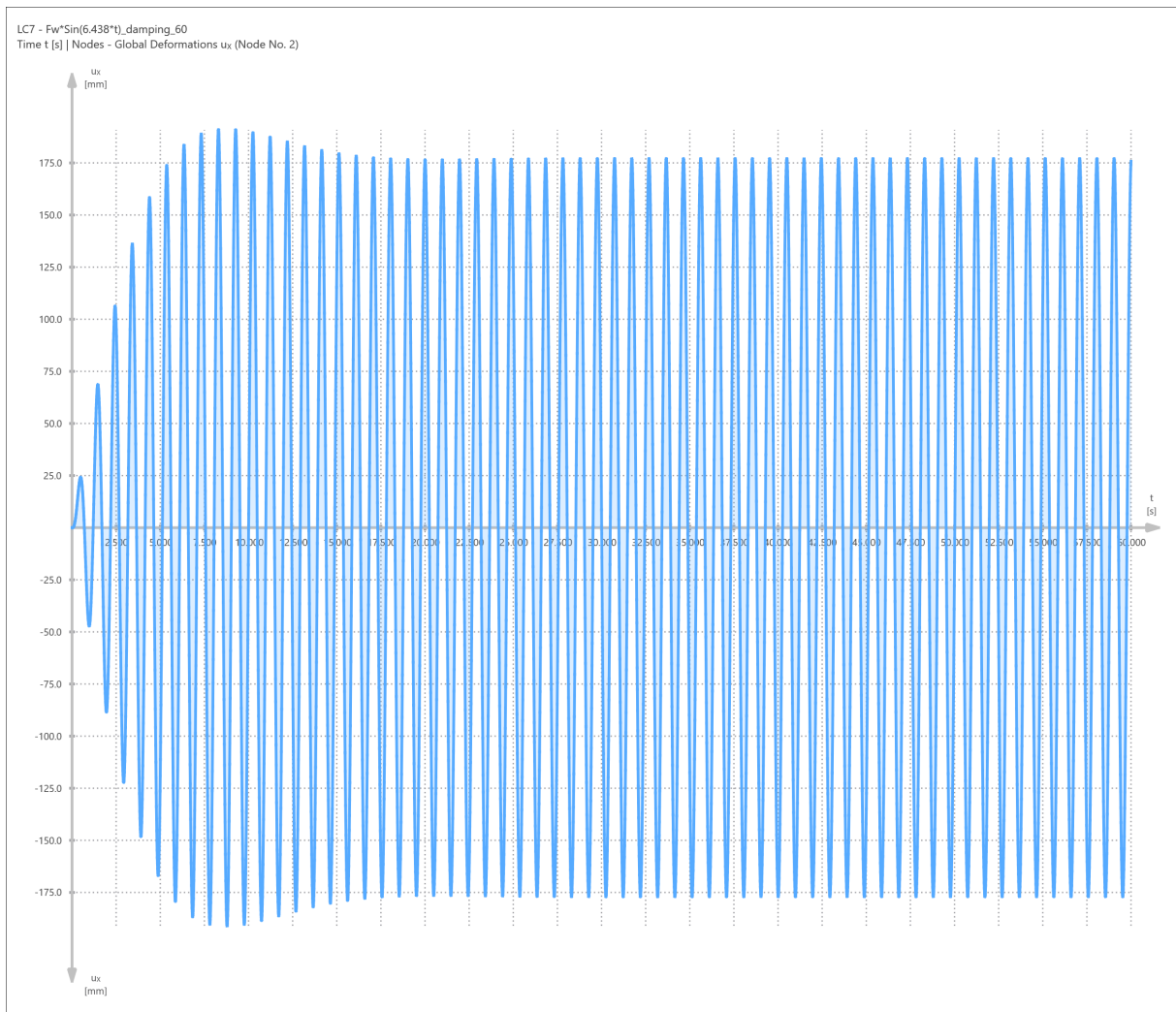
Фигура 27: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

Характерни особености:

- Отново наличие на „биене“, но малкото конструктивно затихване се опитва да го потуши
- По-ниски амплитуди на преместване в резонансните зони
- По-бързо стабилизиране на системата след възбуждане

Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

В този най-пълен модел и конструкцията, и виброгасителят (маса, пружина и гасител) притежават демпфиращи свойства. Тази постановка позволява пълна оценка на взаимодействието между демпфиращите елементи в двете подсистеми и тяхното съвместно влияние върху динамичното поведение на цялата система.



Фигура 28: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител със затихване

Характерни особености:

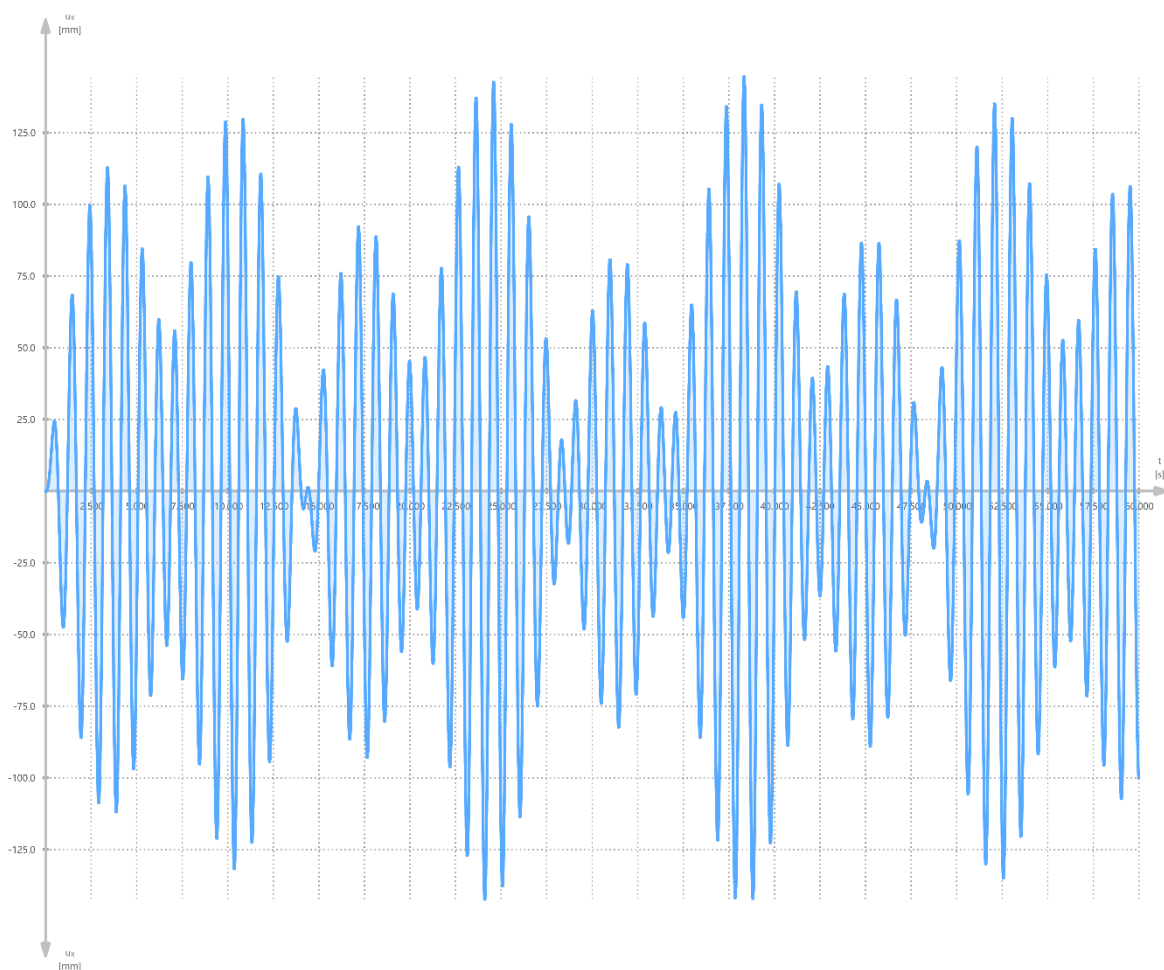
- Значително намаление на амплитудите на преместване
- Добавеното затихване от гасителя не позволява появата на „биене“
- Отсъствие на изразени резонансни пикове
- Стабилизиране на системата за кратко време

Вариант 2: Маса 2% от масата на конструкцията

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване

В този модифициран модел виброгасителят има маса, равна на 2% от масата на основната конструкция. Както и в базовия модел, и конструкцията, и виброгасителят (представен като маса и пружина) са без демпфиращи елементи. Това позволява да се оцени влияние на увеличената маса на виброгасителя върху динамичното поведение на системата.

LC6 - $F_w \sin(6.438 \cdot t)_{60}$
Time t [s] | Nodes - Global Deformations u_x (Node No. 2)



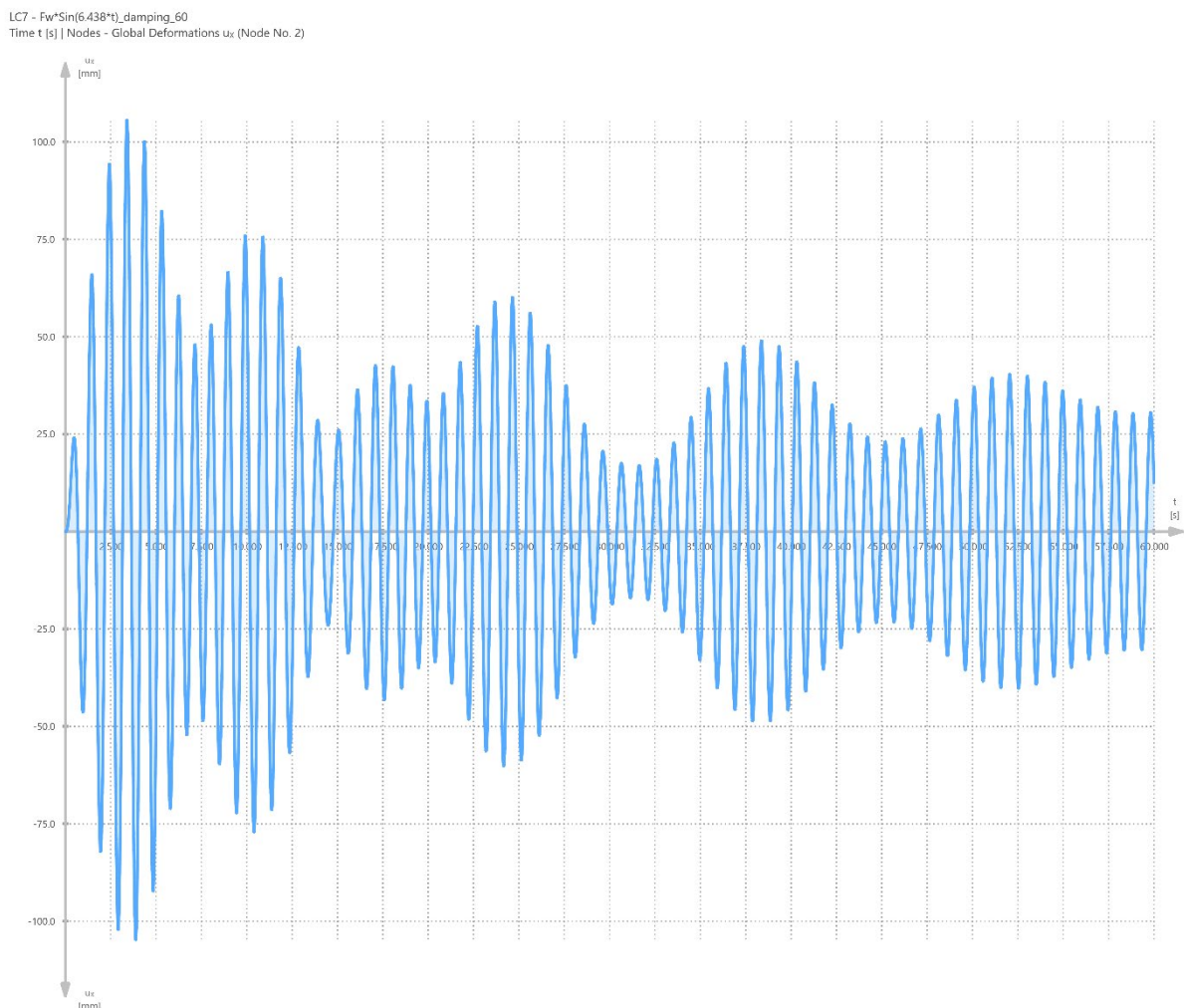
Фигура 29: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване и виброгасител без затихване

Характерни особености:

- Забелязва се явлението „биене“
- Промяна в честотния спектър на системата поради увеличената маса на виброгасителя

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване

В този модифициран модел виброгасителят има маса, равна на 2% от масата на основната конструкция, а в основната конструкция е добавено демпфиране. Виброгасителят остава без демпфиращи елементи и е представен само като маса и пружина. Тази конфигурация демонстрира комбинирания ефект от увеличената маса на виброгасителя и демпфирането в основната конструкция върху общото динамично поведение на системата.



Фигура 30: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване

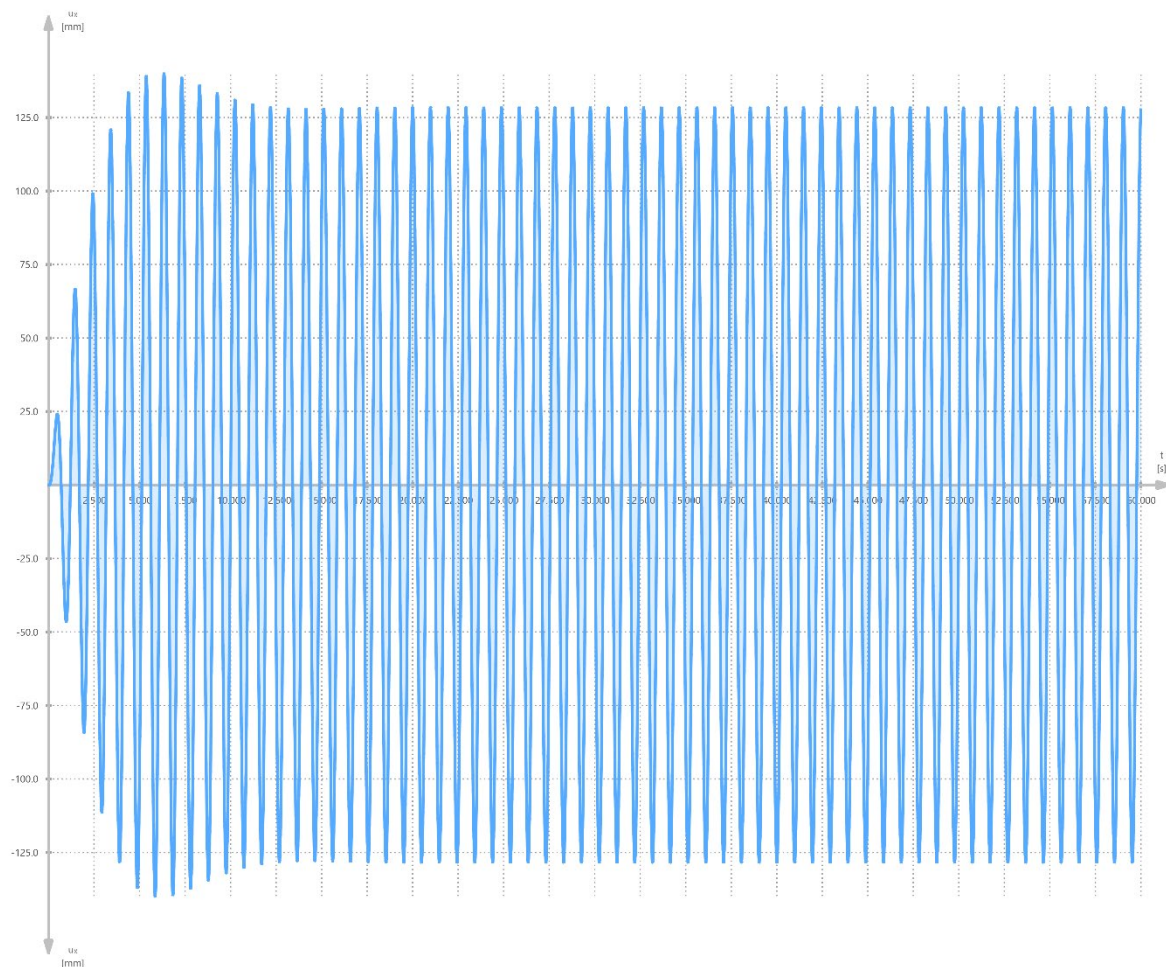
Характерни особености:

- Отново наличие на „биене“, но малкото конструктивно затихване се опитва да го потуши
- По-ниски амплитуди на преместване в резонансните зони
- По-бързо стабилизиране на системата след възбуждане

Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

В този най-пълен модел и основната конструкция, и виброгасителят (маса, пружина и демпфер) притежават демпфиращи свойства. Виброгасителят с маса 2% от конструкцията е моделиран като маса, свързана чрез пружина и демпфер, което представлява най-реалистичната конфигурация. Тази постановка позволява пълна оценка на взаимодействието между демпфиращите елементи в двете подсистеми и тяхното съвместно влияние върху динамичното поведение на цялата система.

