

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інженерної механіки
Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Кушнірик Микола Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 622.276

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Моделювання та оптимізація конструкції колони насосних штанг

(назва роботи)

Комп'ютеризовані та роботизовані технології машинобудування

(назва освітньої програми)

131 - Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

М. І. Кушнірик

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник **Копей Володимир Богданович, д-р техн. наук, доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

докт. техн. наук, професор

(посада)

В. Г. Панчук

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2021

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут _____ Інститут інженерної механіки _____
 Кафедра _____ комп'ютеризованого машинобудування _____
 Освітній рівень _____ магістр _____
 Спеціальність _____ 131 - Прикладна механіка _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Кушнірику Миколі Івановичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Моделювання та оптимізація конструкції колони насосних штанг _____

керівник роботи _____ Копей Володимир Богданович, д-р. техн. наук, доцент _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від "29" _____ 10 _____ 2021 року №546/7

2. Строк подання студентом роботи 18.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Література з проблем експлуатації і підвищення довговічності ШСНУ. Література та документація з питань моделювання мовою Modelica. Документація SOLIDWORKS.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Виконати аналіз умов роботи та причин відмов ШСНУ та колон ШН. 2. Розробити математичні комп'ютерні моделі колони ШН та ШСНУ з використанням методів і засобів моделювання динамічних систем. 3. Проаналізувати результати моделювання ШСНУ та її компонентів та провести оптимізацію їхніх параметрів. 4. Створити тривимірні параметричні моделі з'єднання полімерного тіла насосної штанги зі сталеву головою. 5. Дослідити вплив параметрів з'єднання на напруження і деформації та оптимізувати конструкцію з'єднання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Модель Maplesim 2. Аналіз в Maplesim 3. Аналіз в SW Motion 4. Оптимізація в SW Motion 5. Параметрична геометрична модель з'єднання 6. FEA з'єднання

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Копей В.Б., проф. каф. КМВ		

7. Дата видачі завдання 01.03.21р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літератури і постановка задачі	01.05.21	
2	Розроблення моделей колон насосних штанг та ШЧУ мовою Modelica	01.07.21	
3	Аналіз моделі ШЧУ в SOLIDWORKS Motion	01.09.21	
4	Оптимізація конструкції ШН в SOLIDWORKS Simulation	01.10.21	
5	Оформлення графічної частини і ПЗ	01.12.21	

Студент

(підпис)

Кушнірик М. І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Копей В. Б.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної магістерської роботи " Моделювання та оптимізація
конструкції колони насосних штанг "

Розрахунково-пояснювальна записка: 61 с., 57 рис., 5 табл., 38 джерел.

Графічна частина: 6 аркушів формату А1.

Об'єкт дослідження – колона насосних штанг.

Предмет дослідження – методи і засоби моделювання та оптимізації насосних штанг, колон насосних штанг та ШСНУ в цілому.

Мета роботи – розроблення комп'ютерних моделей, аналіз результатів моделювання та оптимізація параметрів ШСНУ, колон насосних штанг та їх елементів.

Проаналізовано умови роботи та причини відмов ШСНУ. В програмі Maplesim розроблено динамічну модель ШСНУ. В результаті розрахунку моделі отримано залежності подачі рідини від часу на виході насосу, на всмоктуючому клапані та на гирлі. Дана модель може використовуватись для усестороннього аналізу роботи ШСНУ та оптимізації конструкції. На основі тривимірної параметричної моделі верстата-качалки виконано аналіз кінематичних та динамічних характеристик ШСНУ в SOLIDWORKS Motion. В SOLIDWORKS розроблено тривимірну параметричну модель з'єднання полімерного тіла штанги зі сталевим ніпелем. За допомогою в SOLIDWORKS Simulation досліджено вплив геометричних параметрів на еквівалентні напруження та виявлено оптимальні параметри з'єднання.

Ключові слова: *модель, насосна штанга, колона насосних штанг, верстат-качалка, скінченно-елементний аналіз, оптимізація.*

Студент Кушнірик М. І.

ABSTRACT

of the master's work " Modeling and design optimization of the sucker rod string "

Paper: 61 pages, 57 figures, 5 tables, 38 references.

The graphical part: 6 sheets of A1 format.

The object of research is the sucker rod string.

The subject of research is methods and means of modeling and optimization of sucker rods, sucker rod strings and pumping unit system in general.

The purpose of the work is the development of computer models, analysis of modeling results and optimization of pumping unit system parameters, sucker rod strings and their elements.

The working conditions and reasons for failures of the pumping unit system are analyzed. In Maplesim a dynamic model of the pumping unit system has developed. As a result of the calculation of the model, the dependences of the fluid feed on the time at the pump outlet, on the suction valve and on the wellhead are obtained. This model can be used for a comprehensive analysis of the work of pumping unit system and design optimization. Based on the three-dimensional parametric model of the pumping unit, the analysis of the kinematic and dynamic characteristics of pumping unit system in SOLIDWORKS Motion was performed. In SOLIDWORKS a three-dimensional parametric model of the connection of the polymer body of the rod with a steel nipple has developed. With the help of SOLIDWORKS Simulation, the influence of geometric parameters on equivalent stresses was investigated and the optimal connection parameters were identified.

Keywords: *model, sucker rod, sucker rod string, pumping unit, finite element analysis, optimization.*

Student M. Kushniryk

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	5
1.1. Огляд можливостей і принципів роботи ШСНУ	5
1.2. Аналіз умов роботи і причини відмов колон ШН та ШСНУ	8
1.3. Методи і засоби побудови моделей	10
1.3.1. SOLIDWORKS Motion - інтегрований кінематичний і динамічний аналіз.....	10
1.3.2. Метод скінченних елементів і SOLIDWORKS Simulation.....	13
1.3.3. Моделювання динамічних систем мовою Modelica	14
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ КОЛОН НАСОСНИХ ШТАНГ ТА ШСНУ МОВОЮ MODELICA	16
2.1. Модель колони насосних штанг	16
2.2. Модель з гідравлічною частиною	25
2.3. Модель ШСНУ з верстатом-качалкою	29
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МОДЕЛІ ШСНУ В SOLIDWORKS MOTION.....	34
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ШН В SOLIDWORKS SIMULATION	40
4.1. Побудова параметричної геометричної моделі	40
4.2. Побудова скінченно-елементної моделі.....	43
4.3. Оптимізація параметрів конструкції.....	48
Висновки	52
Перелік використаних джерел	54

ВСТУП

Актуальність теми. Чимало нафтових свердловин в Україні і за кордоном експлуатуються за допомогою штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) [1]. Такі установки зарекомендували себе як надійний спосіб видобування нафти з малодебітні свердловини. Проте під час експлуатації цих установок відбуваються відмови, як правило підземної частини, яка включає колону насосних штанг (ШН) та насос. Колона насосних штанг працює в складних умовах корозії, динамічного навантаження, згину, тому нерідко відбуваються корозійно-втомні відмови і обриви. Ці обриви надзвичайно важко ліквідувати. Тому актуальними є дослідження, пов'язані з моделюванням і оптимізацією конструкції колони насосних штанг та її елементів.

Мета і задачі досліджень. Мета роботи – розроблення комп'ютерних моделей, аналіз результатів моделювання та оптимізація параметрів ШСНУ, колон насосних штанг та їхніх елементів.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1. Виконати аналіз умов роботи та причин відмов ШСНУ та колон ШН.
2. Розробити математичні комп'ютерні моделі колони ШН та ШСНУ з використанням методів і засобів моделювання динамічних систем.
3. Проаналізувати результати моделювання ШСНУ та її компонентів та провести оптимізацію їхніх параметрів.
4. Створити тривимірні параметричні моделі з'єднання полімерного тіла насосної штанги зі сталеву головою.
5. Дослідити вплив параметрів з'єднання на напруження і деформації та оптимізувати конструкцію з'єднання.

Об'єкт дослідження – колона насосних штанг.

Предмет дослідження – методи і засоби моделювання та оптимізації насосних штанг, колон ШН та ШСНУ в цілому.

Методи дослідження. Засобами створення моделей в даній роботі є САПР SOLIDWORKS 2018 з модулями Motion і Simulation та програма Maplesim, основана на мові моделювання Modelica, що використовує компонентно-орієнтований декларативний підхід до створення складних моделей. Методами дослідження є методи математичного моделювання динамічних систем та метод скінченних елементів для задач теорії пружності.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Огляд можливостей і принципів роботи ШСНУ

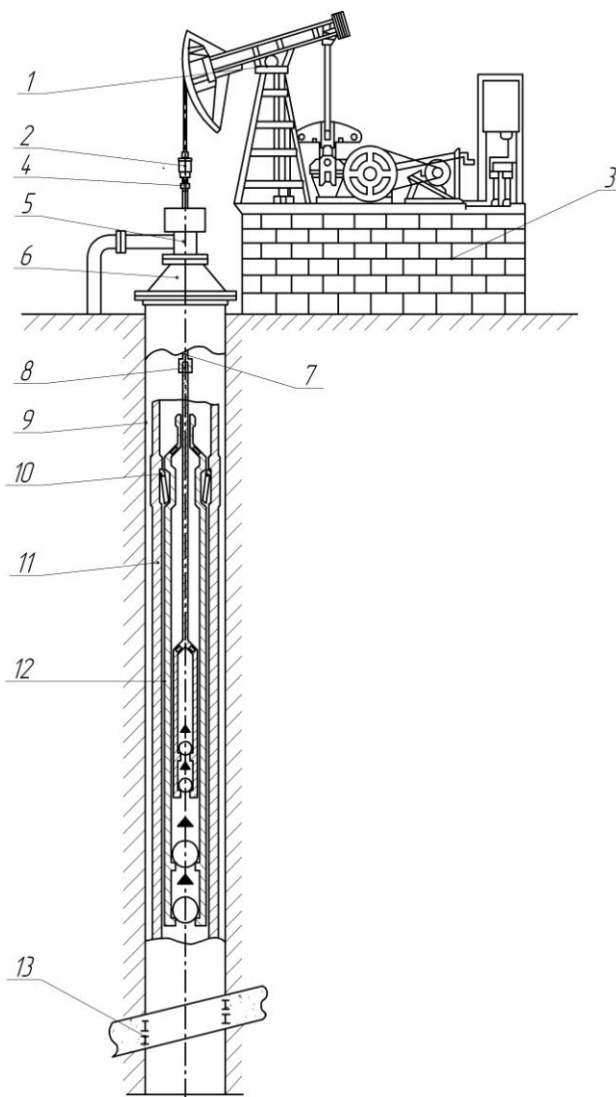
Більше половини усіх нафтових свердловин експлуатується свердловинними штанговими насосними установками [1]. Це можна пояснити економічністю, гнучкістю і широкими можливостями застосування ШСНУ. До основних переваг ШСНУ можна віднести: технічно нескладний і швидкий монтаж; наявність великої гама типорозмірів свердловинних насосів, що дає можливість експлуатувати свердловини в широкому діапазоні дебітів і агресивності пластових флюїдів; можливість адаптації до змінних умов притоку рідини в свердловину за рахунок зміни частоти ходів плунжера, довжини ходу плунжера і ефективної поверхні плунжера свердловинного насоса; неможливість до технічного обслуговування та інші [1-8, 15-20, 38].

ШСНУ для експлуатації одного пласта складається з приводу (верстата-качалки), гирлового сальника, колони насосних штанг і насосно-компресорних труб, а також вставного або невставного свердловинного насоса [3]. Для закріплення в колоні насосно-компресорних труб вставного свердловинного насоса, який опускається на колоні насосних штанг, застосовують замкову опору. Циліндр невставного насоса опускається в свердловину на колоні насосно-компресорних труб, а плунжер – на колоні насосних штанг.

Призначення приводу штангового насоса – перетворення обертового руху вала електродвигуна у зворотно-поступальний рух точки підвісу штанг. Привід може бути механічним, гідравлічним і пневматичним. На даний час найбільшого поширення набули саме балансірні індивідуальні механічні приводи штангових свердловинних насосів – верстати-качалки (рис. 1.1). Основні вузли верстата-качалки: рама, стійка, балансір з поворотною головкою, траверса з шатунами, шарнірно підвішена до балансіра, редуктор

з кривошипами і противагами. Верстат-качалка комплектують набором змінних шківів для зміни числа коливань балансира. Для швидкої зміни шківів і натягу пасів електродвигун встановлюють на поворотних салазках.

Верстати-качалки виготовляють у двох виконаннях: СК (аксіальні) – випускаються семи типорозмірів, СКД (дезаксіальні) – випускаються шести типорозмірів [1, 15].



1 – привід ШСН (верстат-качалка), 2 – фундамент, 3 – підвіска устьового штока, 4 – устьовий шток, 5 – обладнання устя, 6 – планшайба, 7 – муфта штангова, 8 – колона штанг, 9 – колона НКТ, 10 – колона експлуатаційна, 11 – опора замкова, 12 – ШСН

Рисунок 1.1 – Схема ШСНУ

Свердловинні штангові насоси призначені для відкачування із нафтових свердловин рідини обводненістю до 99%, температурою не більше

130° С, вмістом сірководню до 0,1 % (в об'ємі), твердих механічних домішок до 0,5 %, Їх поділяють на дві основні групи: вставні і невставні (трубні) [27-29].

Перспективним напрямком забезпечення надійності ШСНУ є використання склопластикових насосних штанг замість сталевих. Це дозволяє також збільшити довжину ходу плунжера насосу внаслідок більшої податливості колони [31].

Склопластикові насосні штанги набагато легше за сталеві і не поступаються їм за міцністю [31]. Важливою перевагою склопластикових штанг є їхня корозійна стійкість. Проте такі штанги легко руйнуються під час навантажень згину і списку. Тому особливо уважним потрібно бути під час установки штангових колон зі склопластиковими штангами. Така колона також повинна бути обладнана важким сталевим низом, який би запобігав появі навантажень стиску. Склопластикові насосні штанги не можуть експлуатуватися в свердловинах з підвищеною температурою.

В праці [36] виявлено, що відкачування з білярезонансними частотами призводить до суттєвого збільшення ходу плунжера насоса у випадку застосування склопластикових колон. Проте застосування резонансних частот може призвести до збільшення навантажень на колону і їхнього руйнування. Оптимізаційні обчислення повинні бути направлені на те, щоб забезпечити як можна більший хід плунжера і водночас не досягти небезпечних динамічних навантажень на колону.

Поряд зі склопластиковими штангами можуть бути застосовані вуглепластикові штанги та комбіновані, які володіють вищою міцністю.

Існує чимало способів з'єднати полімерне тіло насосної штанги зі сталевою головкою. Багато з цих способів проаналізовано в праці [31]. Одним з найбільш розповсюджених способів з'єднання є адгезійно-клинове з'єднання. Це з'єднання полягає в тому, що в сталевому ніпелі виготовляється система клиноподібних виточок, які заповнюються епоксидним клеєм. Після затвердіння клею утворюється система клинів, яка міцно стискає тіло штанги під час дії навантаження розтягу на неї. Адгезійні металополімерні

з'єднання насосних штанг мають наступні переваги: проста технологія, висока міцність під час навантаження розтягу, клей запобігає проникненню середовища. Недоліком таких з'єднань є неможливість працювати в умовах підвищених навантаженнях стиску і кручення. Поряд з цими з'єднаннями застосовують також пресові з'єднання, які дещо важчі у виготовленні, але можуть працювати в умовах підвищених навантажень тиску і кручення.

На даний час відомо досить мало праць, в яких досліджено такі адгезійно-клинові з'єднання і майже немає праць, в яких би розглядалась задача оптимізації конструкції такого з'єднання.

1.2. Аналіз умов роботи і причини відмов колон ШН та ШСНУ

До відмов ШСНУ можуть призвести наступні фактори [2, 3, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23]:

1. Наявність механічних домішок в продукції.

Під час роботи насоса механічні домішки, потрапляючи в зазор між плунжером і циліндром, пошкоджують їх робочі поверхні, викликають виток, або призводять до заклинювання плунжера в циліндрі [27-29].

2. Корозійне середовище.

Під час експлуатації насоса в корозійної середовищі зносу схильні плунжер, циліндр, НКТ, штанги [31].

3. Виділення газу на прийомі насоса.

Присутність вільного газу на прийомі насоса впливає на величину коефіцієнта наповнення насоса, а також часто призводить до сухого або напівсухому тертю між поверхнями плунжера і циліндра.

3. Вихід з ладу насосно-компресорних труб (НКТ).

При глибинонасосній експлуатації свердловини відбувається поступовий знос різьби, тіла НКТ і зовнішньої поверхні муфти штанги, при поступальному русі колон штанг в НКТ у свердловинах з великим набором кривизни.

У деяких випадках труби піддаються інтенсивності корозії, на їх стінках відкладається сіль і парафін, стираються різьбові з'єднання і поверхня труб пошкоджується трубними ключами.

В результаті труби втрачають герметичність і міцність, що призводить до серйозних аварій. Для запобігання аварій всі труби перед спуском у свердловину перевіряються і при необхідності, відбраковуються.

Несправності верстату-качалки описані в [1, 14, 15, 16].

Основними видами поломок насосних штанг [30, 31] є: технологічні (дефекти при виготовленні прокату і насосних штанг); конструкторські (помилки при проектуванні колони насосних штанг і її елементів); монтажні і транспортні (порушення правил зберігання, транспортування і монтажу); експлуатаційні (поломки, які виникають переважно на етапі експлуатації штангової колони). Як правило відмовляють такі елементи колони, як тіло штанги, ніпель, муфта, різьба, з'єднання.

Їхніми основними експлуатаційними причинами є статичне і корозійно-втомне руйнування, механічне спрацювання, корозійні дефекти, відгвинчування.

Технологічні причини та дефекти під час виготовлення - це дефекти прокату заготовки, дефекти штампування головки, механічної обробки та термообробки

Помилки під час проектування колони та її елементів призводять до завищених навантажень на колону, неправильної компоновки колони, неправильного вибору матеріалу і термообробки, неправильного вибору діаметра плунжера насосу і НКТ.

Монтажні порушення призводять до: пошкодження поверхні штанг і муфти з утворенням концентраторів напружень, згину штанг, неналежно закріплених НКТ, неоптимального моменту згвинчування різьбових з'єднань, згвинчувань забрудненої різьби, відсутності змащування, неправильної посадки плунжера, неоптимального занурення під динамічний рівень.

Експлуатаційними причинами відмов є: корозійно-втомні дефекти, дефекти механічного спрацювання, часткове відгвинчування, корозійні

дефекти, викривлена свердловина, згин тіла штанги, згин нижньої частини колони, навантаження стиску, падіння обірваної частини колони, спрацювання внаслідок тертя об НКТ, удари муфти по НКТ, вібрації, динамічні навантаження, удари, в'язка рідина, наявність піску, висока концентрація напружень, інші експлуатаційні дефекти, відкладення парафіну, заїдання плунжера, корозія, проникнення корозійного середовища, висока обводненість свердловини, високий газовий фактор, дефекти насосу.

1.3. Методи і засоби побудови моделей

1.3.1. SOLIDWORKS Motion - інтегрований кінематичний і динамічний аналіз

SOLIDWORKS Motion призначений для розрахунку руху механізмів. Модуль використовує інформацію, що міститься в збірках SolidWorks [32, 33] з можливістю уточнення розрахункової моделі за допомогою його процедур. SOLIDWORKS Motion є третім, найбільш функціональним інструментом SOLIDWORKS, для імітації руху [34]. Перші два рівні: *Рух збірки* і *Фізичне моделювання*, присутні в базовій конфігурації SOLIDWORKS Standard, можуть бути використані для створення кінематичної моделі збірки, імітації руху без отримання чисельних характеристик. Після цього інформація без будь-яких додаткових дій сприймається на рівні SOLIDWORKS Motion.

Підготовка розрахункової моделі в середовищі SOLIDWORKS [34]:

- Базова частина моделі формується в базовому пакеті SolidWorks Standard, не вимагаючи ліцензії Motion. У SolidWorks доступні всі з'єднання Motion, які в середовищі SolidWorks формуються як сполучення. Це, зокрема сполучення групи Механічні, що включають: Кулачок; Шарнір; Редуктор; Шестерня-рейка; Гвинт, Універсальний шарнір (шарнір Кардана).

- Стосовно до сполученого можуть бути призначені коефіцієнти тертя, а також уточнюючі параметри геометрії, що характеризують взаємодію об'єктів з тертям.

- Сполучення (стосовно аналізу) можуть бути замінені податливими втулками, що володіють заданою жорсткістю і демпфуючими властивостями. Віртуальні втулки можуть бути анізотропними. При зв'язуванні плоских граней втулки вироджуються в свого роду прокладки.

- В інтерфейсі сполучень SolidWorks також визначаються межі, сприймають зусилля, з метою подальшого використання результатів динамічного аналізу в Simulation.

- Модуль Motion допускає розрахунок на моделі, в якій відсутній твердотіла інформація. У цьому випадку використовуються компоувальні ескізи, створені в контексті збірки. Для виконання динамічного аналізу відповідним блокам повинні бути присвоєні масово-інерційні характеристики.

Умови, що визначають рух [34]:

- У SolidWorks Motion створюються віртуальні пружини і демпфери, які можуть бути, у загальному випадку, нелінійними. Пружини можуть мати властивість в'язкості.

- Просторові контакти з заданими характеристиками жорсткості і демпфірування і з невідомими границями.

- Стосовно об'єктів моделі призначаються лінійні і кутові швидкості, закон зміни яких визначається користувачем; лінійні сили і крутні моменти, також діючі за заданими законами.

- Враховується сила гравітації.

- Всі з'єднання можуть бути замінені податливими втулками, що володіють ідентичною жорсткістю і в'язкістю. Параметри жорсткості й в'язкості можуть бути перевизначені користувачем.

- Просторовий контакт в обчислювальній процедурі може бути інтерпретований як контакт між реальними об'єктами моделі або як взаємодія їх спрощених моделей, отриманих триангуляцією. Ступінь точності триангуляції регулюється користувачем.

- Всі обчислення виконуються в залежності від реального часу.

Управління обчислювальним процесом [34]:

- У модулі SolidWorks Motion є три обчислювальних процедури, інтегруючі рівняння руху. Користувач може вибрати процедуру залежно від особливостей задачі.

- У процесі вирішення може здійснюватися візуалізація руху моделі
- Алгоритм ідентифікує кінематично-перевизначені моделі і автоматично коригує з'єднання.

Результати [34]:

- Переміщення, швидкості, прискорення, сили, моменти, інші кінематичні характеристики для сплук, пружин і демпферів, а також характерних точок моделі в чисельному, табличному і графічному вигляді.

- Анімація результатів, у тому числі і спільно з процедурами SolidWorks Animator.

- Генерація траєкторій характерних точок моделей і збереження їх в якості кривих SolidWorks.

- Передача результатів динамічного аналізу - сил в сполученнях і інерційних навантажень в модуль SolidWorks Simulation.

Огляд елементів Дослідження руху [34].

1. Двигун. Двигуни є елементами дослідження руху, які рухають компоненти в збірці, шляхом моделювання ефектів різних типів двигунів.

2. Сила. Силу можна задавати постійною та змінною, що змінюється за заданим законом.

3. Сила тяжіння. Сила тяжіння (Тільки в Basic Motion і Аналізі руху) є елементів моделювання, який переміщує компоненти в збірці шляхом вставки модельованої сили тяжіння.

4. Визначення пружини кручення або демпфера. Можна створити пружину, що зберігає енергію, або демпфер, розсіює енергію, при крученні.

Профілі двигуна та сили. Можна використовувати Конструктор функцій, щоб визначити профілі двигуна або сили з імпортованого набору даних. Конструктор функцій також можна використовувати щоб визначити профілі двигуна або сили з математичного виразу або інтерпольованих

функцій. Для профілів двигуна можна задати час, кут циклу або будь-який результат в якості незалежної змінної.

Епюри дослідження руху. У дослідженнях аналізу руху можна побудувати епюри за результатами розрахунку руху.

1. Епюри переміщення, швидкості і прискорення .
2. Епюри сили і крутного моменту .
3. Епюри енергії та імпульсу .
4. Епюри орієнтації, відображеного навантаження та інші .

Жорсткі групи

Відібравши потрібні компоненти і сформувавши з них жорстку групу, можна скоротити час моделювання в Аналізі руху. При розрахунку руху жорсткі групи, що складаються з компонентів, ведуть себе так само, як окремі компоненти.

1. Переміщення компонентів всередині групи ігнорується.
2. Сполучення між компонентами всередині групи ігноруються.
3. Маса і момент інерції жорсткої групи складаються з усіх компонентів.

1.3.2. Метод скінченних елементів і SOLIDWORKS Simulation

SOLIDWORKS Simulation - модуль, що реалізує метод скінченних елементів (FEM) для задач механіки деформівного твердого тіла.

Метод скінченних елементів – це дуже відомий в інженерній практиці метод, який дозволяє розв'язувати задачі моделювання фізичних явищ, що сформульовані за допомогою диференціальних рівнянь з частинними похідними. Такі задачі як: симуляція напружено-деформованого стану, симуляція потоку рідини чи газу, електромагнетизм та інші [33].

Модуль дозволяє виконувати статичні та динамічні дослідження, є можливість аналізу власних частот конструкції та лінійного динамічного аналізу [34]. Можна аналізувати тривимірні моделі, плоскі або осесиметричні. В модулі також можуть бути розв'язані різноманітні

контактні задачі. Проте модуль зазвичай програє в можливостях таким програмним продуктом як Ansys, Comsol або Abaqus.

Особливістю модуля є тісна інтеграція з САПР SOLIDWORKS, що дозволяє легко організувати оптимізаційні дослідження, у тому числі повністю автоматично. Як правило для цього потрібно розробити параметрично модель конструкції, задати межі зміни параметрів та критерій оптимізації.

1.3.3. Моделювання динамічних систем мовою Modelica

Компанія Maplesoft випускає продукт MapleSim для імітаційного моделювання мультидоменних фізичних систем [35]. Тісна інтеграція з відкритою платформою моделювання та симуляцій Modelica забезпечує користувачам MapleSim нові можливості для симуляції, аналізу та зв'язування систем між собою.

Пакет MapleSim побудований на базі мови моделювання Modelica, що став відкритим стандартом для опису фізичних моделей і компонентів. Мова Modelica дозволяє створювати складні мультидоменні моделі фізичних систем, які складається з компонентів. Наприклад механічні системи можуть складатися з таких компонентів як: «маса», «пружина», «демпфер» «важіль» «тіло з інерцією», «колесо», «сила», «тертя» та інші. Кожний компонент описується у відповідному класі мовою Modelica, в якому зазначаються параметри та алгебраїчно-диференціальні рівняння, що описують поведінку цього компонента. Наприклад поведінка компонента «маса» описується за допомогою другого закону Ньютона, що пов'язує силу, масу і прискорення. Перевагою Modelica є можливість створення мультидоменних моделей, тобто таких, які включають компоненти з різних фізичних областей, наприклад, механічні моделі з елементами гідравліки або електрики. Існують також вільне середовища моделювання мовою Modelica, такі як OpenModelica. Стандартна бібліотека мови Modelica включає велику кількість компонентів для побутових механічних, електричних, гідравлічних та інших систем. Проте існує велика кількість сторонніх бібліотек для Modelica.

Декларативний спосіб програмування значно спрощує формулювання задачі, а об'єктно-орієнтоване програмування дозволяє легко створювати нові компоненти за допомогою принципу успадкування.

У MapleSim підтримка мови Modelica розширена відразу по декількох напрямках, полегшуючи інженерам контроль і аналіз процесу моделювання. Наприклад, пакет MapleSim дозволяє швидко відобразити код мовою Modelica для будь-якої підсистеми або компонента. Дивлячись на код, інженери зможуть точно сказати, що саме робить їх модель, а також зможуть швидше вносити виправлення в роботу моделі. Також забезпечується можливість відкривати і відразу використовувати файли Modelica в пакеті MapleSim; можливість швидко зберігати будь-які моделі MapleSim у файлах на мові Modelica; а за рахунок нового конектора для FMI-систем можна експортувати моделі MapleSim в стандартному форматі, який легко сприймається іншими програмами з підтримкою стандарту FMI.

У новій версії також підтримується пакетний запуск паралельних симуляцій і оптимізацій з повноцінним використанням багатопроцесорних систем, які допомагають виконати обчислення помітно швидше.

Отже програмні продукти SolidWorks Motion, Simulation та MapleSim є зручними інструментами для аналізу та оптимізації такої системи як ШСНУ. SolidWorks Motion підходить більше для аналізу кінематики та динаміки тривимірної моделі верстата-качалки, а MapleSim може використовуватись для створення динамічної моделі всієї установки разом з колоною насосних штанг, гідравлічною частиною та верстатом-качалкою. Модуль Simulation зручний для аналізу окремих вузлів і деталей ШСНУ.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ КОЛОН НАСОСНИХ ШТАНГ ТА ШСНУ МОВОЮ MODELICA

2.1. Модель колони насосних штанг

Розглянемо модель вільно підвішеної колони насосних штанг в Maplesoft Maplesim (рис. 2.1). Параметри моделі:

c - жорсткість колони штанг, $c=80000$ Н/м,

d - константа демпфування, $d=1000$ Нс/м,

m - маса колони штанг, $m=3000$ кг,

F_{constant} - сила ваги колони, $F_{\text{constant}} = -30000$ Н,

S_0 - абсолютна позиція центру мас.

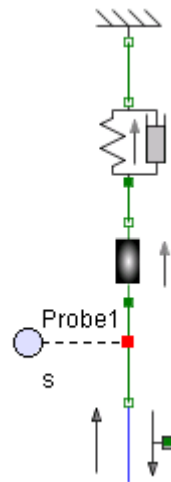


Рисунок 2.1 - Модель вільно підвішеної колони насосних штанг

Якщо не задавати початкову умову S_0 , то за замовчуванням $S_0=0$ і отримаємо наступний результат (рис. 2.2):

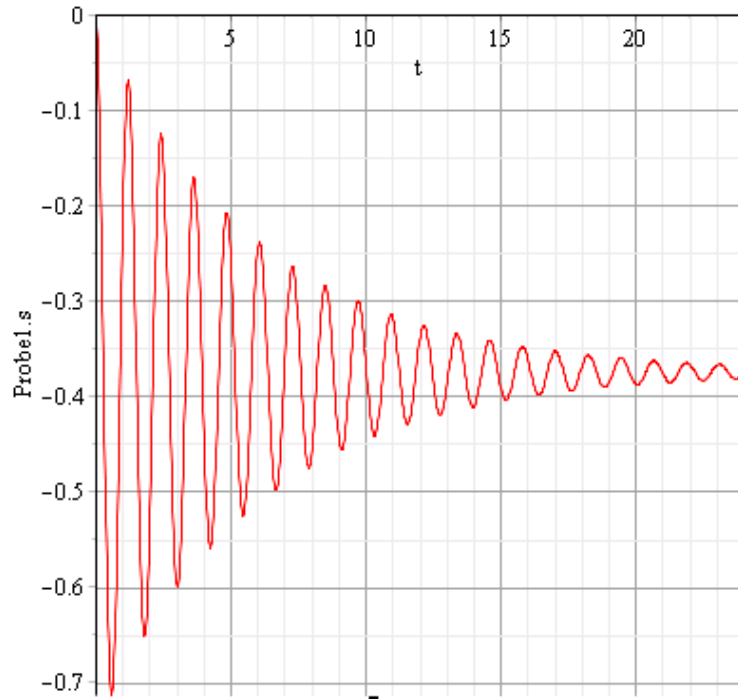


Рисунок 2.2 - Переміщення для $S_0=0$ (м)

Якщо задавати початкову умову $S_0=m/c=0,375$ м, то результат буде таким (рис. 2.3). Отже дуже важливо вірно задавати початкові умови для динамічних моделей.

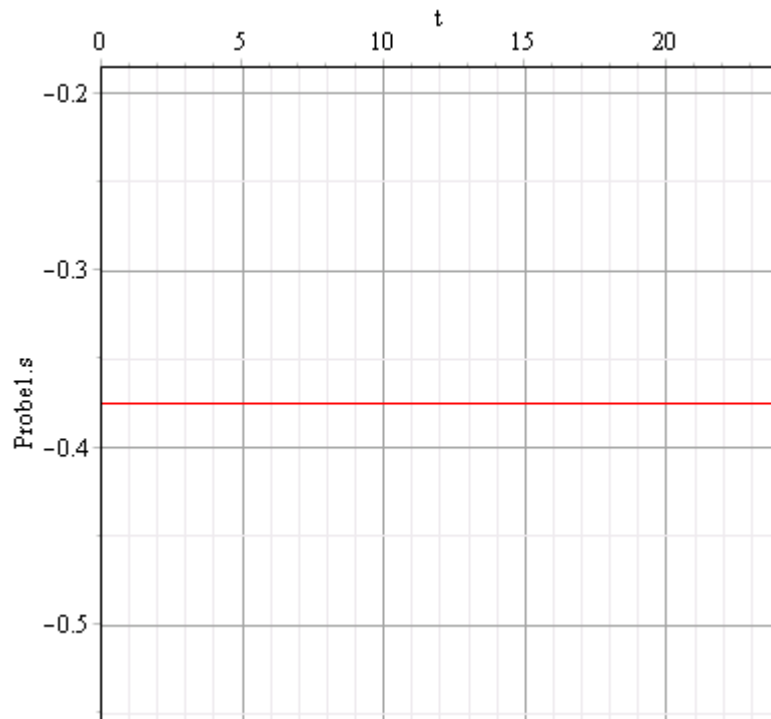


Рисунок 2.3 - Переміщення для $S_0=0,375$ м (м)

Перевагою Maplesim є те, що ця програма дозволяє автоматично отримати систему диференційно-алгебричних рівнянь, яка описує модель.

Так, в системі Maple ця система рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} SDl_s_rel(t) &= SDl_v_rel(t) \\ \frac{d}{dt} SDl_v_rel(t) &= 10 - \frac{80}{3} SDl_s_rel(t) - \frac{1}{3} SDl_v_rel(t)\end{aligned}$$

Не важко переконатись, що ця система рівнянь, описує модель пружинного маятника з демпфером. При бажанні можна провести відповідні маніпуляції з цими рівняннями в Maple 17 та отримати аналітичний розв'язок системи.

Додамо в нашу модель компонент двигуна переміщення з синусоїдальним переміщенням (рис. 2.4а). Амплітуда переміщення 1 м, частота 0,1 Гц. Для можливості візуалізації результатів моделювання добавимо в модель підмодель для візуалізації переміщення точки на колоні (рис. 2.4б). Візуалізацію моделювання можна буде побачити в вікні 3-D View (рис. 2.5).

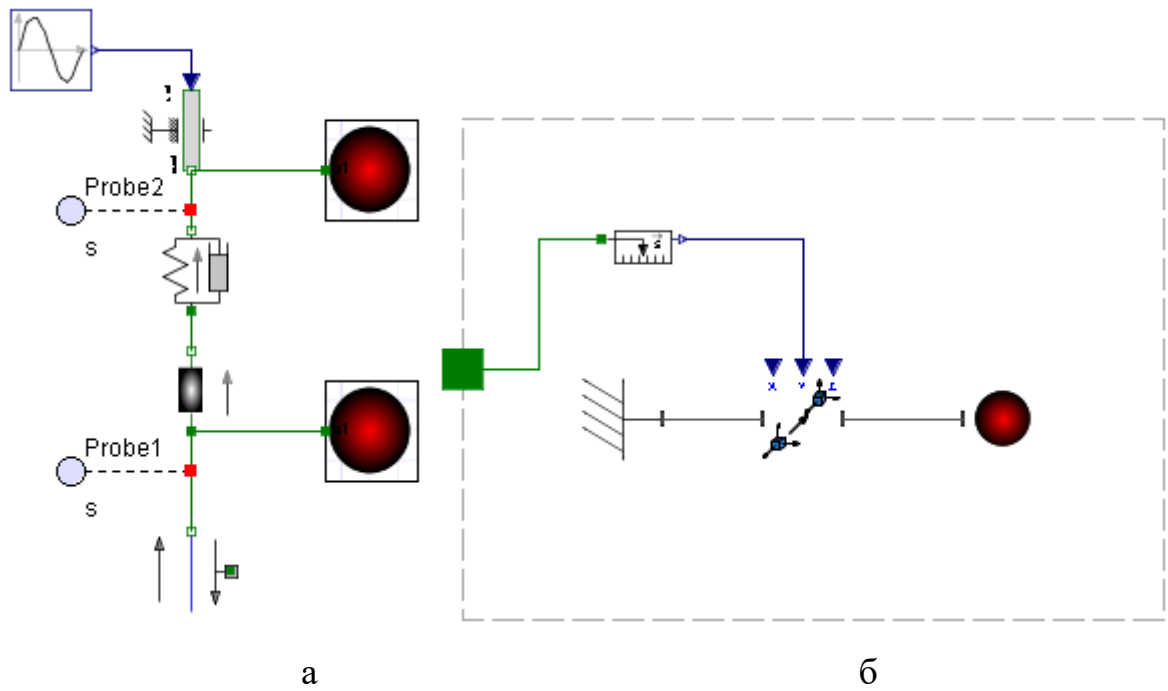


Рисунок 2.4 - Модель колони насосних штанг з переміщенням верхнього кінця (а) та підмодель для візуалізації переміщення точки на колоні (б)

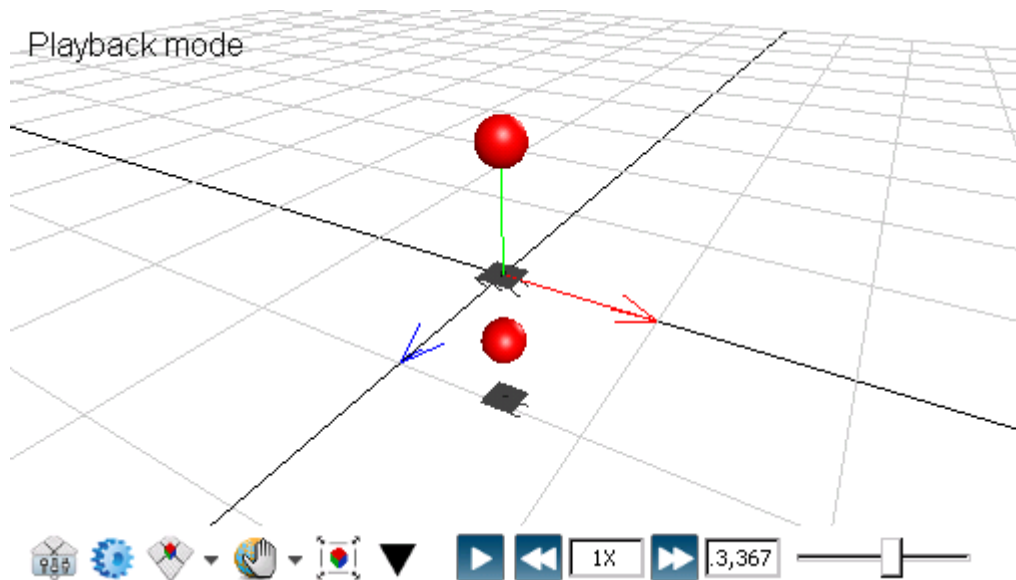


Рисунок 2.5 - Візуалізація переміщення верхньої та нижньої точок колони

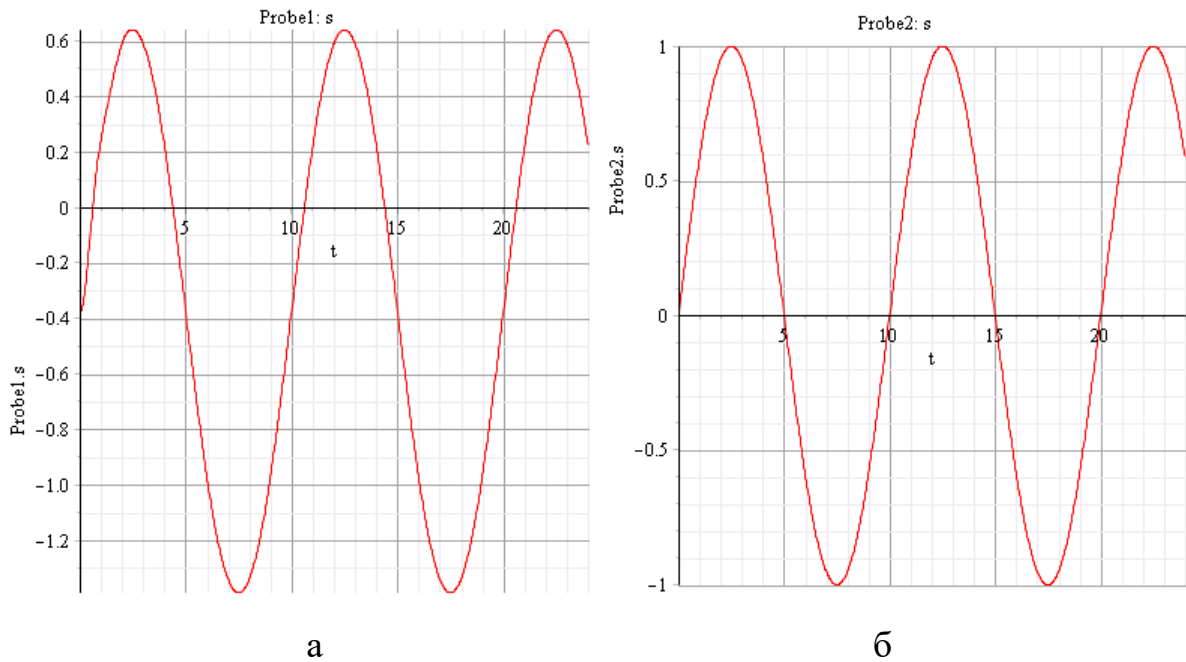


Рисунок 2.6 - Переміщення нижнього (а) та верхнього (б) кінця колони (м)

Як бачимо (рис. 2.6) переміщення верхнього і нижнього кінця колони не співпадають, що пояснюється динамічними навантаженнями.

Можна також моделювати сили тертя, які виникають під час руху колони штанг в колоні НКТ. Для цього використовуємо компонент Translational Friction з значенням параметру $d=10000$ Н·с/м. В даному випадку можливе "зависання" точки підвісу колони внаслідок тертя колони. Для можливості моделювання "зависання" точки підвісу колони необхідно додати компонент Translational Hardstop з наступними значеннями параметрів: $b = 2$ м, $c = 106$ Н·м, $d = 106$ Н·м·с (рис. 2.7).

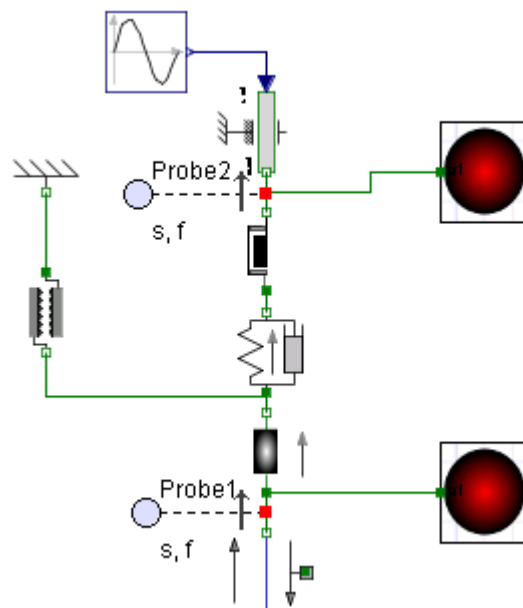


Рисунок 2.7 - Модель колони насосних штанг з моделюванням тертя

Результати моделювання показані на рис. 2.8, 2.9.

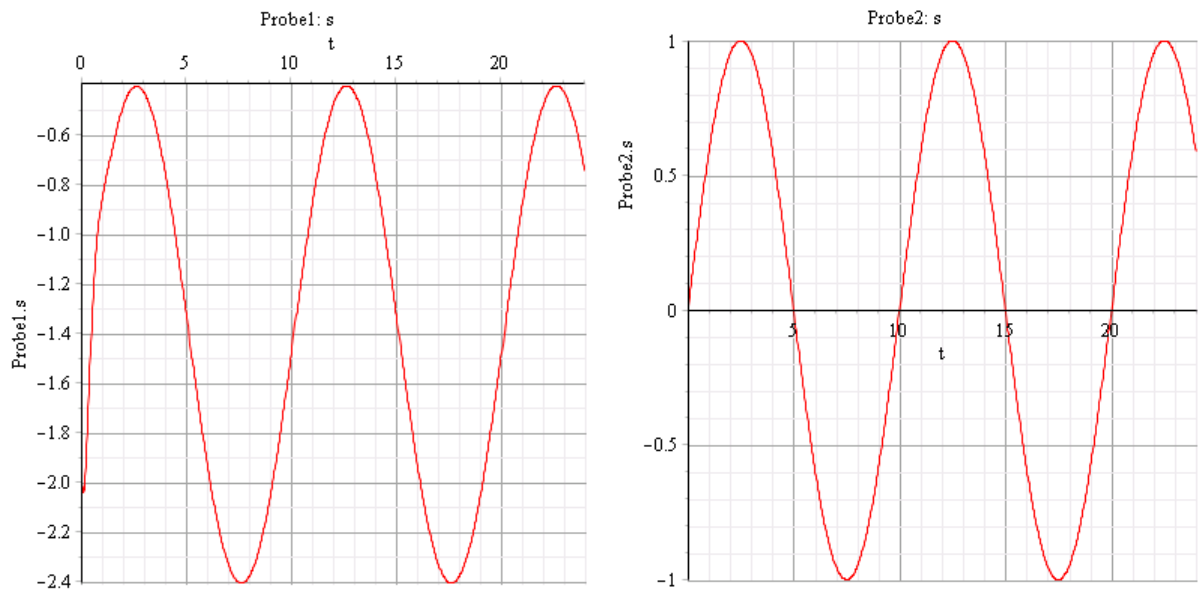


Рисунок 2.8 - Переміщення нижнього (а) та верхнього (б) кінця колони (м)

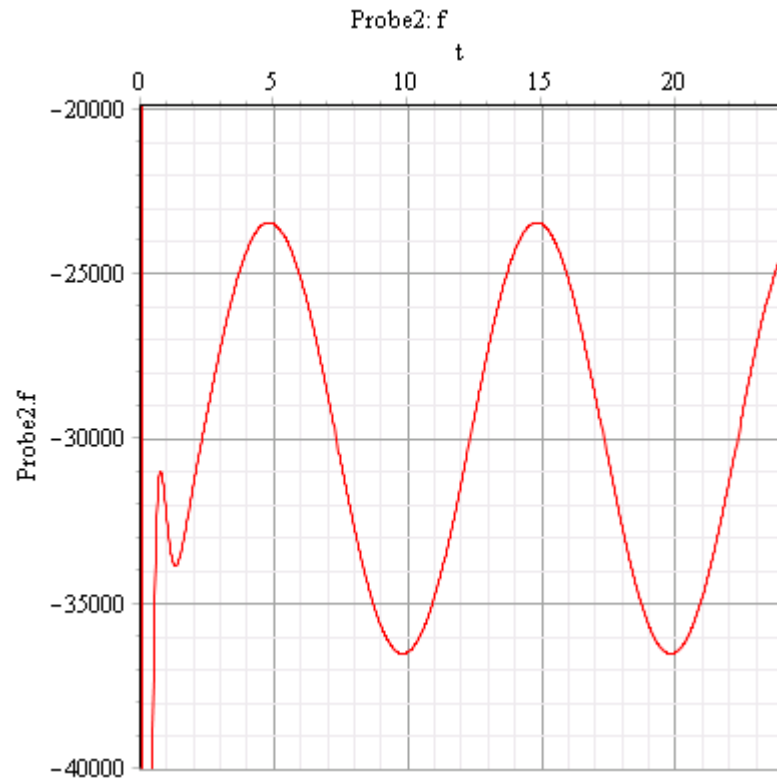


Рисунок 2.9 - Сила в верхньому кінці колони (Н)

Якщо збільшити частоту навантажування (рис. 2.10), то навантаження суттєво збільшиться. Ось чому намагаються зменшити частоту навантажування для збільшення ресурсу насосних штанг.

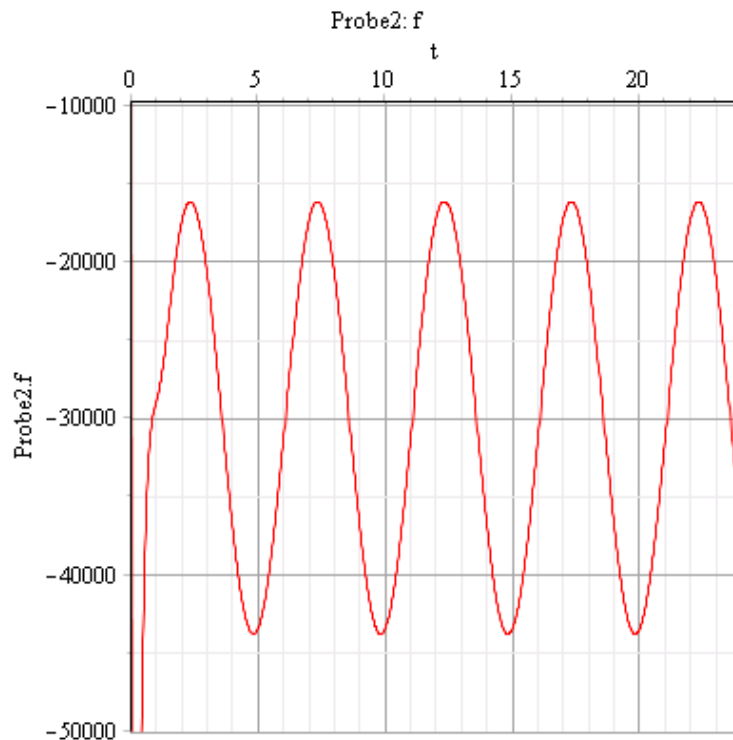


Рисунок 2.10 - Сила в верхньому кінці колони (Н) для частоти 0,2 Гц

Під час використання склопластикової колони насосних штанг з важким сталевим низом можливо збільшити довжину ходу плунжера насосу (нижнього кінця колони). Це дозволить збільшити об'єм нафти, що видобувається. Спробуємо зменшити жорсткість колони штанг до 30000 Н/м залишивши значення маси без змін. Результати показані на рис. 2.11. Помітне суттєве збільшення довжини ходу плунжера.

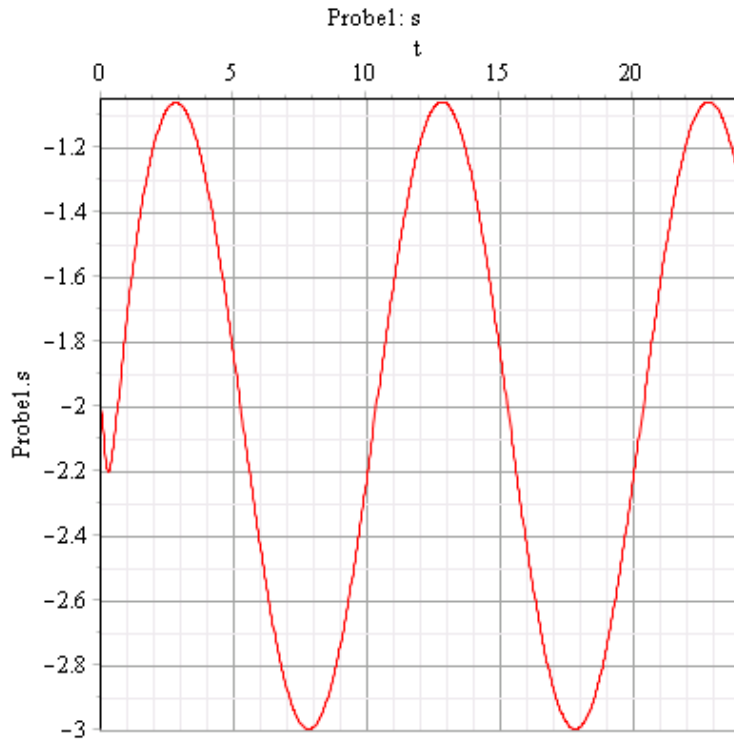


Рисунок 2.11 - Переміщення нижнього кінця колони (м) для колони

склопластикових штанг з важким сталевим низом

Для зручної візуалізації даних розробимо підсистему-компонент для динамометрування ШСНУ (рис. 2.12). Цей компонент містить датчики сили та переміщення, компонент Prescribed Translation та компонент для рисування траєкторії переміщення у вікні візуалізації. Додатково ця підсистема містить компонент для множення значення сили на заданий коефіцієнт. Це робиться для створення заданого масштабу динамограми.

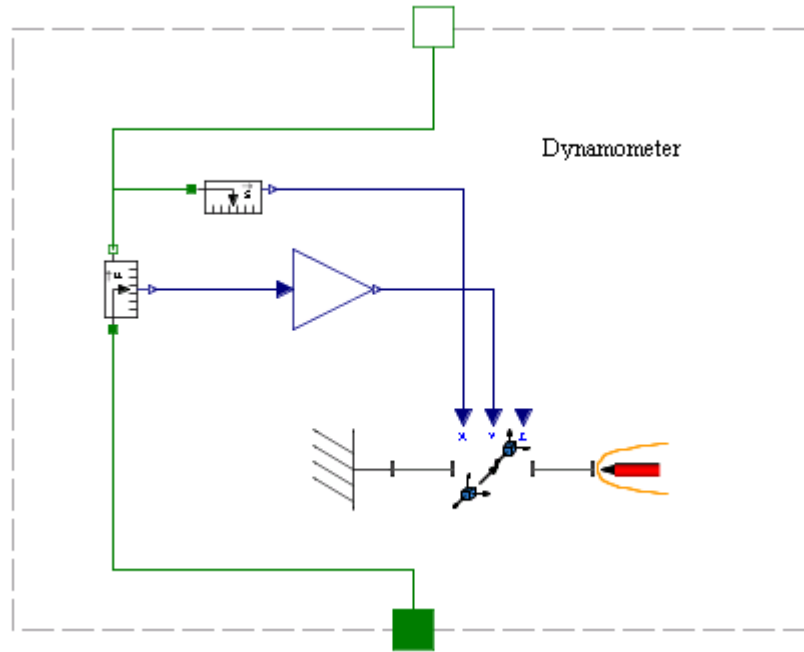


Рисунок 2.12 - Компонент для динамометрування ШСНУ

Розмістивши цей компонент у верхній частині колони (рис. 2.13) можливо отримувати динамограми роботи ШСНУ (2.14).