LC7 - Fw*Sin(6.438*t)_damping_60
Time t [s] | Nodes - Global Deformations ux (Node No. 2)



Фигура 31: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител със затихване

Характерни особености:

- Добавеното затихване от гасителя не позволява появата на „биене“

- Значително намаление на амплитудите на преместване в сравнение с всички предходни конфигурации

6.1.3. Аналитично решение

Процедурата за аналитично решение следва същата методология за оразмеряване на масовия виброгасител, както в предходните раздели. Основната разлика се състои в начина на получаване на крайните резултати, които в този случай са продукт на решаването на система от свързани диференциални уравнения. Аналитичните решения позволяват по-лесно параметризиране на модела и възможност за оптимизация. За решаването на системата уравнения е разработена програма в системата за компютърна алгебра Wolfram Mathematica.

Системата се моделира чрез двойка диференциални уравнения, описващи законите за движение на основната конструкция и масовия виброгасител. Тези уравнения отчитат:

- Взаимодействието между двете подсистеми
- Външните динамични въздействия
- Параметрите на виброгасителя и основната конструкция (маса, коравина и демпфиране)

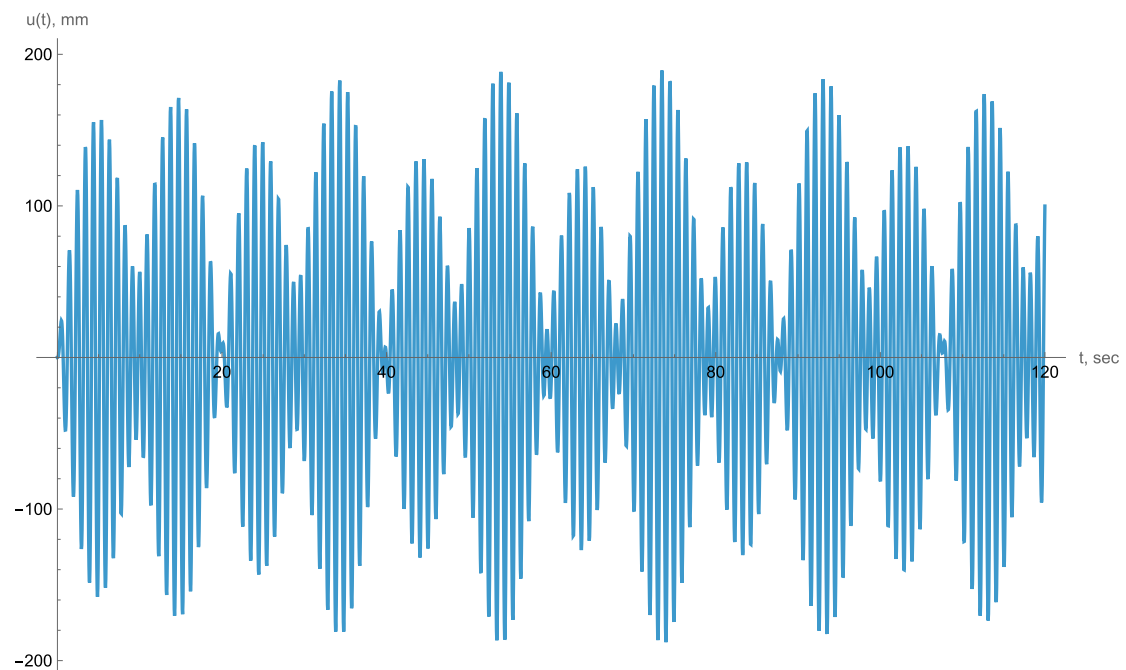
Чрез решаването на тази система от уравнения се получават зависимости като функции във времето за преместванията, скоростите и ускоренията на двете подсистеми. Резултатите се визуализират под форма на графики, които позволяват детайлен анализ на динамичното поведение на системата и оценка на ефективността на виброгасителя.

$$\begin{cases} m * u''[t] + (c + c_d) * u'[t] - c_d * u'_d[t] + (k + k_d) * u[t] - k_d * u_d[t] = F * \sin[\Omega * t] \\ m_d * u''_d[t] - c_d * u'[t] + c_d * u'_d[t] - k_d * u_d[t] = 0 \end{cases}$$

$$\Omega = \omega$$

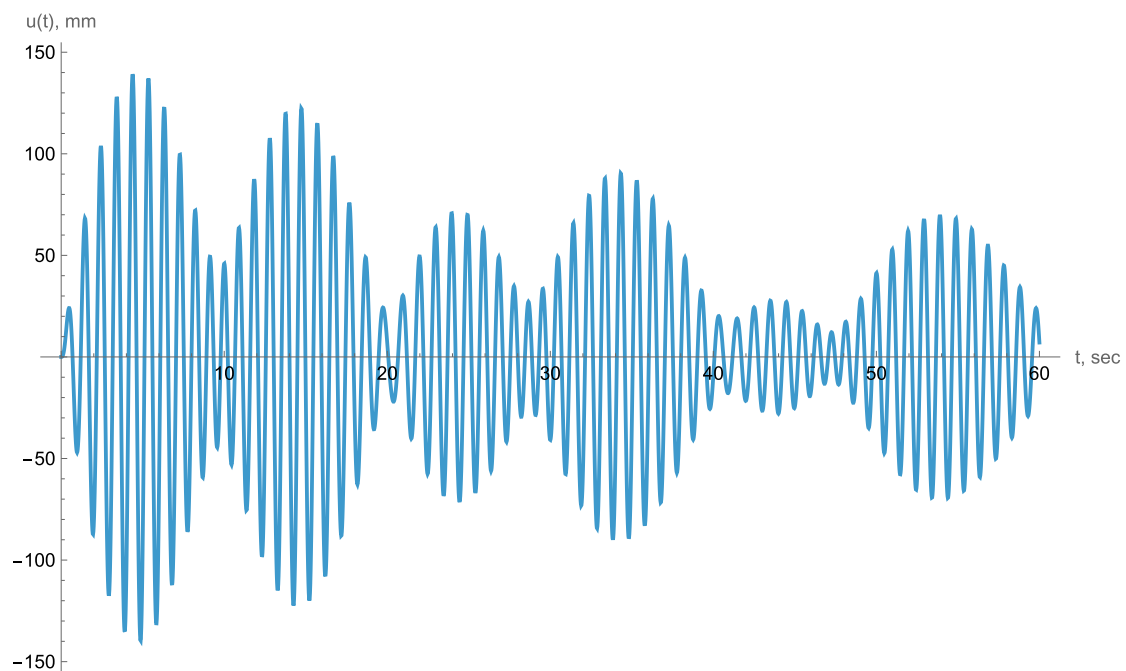
Вариант 1: Маса 1% от масата на конструкцията

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване



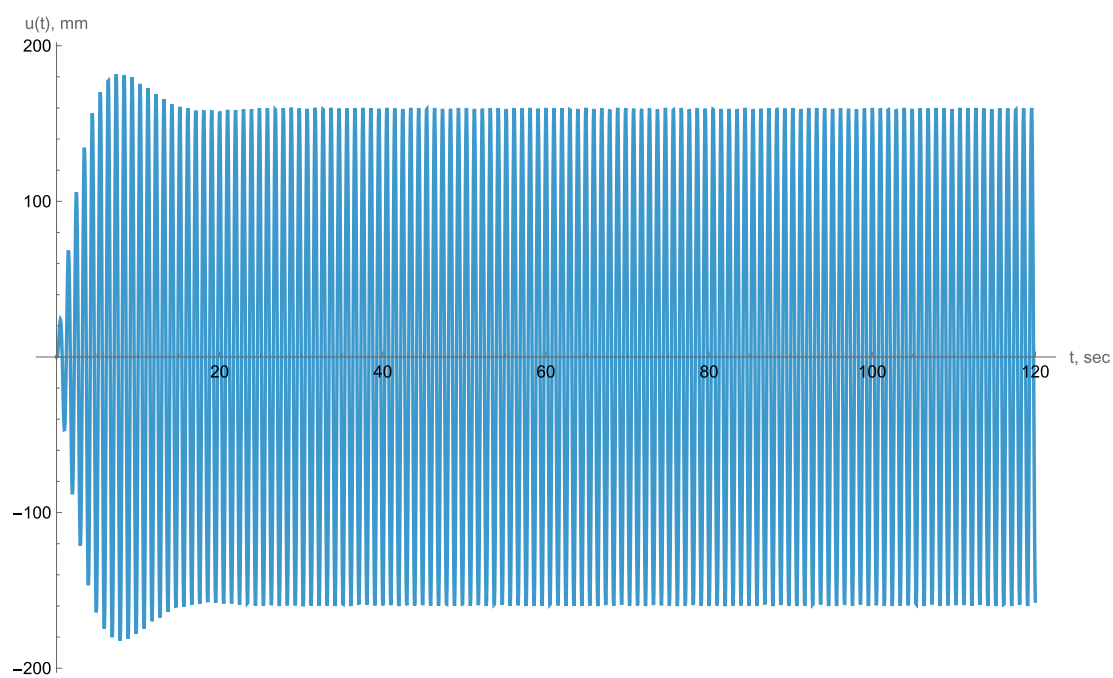
Фигура 32: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване и виброгасител без затихване

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване



Фигура 33: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

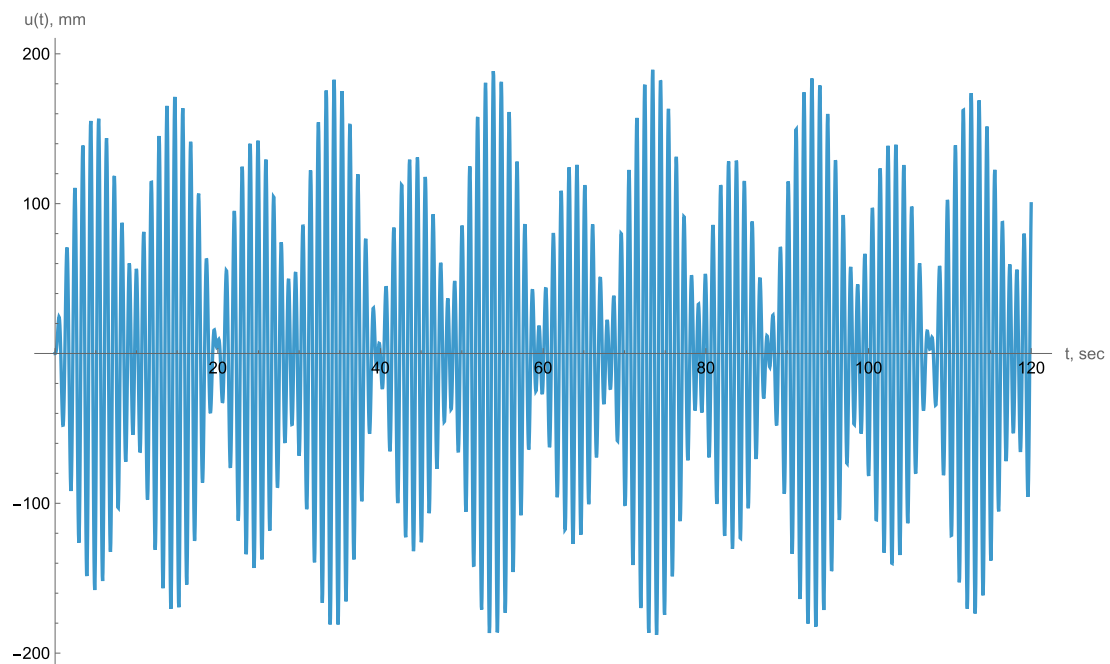
Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване



Фигура 34: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител със затихване

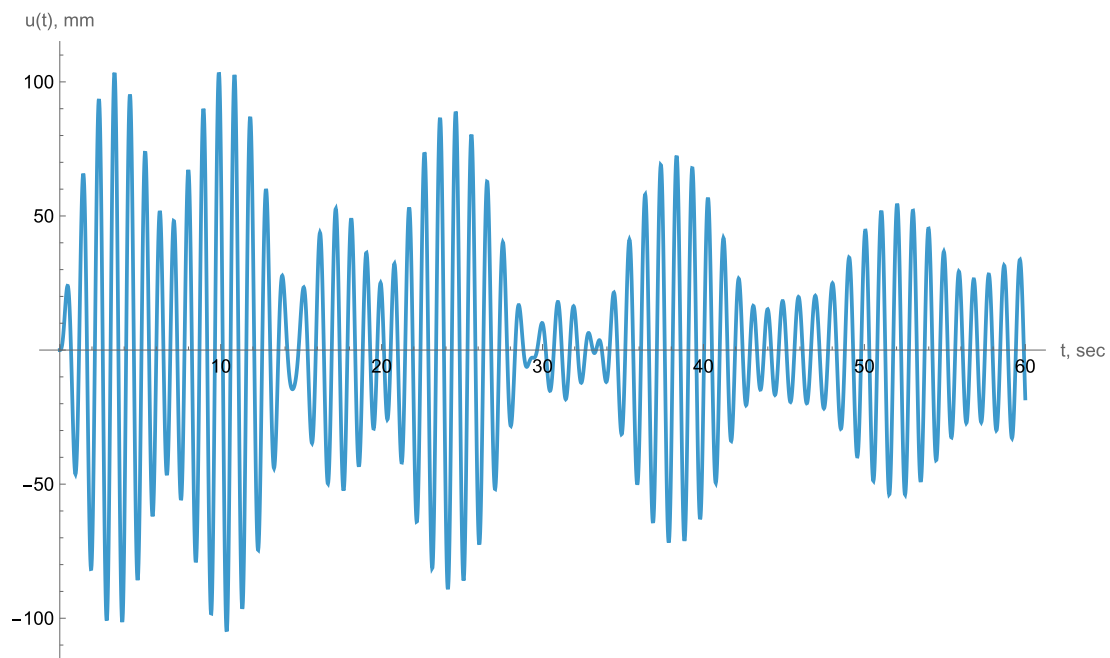
Вариант 2: Маса 2% от масата на конструкцията

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване



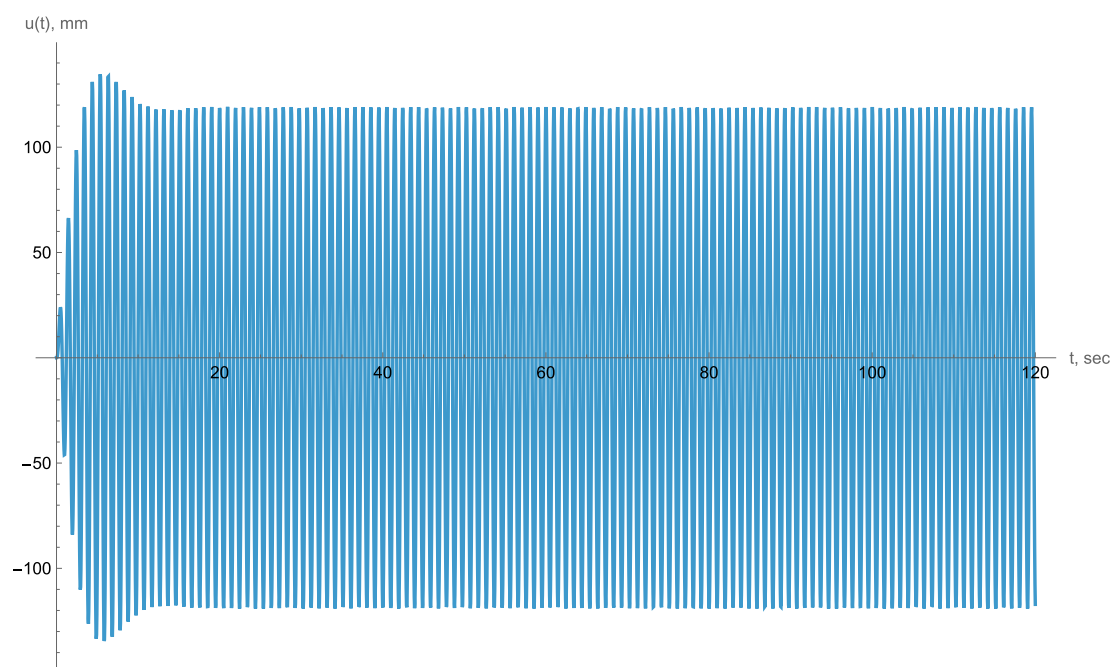
Фигура 35: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване и виброгасител без затихване