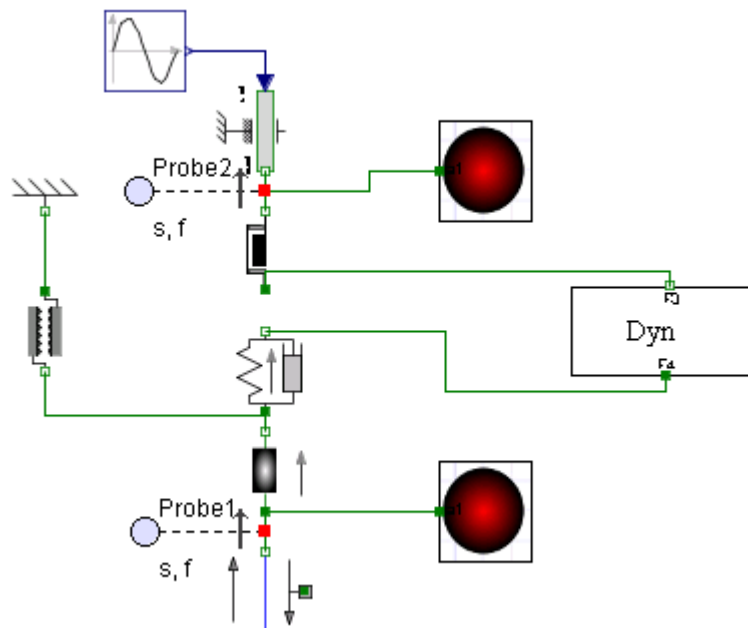
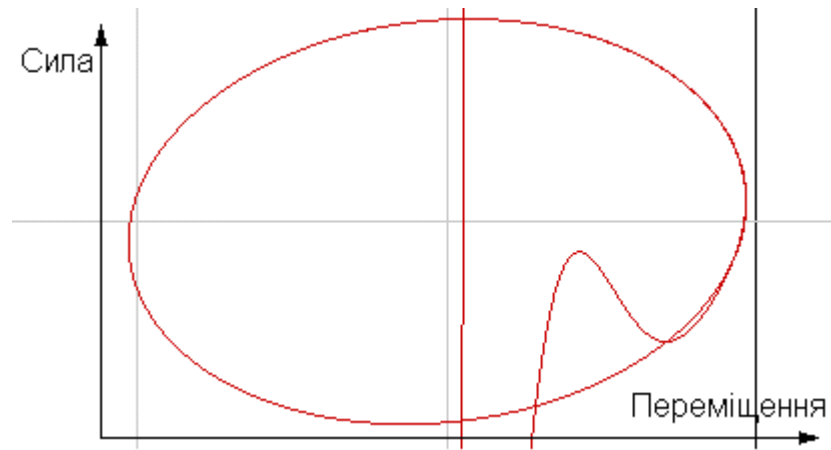


Рисунок 2.13 - Динамограма моделі колони штанг



Продовження рис. 2.14 - Динамограма моделі колони штанг

2.2. Модель з гідравлічною частиною

Maplesim містить також компоненти для моделювання гідравлічних динамічних систем. Їх можливо поєднувати разом з механічними компонентами в моделі однієї системи. Розробимо гідравлічно-механічну модель установки для відкачування нафти (рис. 2.15).

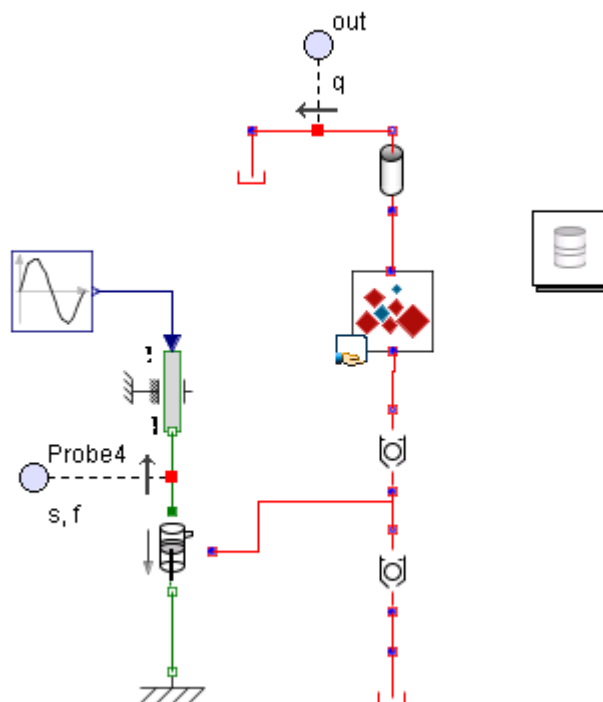


Рисунок 2.15 - Гідравлічно-механічна модель установки для відкачування нафти

Крім стандартних компонентів нам знадобилось розробити новий компонент для моделювання вертикальної труби (Vertical Pipe). Maplesim

містить засоби для зручного та легкого створення нових компонентів за допомогою системи Maple або шляхом вводу коду компонента мовою моделювання динамічних систем Modelica.

Рівняння, які описують поведінку цього компонента показані нижче.

```
eq := [ dP(t) = rho · g · z, Pin(t) - Pout(t) = dP(t), Qin(t) = Qout(t) ]
      [ dP(t) = ρ g z, Pin(t) - Pout(t) = dP(t), Qin(t) = Qout(t) ]
params := [ z = 0, rho = 1000, g = 9.81 ]
      [ z = 0, ρ = 1000, g = 9.81 ]
initialconditions := [ ]
```

Компонент містить два гідравлічні порти (рис. 4.16).

Port Type:

Port Name:

Port Components:

Pressure	<input type="text" value="Pin(t)"/>
Volume Flow Rate	<input type="text" value="Qin(t)"/>

Port Type:

Port Name:

Port Components:

Pressure	<input type="text" value="Pout(t)"/>
Volume Flow Rate	<input type="text" value="-Qout(t)"/>

Рисунок 2.16 - Створення портів компонента в шаблоні Maple

Код компонента мовою моделювання динамічних систем Modelica показано нижче.

```
model VerticalPipe
  extends Maplesoft.Icons.CustomComponent;
```

```

parameter Real z = 0 "z";
parameter Real rho = 1000 "rho";
parameter Real g = 9.81 "g";
Real Pin;
Real Qin;
Real dP;
Real Pout;
Real Qout;

Maplesoft.Hydraulics.Interfaces.Port_a portA annotation
(Placement(transformation(
    extent = {
        {-6, -110},
        {14, -90}},
    rotation = 0)));

Maplesoft.Hydraulics.Interfaces.Port_a portB annotation
(Placement(transformation(
    extent = {
        {-11, 90},
        {9, 110}},
    rotation = 0)));

equation
    Qin = Qout;
    dP = rho * g * z;
    Pin - Pout = dP;
    portA.p = Pin;
    portA.q = Qin;
    portB.p = Pout;
    portB.q = -Qout;
    annotation (uses(Modelica(version = "3.1")));
end VerticalPipe;

```

Розроблений компонент був протестований в наступній гідравлічній моделі (рис. 2.17). Результати показують відмінність значень тисків p для проб bot1 та bot2.

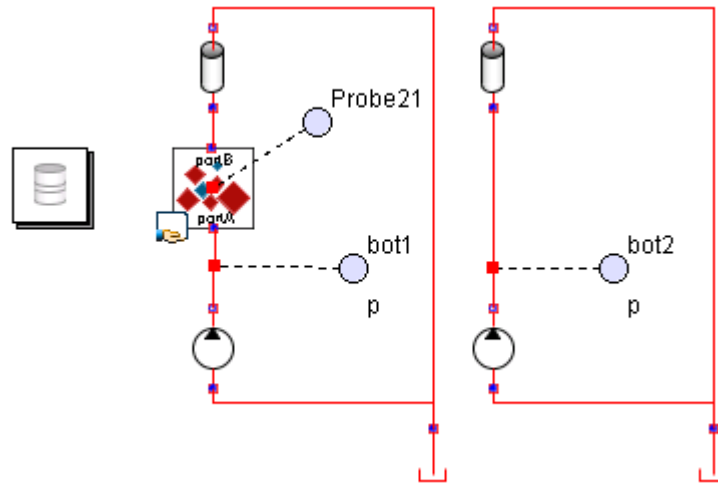
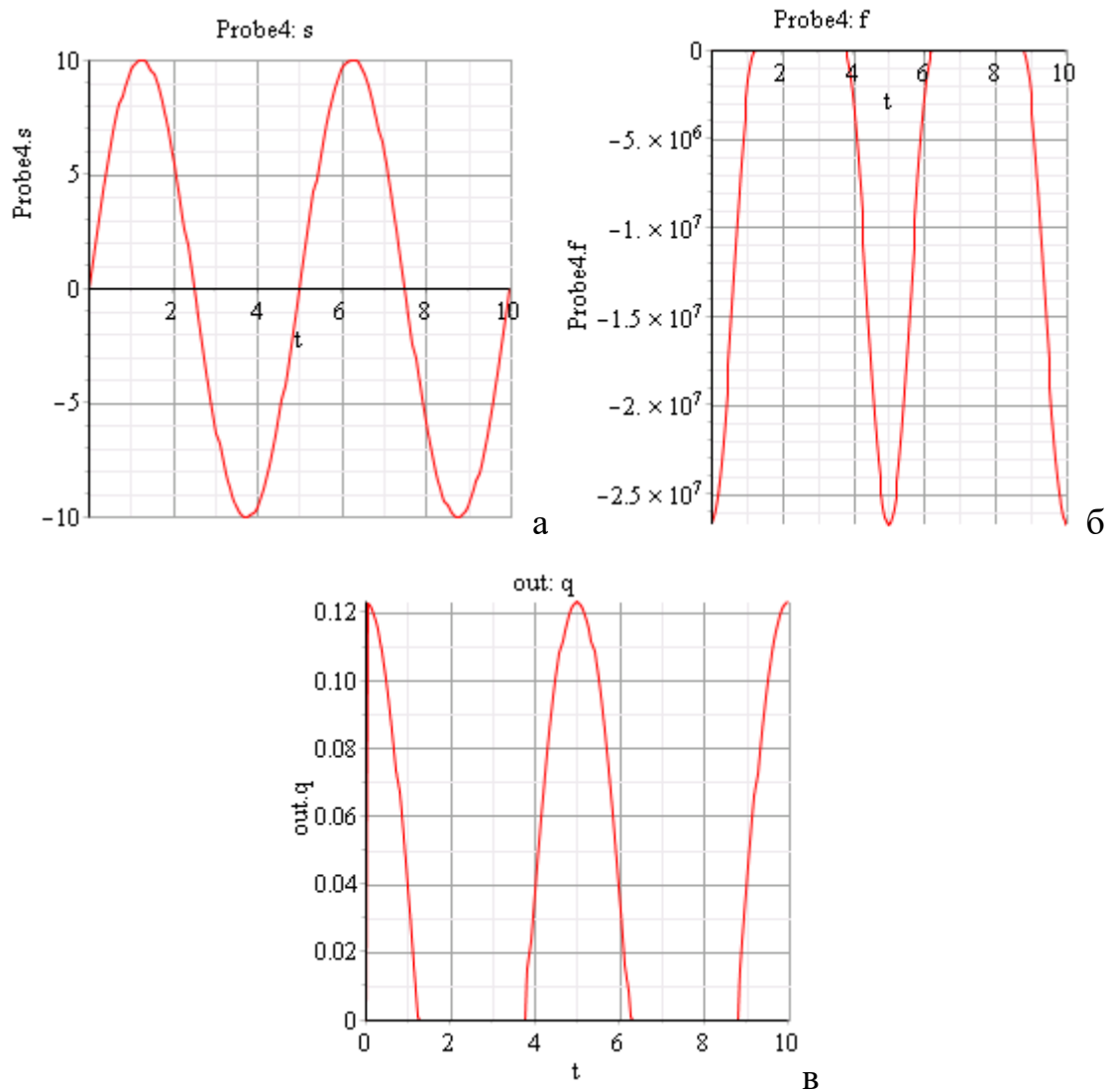


Рисунок 2.17 - Гідравлічна модель для тестування компоненту Vertical Pipe

Результати моделювання гідравлічно-механічної динамічної системи показані нижче (рис. 2.18). Тепер розроблену гідравлічну модель гідравлічної частини ШСНУ можна під'єднати до вже розробленої механічної моделі колони насосних штанг.



- а - хід плунжера насосу (м),
 б - сила плунжера насосу (Н),
 в - подача рідини на гирлі (m^3)

Рисунок 2.18 - Результати моделювання гідравлічно-механічної динамічної системи

2.3. Модель ШСНУ з верстатом-качалкою

Maplesim також дозволяє розробити динамічну модель привода ШСНУ (верстата-качалки). Для цього слід використовувати компоненти з вкладки Multibody (рис. 2.19).

Компоненти Multibody дозволяють виконувати візуалізацію їх руху у вікні візуалізації (рис. 2.20, 2.21).

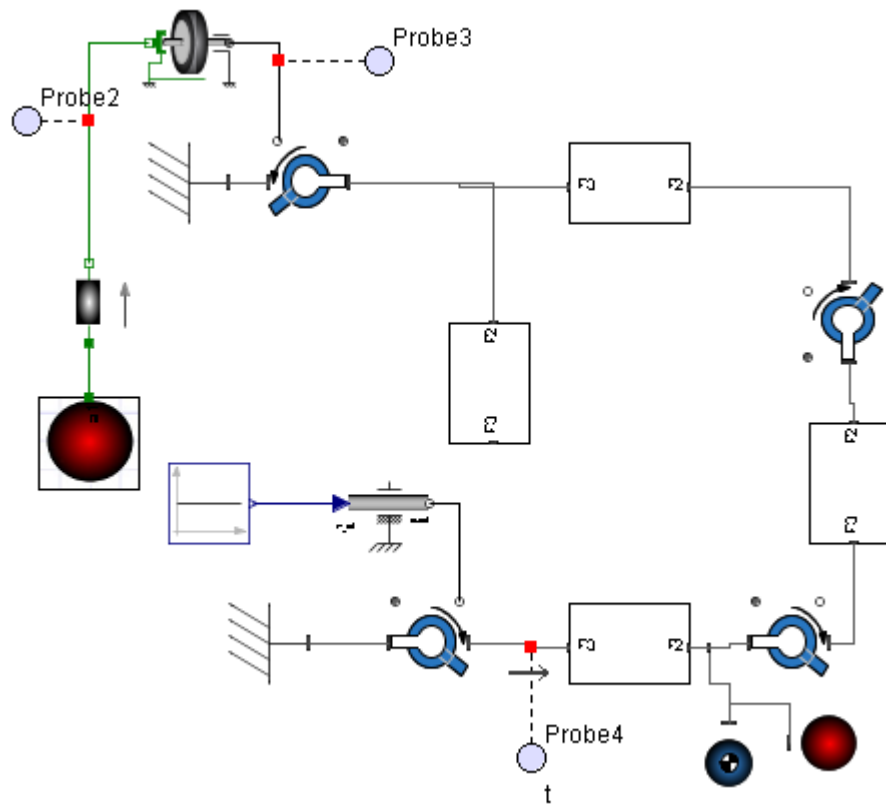


Рисунок 2.19 - Динамічна модель верстата-качалки

Construct mode

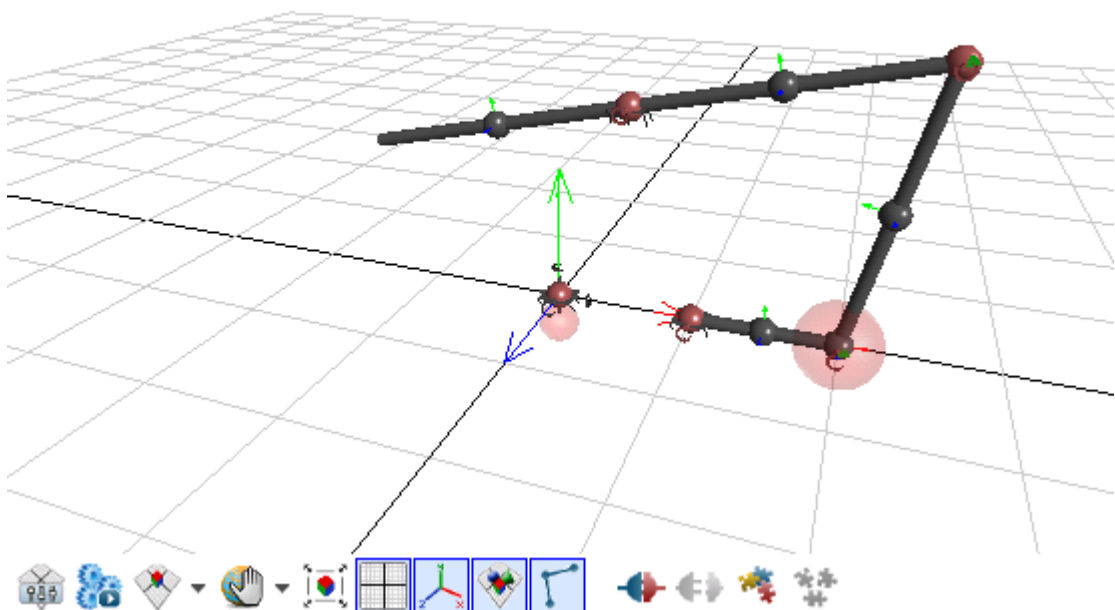


Рисунок 2.20 - Вікно візуалізації руху ланок моделі верстата-качалки

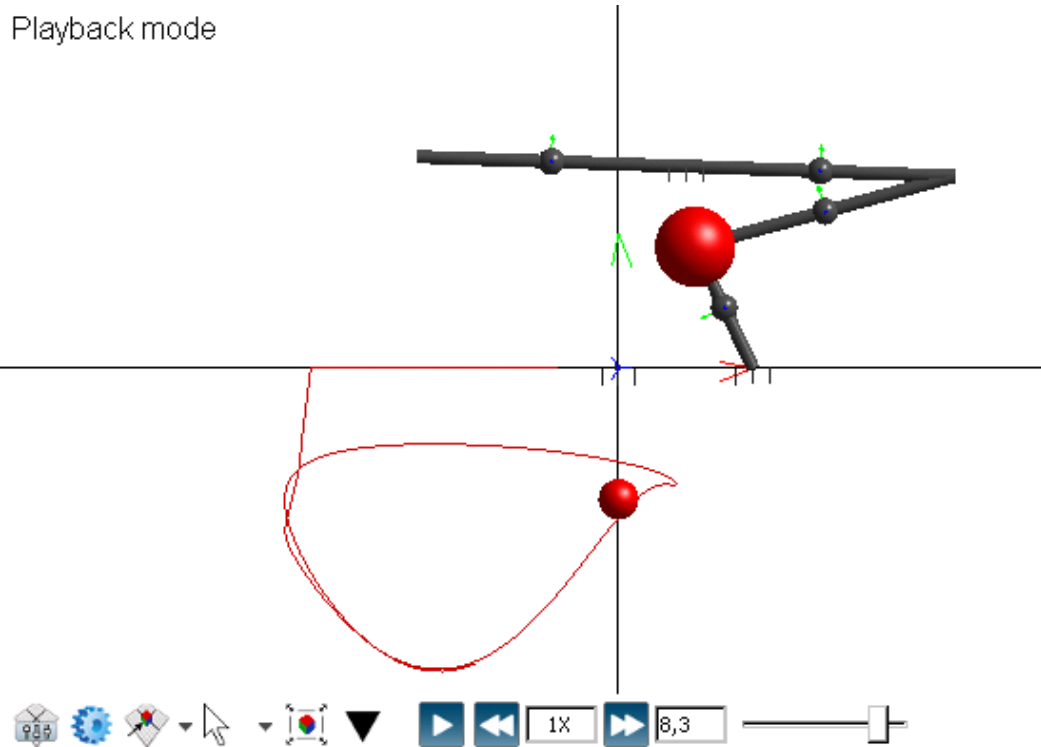


Рисунок 2.21 - Візуалізація роботи ланок верстата-качалки з побудовою динамограми

Об'єднана модель ШСНУ показана на рис 2.22. Для можливості отримання результатів моделювання необхідно змінити налаштування симуляції: Solver type: Fixed, Solver: Euler. Час симуляції динамічної моделі 10 с. Результати моделювання показані на рис. 2.23-2.25.

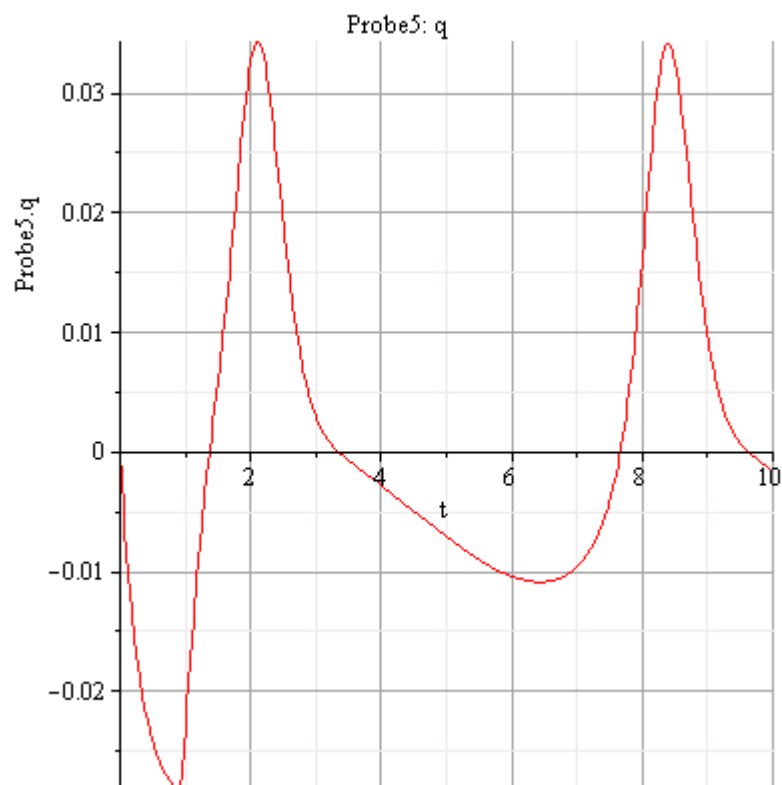


Рисунок 2.23 - Подача на виході насосу (м³)

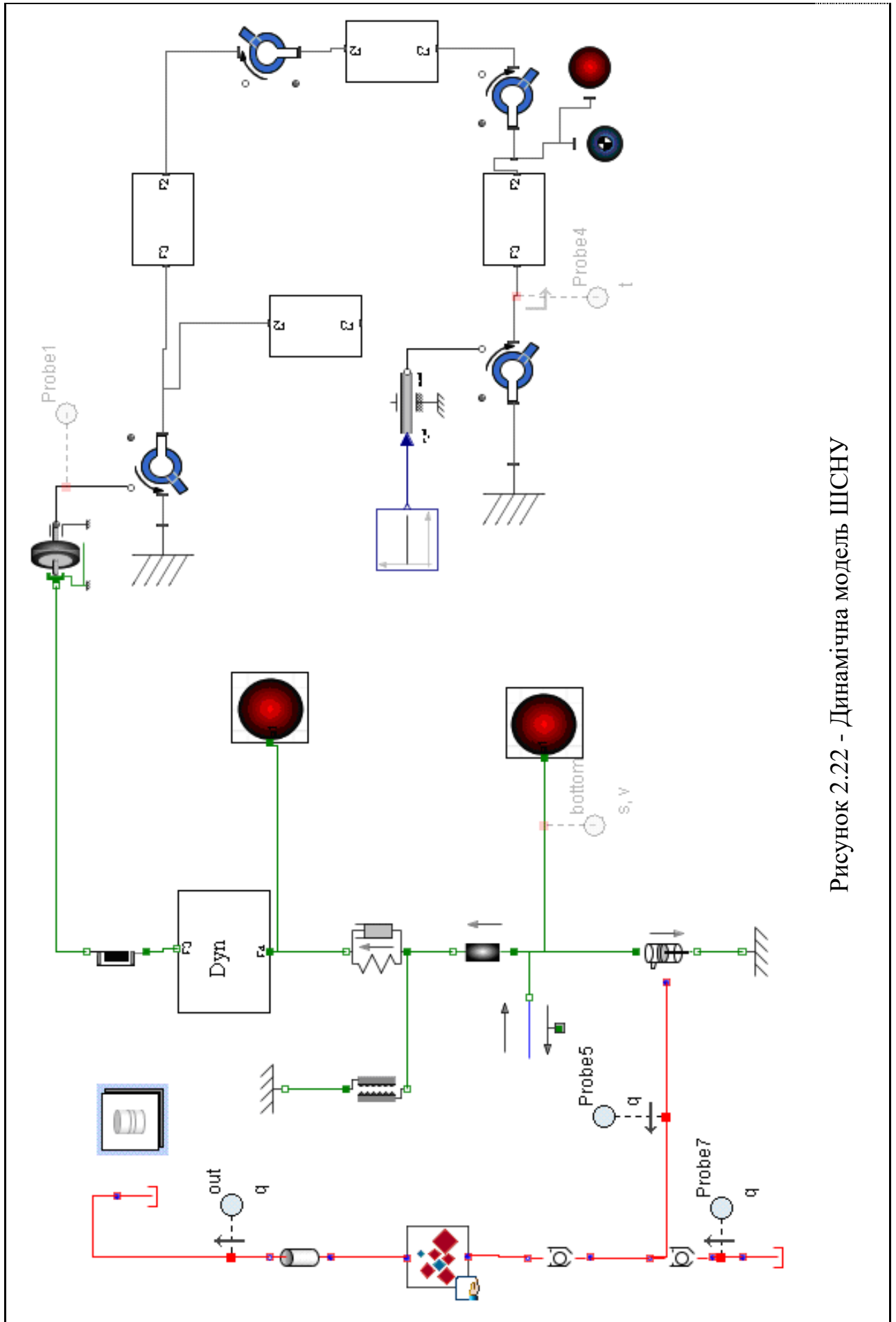


Рисунок 2.22 - Динамічна модель ПСНУ

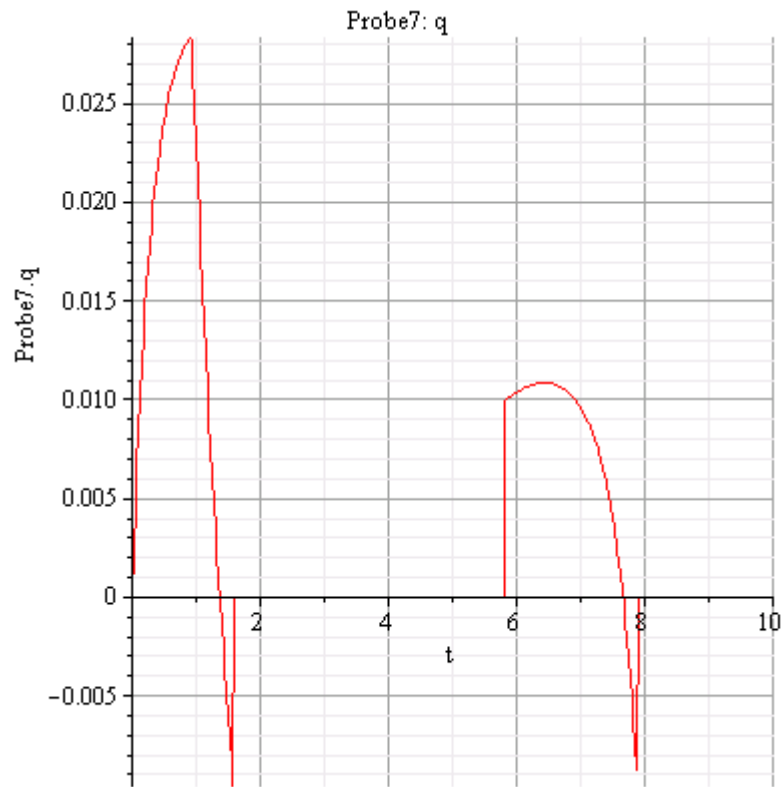


Рисунок 2.24 - Подача на всмоктуючому клапані (м^3)

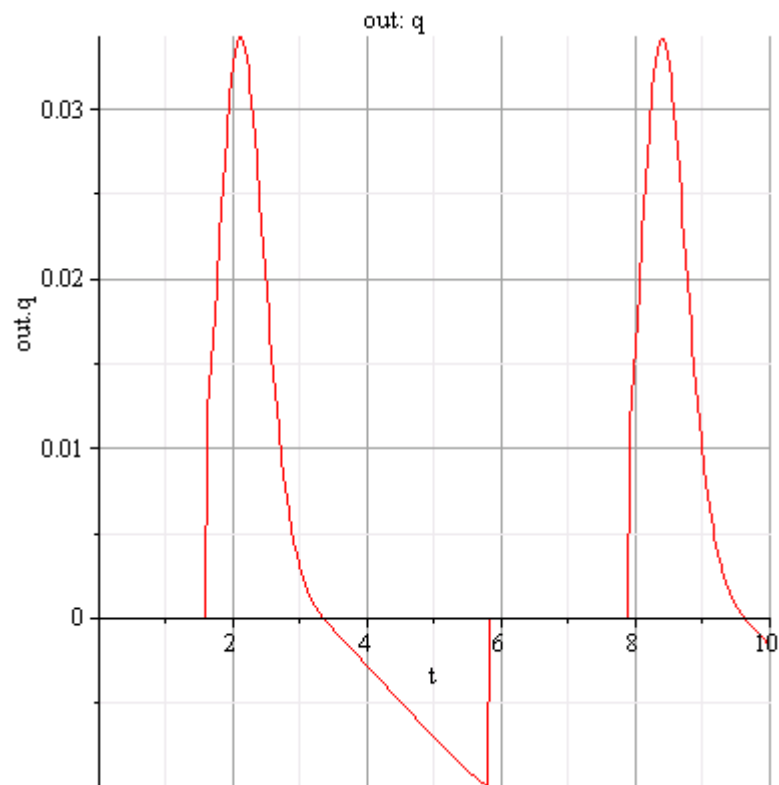


Рисунок 2.25 - Подача на гирлі (м^3)

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МОДЕЛІ ШЧНУ В SOLIDWORKS MOTION

В праці [37] за допомогою САПР SOLIDWORKS розроблено параметричну модель ШЧНУ для наступного аналізу її динамічних та кінематичних характеристик в SOLIDWORKS Motion. Це модель ШЧНУ, яка є максимально подібна на об'єкт моделювання за геометрією та масою, але може не містити дрібних деталей (кріпильні деталі, підшипники, втулки, дрібні геометричні елементи), які не є суттєвими для моделювання динамічних та кінематичних характеристик в Motion. Параметрична модель ШЧНУ містить параметричні моделі деталей та зборок та відповідні класи мовою програмування Python, в яких розраховуються параметри моделі. Це дозволяє легко перебудувати модель у разі зміни її параметрів.