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване



Фигура 36: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

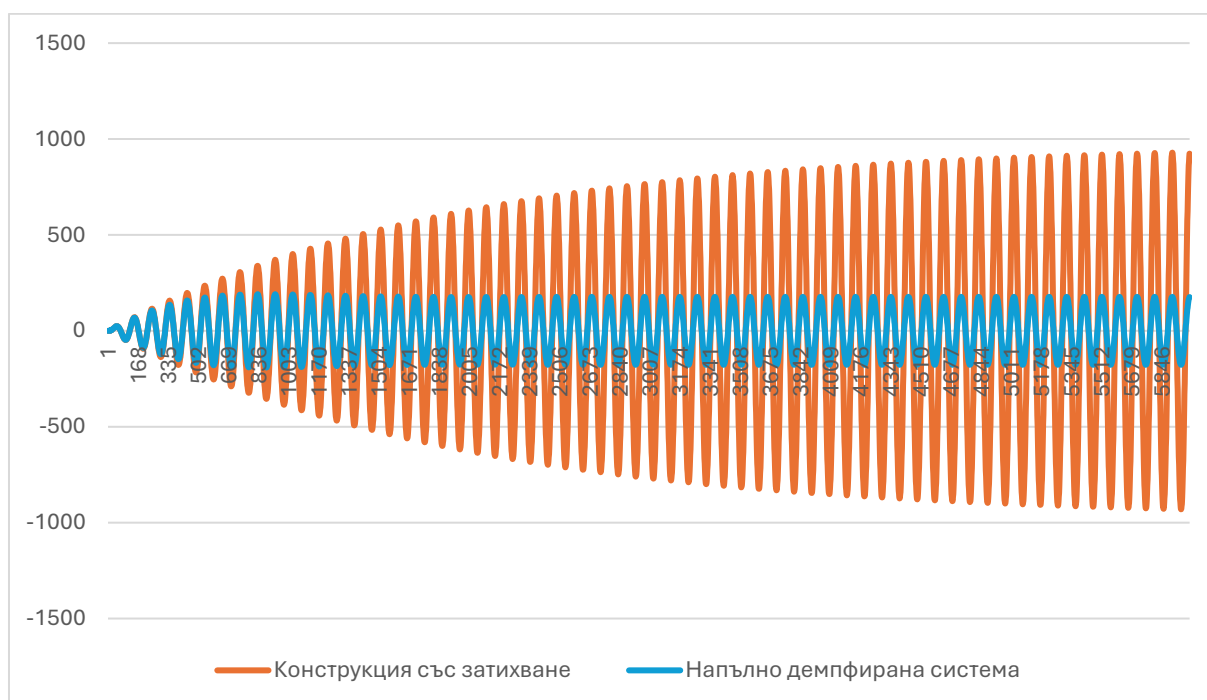


Фигура 37: В2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител със затихване

6.1.4. Анализ на резултатите

Вариант 1: Маса 1% от масата на конструкцията

В този раздел се представя сравнителен анализ на динамичното поведение на системата "конструкция-виброгасител". С тази цел са наложени диаграмите на преместванията на върха на конструкцията с и без масов виброгасител, което позволява визуална оценка на влиянието на демпфирането върху вибрационните характеристики на системата (Фигура 38).



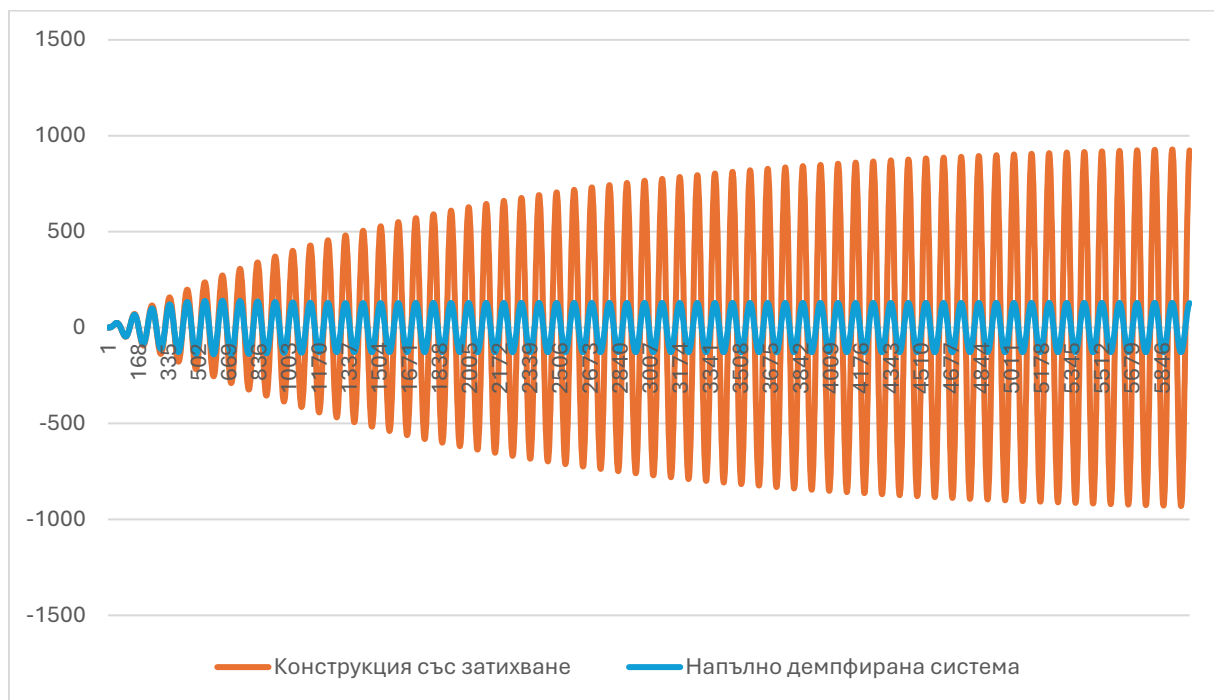
Фигура 38: В1. Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията без виброгасител и с настроен виброгасител

При налагането на диаграмите на преместванията за конструкцията без затихване (оранжев) и пълно демпфирана система (синя линия) се наблюдават драстични различия в динамичното поведение:

- Недемпфираната система демонстрира значително по-високи амплитуди на преместване (до 4-5 пъти по-големи)
- При пълното демпфиране амплитудите бързо намаляват и остават в приемливи граници

Вариант 2: Маса 2% от масата на конструкцията

В този раздел се представя детайлен сравнителен анализ на динамичното поведение на системата "конструкция-виброгасител", когато масата на виброгасителя съставлява 2% от масата на основната конструкция. За целите на анализа са наложени и сравнени диаграмите на преместванията за конструкция без виброгасител и конструкция с настроен виброгасител (Фигура 39).



Фигура 39. В2. Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията без виброгасител и с настроен виброгасител

При налагането на диаграмите на преместванията за недемпфирана система (оранжева линия) и пълно демпфирана система с виброгасител 2% от масата на конструкцията (синя линия) се наблюдават значителни разлики в динамичното поведение, които са по-изразени в сравнение с системата с 1% виброгасител:

- При пълното демпфиране с 2% виброгасител амплитудите намаляват още по-бързо и остават в значително по-тясни граници от тези при системата с 1% виброгасител
- Недемпфираната система изисква значително повече време за затихване на вибрациите

6.2. Флуиден виброгасител (Sun, 1992)

6.2.1. Изчисления за оразмеряване на флуидния виброгасител

Разглеждани са два варианта за флуиден виброгасител:

- Вариант 1: Система с 16 резервоара
- Вариант 2: Система с 40 резервоара

Входни данни:

$k = 1799000$ - коравина на конструкцията

$m = 43400$ kg - маса на конструкцията

$g = 9.81$ m/s² - земно ускорение

Дължина на резервоара

$$L = 0.5m$$

Честота на флуидния виброгасител

$$f_w = 0.9 \cdot f$$

Честота на флуидния виброгасител

$$\omega_w = 2 \cdot \pi \cdot f_w$$

Височина на вълната

$$f_w = \frac{1}{2 \cdot \pi} * \sqrt{\frac{\pi * g}{L} * \tanh\left(\frac{\pi * h_w}{L}\right)} \rightarrow h_w = 0.09722m$$

$$h_w = 0.085m$$

Оптимален коефициент на затихване на флуидния виброгасител

$\eta = 0$ максимална височина на течността

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ - плътност на водата

$S = 1$ - коефициент на замърсяване на повърхността

$\nu = 1 \cdot 10^{-6} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ - кинематичен вискозитет

$b = 0.5 \text{ m}$ - широчина на резервоара

$\Omega = \omega$

$$\xi_{w1} = \frac{1}{\eta + h_w} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{\Omega \cdot \nu}}{2 \cdot \omega_w} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_w}{b} + S \right)$$

$$\xi_{opt} = 0.06$$

Брой резервоари

$$n_{cells} = \frac{\xi_{opt}}{\xi_{w1}} = 14.08 \text{ бр}$$

$$n_{cells,1} = 16 \text{ бр}$$

$$n_{cells,2} = 40 \text{ бр}$$

$$\xi_d = n_{cells} \cdot \xi_{w1}$$

Маса на масов виброгасител

$$m_{w1} = \frac{8 \cdot \rho \cdot b \cdot L^2}{\pi^3} \cdot \tanh\left(\frac{\pi \cdot h_w}{L}\right) \text{ kg} - \text{маса на един резервоар}$$

$$m_d = n_{cells} \cdot m_{w1} \text{ kg} - \text{маса на всички резервоари}$$

Коравина на масовия виброгасител

$$k_{w1} = \frac{8 \cdot \rho \cdot b \cdot L \cdot g}{\pi^2} \cdot \tanh\left(\frac{\pi \cdot h_w}{L}\right)^2 \text{ N/m} - \text{коравина за един резервоар}$$

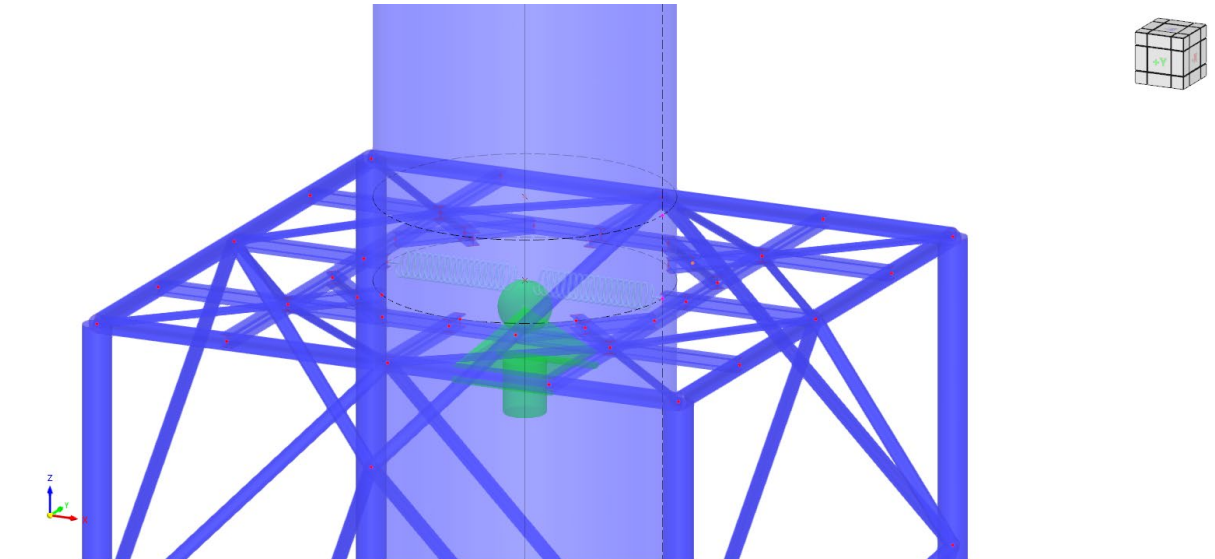
$$k_d = n_{cells} \cdot k_{w1} \text{ N/m} - \text{коравина за всички резервоари}$$

Коефициент на дампфиране на водния виброгасител

$$c_d = 2 \cdot \xi_d \cdot \omega_w \cdot m_d$$

6.2.2. Числено моделиране в RFEM

В този раздел се описва процесът на създаване и анализ на компютърни модели в програмата RFEM за различни конфигурации на системата "конструкция-флуиден виброгасител". Флуидният виброгасител (Tuned Liquid Damper - TLD) е моделиран като еквивалентна механична система, състояща се от маса и пружина, с параметри, определени според характеристиките на флуидните резервоари.



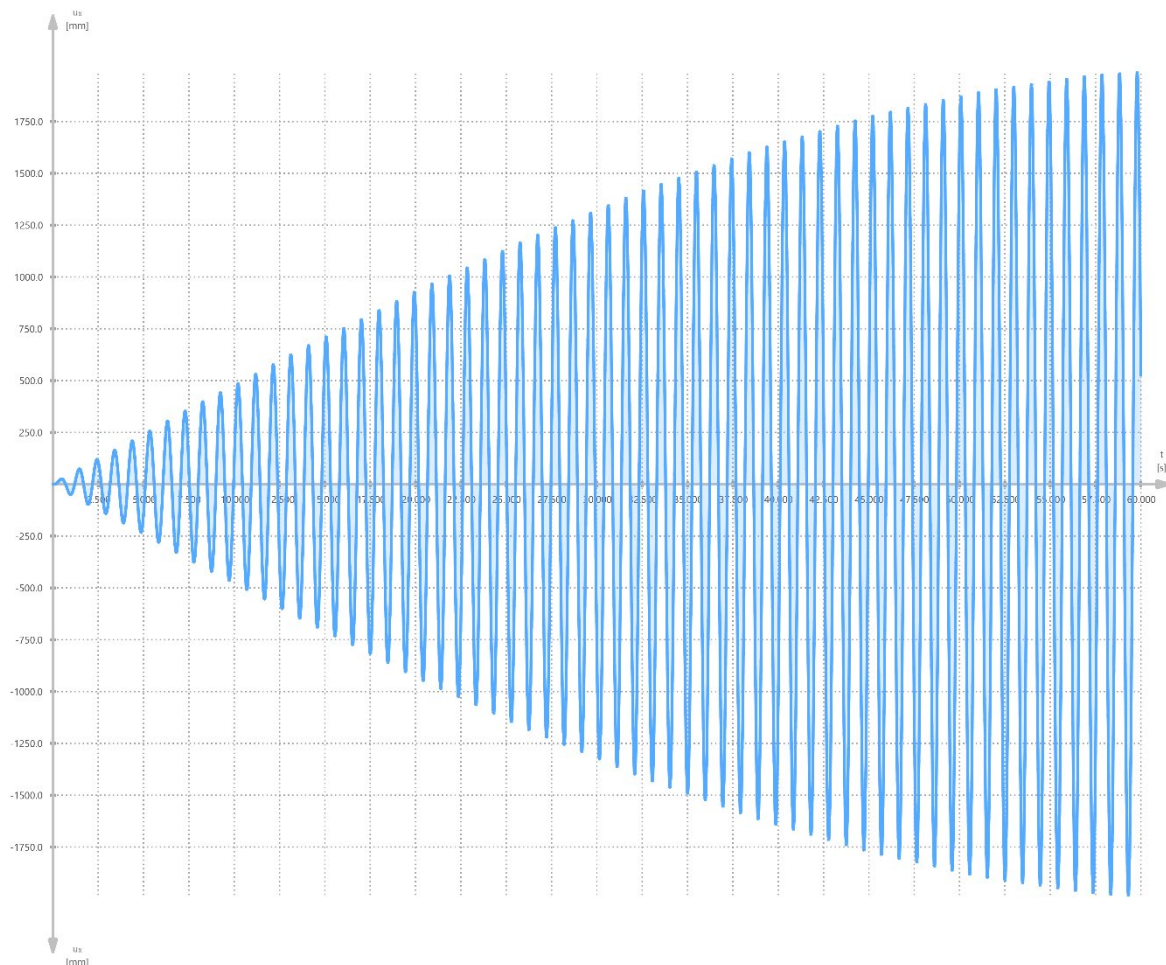
Фигура 40: Модел на флуиден виброгасител в RFEM

Вариант 1: Система с 16 резервоара

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване

В този базов модел и основната конструкция, и флуидния виброгасител (моделиран чрез еквивалентна маса и пружина) не притежават специални демпфиращи елементи. Тази конфигурация позволява да се оцени чистото влияние на масово-инерционните характеристики на системата върху нейното динамично поведение, без въздействието на допълнителни демпфиращи фактори.