За допомогою цієї моделі виконаємо аналіз кінематичних та динамічних характеристик тривимірної моделі верстата-качалки за допомогою програми SOLIDWORKS Motion. Розглянемо роботу ШЧНУ з наступними значеннями параметрів:

Верстат-качалка: СКД8-3-4000;

Навантаження на балансир: $P_{\min}=10000$ Н, $P_{\max}=20000$ Н (рис. 3.1);

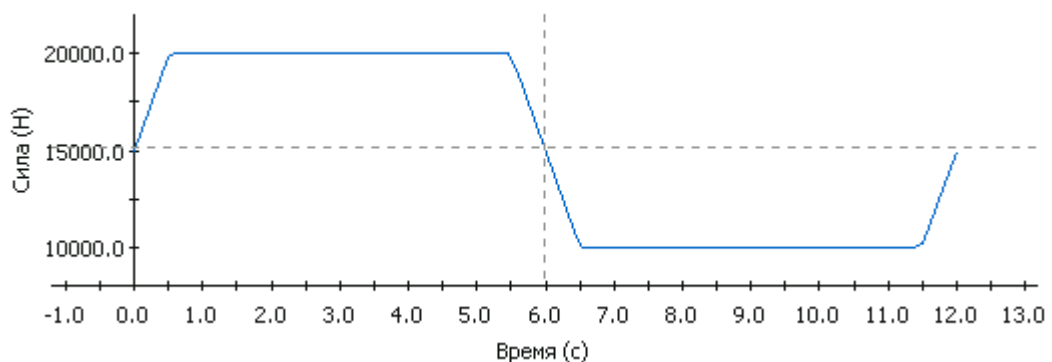


Рисунок 3.1 - Зміна навантаження в точці підвісу штанг

Довжина ходу полірованого штока: 2000 мм;

Кількість ходів: 5 хв^{-1} ;

Кількість противаг: 4;

Радіус центра мас противаг: 1014 мм.

Для здійснення моделювання в SOLIDWORKS Motion необхідно розташувати кривошип з противагами в верхньому крайньому положенні (рис. 3.2). В вікні "Анімація" (рис. 3.3) потрібно вибрати тип дослідження "Аналіз руху". Далі потрібно додати двигун до моделі, вказавши циліндричну поверхню деталі "Вал" та ввести частоту обертання 5 хв^{-1} . Далі потрібно додати силу, що відповідає навантаженню в точці підвісу штанг та додати силу гравітації і вказати її напрямок.

Оскільки частота обертання вала 5 хв^{-1} , то обмежимося часом моделювання $60/5=12 \text{ с}$. Ті деталі, які розташовані одна відносно іншої нерухомо, бажано об'єднати в жорсткі групи (рис. 3.3). Це зменшить час розрахунку моделі.

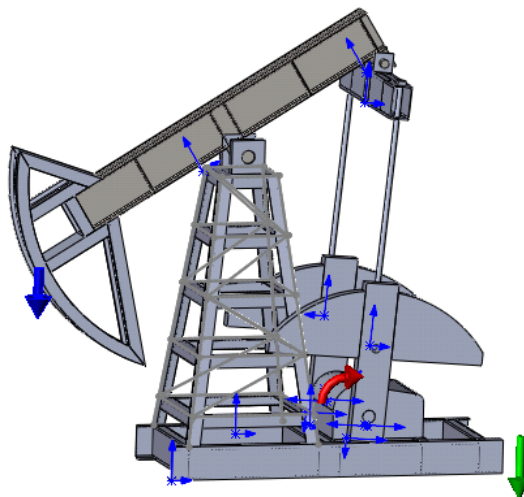


Рисунок 3.2 - Модель ШЧНУ в SOLIDWORKS Motion

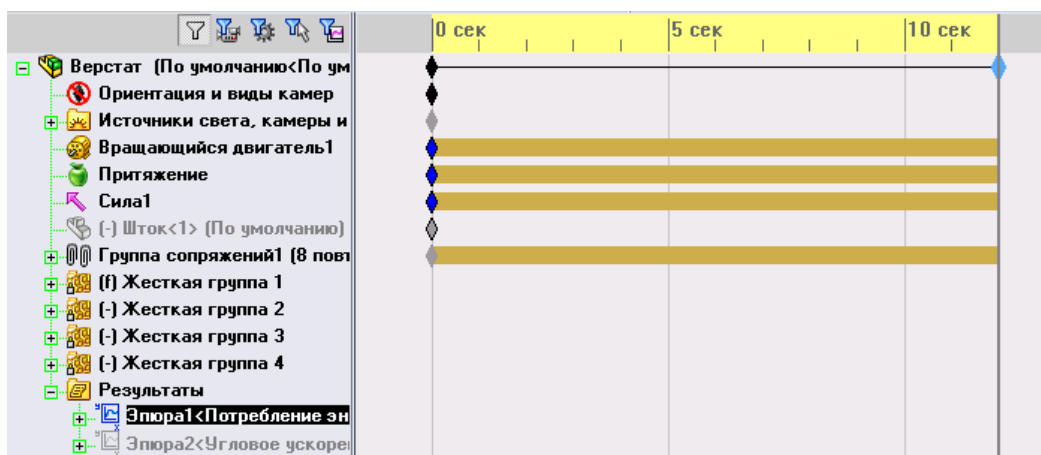


Рисунок 3.3 - Вікно аналізу руху в SOLIDWORKS Motion

Необхідно також вказати, які результати моделювання нас цікавлять. В даному випадку нас цікавлять кінематичні характеристики руху балансира (кутове переміщення, швидкість та прискорення) та динамічні характеристики (крутний момент на тихохідному валу редуктора, та споживання енергії).

Результати розрахунку кінематичних характеристик руху балансира наведено на рис. 3.4-3.6.

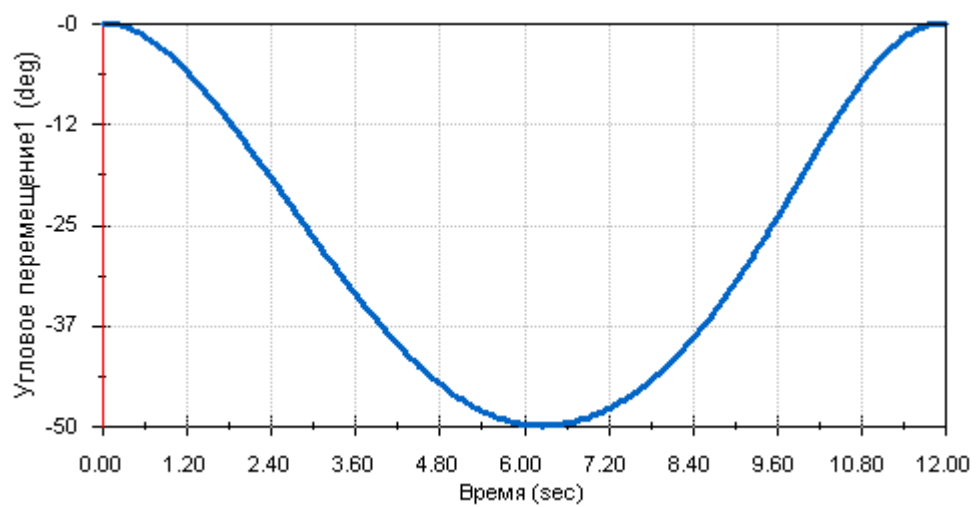


Рисунок 3.4 - Кутове переміщення балансира, град.

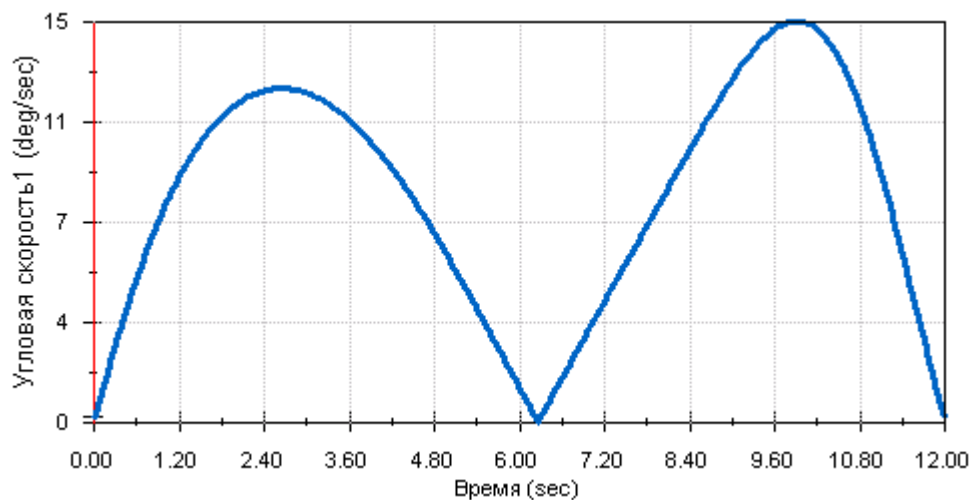


Рисунок 3.5 - Кутова швидкість балансира, град/с.

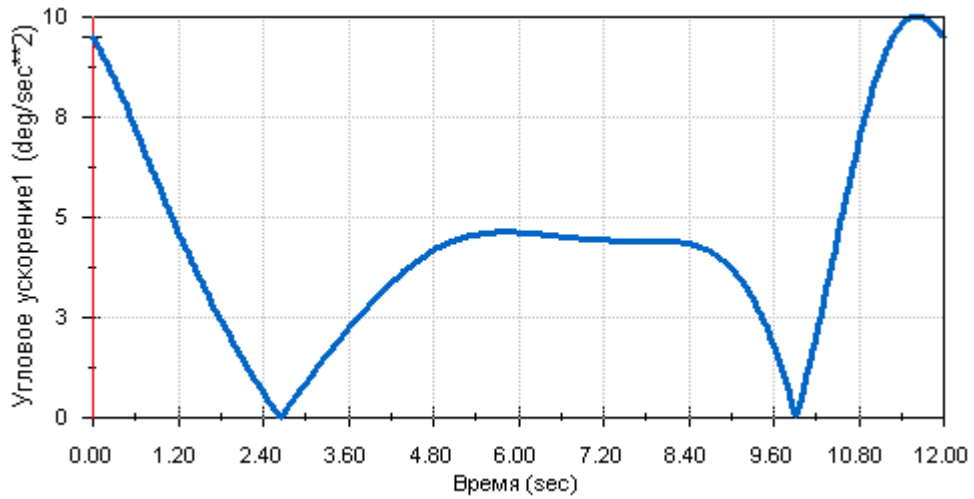


Рисунок 3.6 - Кутове прискорення балансира, град/с².

На рис. 3.7, 3.8 показано зміну крутного моменту на тихохідному валу редуктора з часом та зміну споживання енергії з часом.

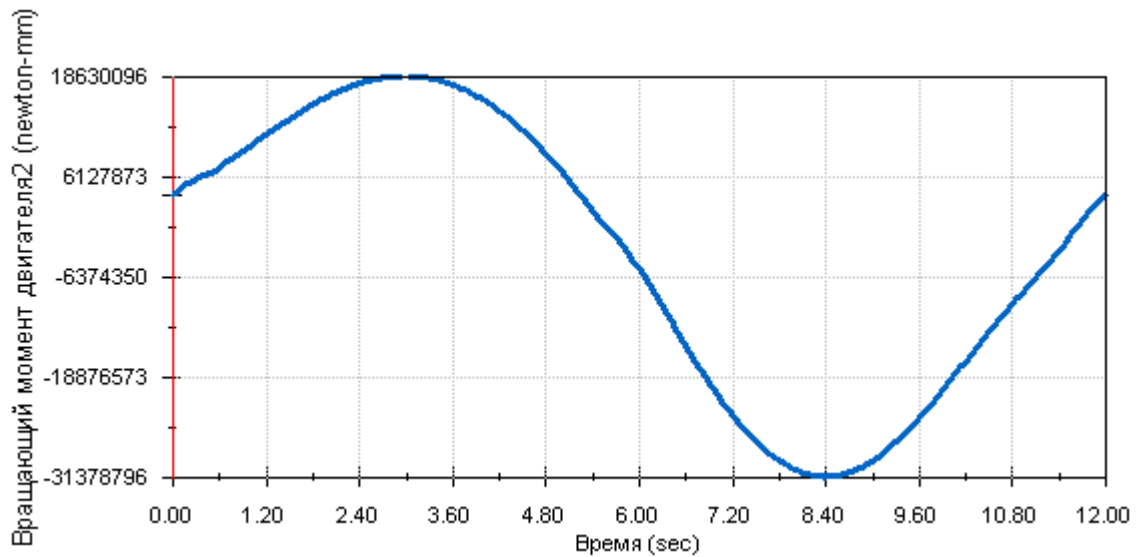


Рисунок 3.7 - Крутний момент на тихохідному валу редуктора, Н·мм

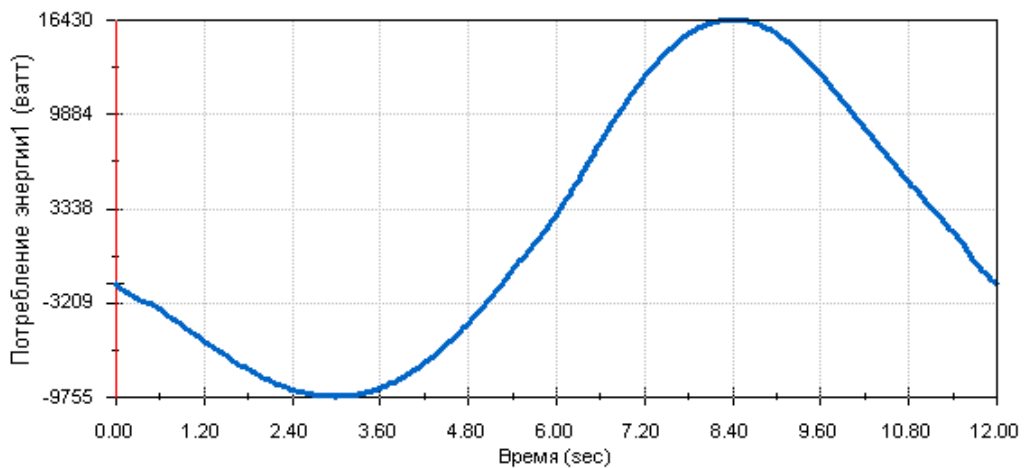


Рисунок 3.8 - Споживання енергії, Вт

Змінимо радіус центра мас противаг до 1114 мм та подивимось, як це змінить криву ватметрограми (рис. 3.9). Помітно, що урівноваження верстату погіршилось (збільшився максимум та зменшився мінімум на графіку).

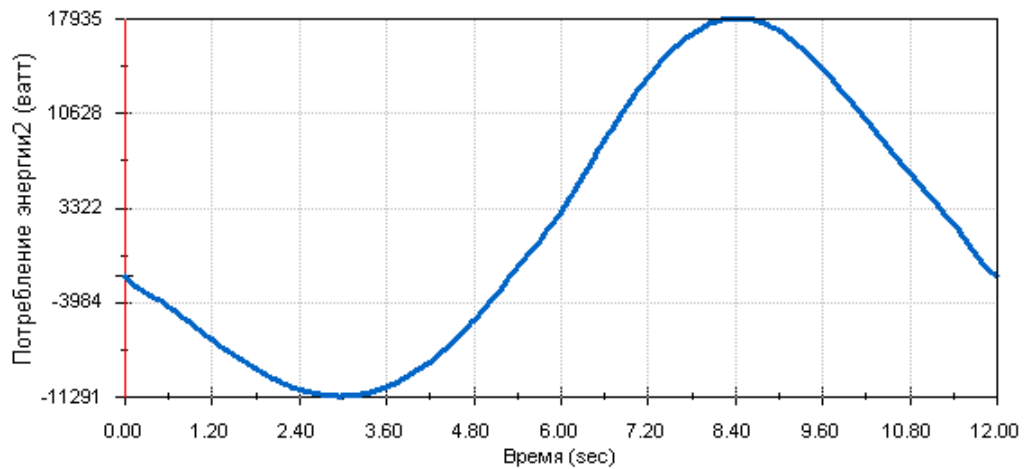


Рисунок 3.9 - Споживання енергії, Вт ($r=1114$ мм)

Змінимо радіус центра мас противаг до 914 мм. З рис. 3.10 помітно, що урівноваження верстату покращилось (зменшився максимум та збільшився мінімум на графіку).

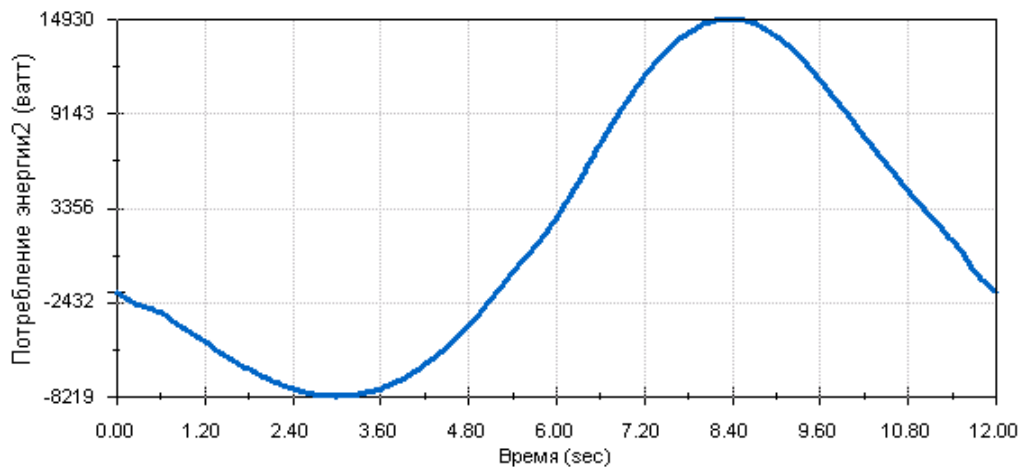


Рисунок 3.10 - Споживання енергії, Вт ($r=914$ мм)

Розглянемо роботу верстату, якщо навантаження на балансир відсутнє ($P=0$ Н). З рис. 3.11 видно, що неурівноваженість верстату зростає до максимуму.

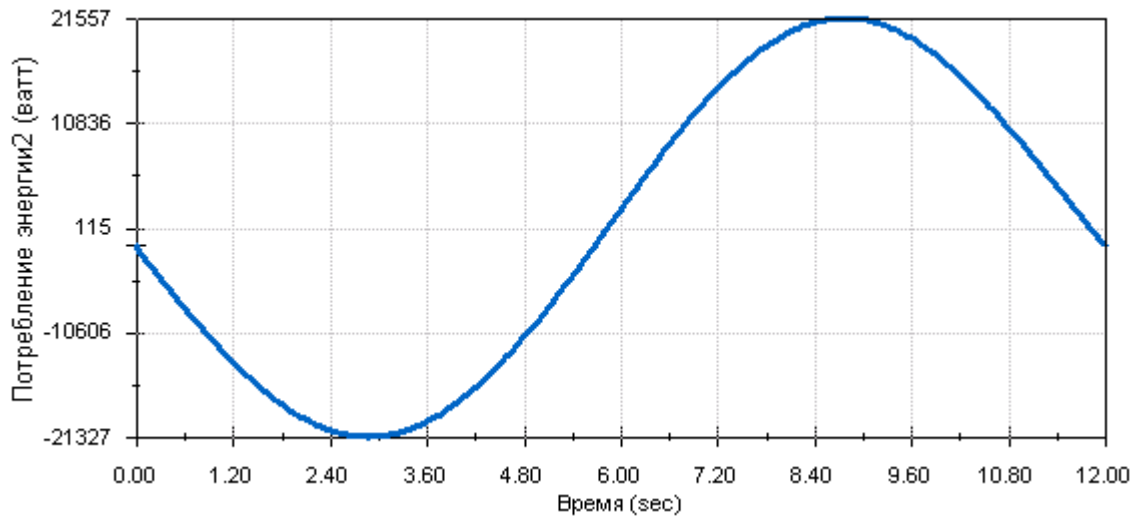


Рисунок 3.11 - Споживання енергії, Вт (P=0 Н)

Розглянемо роботу верстату, якщо навантаження на балансір постійне (P=20000 Н). На рис. 3.12 показано відповідну ватметрограму.

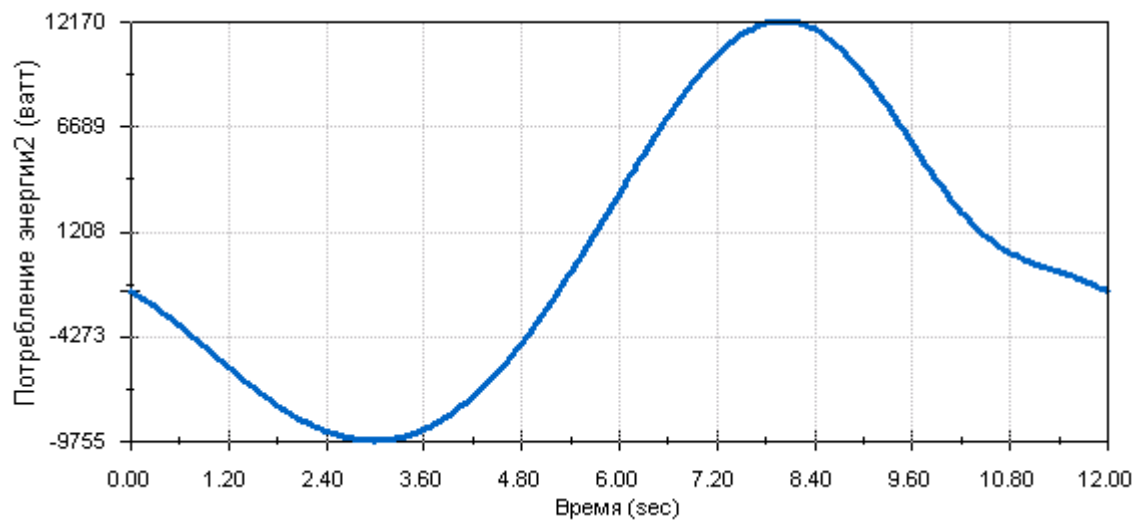


Рисунок 3.12 - Споживання енергії, Вт (P=20000 Н)

Дана методика розрахунків дозволяє проводити оптимізацію конструкції верстат-качалки та цілої ШСНУ. Наприклад, для оптимізації радіус центра мас противаг необхідно поступово збільшувати цей радіус на малу величину до тих пір, поки неурівноваженість верстату (по даним ватметрограм) не зменшиться до мінімуму.

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ШН В SOLIDWORKS SIMULATION

4.1. Побудова параметричної геометричної моделі

З метою оптимізації конструкції такого з'єднання в системі SOLIDWORKS була розроблена параметрична модель з'єднання. Параметрична модель дозволяє легко змінювати значення параметрів моделі без необхідності перебудови моделі заново. Це відкриває широкі можливості для параметричної оптимізації конструкції, зокрема за критерієм максимальних еквівалентних напружень у з'єднанні S_{max} .

Нижче показано послідовність побудови параметричної моделі з'єднання. Тіло штанги будуємо як циліндр шляхами витягування круглого ескізу на задану відстань (рис. 4.1). Діаметр тіла – 22 мм.

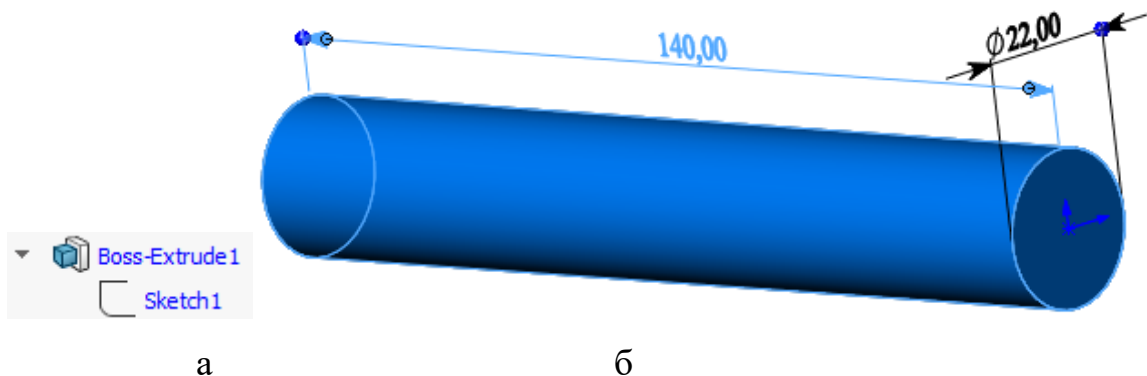


Рисунок 4.1 - Дерево побудови моделі (а) та модель тіла штанги (б)

Для побудови адгезійного клину спочатку створюємо кільце з внутрішнім радіусом 11 мм та зовнішнім радіусом $r=13$ мм (рис. 4.2). Після цього створюємо фаску довжиною 8 мм і з кутом $\alpha=34$ градуса (рис. 4.3). Щоб створити систему клинів застосовуємо лінійний масив $Lpattern$ з параметром кроку, який рівний $p=10$ мм (рис. 4.4).

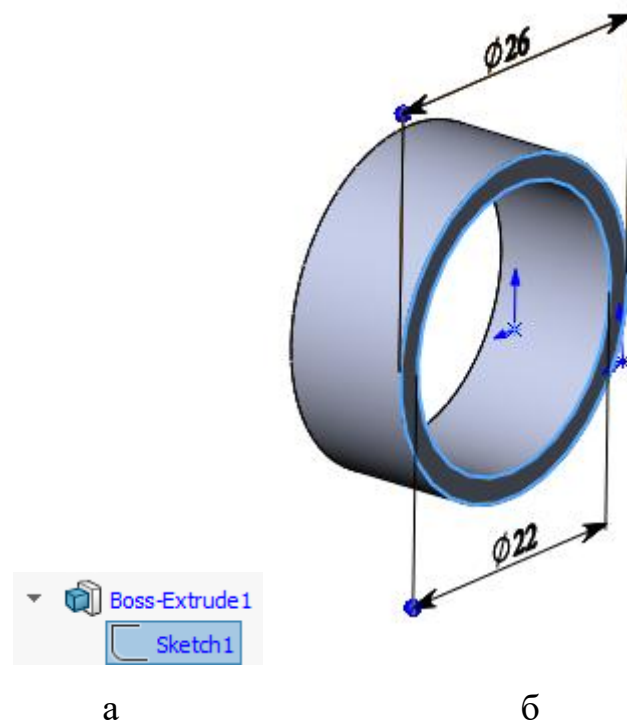


Рисунок 4.2 - Дерево побудови моделі (а) та модель епоксидного клина (б) на першому етапі побудови моделі

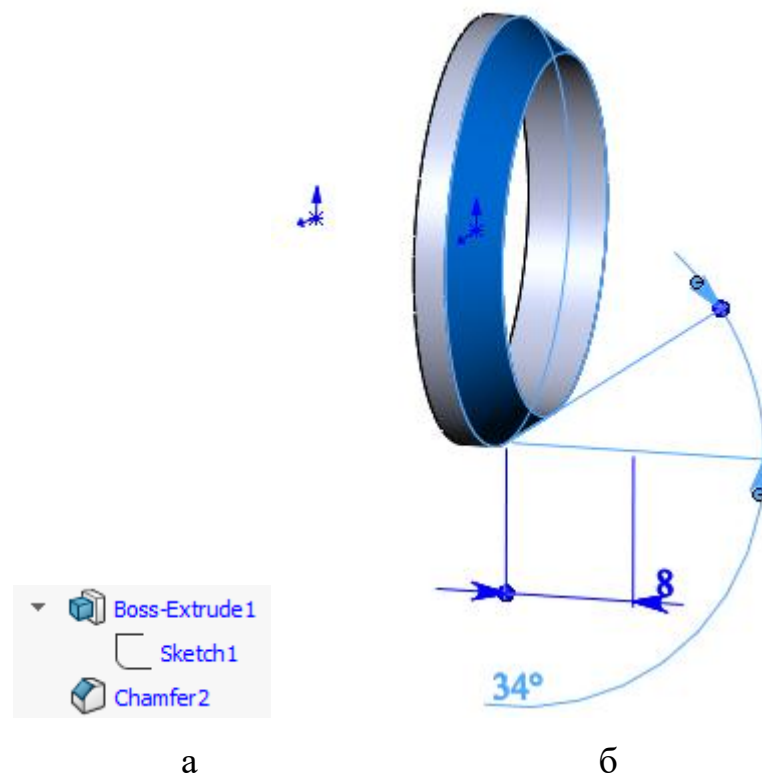


Рисунок 4.3 - Дерево побудови моделі (а) та модель епоксидного клина (б) на другому етапі побудови моделі

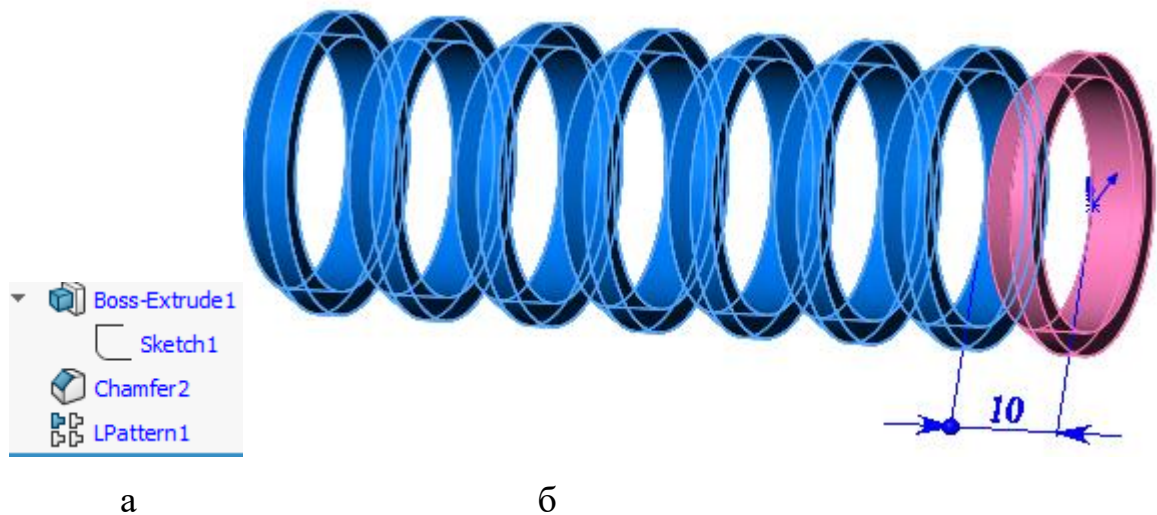


Рисунок 4.4 - Дерево побудови моделі (а) та модель епоксидного клина (б) на третьому етапі побудови моделі

Для створення ніпеля спочатку створюємо циліндричне тіло з внутрішнім діаметром 21,98 мм (потрібен невеликий зазор між ніпелем і тілом) та зовнішнім діаметром 36 мм (рис. 4.5). Після цього додаємо елемент Cavity, який утворює виріз, що відповідає системі адгезійних клинів. Для цього потрібно вказати на готову модель системи адгезійних клинів і потрібним чином розташувати її відносно ніпеля. В даному випадку вона розташовується на відстані 10 мм від торця ніпеля. Як правило це зручно робити в режимі Assembly.

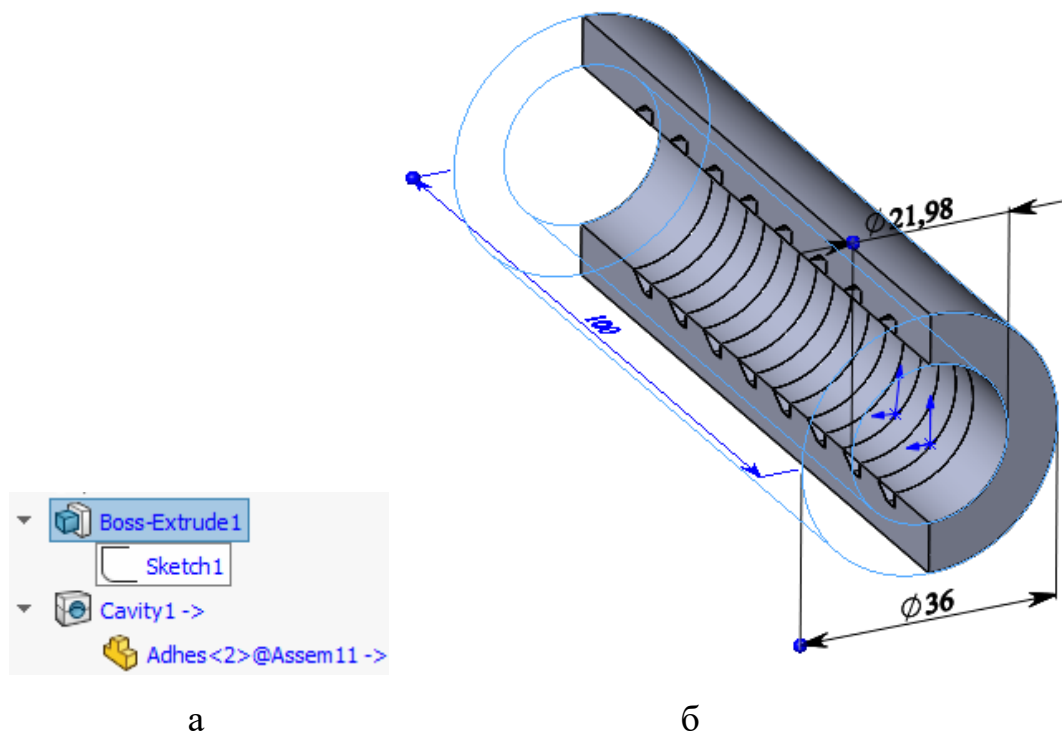


Рисунок 4.5 - Дерево побудови моделі (а) та модель сталевгого ніпеля ШН (б)

Після цього приступаємо для до створення збірки. Додаємо в неї три деталі - ніпель, тіло ШН і систему клинів. Торці ніпеля і тіла повинні зберігатися, тому створюємо відповідне обмеження (рис. 4.6). Додаткове обмеження робить концентричними ніпель, тіло і систему клинів. Ще одно обмеження розташовує систему клинів на відстані 10 мм від торця ніпеля. Додатково створюємо вісь на основі будь-якої циліндричної поверхні. Ця вісь буде використовуватись для визначення осесиметричного аналізу методом скінченних елементів. Готова зборка показана на рисунку. Параметри для оптимізаційних досліджень показані в таблиці 4.1.

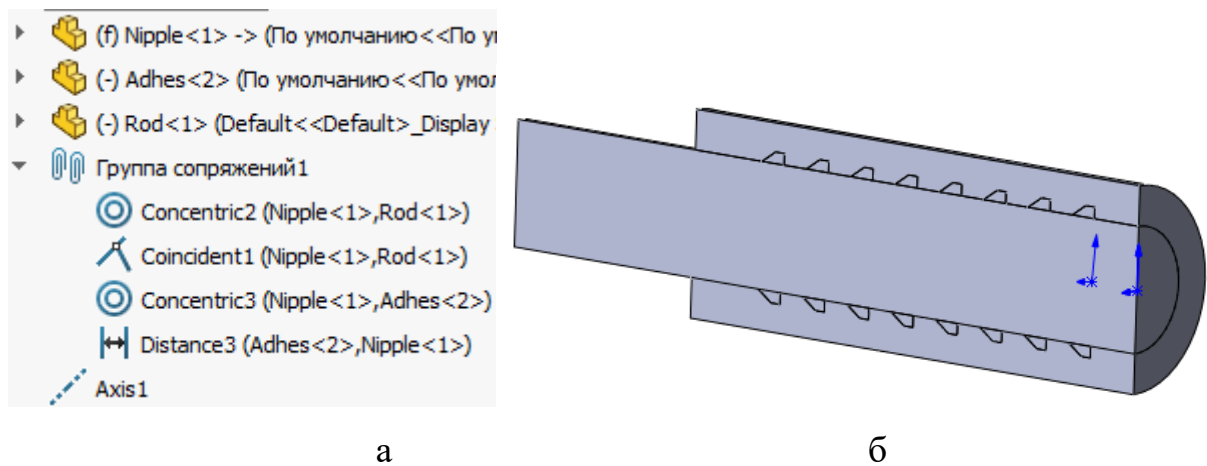


Рисунок 4.6 - Дерево побудови моделі (а) та модель з'єднання ШН (б)

Таблиця 4.1 - Параметри, які обрані для оптимізації

Позначення	Назва, одиниці вимірювання	Межі
n	Кількість клинів	від 1 до 17
a	Кут клина, °	від 20 до 50
r	Зовнішній радіус клина, мм	від 12 до 13,6
p	Крок клинів, мм	від 5 до 10

4.2. Побудова скінченно-елементної моделі

Після цього за допомогою модуля Simulation створюємо нове статичне дослідження. Для пришвидшення обчислень слід зменшити кількість

елементів. Цього можна досягти шляхом створення осесиметричної моделі. В цій моделі не можна буде вводити несиметричні елементи та навантаження. Щоб створити осесиметричну модель потрібно вказати вісь симетрії, яку ми створили вище (рис. 4.7).

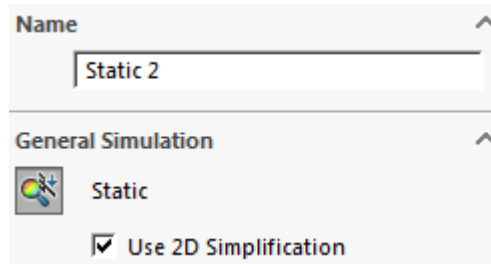


Рисунок 4.7 - Створення осесиметричної моделі

Коли дерево статичного аналізу з'явиться на екрані, слід визначити властивості матеріалу деталей. SOLIDWORKS має велику бібліотеку матеріалів і в ній можна знайти леговану сталь та епоксидну смолу (рис. 4.8). Створення матеріалу склопластикового тіла дещо складніше, оскільки це не ізотропний матеріал, а його властивості відрізняються в різних напрямках. Проте SOLIDWORKS Simulation дозволяє створювати такі ортотропні матеріали.

Property	Value	Units	Property	Value	Units
Elastic Modulus	2.1e+11	N/m ²	Elastic Modulus	2415000000	N/m ²
Poisson's Ratio	0.28	N/A	Poisson's Ratio	0.35	N/A

а

б

Рисунок 4.8 - Введення механічних характеристик матеріалу епоксидного клина (а) і сталевго ніпеля (б)

Наступним етапом є створення опції контакту (рис. 4.9). В даному випадку поверхні адгезивного клина, ніпеля і тіла штанги повинні бути нерухомими одне відносно одного. Цей тип контакту називається Bonded. І він створюється за замовчуванням.

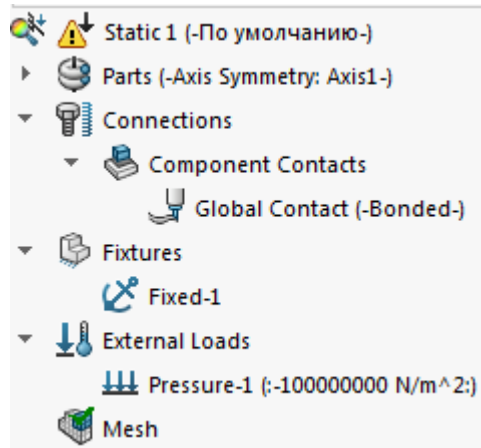


Рисунок 4.9- Дерево побудови скінченно-елементної моделі в Simulation

На наступному кроці потрібно задати граничні умови і навантаження. В даному випадку правий торець ніпеля повинен бути нерухомим, а на лівий торець тіла діє навантаження розтягу у вигляді від'ємного тиску на торець величиною 100 МПа (рис. 4.10).

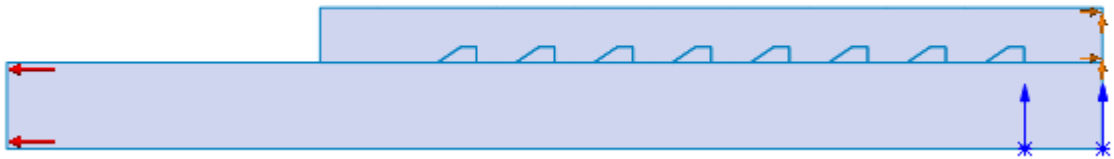


Рисунок 4.10 - Скінченно-елементна модель в Simulation

На наступному кроці створюємо сітку скінченних елементів (Mesh). Слід пам'ятати, що сітка з дрібними елементами може призводити до тривалих обчислень. Проте для осесиметричного аналізу це не дуже важливо. Тому створюємо сітку з найдрібнішими елементами. І це дозволить підвищити точність результатів.

Спочатку розглянемо варіант конструкції з наступними параметрами: $n=8$, $a=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=10$ мм. Шкали напружень та деформацій показані на рисунку 4.11. На рисунку 4.12 показані еквівалентні напруження та деформації в цьому з'єднанні. Помітно, що максимальне еквівалентне напруження $S_{max}=353$ МПа сконцентроване в зоні останнього клина в лівій частині з'єднання.

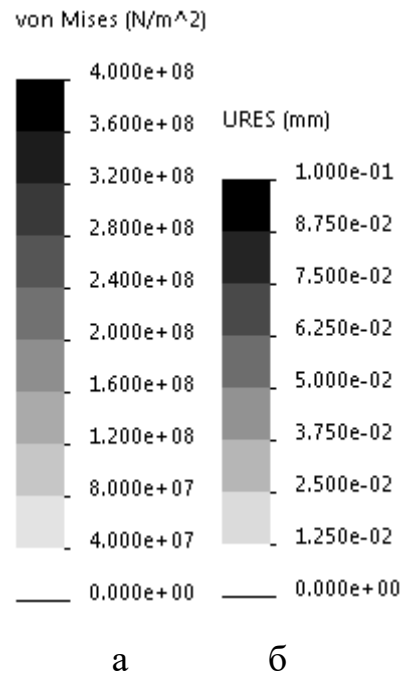


Рисунок 4.11 - Шкали еквівалентних напружень Мізеса-Губера (Па) (а) та сумарних переміщень (мм) (б)

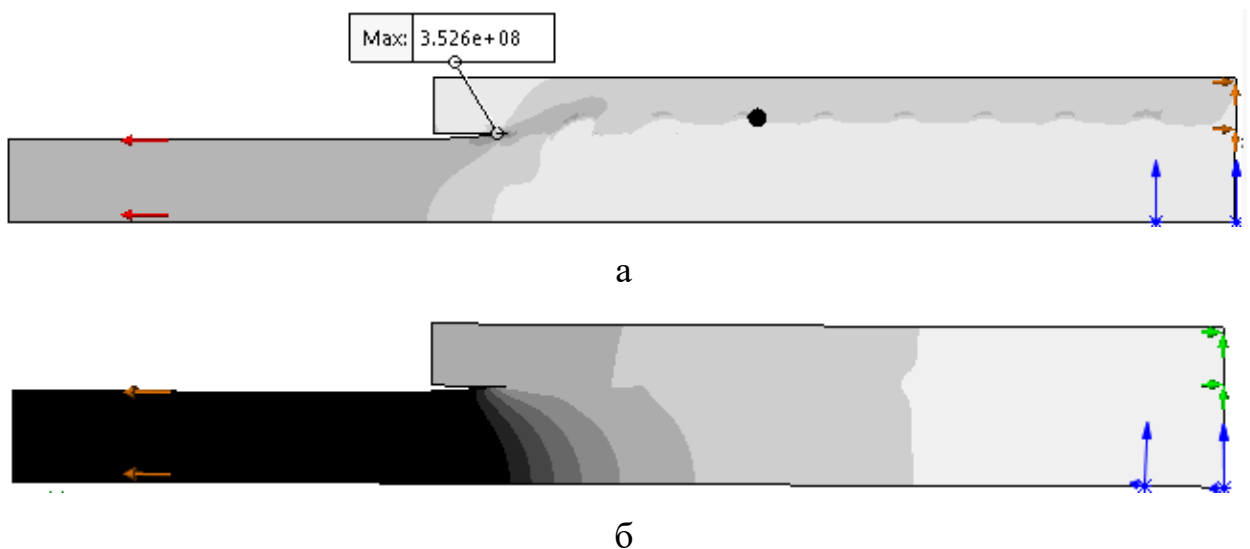


Рисунок 4.12 - Еквівалентні напруження (а) і деформації (б) для варіанта конструкції з $n=8$, $\alpha=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=10$ мм

Спробуємо дослідити як впливають різні параметри з'єднання на це напруження. Ці дослідження дозволять побудувати залежності максимального напруження S_{max} від величини обраного параметра. Такі залежності можна буде використовувати для оптимізації конструкції. Щоб побудувати такі залежності достатньо змінювати в геометричній моделі

відповідний параметр, перебудувувати сітку скінченних елементів і виконувати симуляцію для кожного значення параметра.

Розглянемо варіант конструкції з $n=8$, $a=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=8$ мм. Максимальні напруження сягають 316 МПа (рис. 4.13).

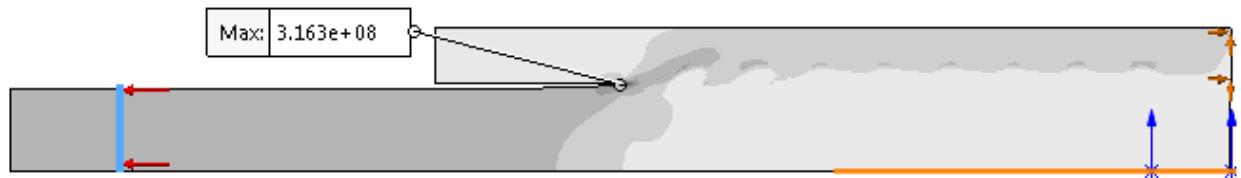


Рисунок 4.13 - Еквівалентні напруження для варіанта конструкції з $n=8$, $a=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=8$ мм

Розглянемо варіант конструкції з $n=8$, $a=34^\circ$, $r=13,4$ мм, $p=5$ мм. Максимальні напруження сягають 1070 МПа (рис. 4.14).

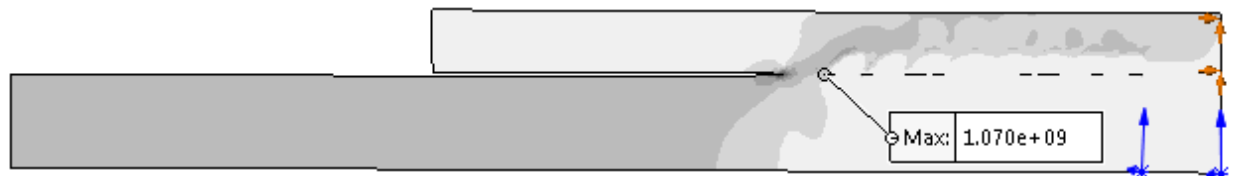
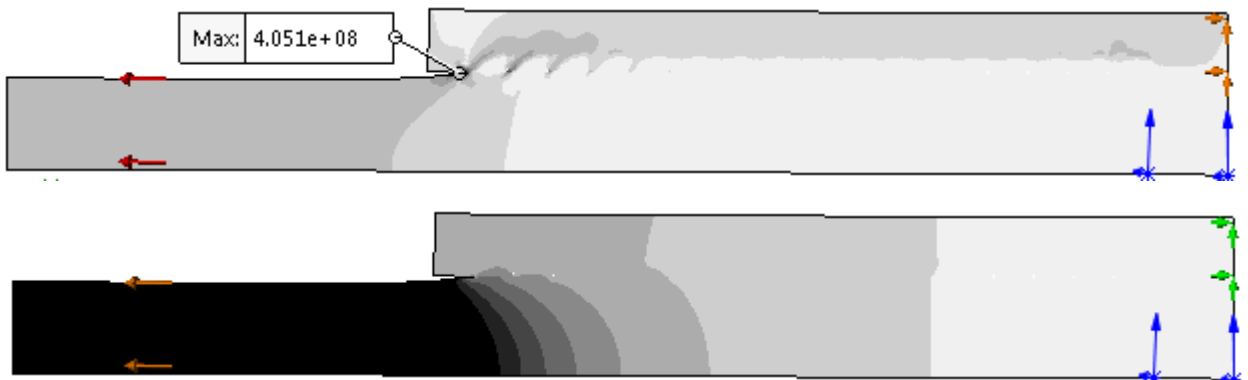


Рисунок 4.14 - Еквівалентні напруження для варіанта конструкції з $n=8$, $a=34^\circ$, $r=13,4$ мм, $p=5$ мм

Розглянемо варіант конструкції з $n=17$, $a=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=5$ мм. Максимальні напруження сягають 405 МПа. Характер деформацій подібний (рис. 4.15).



б

Рисунок 4.15 - Еквівалентні напруження (а) і деформації (б) для варіанта конструкції з $n=17$, $a=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=5$ мм

Помітно, що у всіх випадках зона локалізації максимального напруження S_{max} майже не змінюється і залишається в зоні останнього клина. Змінюється тільки величина S_{max} .

4.3. Оптимізація параметрів конструкції

Результати параметричних досліджень наведено в таблицях 4.2-4.5 та на графіках 4.16-4.19. На графіках також показані криві регресії, які згладжують експериментальні дані. Ці криві являють собою поліном другого степеня. Показана також величина достовірності апроксимації R^2 , яка переважно більша, ніж 0,6.

Помітно, що зі збільшенням кількості клинів n збільшується еквівалентне напруження S_{max} . На графіку 4.16 видно, що оптимальним значенням є $n=8$.

Таблиця 4.2 - Залежність максимальних еквівалентних напружень за Мізесом S_{max} в з'єднанні від кількості клинів n

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
S_{max} , МПа	233	324	394	670	353	491	792	355	540	1044	1527	846	1329	2121	1493	1877	3621

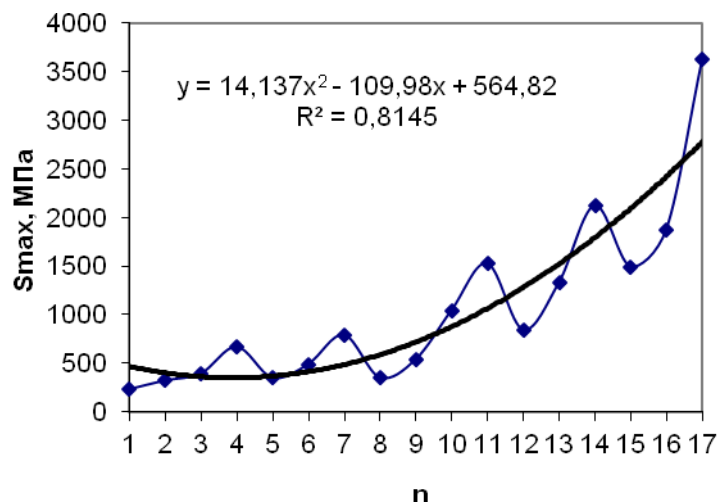


Рисунок 4.16 - Залежність S_{max} від кількості клинів n

Зі збільшенням величини кута клина α еквівалентне напруження зменшується. На графіку 4.17 видно, що оптимальною величиною кута є $\alpha=34$ град.