LC6 - Fw*Sin(6.438*t)_60
Time t [s] | Nodes - Global Deformations u_x (Node No. 2)



Фигура 41: B1. Премествания на върха на комина в модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване

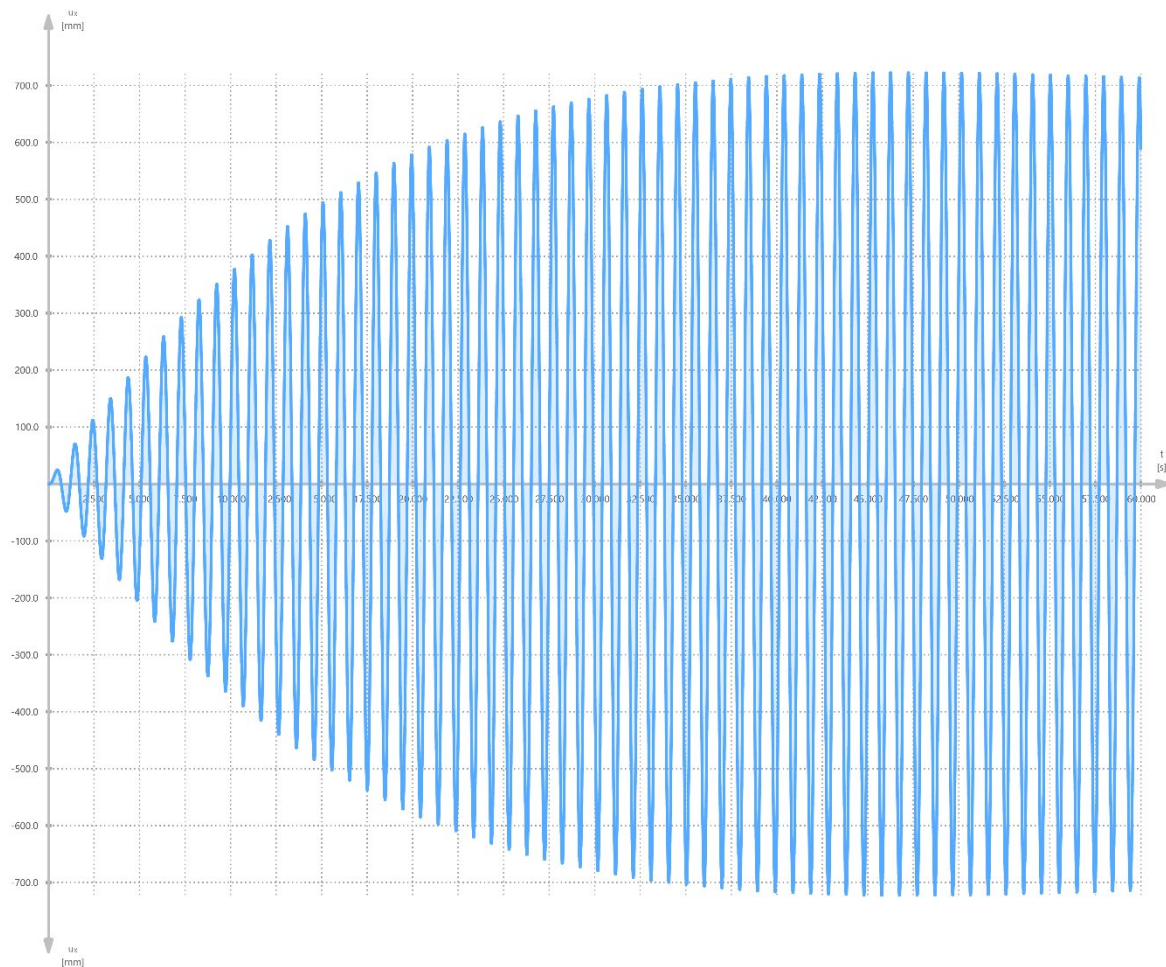
Характерни особености:

- Високи амплитуди на преместване в резонансните зони
- Липса на ефективно потискане на вибрациите
- Продължително време за стабилизиране след динамично въздействие

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване

В този вариант на системата е добавено демпфиране само в основната конструкция, докато флуидният виброгасител (моделиран като еквивалентна маса) остава без специални демпфиращи елементи. Тази конфигурация позволява да се проучи влиянието на демпфирането в основната конструкция върху общото динамично поведение на системата, включваща флуиден виброгасител.

LC7 - Fw*Sin(6.438*t)_damping_60
Time t [s] | Nodes - Global Deformations u_x (Node No. 2)



Фигура 42: В1. Премещения на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

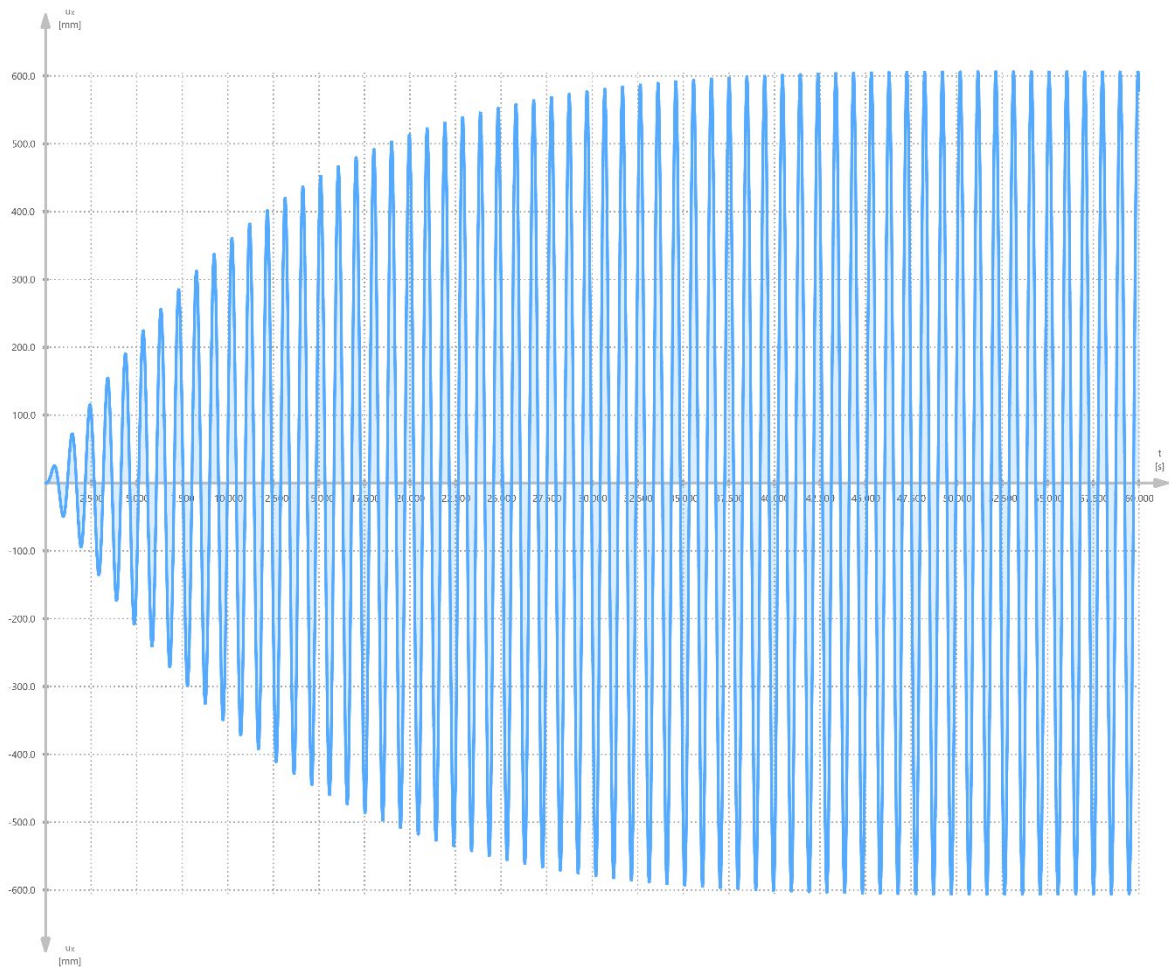
Характерни особености:

- Намалено време за затихване
- По-добро потискане на вибрациите в сравнение с базовия модел

Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

В този най-комплексен модел и основната конструкция, и флуидният виброгасител притежават демпфиращи свойства. Виброгасителят е моделиран като система от маса, пружина и демпфер, което представлява най-реалистичната конфигурация за флуиден виброгасител. Тази постановка позволява пълна оценка на взаимодействието между демпфиращите елементи в двете подсистеми и тяхното съвместно влияние върху динамичното поведение на цялата система.

LC7 - Fw*Sin(6.438*t)_damping_60
Time t [s] | Nodes - Global Deformations u_x (Node No. 2)



Фигура 43: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

Характерни особености:

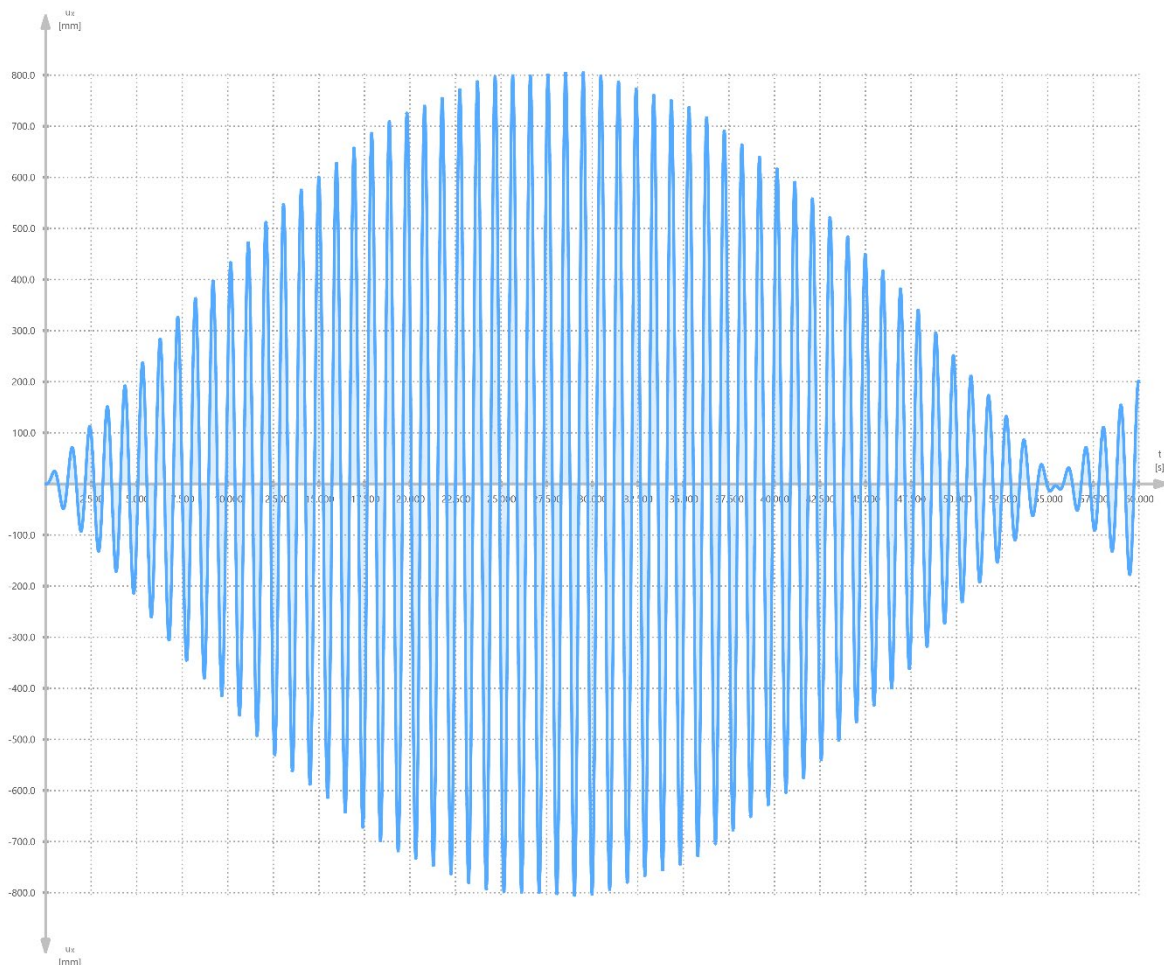
- Значително намаление на амплитудите
- Отсъствие на изразени резонансни пикове

Вариант 2: Система с 40 резервоара

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване

В този базов модел и основната конструкция, и флуидният виброгасител (моделиран чрез еквивалентна маса и пружина) не притежават специални демпфиращи елементи. Тази конфигурация позволява да се оцени чистото влияние на масово-инерционните характеристики на системата върху нейното динамично поведение, без въздействието на допълнителни демпфиращи фактори.

LC6 - Fw*Sin(6.438*t)_60
Time t [s] | Nodes - Global Deformations u_x (Node No. 2)



Фигура 44: В2. Премествания на върха на комина в модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване

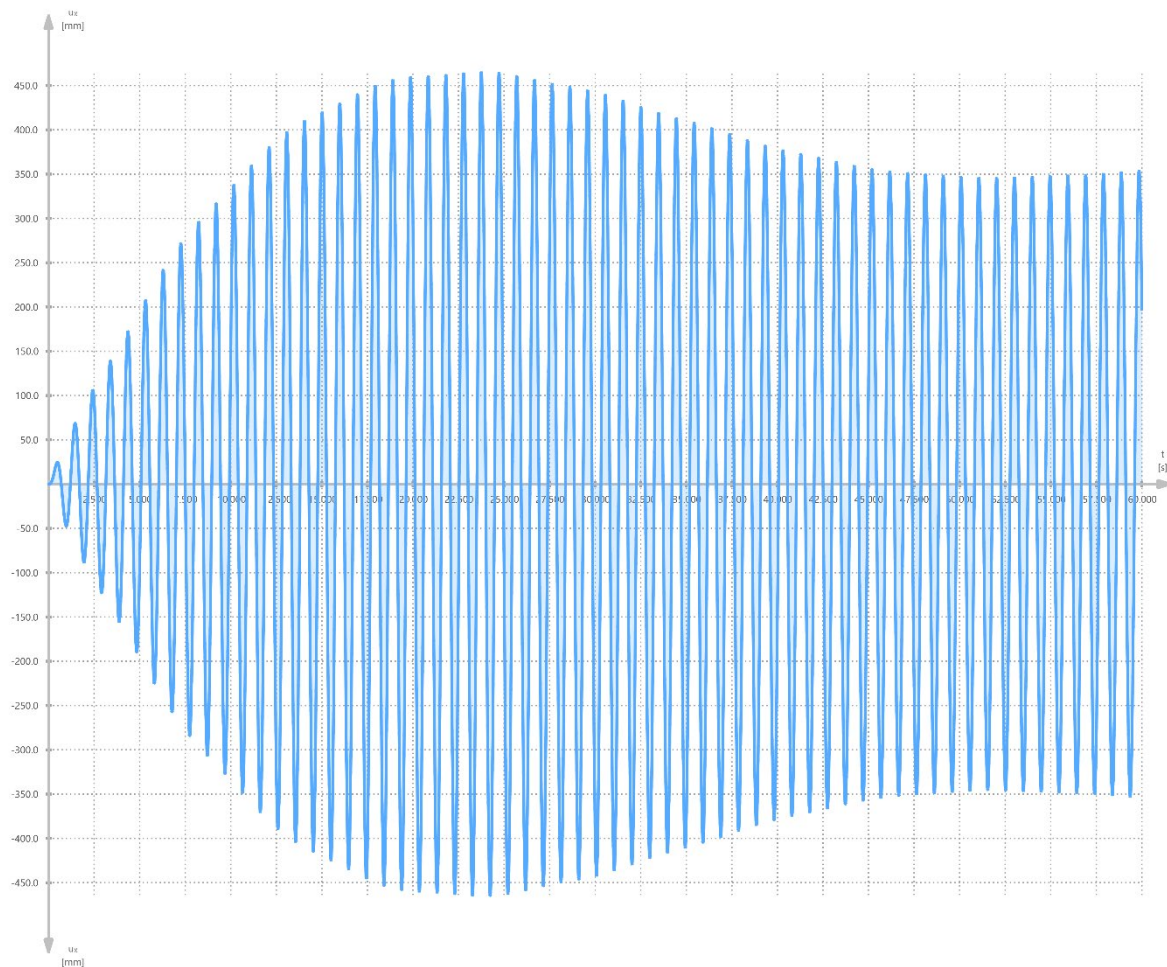
Характерни особености:

- Наблюдава се изразено явление на „биене“
- Бавно затихване на вибрациите след преустановяване на възбуждането
- Високи амплитуди на преместване в резонансните зони

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване

В този вариант на системата е добавено демпфиране само в основната конструкция, докато флуидният виброгасител (моделиран като еквивалентна маса) остава без специални демпфиращи елементи. Тази конфигурация позволява да се проучи влиянието на демпфирането в основната конструкция върху общото динамично поведение на системата, включваща флуиден виброгасител.