Таблиця 4.3 - Залежність максимальних еквівалентних напружень за Мізесом S_{max} в з'єднанні від кута клина α

α , град	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
S_{max} , МПа	992	446	1027	574	355	860	604	354	346	341	321	329	341	353	336	341

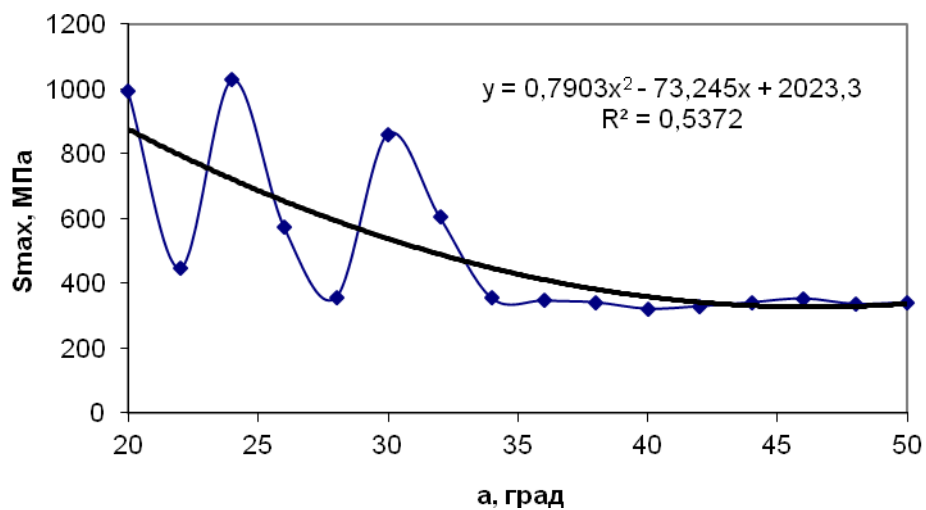


Рисунок 4.17 - Залежність S_{max} від кута клина α

Зі збільшенням радіуса клина еквівалентне напруження збільшується. З графіка 4.18 видно, що оптимальним значенням радіуса є $r=13$ мм.

Таблиця 4.4 - Залежність максимальних еквівалентних напружень за Мізесом S_{max} в з'єднанні від більшого радіуса клина r

r , мм	12	12,2	12,4	12,6	12,8	13	13,2	13,4	13,6
S_{max} , МПа	335	332	340	320	333	354	645	1070	750

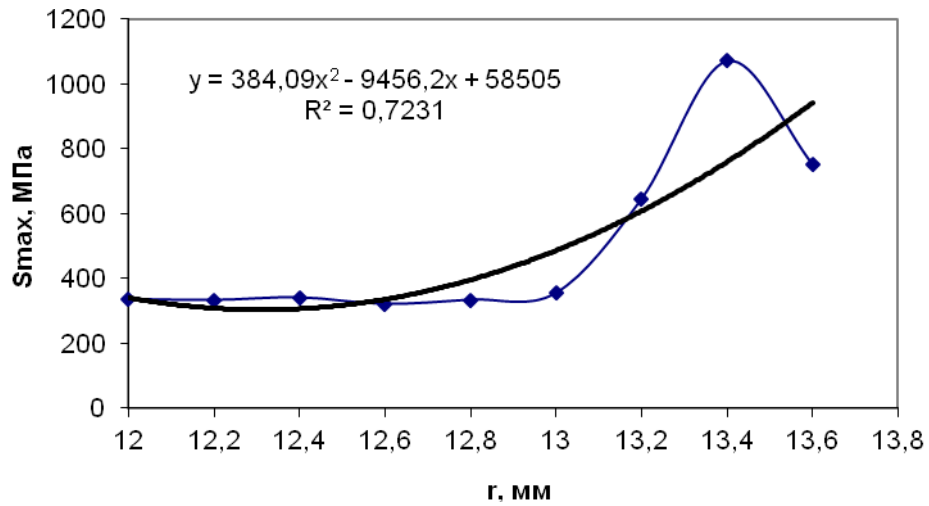


Рисунок 4.18 - Залежність S_{max} від більшого радіуса клина r

Виявлено також, що оптимальним значенням кроку між клинами є $p=8$ мм (рис. 4.19).

Таблиця 4.5 - Залежність максимальних еквівалентних напружень за Мізесом S_{max} в з'єднанні від кроку клинів p

p , мм	5	6	7	8	9	10
S_{max} , МПа	354	337	341	316	342	353

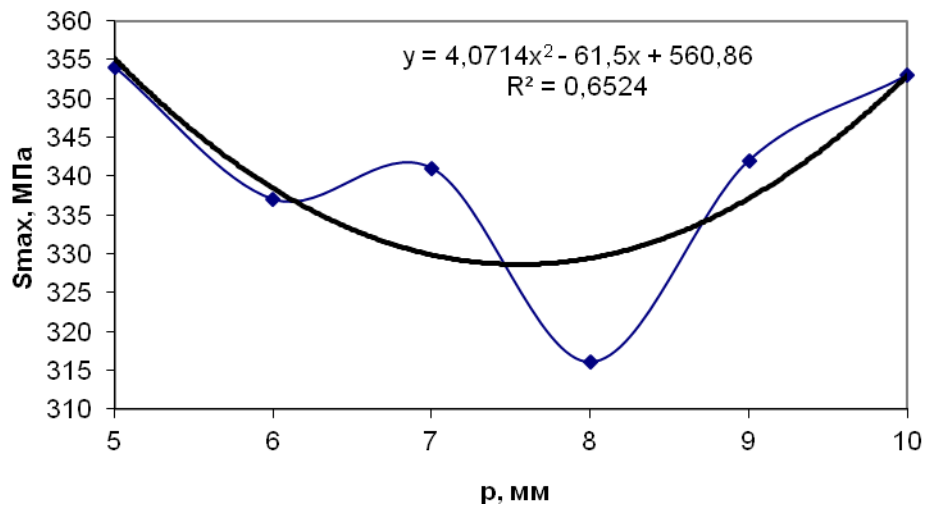


Рисунок 4.19 - Залежність S_{max} від кроку клинів p

Отже з'єднання з параметрами $n=8$, $\alpha=34^\circ$, $r=13$ мм, $p=8$ мм володіє найменшим значенням $S_{\max}=316$ МПа, в той час як найбільше сягало 3621 МПа.

Висновки

1. Аналіз умов роботи і причин відмов ШСНУ показав, що існує дуже багато факторів, які впливають на надійність та довговічність установки. Основним фактором, що визначає довговічність колони насосних штанг, є динамічне навантаження. Недослідженим залишається міцність адгезійно-клинового з'єднання полімерного тіла насосної штанги зі сталеву головою.

2. Програмні продукти SolidWorks Motion та MapleSim є зручними інструментами для аналізу та оптимізації такої системи як ШСНУ. Якщо говорити точніше, то SolidWorks Motion підходить більше для аналізу кінематики та динаміки тривимірної моделі верстата-качалки, а MapleSim може використовуватись для створення динамічної моделі всієї установки разом з колоною насосних штанг, гідравлічною частиною та верстатом-качалкою. Модуль Simulation зручний для аналізу окремих вузлів і деталей ШСНУ.

3. Розроблено динамічну модель колони насосних штанг. Колонна насосних штанг змодельована за допомогою таких компонентів Maplesim як "Маса", "Пружина-демпфер", "Постійна сила", "Тертя", "Упор". Отримано систему диференційних рівнянь моделі. Досліджено поведінку моделі за різних початкових умов. Розроблено підсистему для візуалізації руху колони штанг. Передбачено застосування компоненту Translational Hardstop ("Упор") для можливості моделювання "зависання" колони внаслідок її тертя. Проаналізовано поведінку моделі для різних значень частоти навантажування та жорсткості колони. Розроблено компонент для візуалізації динамограм.

4. Розроблено динамічну модель гідравлічної підсистеми ШСНУ. Розроблено та протестовано новий компонент Vertical Pipe для моделювання вертикальних труб. Отримано код цього компоненту мовою моделювання динамічних систем Modelica.

5. Розроблено динамічну модель привода ШСНУ (верстата-качалки) за допомогою компонентів Multibody. Дана модель володіє властивістю візуалізації руху ланок верстата-качалки.

6. Підмоделі колони насосних штанг, гідравлічної частини та верстата-качалки об'єднані в моделі ШСНУ. В результаті розрахунку моделі отримано залежності подачі рідини від часу на виході насосу, на всмоктуючому клапані та на гирлі. Дана модель може використовуватись для комплексного аналізу роботи ШСНУ та оптимізації.

7. Виконано аналіз кінематичних та динамічних характеристик тривимірної моделі верстата-качалки за допомогою SolidWorks Motion. Для верстату СКД8-3-4000 та заданих умов отримано залежності кутового переміщення, швидкості та прискорення балансиру від часу. Отримано ватметрограми для різних значень радіус центра мас противаг та навантажень в точці підвісу штанг. Дана методика розрахунків може використовуватись для оптимізації параметрів ШСНУ.

8. Розроблено тривимірну параметричну модель з'єднання полімерного тіла штанги зі сталевим ніпелем. Досліджено вплив геометричних параметрів на еквівалентні напруження та виявлено оптимальні параметри з'єднання.

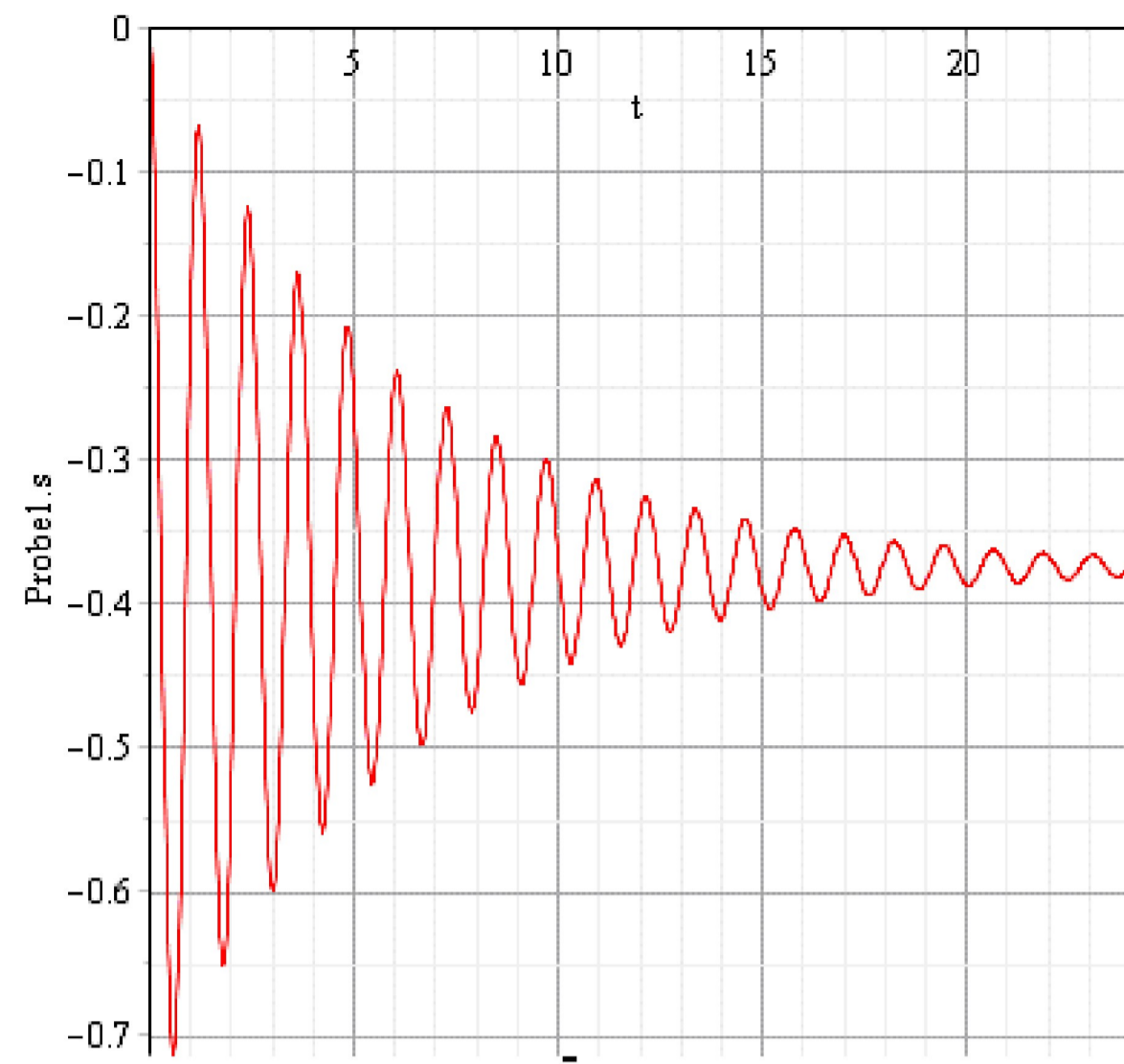
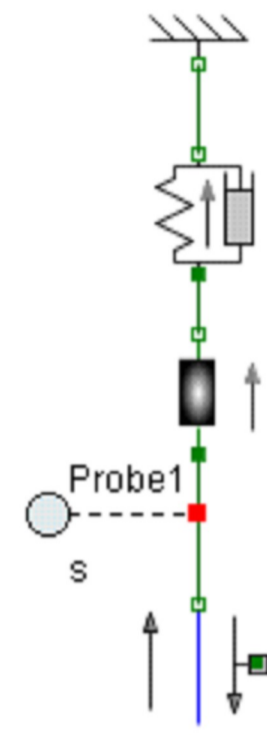
Перелік використаних джерел

1. Аливердизаде К. С. Приводы штангового глубинного насоса. Москва : Недра, 1973. 193 с.
2. Аливердизаде К. С. Влияние кинематики балансирного привода глубинного насоса на величины динамических усилий в штангах. Труды АЗИНМАШа. Вып.1, Азнефтеиздат, 1956.
3. Адонин А. Н. Добыча нефти штанговыми насосами. Москва : Недра. 1979.
4. Касьянов В. М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. Москва : ВНИИОЭНГ, 1973.
5. Касьянов В. М. Расчет глубинных величин по данным наземных измерений (для штанговых насосов с балансирным приводом). Москва, 1986.
6. Касьянов В. М., Муленко В. В. Расчет динамограмм штанговой насосной установки с балансирным приводом. Москва, 1987.
7. Снарев А. И., Папировский В. Л., Пушкин В. Ю. Анализ состояния станков качалок методами вибродиагностики. Москва: ВНИИОЭНГ № 5, 1995.
8. Трахтман Г. И. Состояние штанговой глубинонасосной эксплуатации нефтяных скважин за рубежом. Сер. Нефтепромысловое дело. Москва : ВНИИОЭНГ, 1976.
9. Ваттметрограммы. Методические указания по использованию ваттметрограмм для диагностики и уравнивания ШГНУ. Тюмень : СибНИИНП, 1993.
10. Gibbs S.I., Neely A.B. Computer Diagnosis of Down Hole Conditions in Sucker Rod Pumping Well. Journal of Petroleum Technology. Januar 1966.
11. Белов И. Г. Исследование работы глубинных насосов динамографом. Диссер. канд. техн. наук. Баку, 1963.

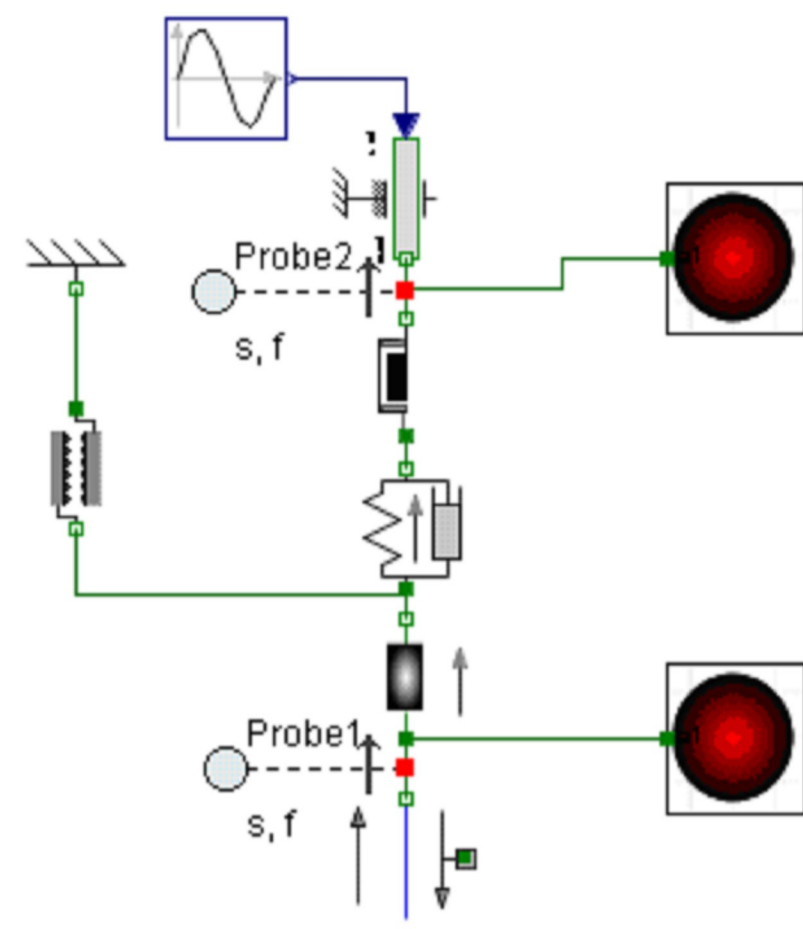
12. Багиров М. М. Исследование штанговой глубинонасосной установки обычного типа и с амортизатором в точке подвеса штанг. Диссер. канд. техн. наук. Баку, 1971.
13. Лепехин Ю. Н. Совершенствование расчетных методов оценки надежности штанг с целью улучшения компоновок штанговых колонн, работающих в наклонно направленных скважинах. Диссер. к.т.н. Москва, 1997.
14. Руководство по эксплуатации скважин штанговыми насосами. Ч. 1. Альметьевск, 1992.
15. Архипов К.И., Попов В.И., Попов И.В. Справочник по станкам-качалкам. Альметьевск, 2000.
16. Инструкция по эксплуатации глубиннонасосных скважин. – Альметьевск, 1970.
17. Муравьев В.М. Эксплуатация нефтяных скважин. Ленинград : ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1947.
18. Совершенствование техники и технологии добычи нефти в НГДУ «Покачевнефть» / Сб. трудов под ред. В.Н. Ивановского и В.И. Даришева. Москва : Нефть и газ, 1993.
19. Андреев В. В., Уразаков К. Р., Далимов В. У. Справочник по добыче нефти. Уфа, 2001.
20. Кушеков А.У., Ермеков М.М., Ажикенов Н.С. Скважинные насосные установки. Книга 1. Штанговые скважинные насосные установки с механическим приводом. Алматы : Эверо, 2001.
21. Кушеков А. У., Ермеков М. М., Ажикенов Н. С. Скважинные насосные установки. Книга 2. Длинноходовые скважинные насосные установки. Алматы : Эверо, 2001.
22. Аливердизаде К.С. Вопросы механики и техники длинноходового режима откачки при штанговом глубиннонасосном способе добычи нефти. Баку, 1958.
23. Мухаметзянов А.К., Чернышов И.Н., Липерт А.И. Добыча нефти штанговыми насосами. Москва : Недра, 1993.

24. Молчанов А.Г., Чичеров Л.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы. Москва : Недра, 1976.
25. Чичеров Л.Г., Молчанов Г.В., Рабинович А.М. и др. Расчет и конструирование нефтепромыслового оборудования. Москва : Недра, 1987.
26. Чичеров Л.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы. Москва : Недра, 1983.
27. ГОСТ-Р 51896-2002. Скважинные штанговые насосы. Общие технические требования.
28. Spec. 11AX API. Well Rod Pumps.
29. Захаров Б.С., Богомольный Е.Й., Драчук В.Р., Шариков Г.Н. Модернизация штанговых насосов. Нефтяное хозяйство. № 8. 2000. С. 59-66.
30. ГОСТ 13877-87. Насосные штанги. Общие требования.
31. Копей Б. В., Копей В. Б., Копей І. Б. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. 406 с.
32. Копей В. Б. Система тривимірного параметричного проектування SolidWorks.: Методичні вказівки для вивчення дисциплін “Основи наукових досліджень” і “Принципи інженерної творчості”. Івано-Франківськ : Факел, 2005. 45 с.
33. Копей Б.В., Копей В.Б. Використання методу скінченних елементів та тривимірного комп'ютерного моделювання для конструювання та оптимізації параметрів нафтогазового обладнання: Навчальний посібник. Івано-Франківськ : Факел, 2008. 117 с.
34. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
35. MapleSim. Maplesoft Online Help. URL : <http://www.maplesoft.com/support/help/category.aspx?cid=1000>

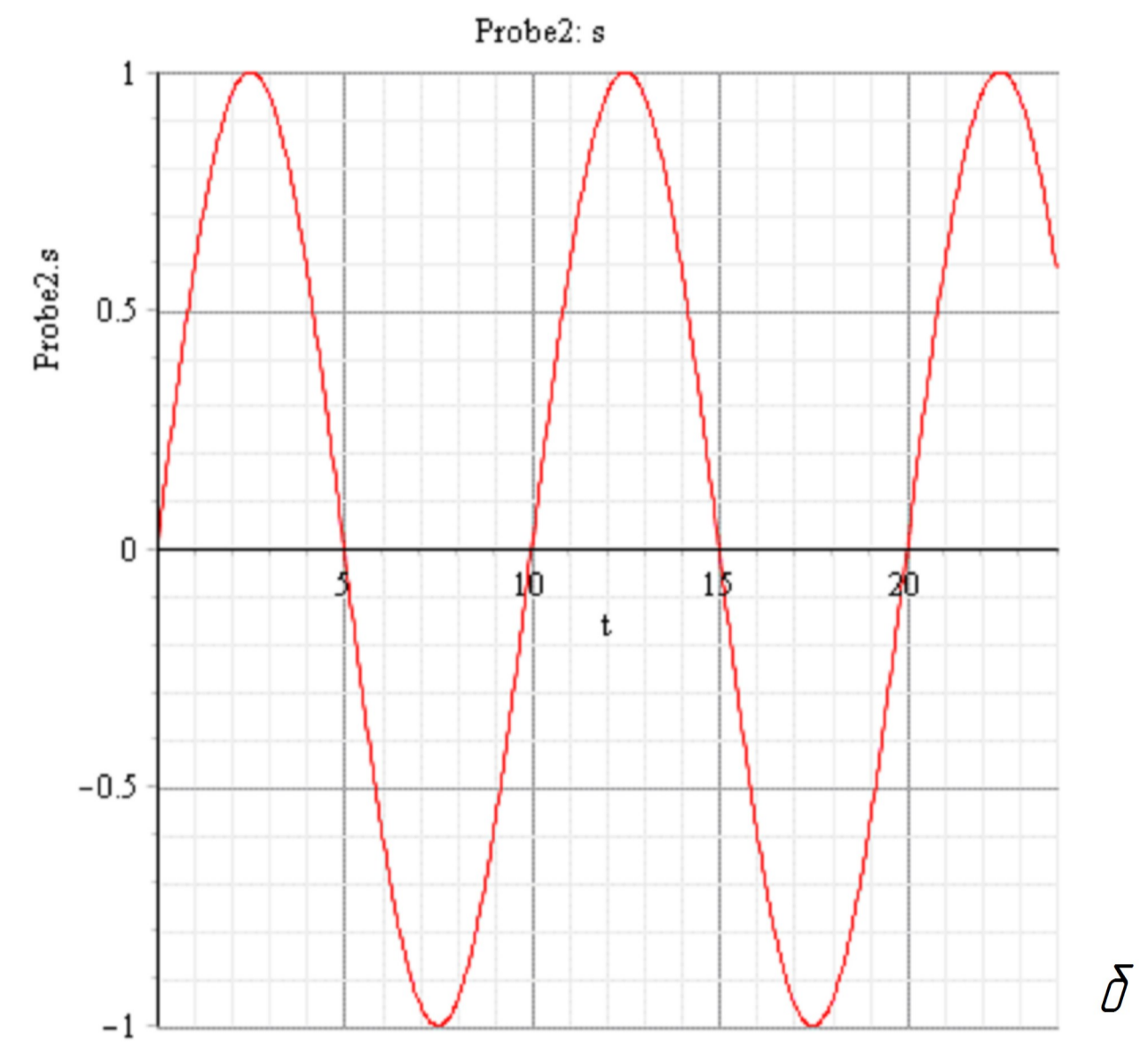
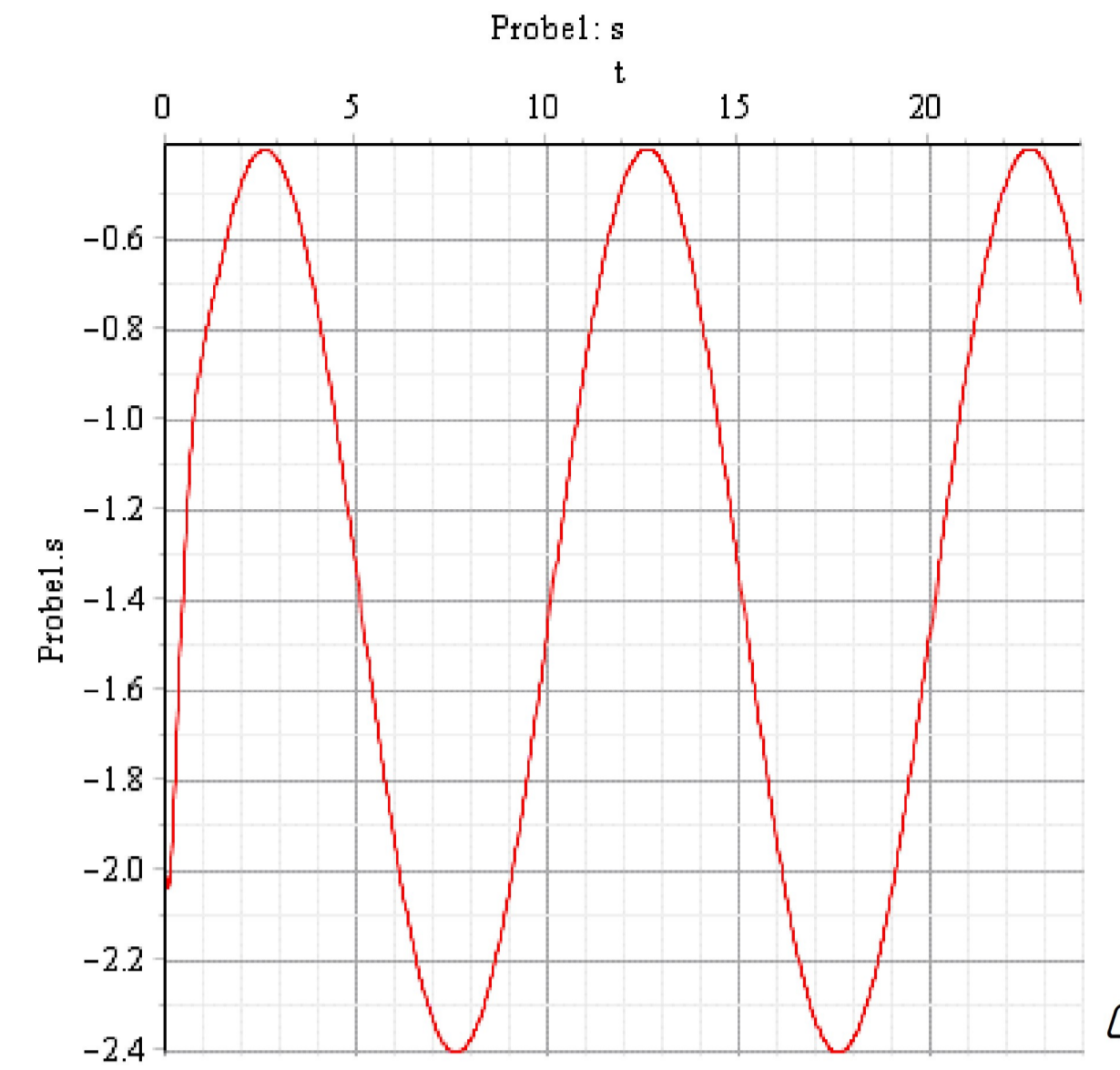
- 36.Копей В., Копей Б. Проектування та міцність колон і з'єднань насосних штанг з полімерних композитів: Монографія / Серія «Нафтогазове обладнання», том 12. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. 386 с.
- 37.Копей В. Б. Принципи побудови тривимірної параметричної моделі верстата-гойдалки в SolidWorks® 2012 // Всеукраїнський науково-практичний семінар "Графічна освіта у ВНЗ: стан та перспективи" (Івано-Франківськ, 19-20 вересня 2013р.) : Збірник тез доповідей. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. С.87-89.
- 38.Махмудов С. А. Монтаж, експлуатація и ремонт скважинних штангових насосних установок. Москва : Недра,1987.



Переміщення для $S_0=0$ (м)



Модель колони насосних штанг з моделюванням тертя

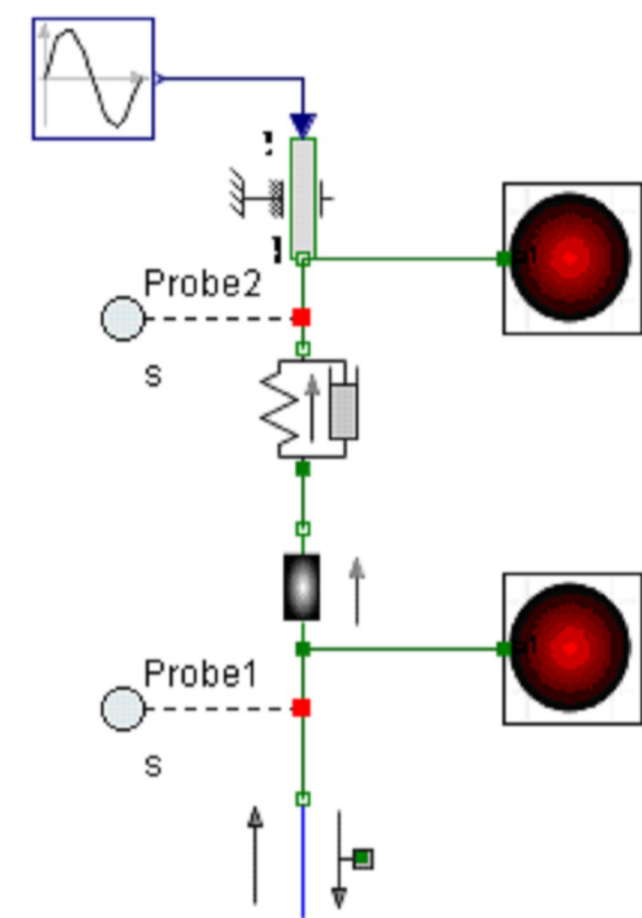


Переміщення нижнього (a) та верхнього (delta) кінця колони (м)

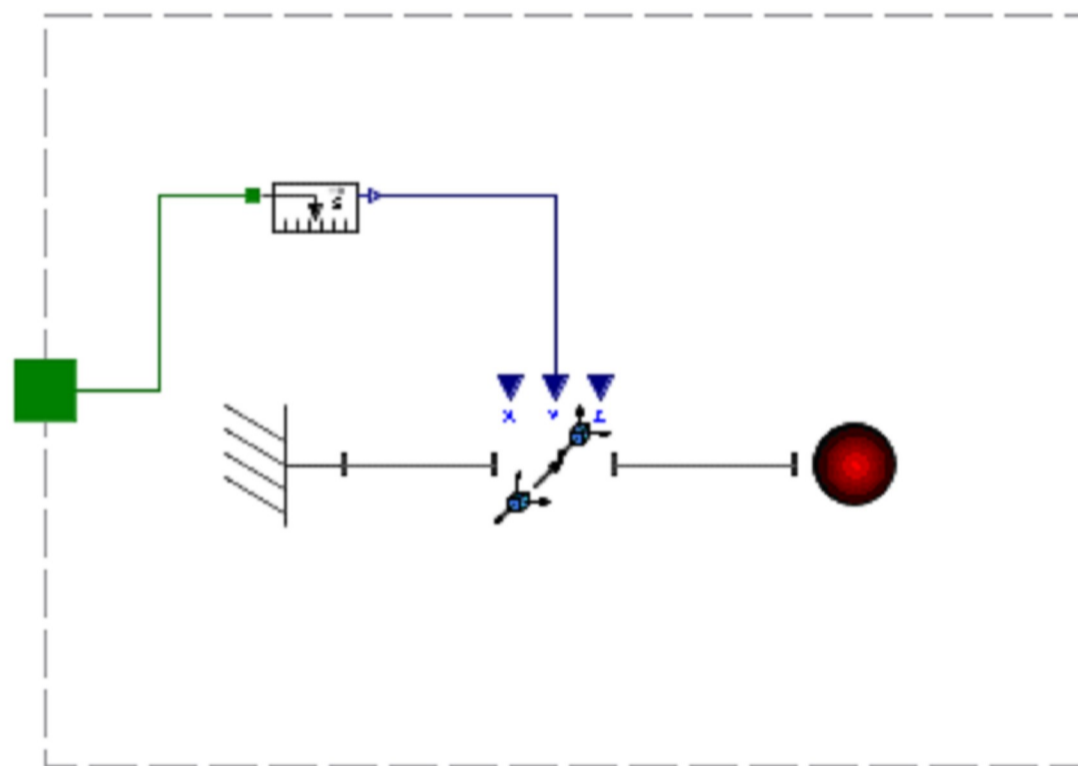
Модель вільно підвішеної колони насосних штанг

$$\frac{d}{dt} SD1_s_rel(t) = SD1_v_rel(t)$$

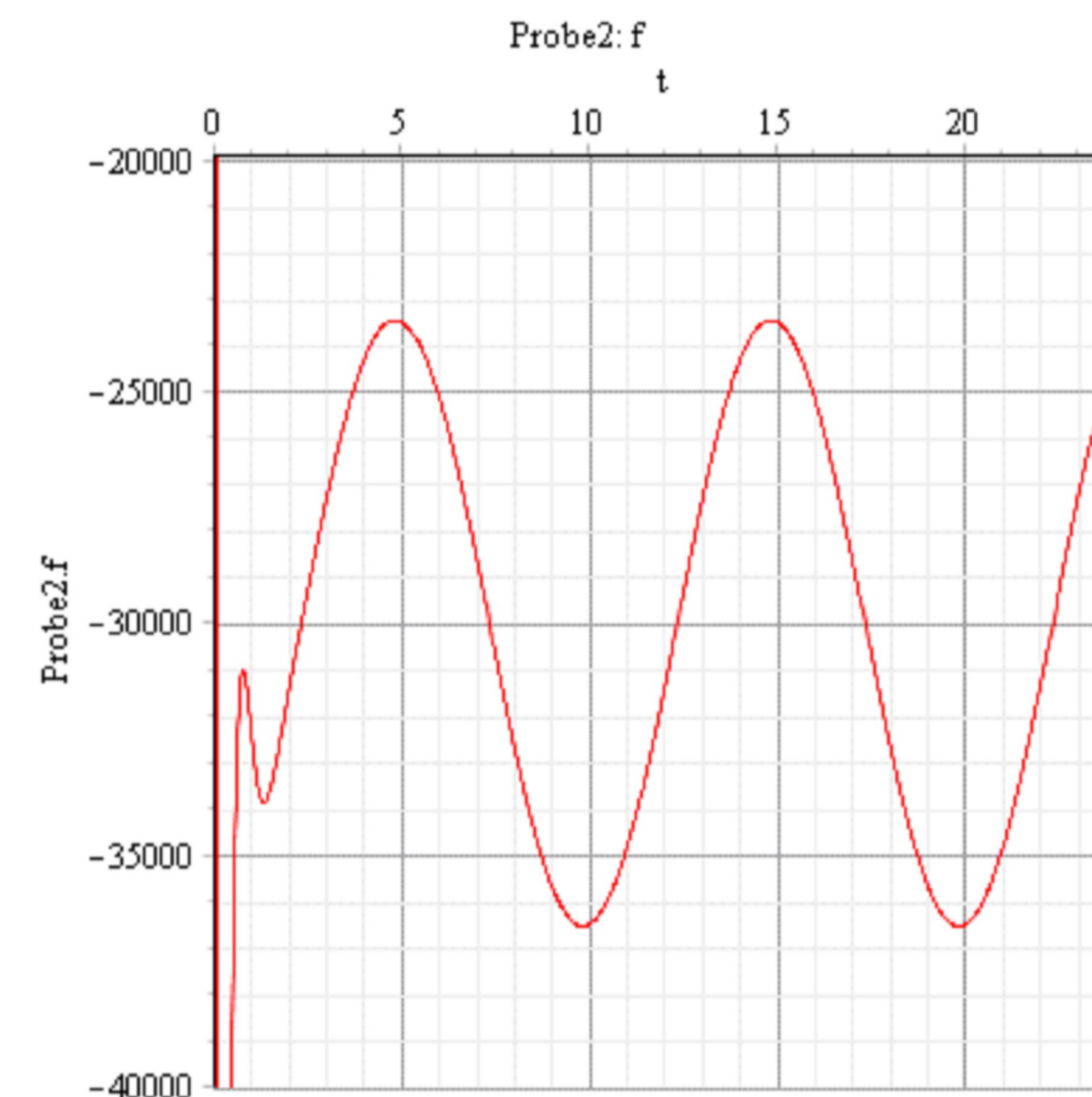
$$\frac{d}{dt} SD1_v_rel(t) = 10 - \frac{80}{3} SD1_s_rel(t) - \frac{1}{3} SD1_v_rel(t)$$



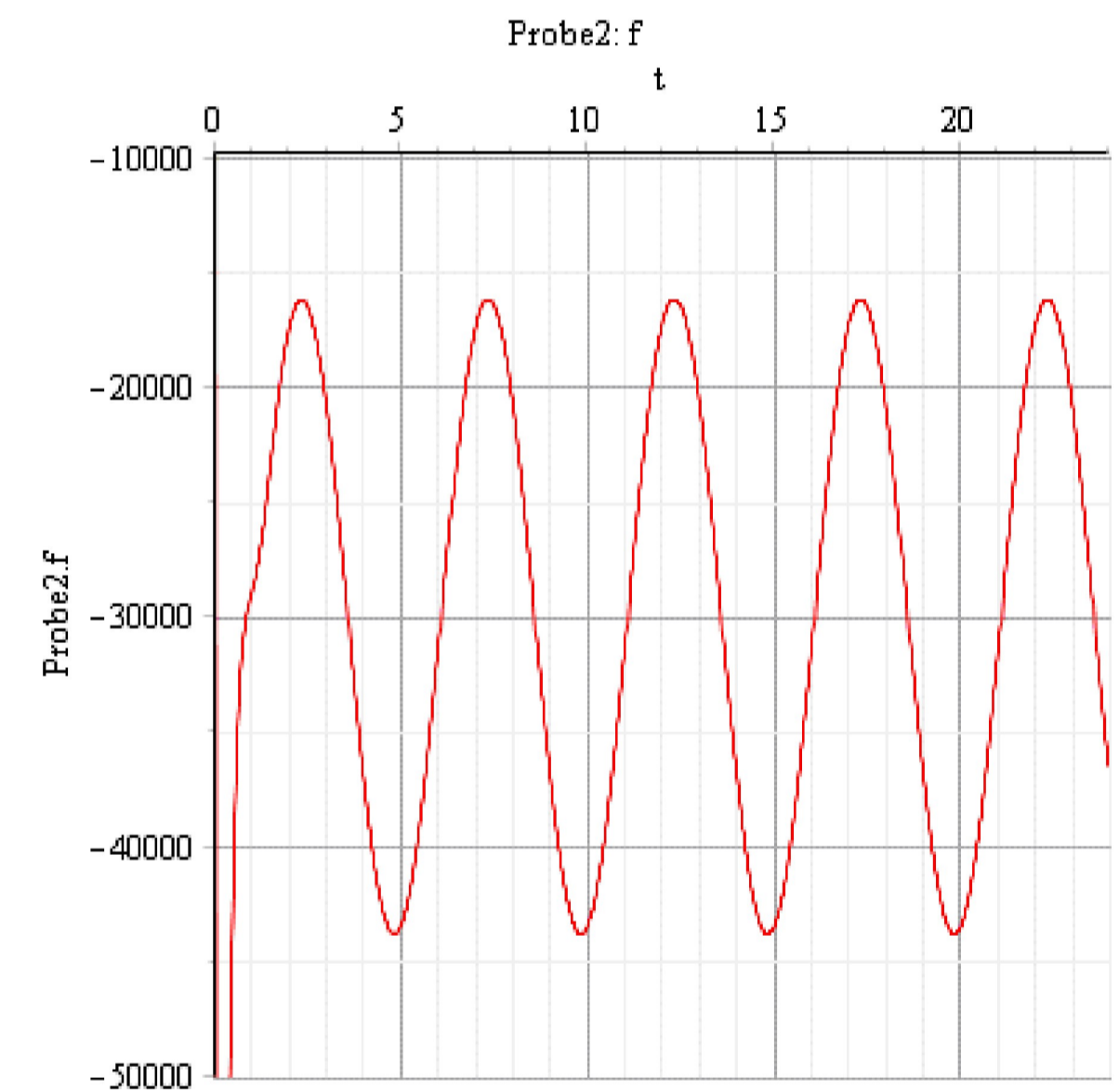
Модель колони насосних штанг з переміщенням верхнього кінця



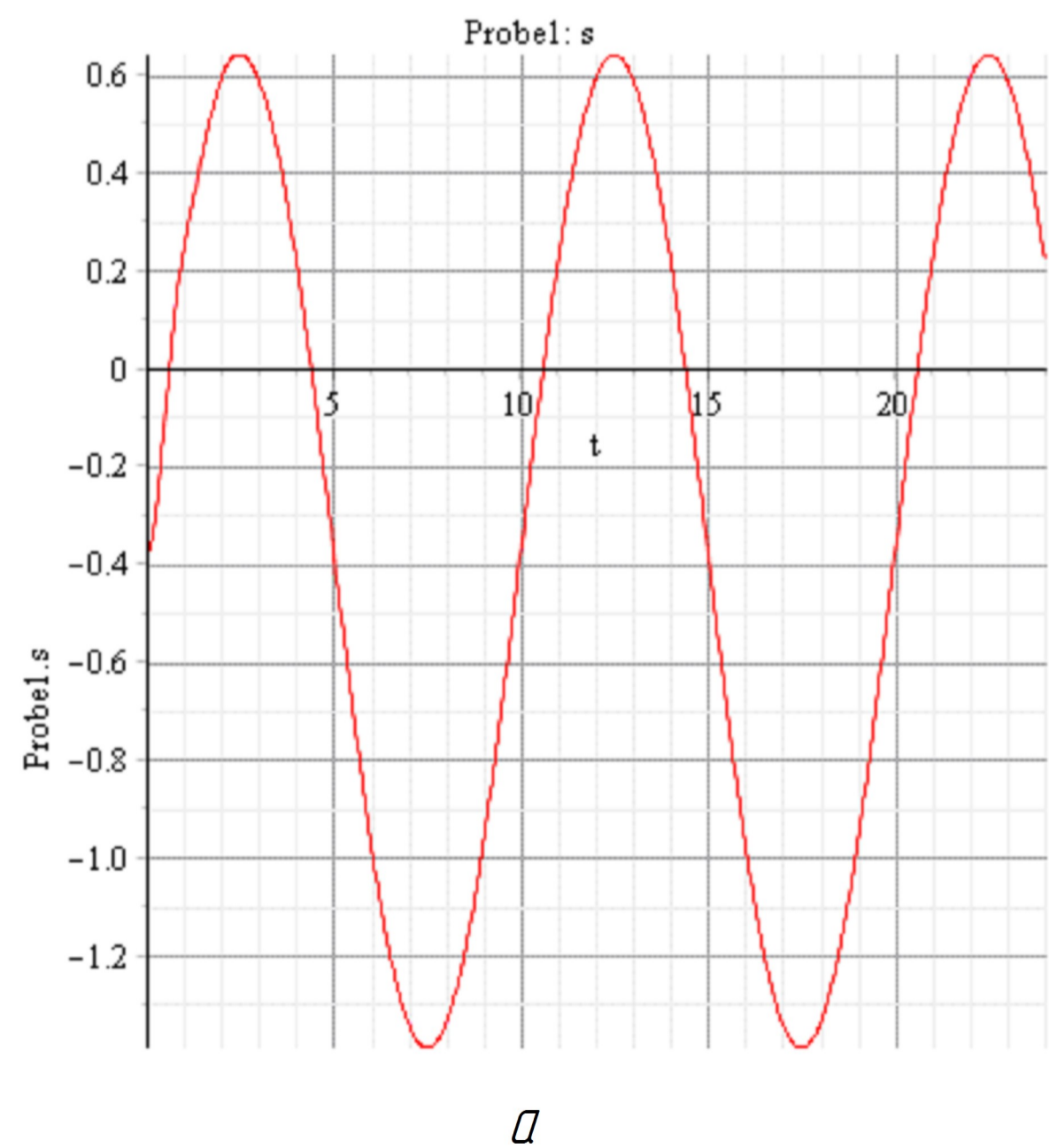
підмодель для візуалізації переміщення точки на колоні



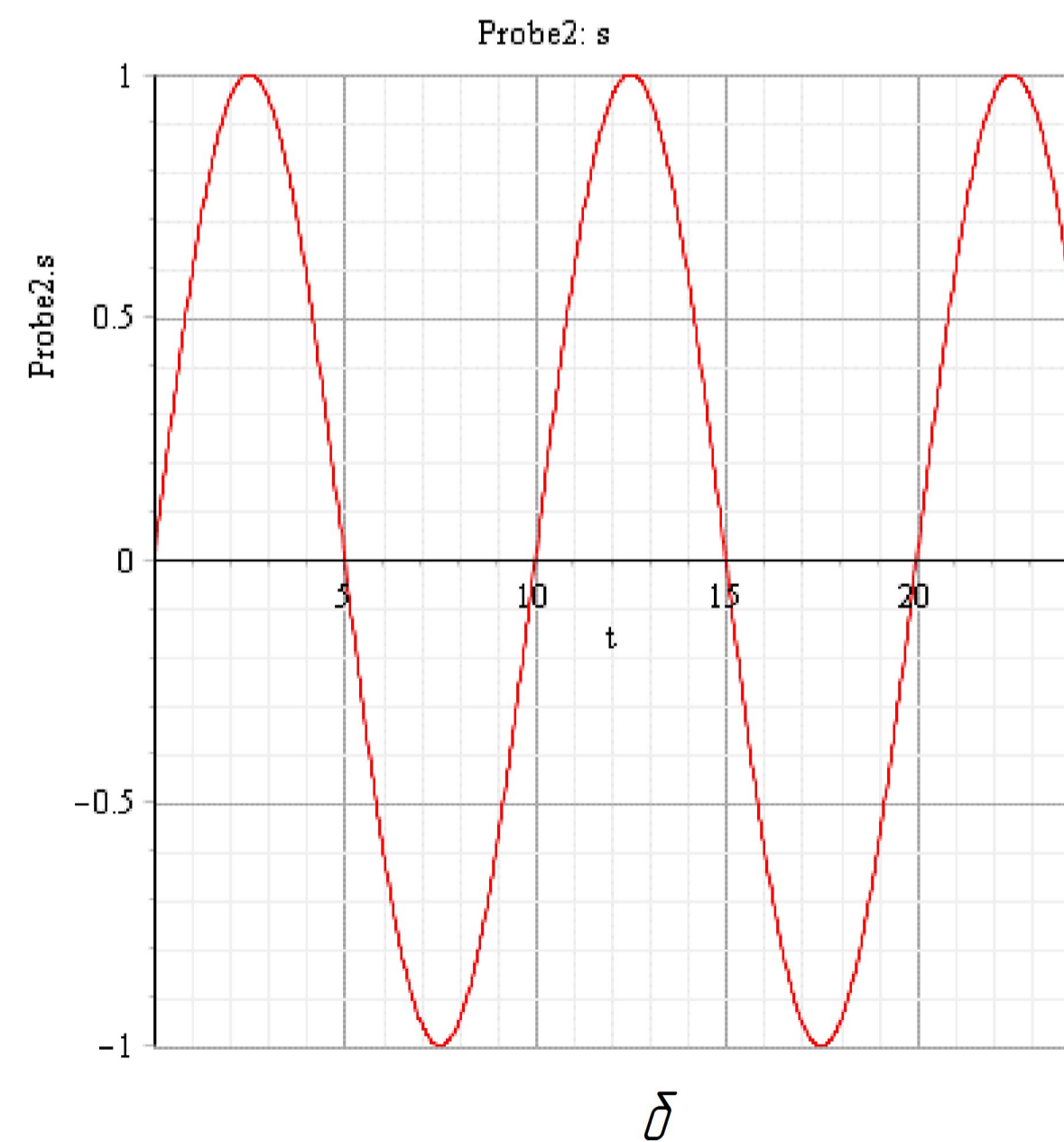
Сила в верхньому кінці колони (Н)



Сила в верхньому кінці колони (Н) для частоти 0,2 Гц

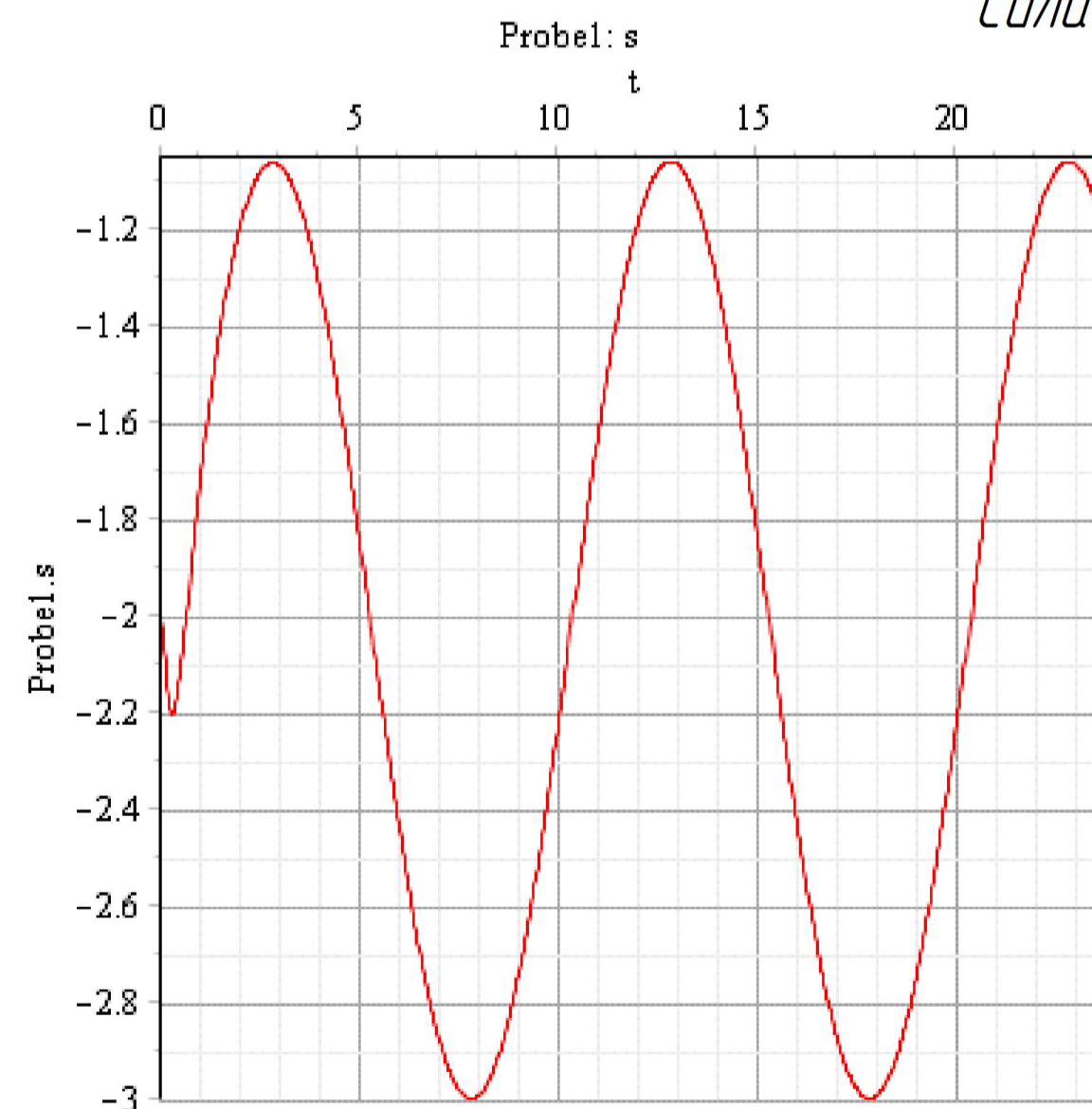


a



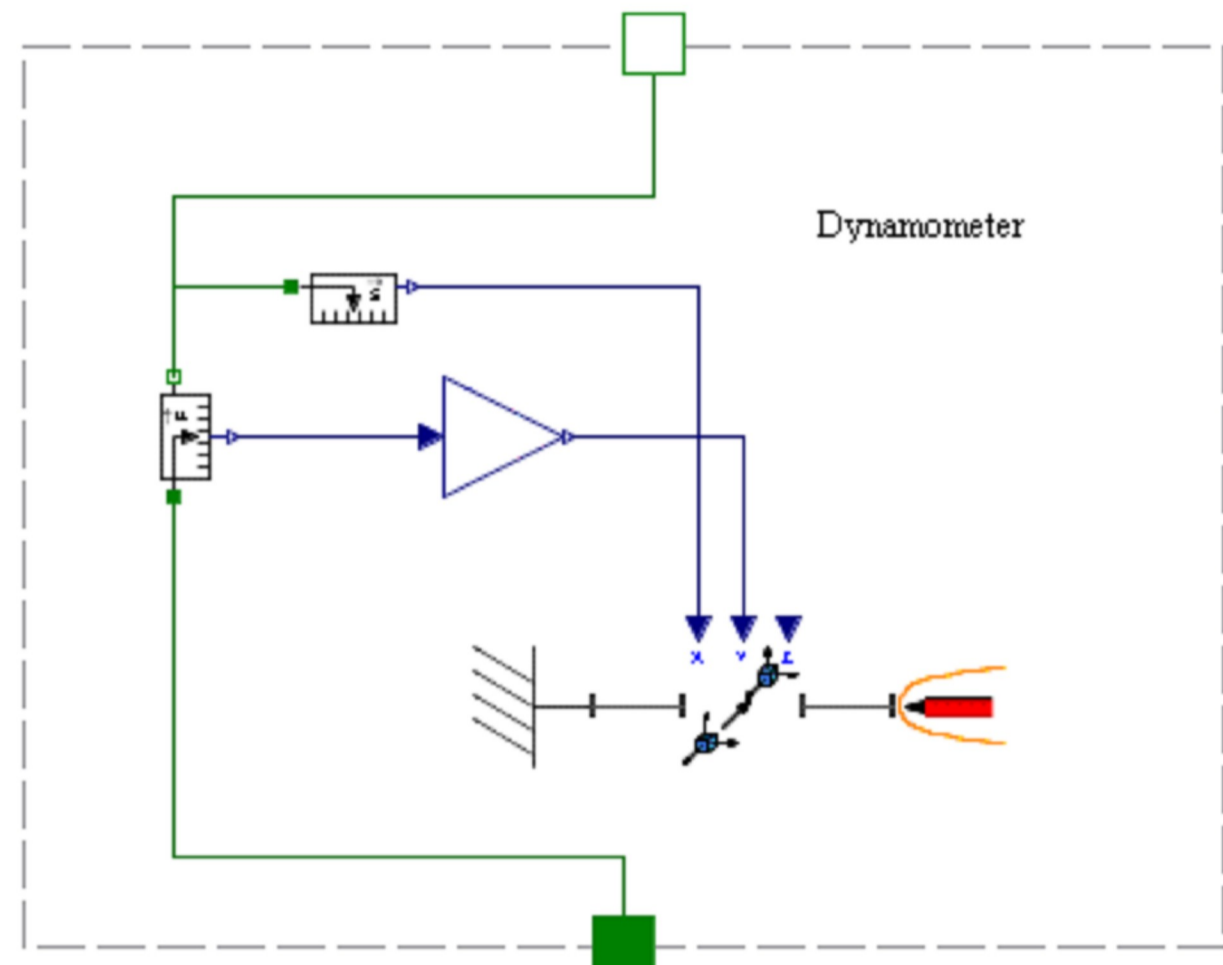
delta

Переміщення нижнього (a) та верхнього (delta) кінця колони (м)