LC7 - FwSin(6.438*t)_damping_60
Time t [s] | Nodes - Global Deformations u_x (Node No. 2)



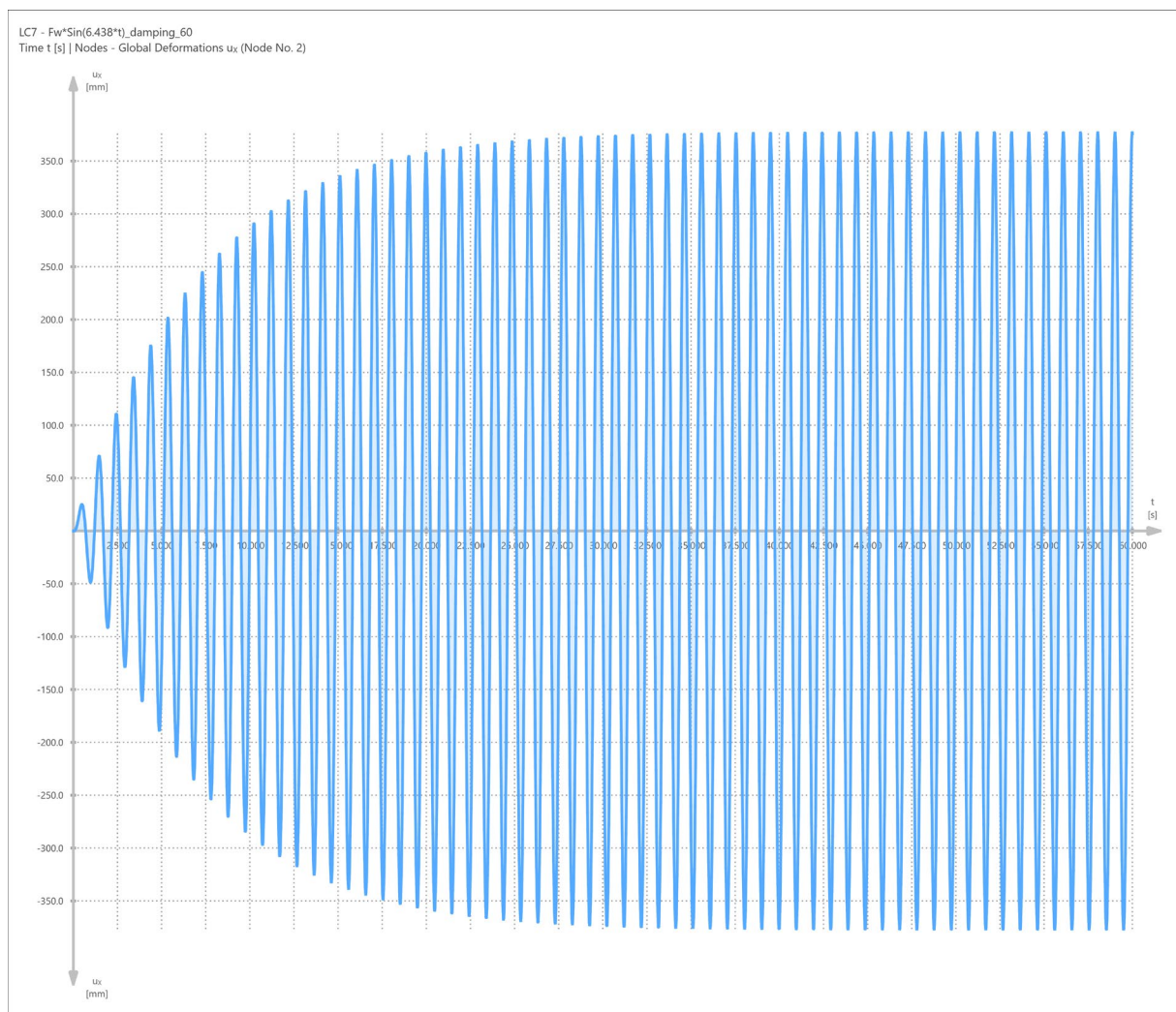
Фигура 45: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

Характерни особености:

- Системата демонстрира по-добри динамични характеристики в сравнение с пълно недемпфирания вариант
- По-бързо стабилизиране на системата след възбуждане

Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

В този най-комплексен модел и основната конструкция, и флуидният виброгасител притежават демпфиращи свойства. Виброгасителят е моделиран като система от маса, пружина и демпфер, което представлява най-реалистичната конфигурация за флуиден виброгасител. Тази постановка позволява пълна оценка на взаимодействието между демпфиращите елементи в двете подсистеми и тяхното съвместно влияние върху динамичното поведение на цялата система.



Фигура 46: В2. Премествания на върха на комина в модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

Характерни особености:

- Значително намаление на амплитудите на преместване
- Бързо затихване на вибрациите
- Отсъствие на изразени резонансни пикове
- Стабилизиране на системата за кратко време

6.2.3. Аналитично решение

Подходът за аналитично решение на системата с флуиден виброгасител следва същата методология като при масовия виброгасител. Основната разлика е в параметрите на системата, които се определят според характеристиките на флуидния демпфер.

Системата се моделира чрез свързани диференциални уравнения, описващи движението на основната конструкция и еквивалентната маса на флуидния виброгасител. Уравненията отчитат:

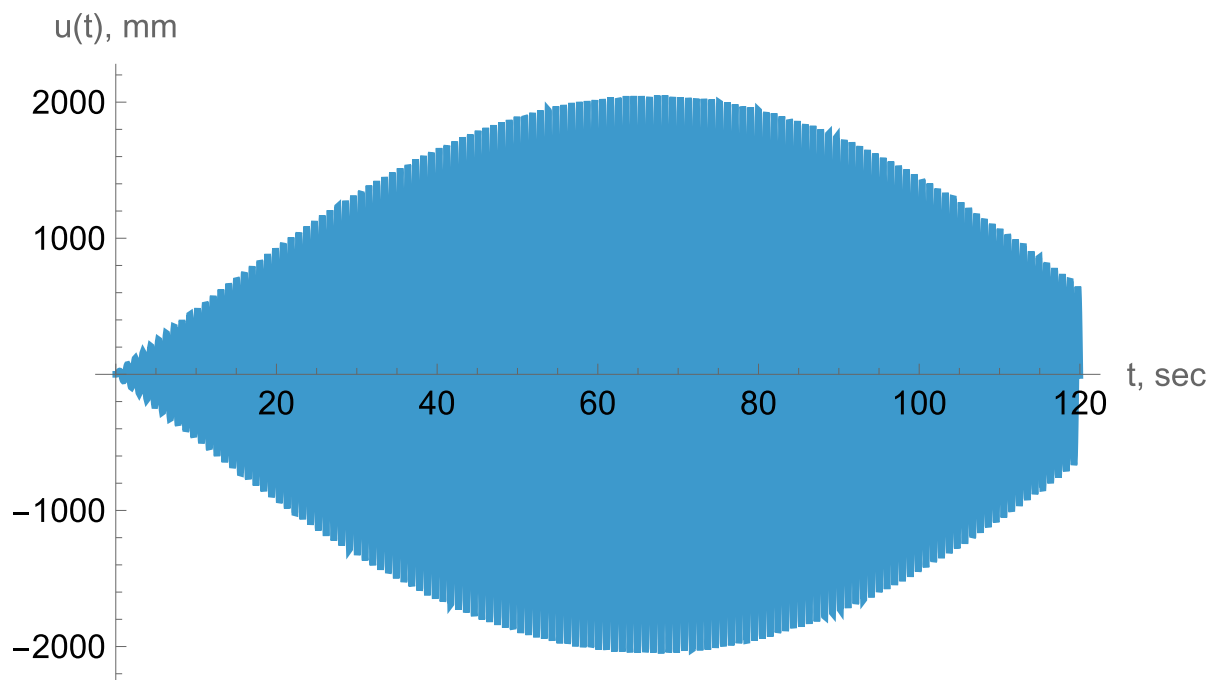
- Взаимодействието между конструкцията и флуидния демпфер
- Външните динамични въздействия
- Параметрите на системата (маса, еквивалентна коравина и демпфиране)

Решаването на системата уравнения дава временни зависимости за преместванията, скоростите и ускоренията. Резултатите се визуализират графично за анализ на динамичното поведение и оценка на ефективността на флуидния виброгасител.

$$\begin{cases} m * u''[t] + (c + c_d) * u'[t] - c_d * u'_d[t] + (k + k_d) * u[t] - k_d * u_d[t] = F * \sin[\Omega * t] \\ m_d * u''_d[t] - c_d * u'[t] + c_d * u'_d[t] - k_d * u_d[t] = 0 \end{cases}$$
$$\Omega = \omega$$

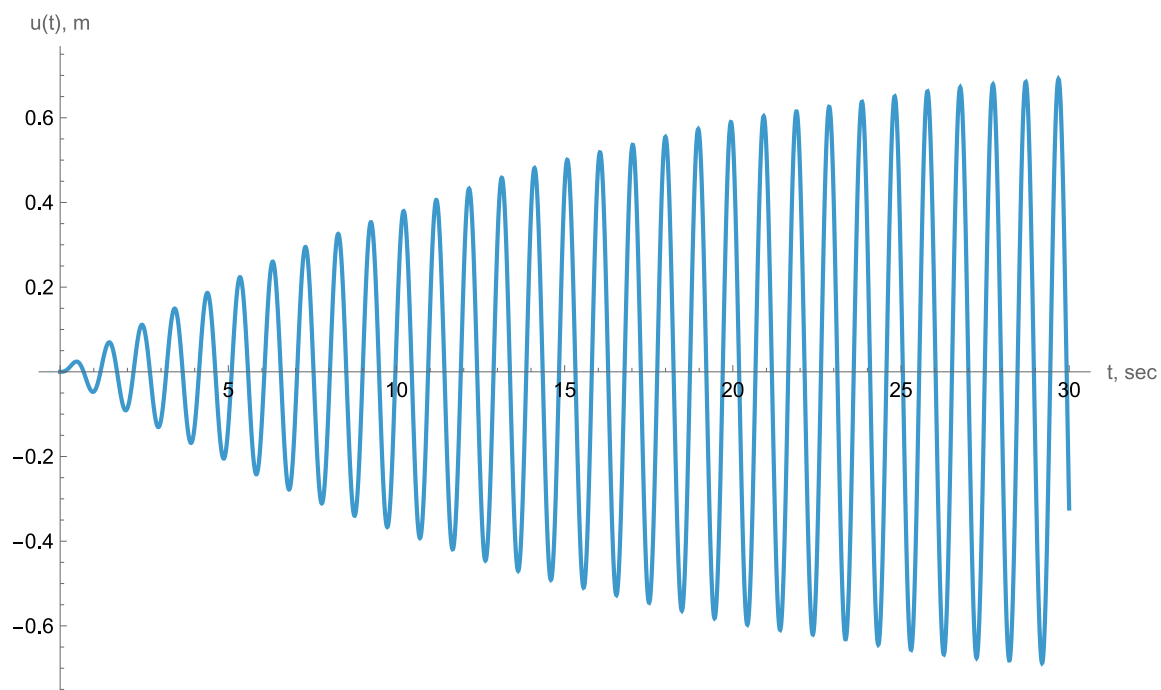
Вариант 1: Система с 16 резервоара

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване



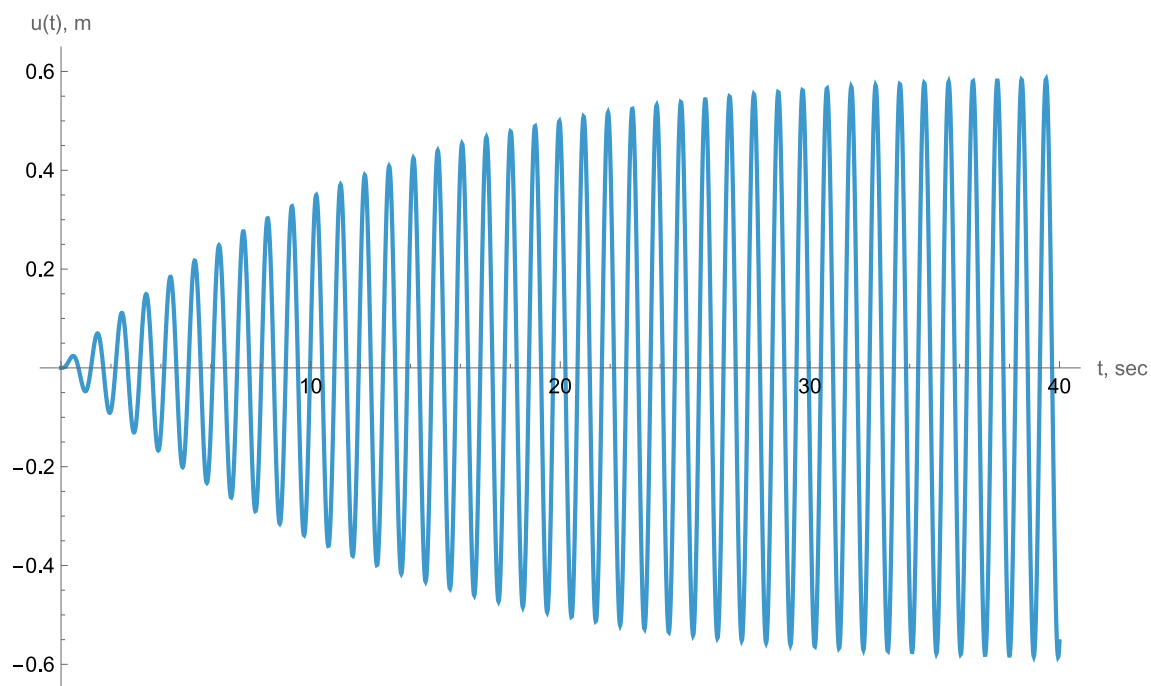
Фигура 47: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване и виброгасител без затихване

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване



Фигура 48: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

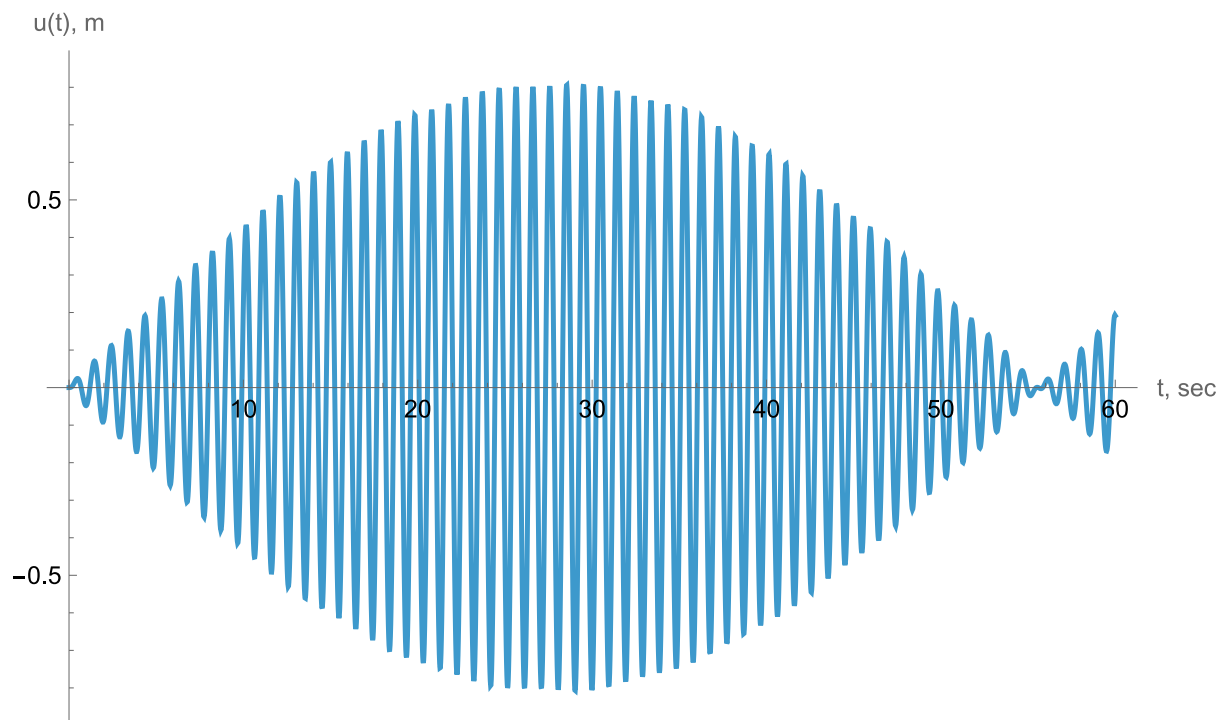
Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване



Фигура 49: В1. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител със затихване

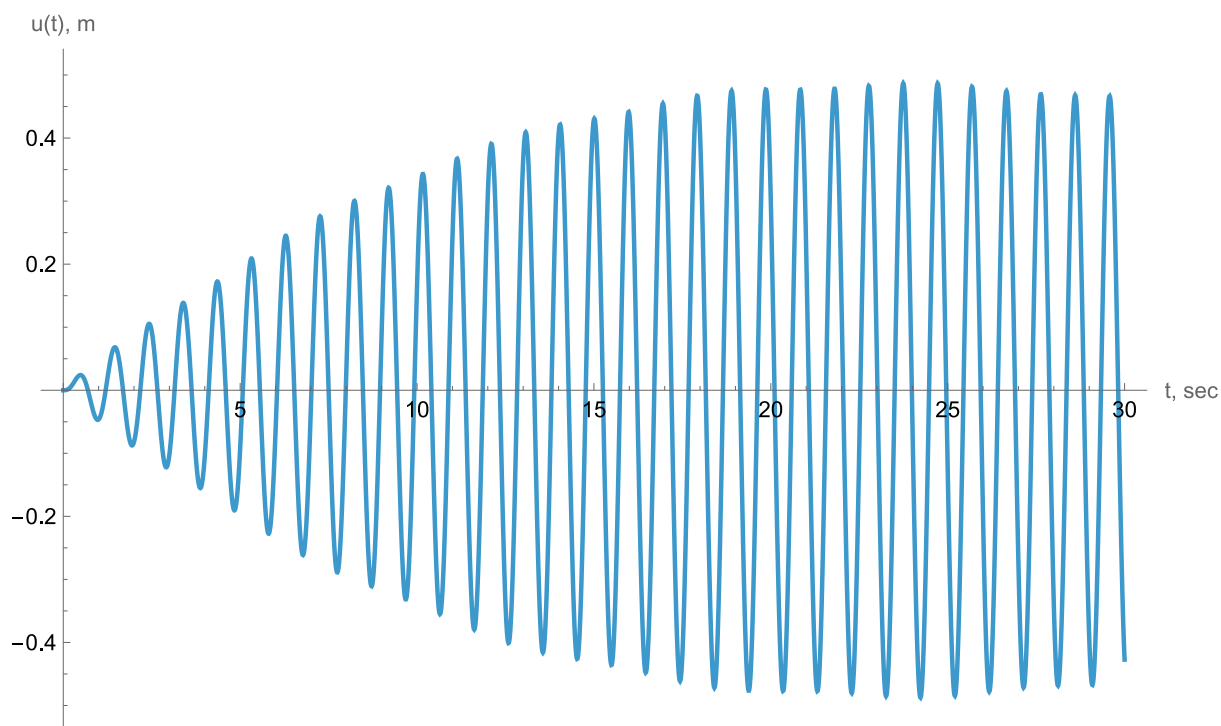
Вариант 2: Система с 40 резервоара

Модел на конструкция без затихване и виброгасител без затихване



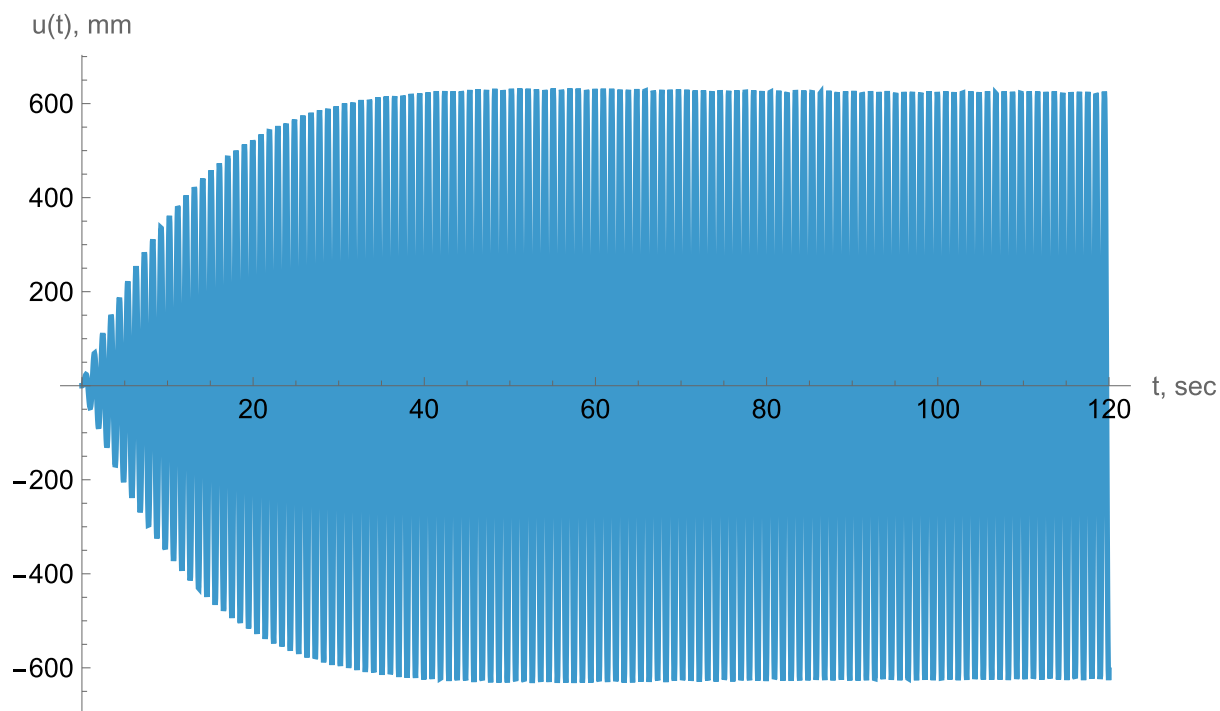
Фигура 50: В2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията без затихване и виброгасител без затихване

Модел на конструкция със затихване и виброгасител без затихване



Фигура 51: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител без затихване

Модел на конструкция със затихване и виброгасител със затихване

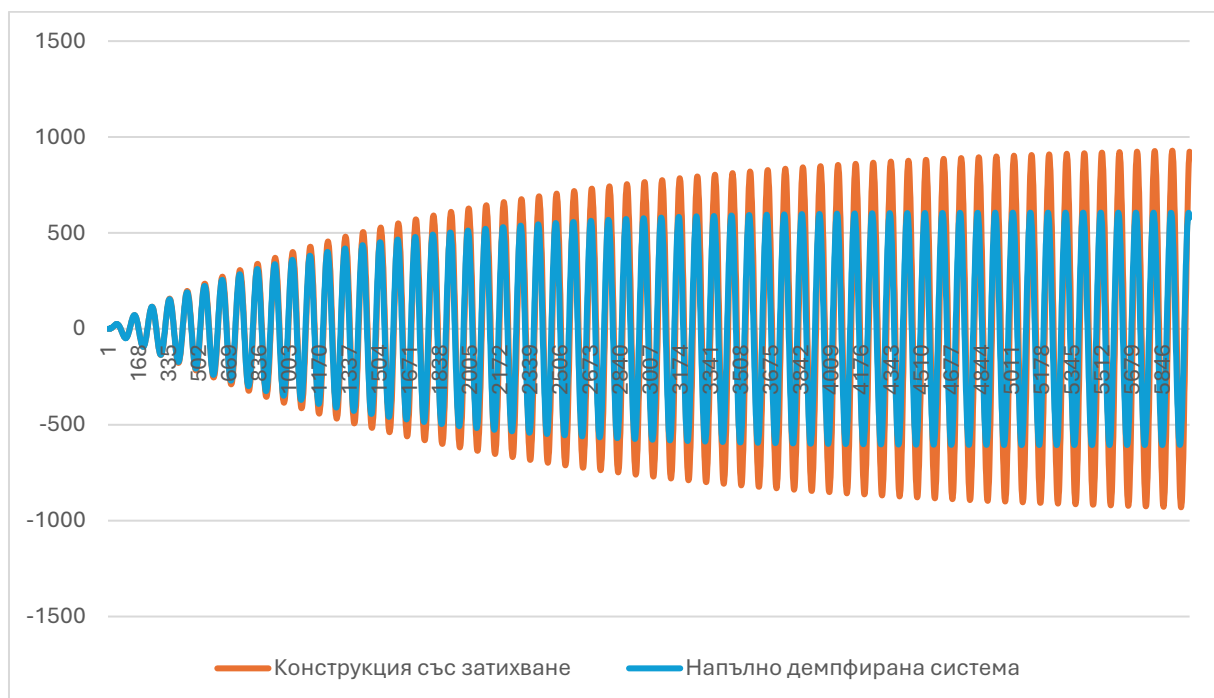


Фигура 52: B2. Премествания на върха на комина в модел на конструкцията със затихване и виброгасител със затихване

6.2.4. Анализ на резултатите

Вариант 1: Система с 16 резервоара

В този раздел се представя сравнителен анализ на динамичното поведение на системата "конструкция-виброгасител". С тази цел са наложени диаграмите на преместванията на върха на конструкцията с и без флуиден виброгасител, което позволява визуална оценка на влиянието на демпфирането върху вибрационните характеристики на системата (**Error! Reference source not found.**).



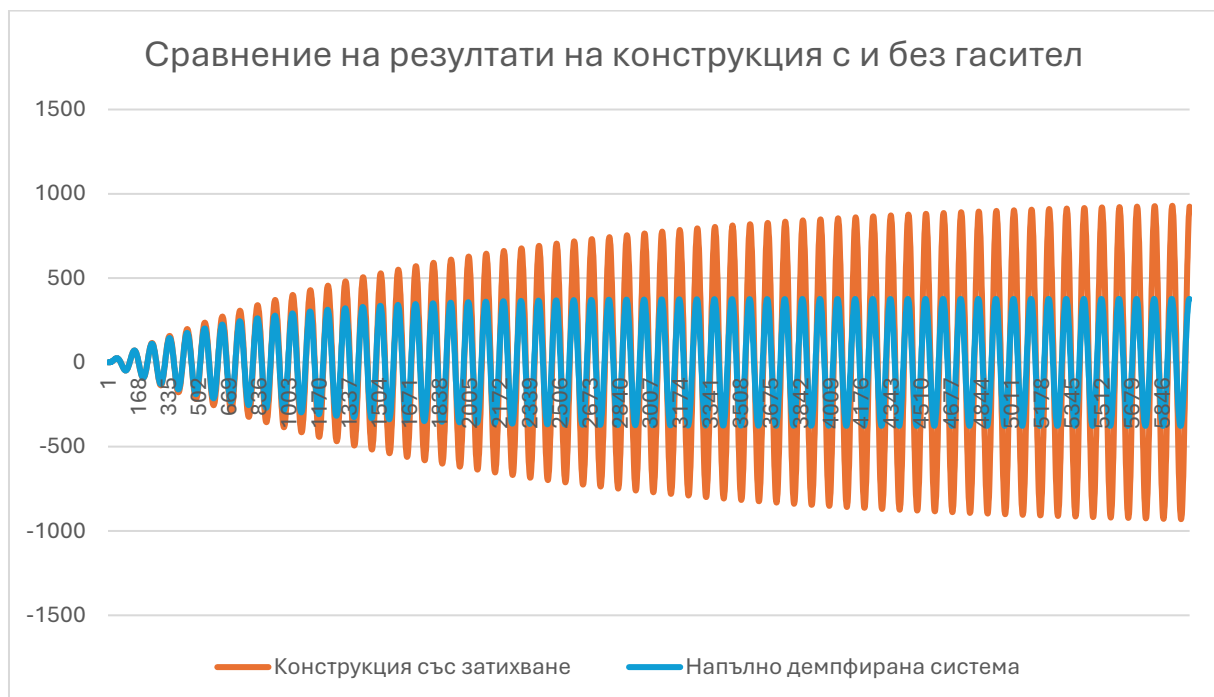
Фигура 53: В1. Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията без виброгасител и с настроен виброгасител

При налагането на диаграмите на преместванията за конструкцията без затихване (оранжев) и пълно демпфирана система (синя линия) се наблюдават драстични различия в динамичното поведение:

- Недемпфираната система демонстрира значително по-високи амплитуди на преместване

Вариант 2: Система с 40 резервоара

В този раздел се представя детайлен сравнителен анализ на динамичното поведение на системата "конструкция-виброгасител", когато се увеличава броят на разположените резервоари на 40. За целите на анализа са наложени и сравнени диаграмите на преместванията за конструкция без виброгасител и конструкция с настроен виброгасител (**Error! Reference source not found.**).



Фигура 54: B2. Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията без виброгасител и с настроен виброгасител

При сравнението на диаграмите на преместванията между недемпфираната система (оранжева линия) и пълно демпфираната система с флуиден виброгасител, съставен от 40 резервоара (синя линия), се наблюдават следните ключови разлики:

- При пълното демпфиране с 40 резервоара амплитудите намаляват още по-бързо и остават в значително по-тесни граници от тези при системата с 16 резервоара
- Недемпираната система изисква значително повече време за затихване на вибрациите

7. Числен анализ чрез CFD

7.1. Основи на CFD

Изчислителната флуидна динамика (CFD) е числена методология за анализ на флуидни системи, базирана на решаването на уравненията на Навие-Стокс. Тя комбинира принципи от механиката на флуидите, числения анализ и компютърните науки за моделиране на сложни флуидни течения.

7.2. Моделиране на коминната тръба

7.2.1. Геометричен модел.

В изследването са разглеждани два геометрични модела на коминната тръба:

- Базов модел - Цилиндрична тръба без модификации с диаметър D и височина H .
- Модифициран модел - Същата цилиндрична тръба с добавена хеликоидна спирала (спойлер) в горната третина на височината. Спиралата има ширина s и стъпка p , определени според препоръките на (Scruton & Walshe, 1957).

Модифицирани двумерни модели за ANSYS:

Тъй като ANSYS симулациите се провеждат в 2D, спиралният виброгасител е представен чрез два отделни двумерни модела, обърнати на 180° един спрямо друг:

Модел 1:

- Напречно сечение на комина със спирални виброгасители
- Виброгасителите са представени като правоъгълни издатъци с размери:
 - Ширина: 25 см (радиално)
 - Дебелина: 16 мм (аксиално)

Модел 2:

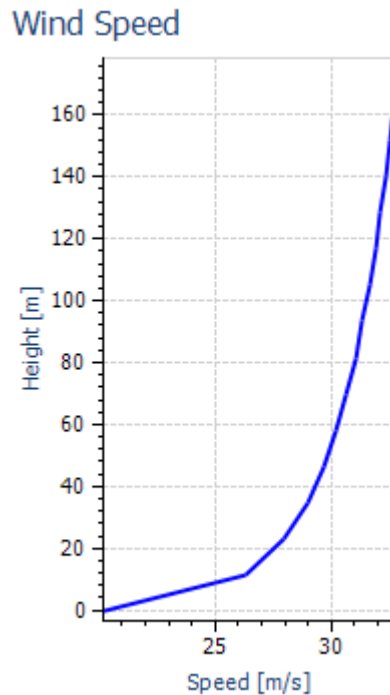
- Идентичен с Модел 1, но завъртан на 180° около вертикалната ос, това представя противоположната страна на спиралата

7.2.2. Гранични условия.

За числените симулации са дефинирани следните гранични условия:

Входящ поток:

- Скорост на вятъра: (критична скорост според Еврокод)
- Профил на скоростта:



Изходящ поток:

- Налягане: атмосферно
- Градиент на налягане: нулев

Симетрия:

- Осометрични условия за двумерния модел в Ansys

Геометрични характеристики на спираловидния спойлер:

- Ширина: 25 cm
- Дебелина: 16 mm
- 2 пълни обиколки около комина за последните 28 метра от коминната тръба

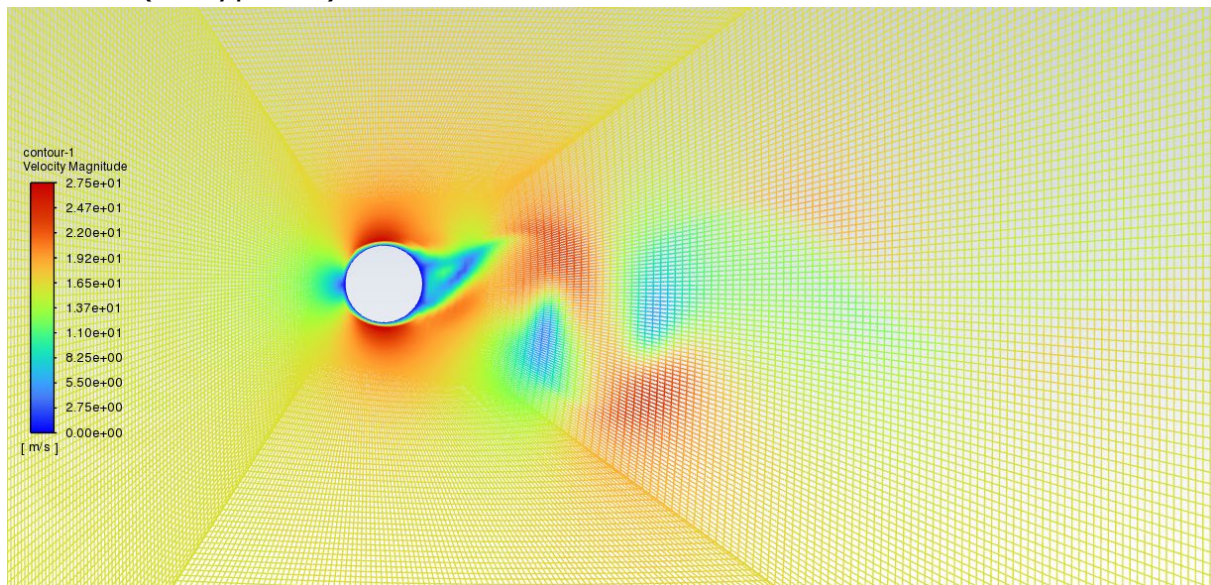
7.3. Анализ на резултатите

7.3.1. Сравнение на различни сценарии.