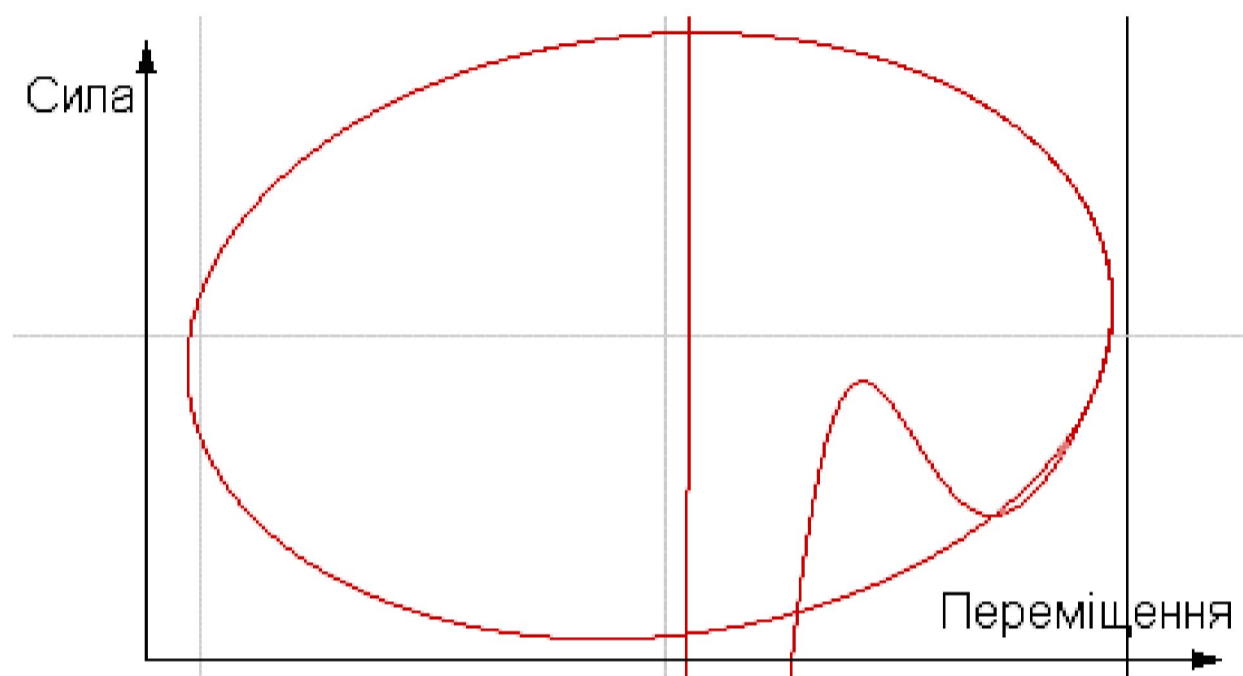


Переміщення нижнього кінця колони (м) для колони склопластикових штанг з важким сталевим низом

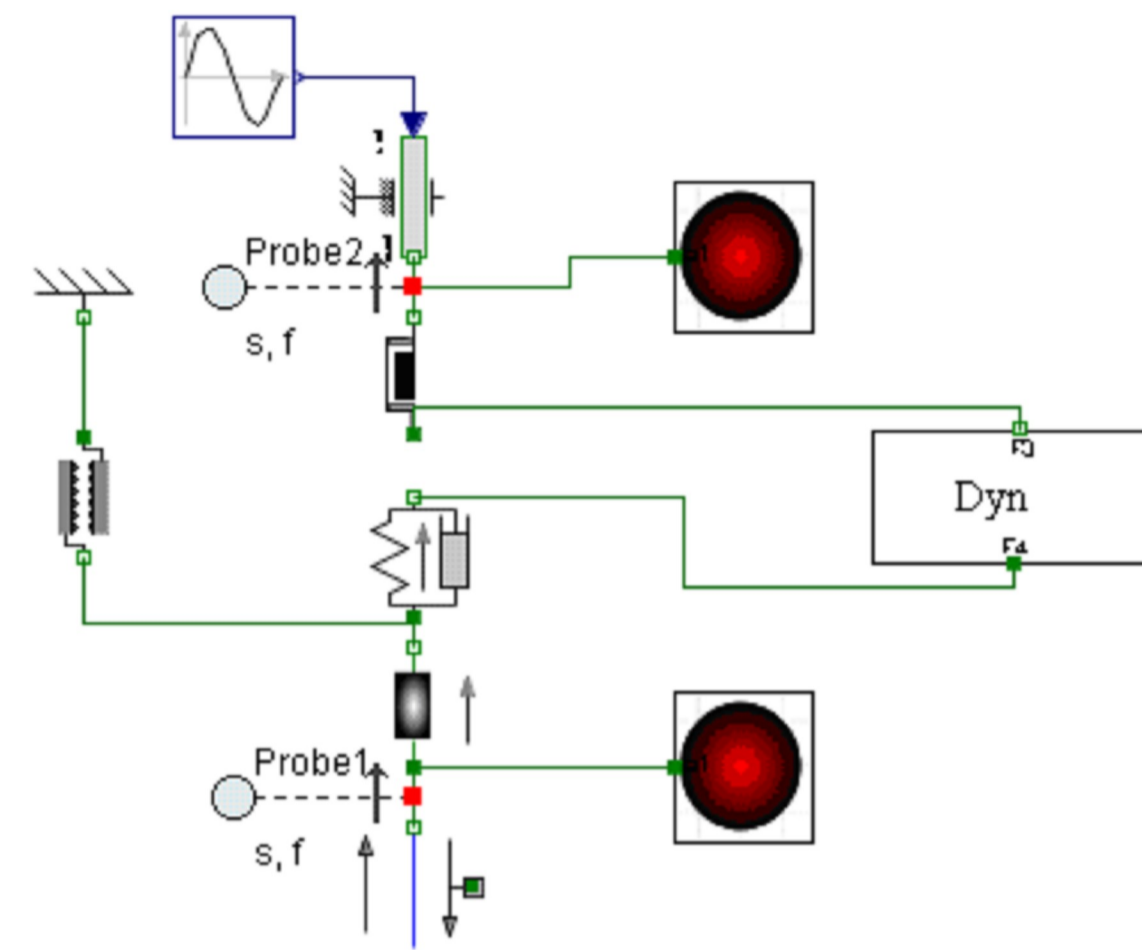
MP.ПМК-127.00.001				Лист	Масштаб
Модель в MapleSim				1	1:1
Изм. №	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Листов 1
Разраб.	Кущинюк М.І.				1
Проб.	Копей В.Б.				
Т.контр.	Копей В.Б.				
Реценз.					
И.контр.	Копей В.Б.				
Утв.	Ланчук В.Г.				



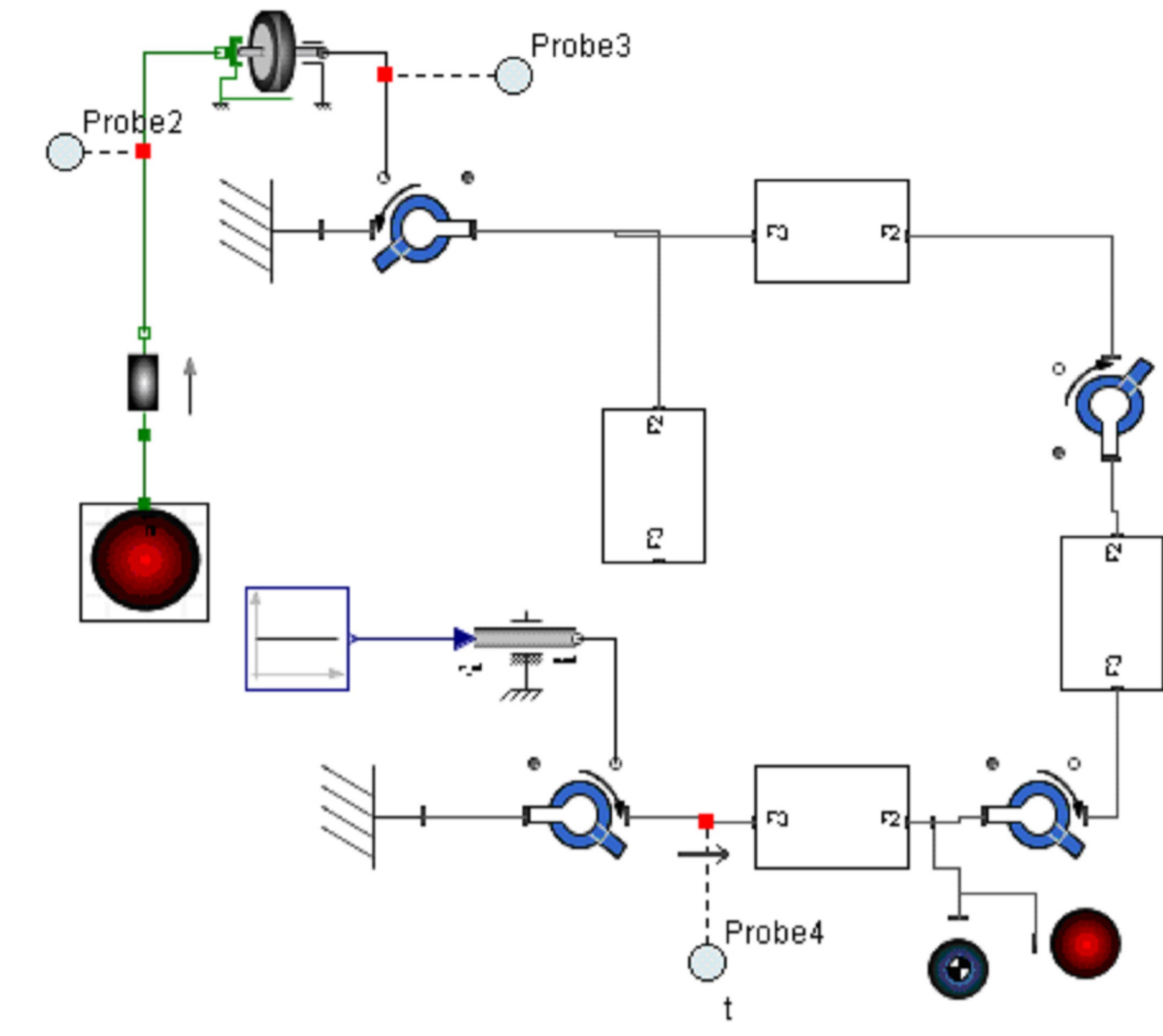
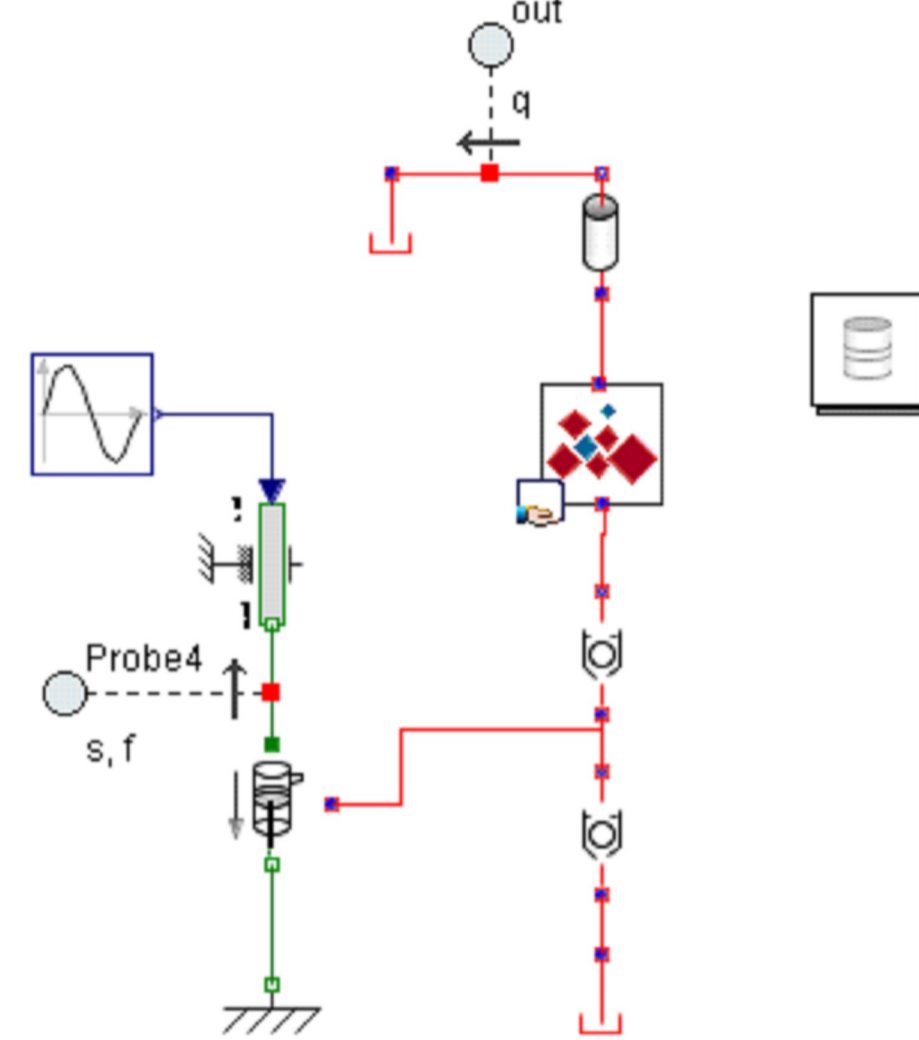
Компонент для динамометрування ШСНУ



Динамограма моделі колони штанг

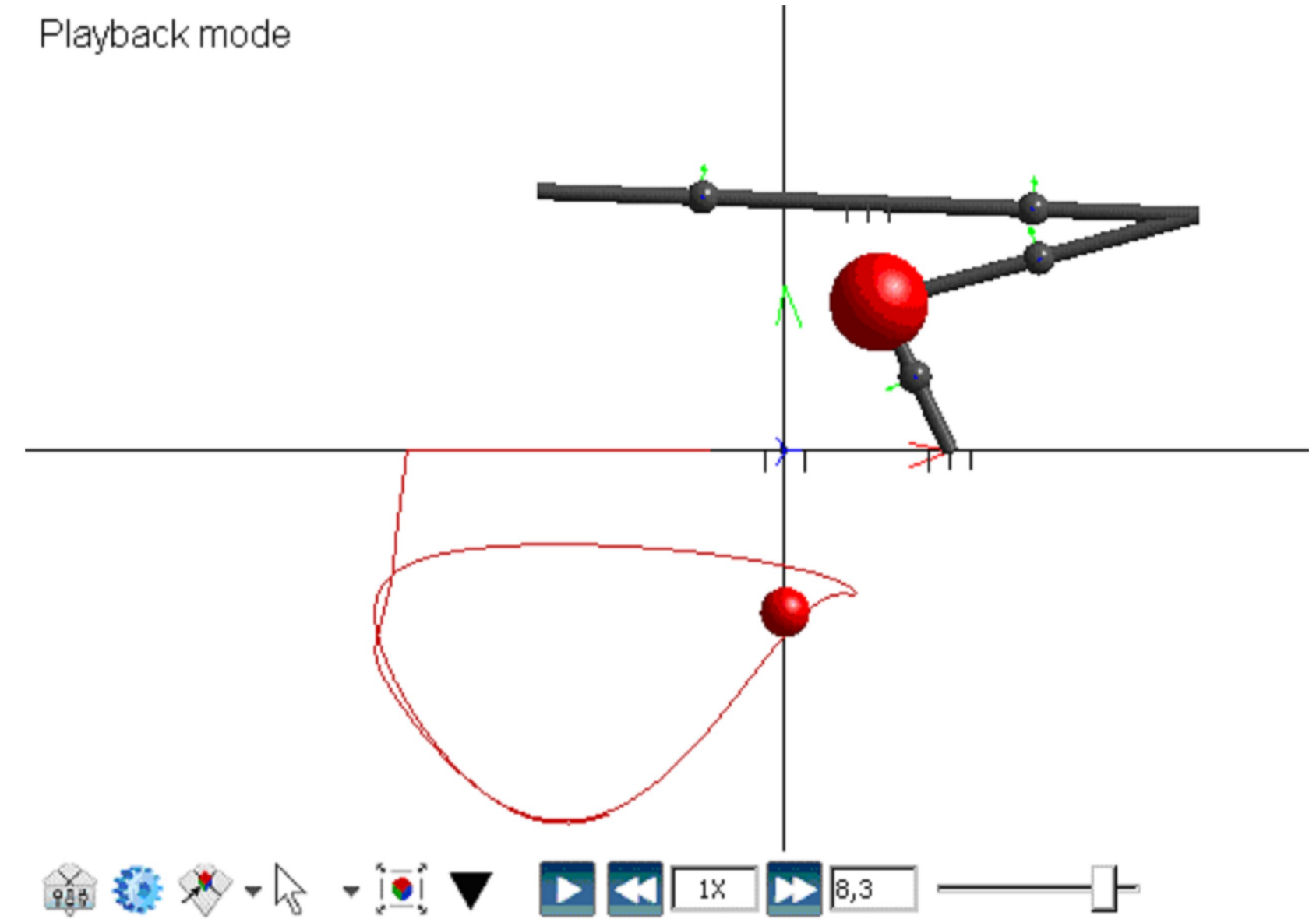


Гідравлічно-механічна модель установки для відкачування нафти

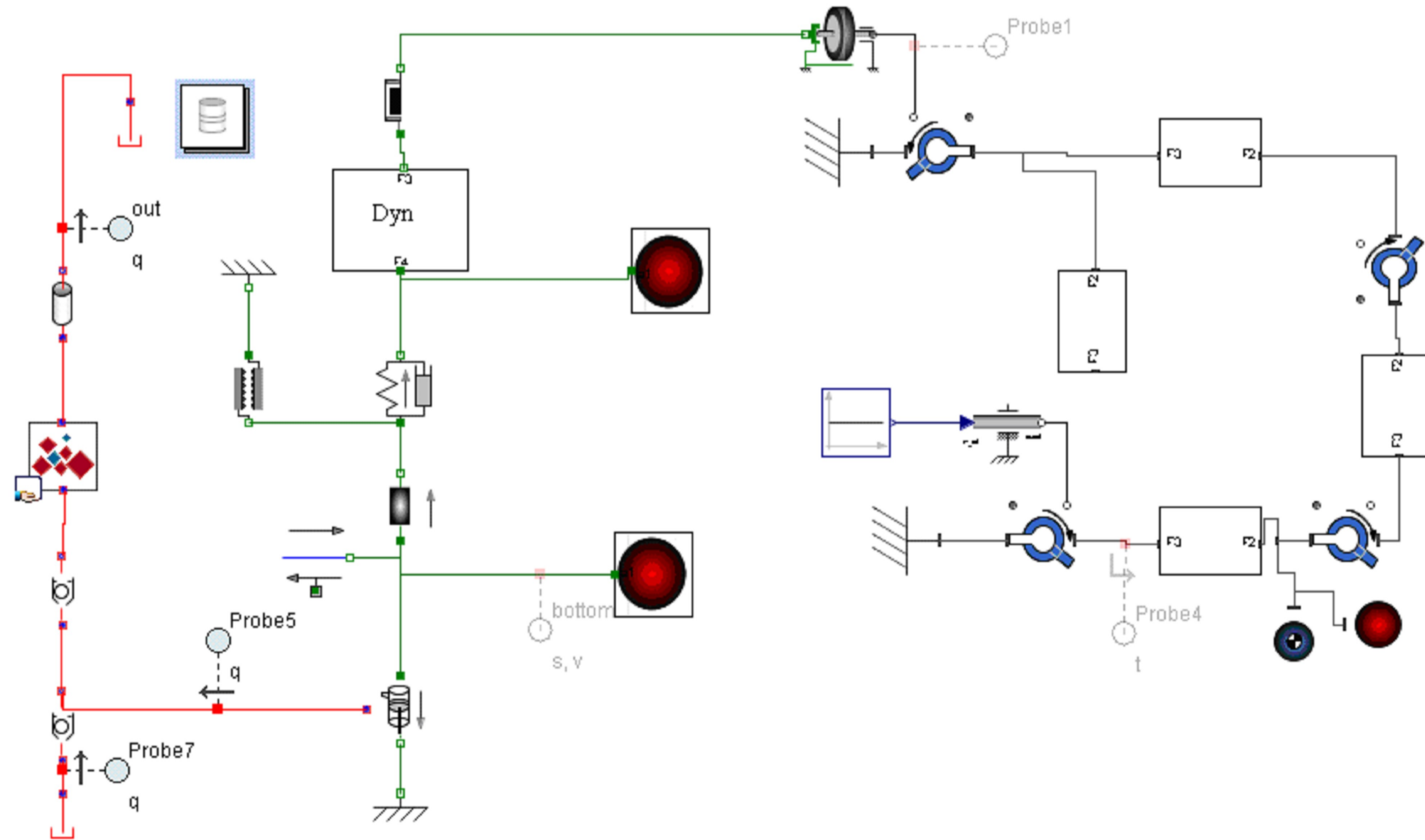


Динамічна модель верстата-качалки

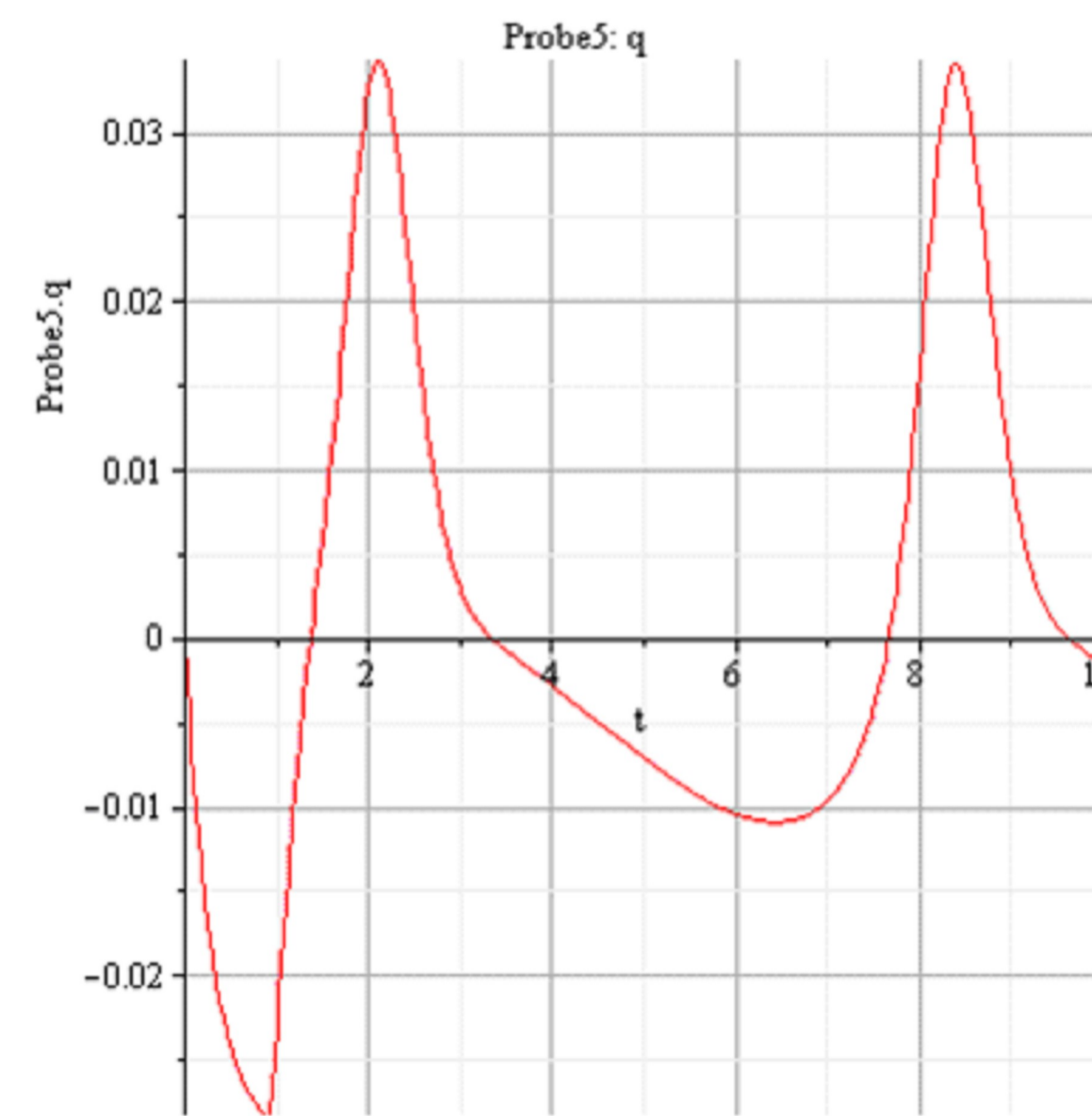
Playback mode



Візуалізація роботи ланок верстата-качалки з побудовою динамограми