Проведени са симулации в два софтуерни пакета:

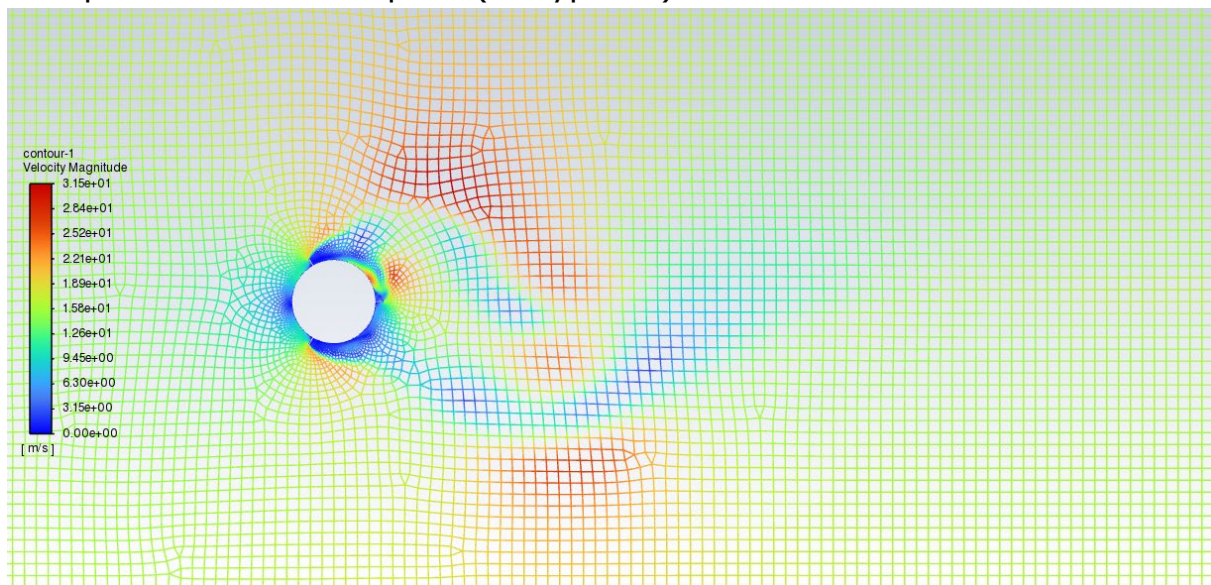
Ansys Fluent (2D модел):

- Базов модел: Ясно изразени вихрови структури в следата на комина (Фигура 55)



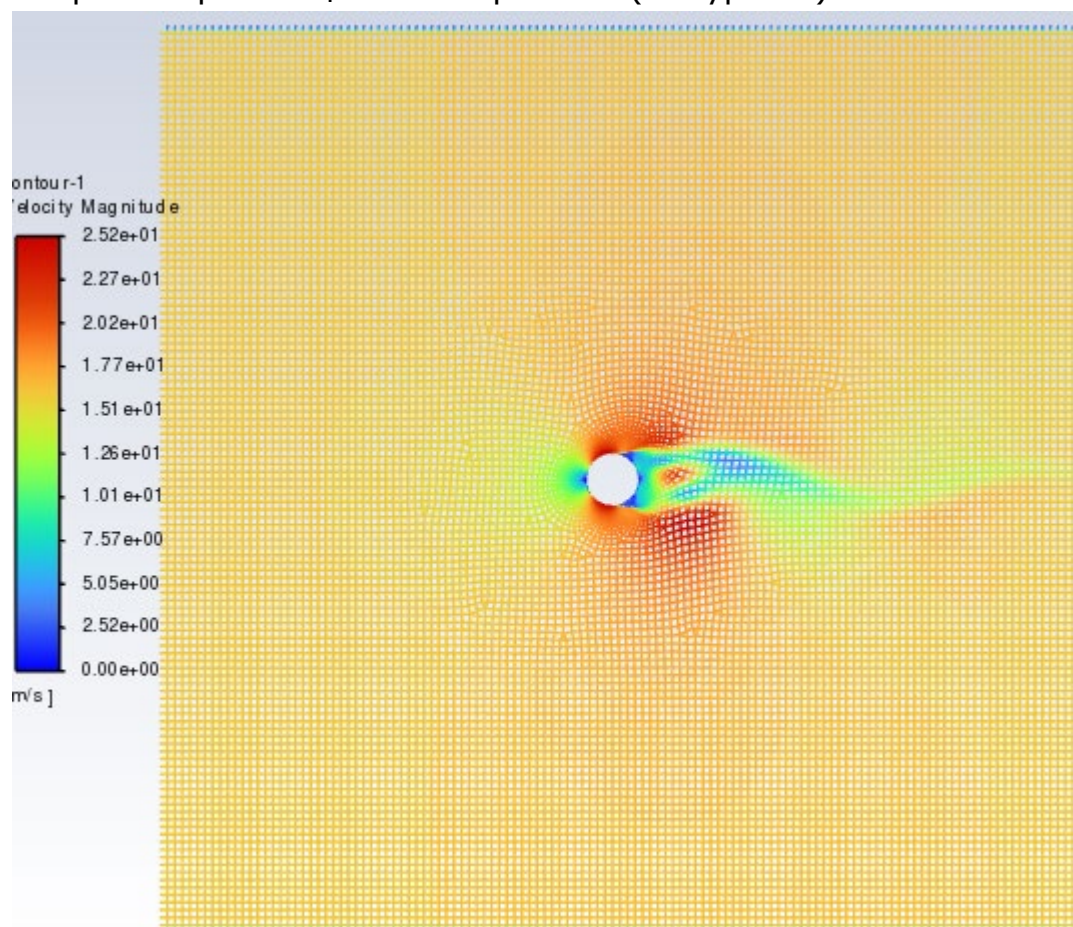
Фигура 55: Ansys CFD базов модел

- Модифициран модел: Значително намаляване на кохерентността на вихрите (Фигура 56)



Фигура 56: Ansys CFD модифициран модел със спираловидни спойлери

- Модифициран модел 180°: Подобен ефект върху вихрите при обърнатата ориентация на спиралата. (Фигура 57)

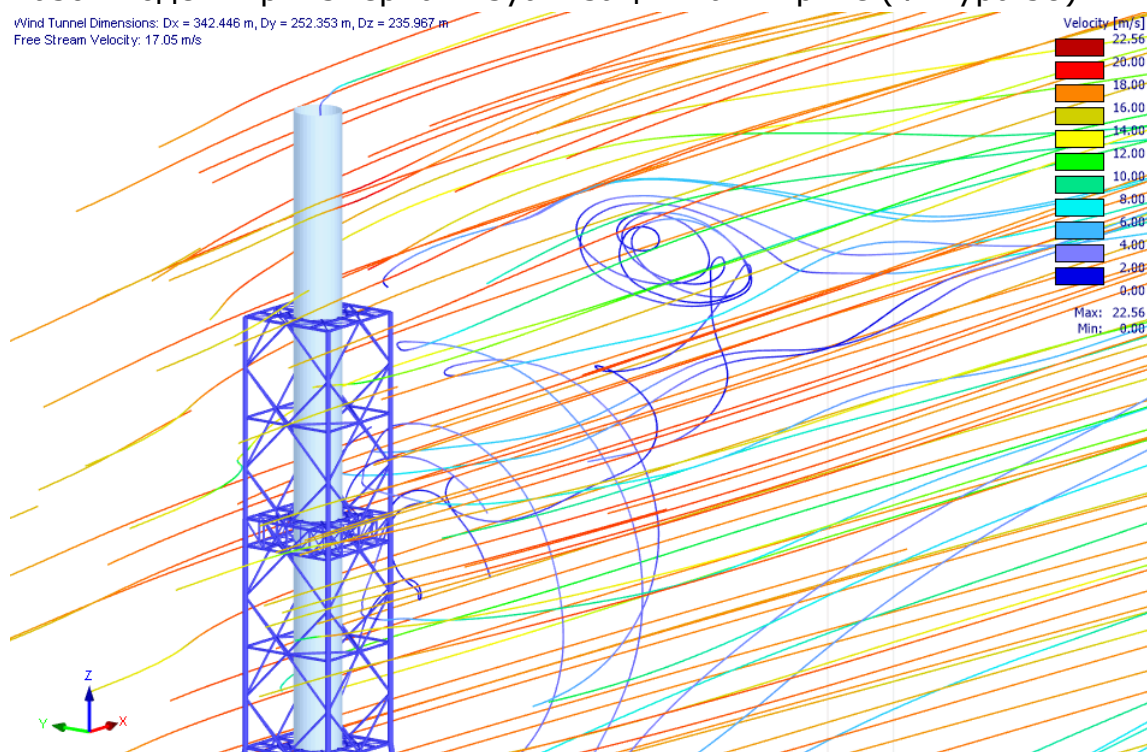


Фигура 57: Ansys CFD модифициран модел със спираловидни спойлери завъртян на 180°

RWIND (3D модел):

- Базов модел: Триизмерна визуализация на вихрите (Фигура 58)

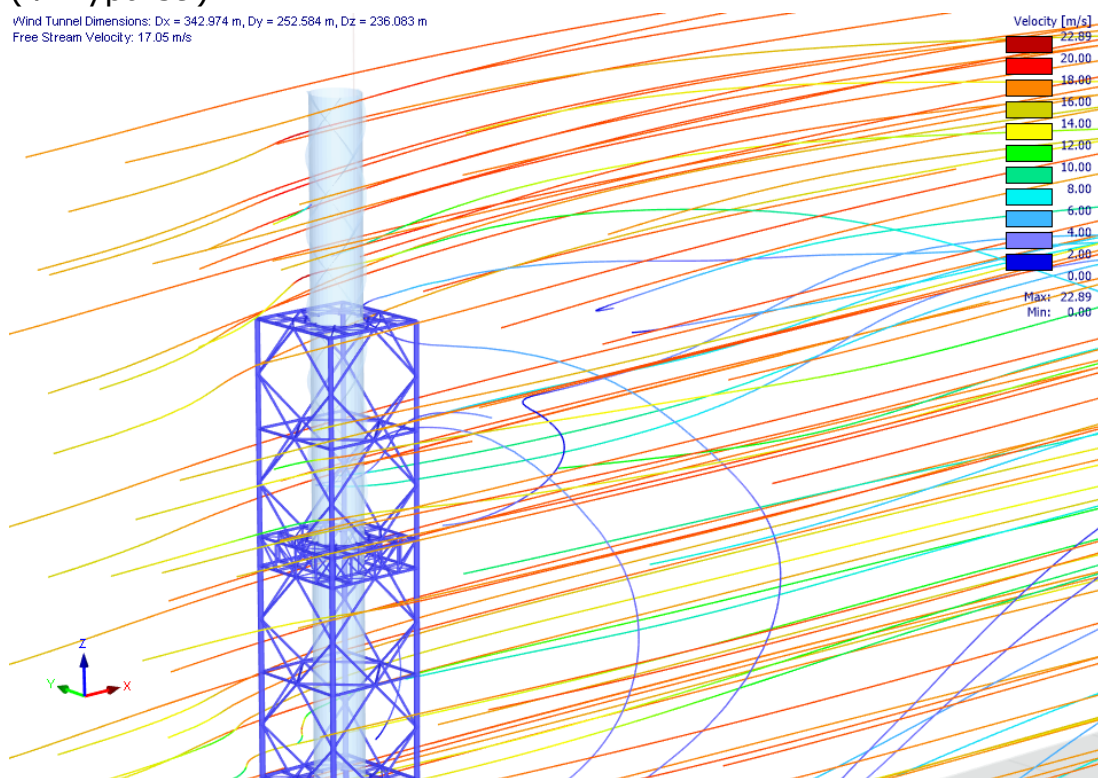
Wind Tunnel Dimensions: $D_x = 342.446$ m, $D_y = 252.353$ m, $D_z = 235.967$ m
Free Stream Velocity: 17.05 m/s



Фигура 58: RWIND CFD базов модел

- Модифициран модел: Нарушаване на симетрията на вихрите (Фигура 59)

Wind Tunnel Dimensions: Dx = 342.974 m, Dy = 252.584 m, Dz = 236.083 m
Free Stream Velocity: 17.05 m/s



Фигура 59: RWIND CFD модифициран модел

7.3.2. Анализ на резултатите от CFD-изследване.

Анализът на графичните резултати показва следните ключови заключения:

Вихрови структури:

- В базовия модел се наблюдават ясно изразени вихри на Карман (Фигура 55: Ansys CFD базов модел)
- В модифицирания модел вихровите структури са раздробени и нерегулярни (Фигура 56: Ansys CFD модифициран модел)

Ефективност на спиралата:

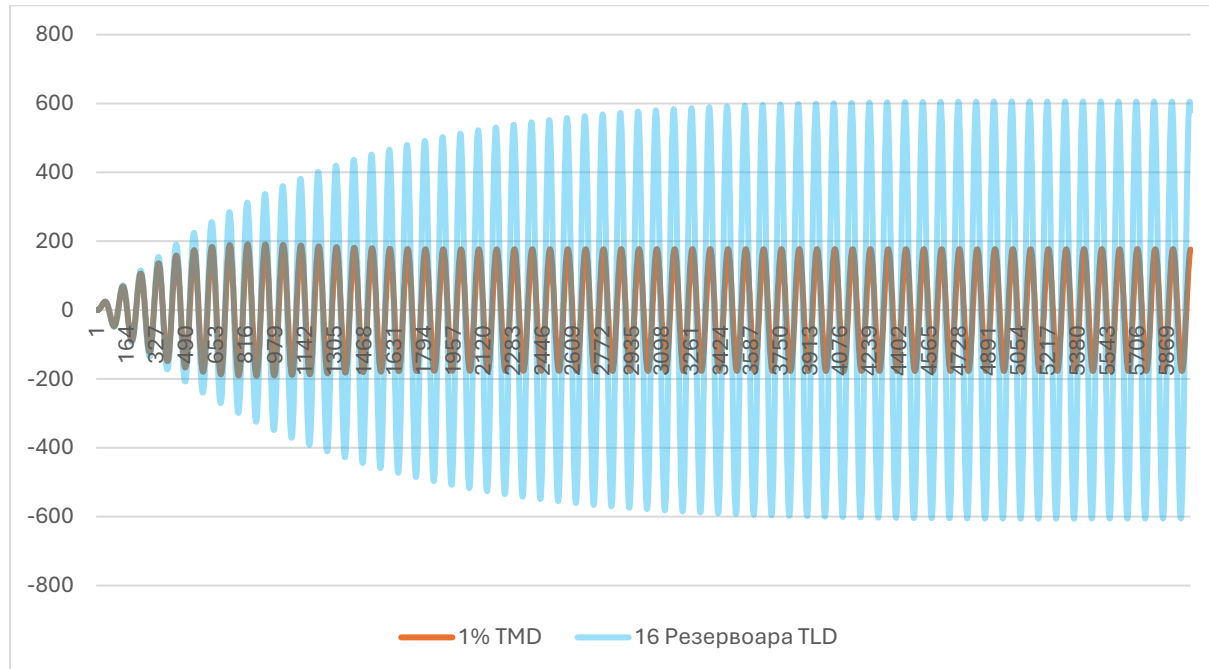
- Спиралата ефективно нарушава формирането на кохерентни вихри
- Намаляването на вихровото възбуждане е по-изразено при по-високи скорости на вятъра
- Оптималните параметри на спиралата зависят от геометричните характеристики на комина

8. Сравнителен анализ и препоръки

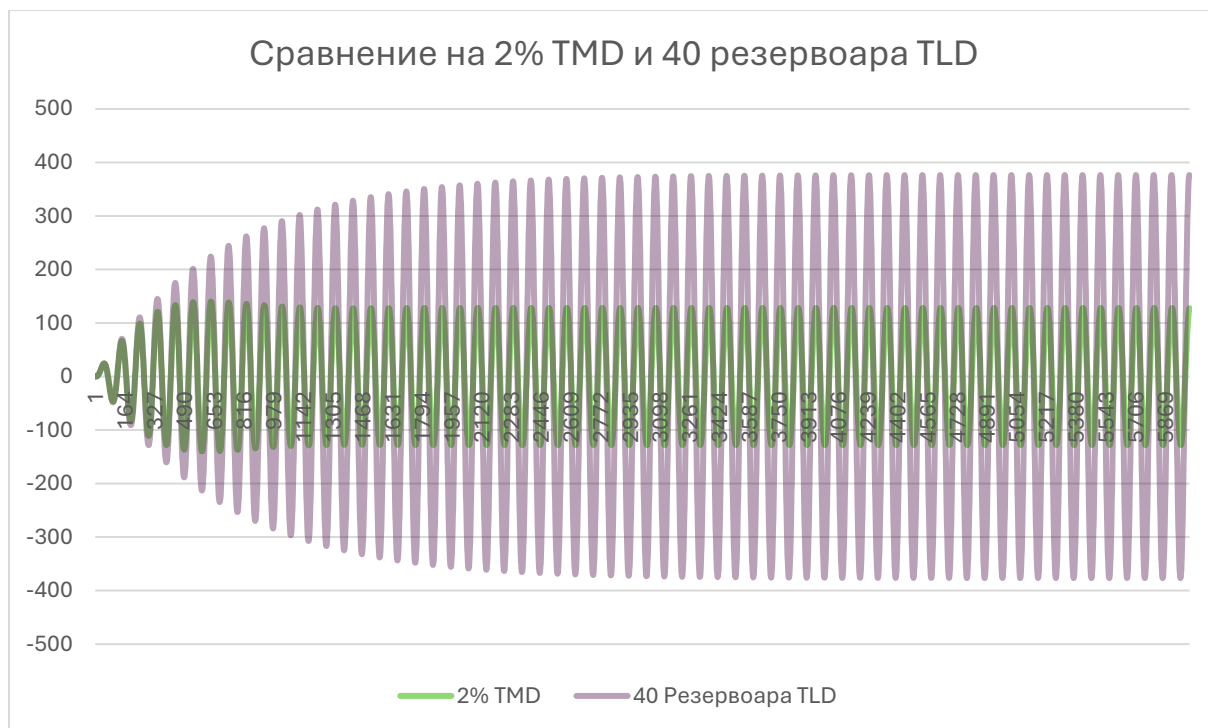
8.1. Сравнение на методите за намаляване на вибрациите

В този раздел се провежда сравнителен анализ на три основни метода за намаляване на вибрациите в конструкциите: масови виброгасители (TMD), флуидни виброгасители (TLD) и аеродинамични модификации. Анализът се базира на резултатите от числените симулации, представени в предходните раздели.

От проведения анализ в предходните раздели се установява, че увеличаването на масата на масовия виброгасител (TMD) или обема на течността в флуидния виброгасител (TLD) води до значително подобрене на ефективността на виброгасенето. Това наблюдение е валидно за всички разглеждани конфигурации и се потвърждава от числените симулации и експерименталните резултати.



Фигура 60: Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията с масов виброгасител с 1% от масата на конструкцията и с флуиден виброгасител с 16 резервоара



Фигура 61: Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията с масов виброгасител с 2% от масата на конструкцията и с флуиден виброгасител с 40 резервоара

Масови виброгасители (TMD):

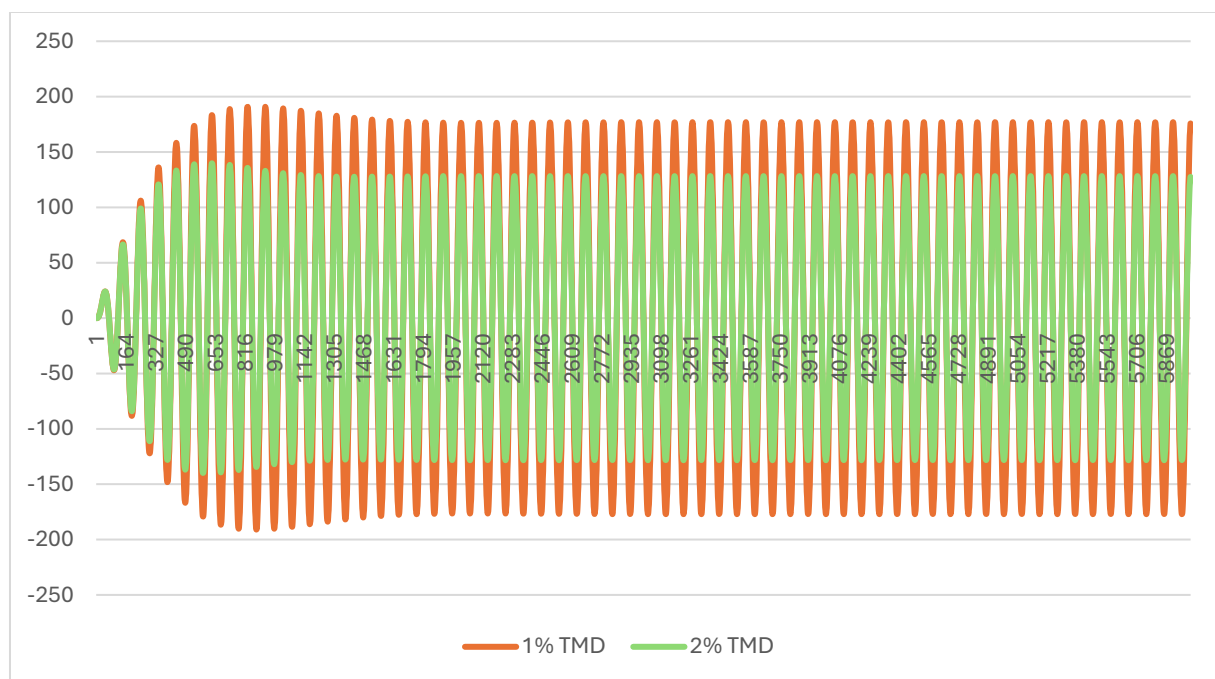
Влияние на масата:

Увеличаването на масата на виброгасителя от 1% до 2% от масата на конструкцията води до:

- Намаляване на амплитудите на вибрация с около 30-40%
- По-бързо затихване на вибрациите (с около 25-30%)
- По-добро потискане на резонансните пикове

Оптимални стойности:

- Оптималната маса на виброгасителя зависи от конкретните параметри на конструкцията, но общо взето, увеличаването на масата води до подобрене на ефективността.
- За повечето приложения, масата на виброгасителя се движи в диапазона от 1% до 5% от масата на конструкцията.



Фигура 62: Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията с масов виброгасител с 1% от масата на конструкцията и с масов виброгасител с 2% от масата на конструкцията

Флуидни виброгасители (TLD):

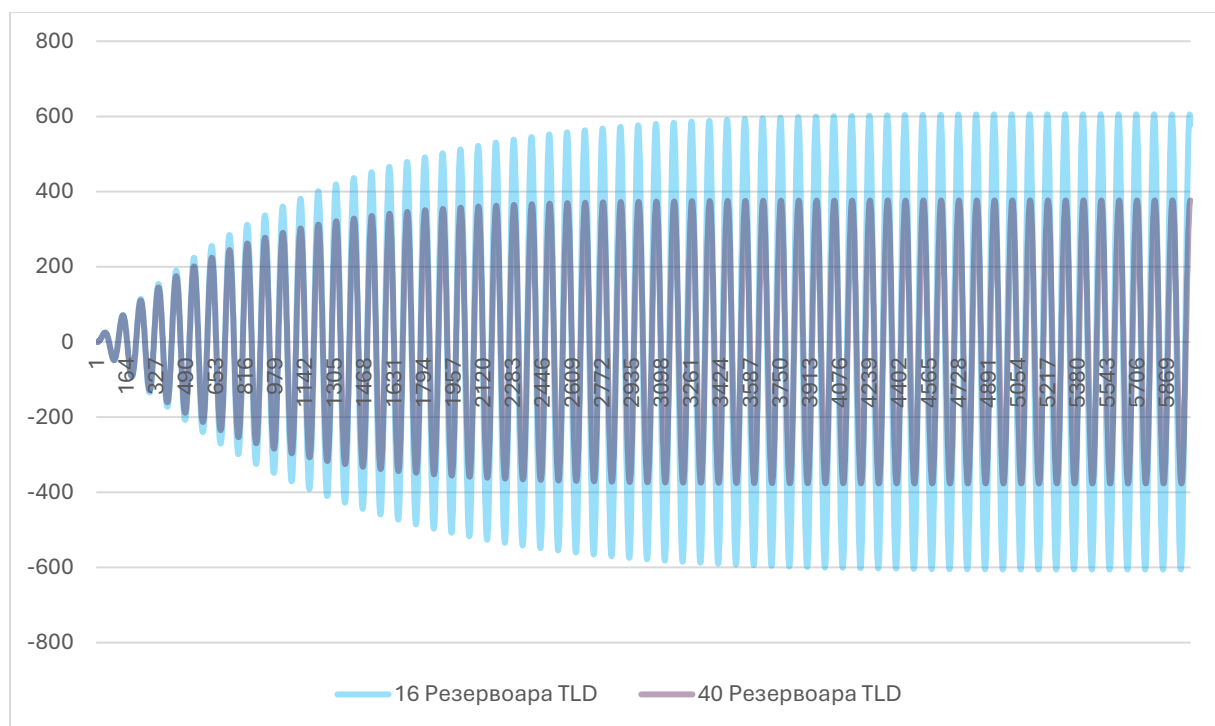
Влияние на обема:

Увеличаването на обема на течността във виброгасителя води до:

- Намаляване на амплитудите на вибрация с около 20-30%
- По-бързо затихване на вибрациите (с около 20-25%)
- По-добро потискане на вибрациите в широк честотен диапазон
- Завишаването на водното ниво е в определен диапазон, при чието превишаване има опасност от поява на воден слой, който не е в движение.

Оптимални стойности:

- Оптималният обем на течността зависи от конкретните параметри на конструкцията и броя на резервоарите.



Фигура 63: Сравнение на преместванията на върха на комина в модел на конструкцията с флуиден виброгасител с 16 резервоара и с флуиден виброгасител с 40 резервоара

Метод	Ефективност	Предимства	Недостатъци
Масов виброгасител	Висока	• Точна настройка на честотни характеристики • Компактни размери • Висока ефективност в тесен честотен диапазон	• Ограничен честотен обхват • Необходимост от точно оразмеряване
Флуиден виброгасител	Средна до висока	• По-широк честотен обхват • По-проста конструкция • По-ниски експлоатационни разходи	• По-големи размери • Необходимост от поддръжка на течността • Ограничена ефективност при ниски температури
Аеродинамични модификации	Средна	• Пасивен метод без необходимост от поддръжка • Висока надеждност • Дълъг срок на експлоатация	• Ограничена ефективност • Възможност за увеличаване на натоварванията

9. Заключение

9.1.Обобщение на основните резултати

В рамките на това изследване бяха анализирани различни методи за намаляване на вибрациите в конструкциите, с особен фокус върху масовите и флуидните виброгасители. Основните постигнати резултати могат да бъдат обобщени по следния начин:

9.1.1. Ефективност на различни методи:

- Масовите виброгасители (TMD) демонстрират най-висока ефективност в тесен честотен диапазон, но изискват точна настройка.
- Флуидните виброгасители (TLD) предлагат по-широк честотен обхват и по-проста конструкция, но с по-ниска ефективност в сравнение с TMD.
- Аеродинамичните модификации са най-малко ефективни, но предлагат пасивен метод за намаляване на вибрациите.

9.1.2. Влияние на масата/обема:

- Увеличаването на масата на масовия виброгасител или обема на течността във флуидния виброгасител води до значително подобрене на ефективността на виброгасенето.
- Оптималните стойности за масата/обема зависят от конкретните параметри на конструкцията, но общо взето, увеличаването на тези параметри води до подобрене на ефективността.

9.1.3. Сравнителен анализ:

- Масовите виброгасители са най-подходящи за високи сгради и съоръжения, където е необходима висока ефективност в тесен честотен диапазон.
- Флуидните виброгасители са предпочитани за офшорни платформи и ветроенергийни инсталации, където са необходими по-прости и надеждни решения.

- Аеродинамичните модификации се използват главно за високи сгради, комини и комуникационни кули, където е необходима висока надеждност и дълъг срок на работа.

9.1.4. Препоръки за приложение:

- За високи сгради и мостове се препоръчва използването на масови виброгасители с маса от 2% до 5% от масата на конструкцията.
- За офшорни платформи и ветроенергийни инсталации се препоръчва използването на флуидни виброгасители с обем от 2% до 3% от масата на конструкцията.
- В някои случаи може да се разглежда комбинация от различни методи, за да се постигне оптимална ефективност и икономическа ефективност.

9.1.5. Dlubal RWIND

Благодаря на Dlubal Software за предоставения лиценз на RWIND, който значително подпомогна провеждането на аеродинамичните симулации в това изследване.

10. Приложения

10.1. Списък на използваните софтуерни инструменти

Софтуер	Производител	Приложение
RFEM	Dlubal Software	Анализ на конструкции по метод на крайните елементи, моделиране на виброгасители, динамичен анализ
RWIND	Dlubal Software	Аеродинамичен анализ, симулация на вятърни натоварвания
Ansys	Ansys, Inc.	Числени симулации, анализ на вибрации, оптимизация на параметри
Wolfram Mathematica	Wolfram Research	Аналитично решаване на диференциални уравнения, визуализация на резултати
Microsoft Excel	Microsoft	Обработка и анализ на данни, създаване на графики и таблици, инженерни изчисления
Microsoft Word	Microsoft	Подготовка на текстови документи, доклади и публикации
CalcPad	ProektSoft	Инженерни изчисления, анализ на резултати

Литература

- Connor, J. (2002). Tunes mass damper. *Intro to structural motion control*.
- Cowdrey, C., & Lawes, J. (1959). *Drag measurements at high Reynolds numbers of a circular cylinder fitted with three helical strakes*. National Physics Laboratory (UK).
- DIN 4133, 1991. (1991). Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- Eurocode. (2008). *BDS EN 1991-1-4:2008*.
- Hansen, S. O. (November 2-7, 2007). Vortex-Induced Vibrations of Structures. *Proceedings of the Structural Engineers World Congress*,. Bangalore, India.
- Hartog, J. P. (1934). *Mechanical Vibrations*. Massachusetts Institute of Technology.
- Nakagawa, K., Fujino, T., Arita, Y., Ogata, Y., & Masaki, K. (1959). An experimental investigation of aerodynamic instability of circular cylinders at supercritical Reynolds numbers. *Proceedings of 9th Japan National Congress for Applied Mechanics*, (стр. 235-240). Tokyo.
- Niemann, H.-J. L. (2014). Vibrations of Chimneys under the Action of. *9th International Conference of Structural Dynamics*. EURODYN,.
- Ruscheweyh, H. (1972). Tip effect on vortex excited oscillation of a model stack with and without efflux stream. *Symp. on Flow Induced Structural Vibrations*, (стр. 101-103). Karlsruhe.
- Ruscheweyh, H. (1986). *Ein verfeinertes, praxisnahes Berechnungsverfahren wirbelerregter Schwingungen von schlanken Baukonstruktionen im Wind*. . Innsbruck/Lausanne.
- Scruton, C., & Walshe, D. (1957). *A means for avoiding wind-excited oscillations of structures with circular or nearly circular cross section*. National Physical Laboratory (UK).
- Sun, L. M. (1992). Modeling of Tuned Liquid Damper (TLD). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1883-1894.
- Verboom, G. K. (2010). Vortex Excitation: Three Design Rules Tested on 13. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98, 145-154.
- Vickery, B. J. (1983). Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I. Development of a mathematical model for two-

- dimensional conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 49-73.
- Walshe, D., & Wootton, L. (1970). Preventing wind-induced oscillations of structures of circular section. *Proc. Inst. Cir. Eng.*, 47, (стр. 1-24).
- Woodgate, L., & Maybrey, J. (1959). *Further experiments on the use of helical strakes for avoiding wind excited oscillations of structures of circular or nearly circular section*. National Physics Laboratory (UK).
- Zdravkovich, M. M. (1979). *Variation on the theme of mechanics of vortex shedding*. London: Imperial College.
- Zdravkovich, M. M. (1981). REVIEW AND CLASSIFICATION OF VARIOUS AERODYNAMIC AND HYDRODYNAMIC MEANS FOR SUPPRESSING VORTEX SHEDDING. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145-189.
- Райков, С., Рангелов, Н., & Динев, Д. (2021). ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ВЕТРОВО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ ВИСОКИ КОМИНИ СЪС СТОМАНЕНА НОСЕЩА КОНСТРУКЦИЯ. ЧАСТ 1 и 2. ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ.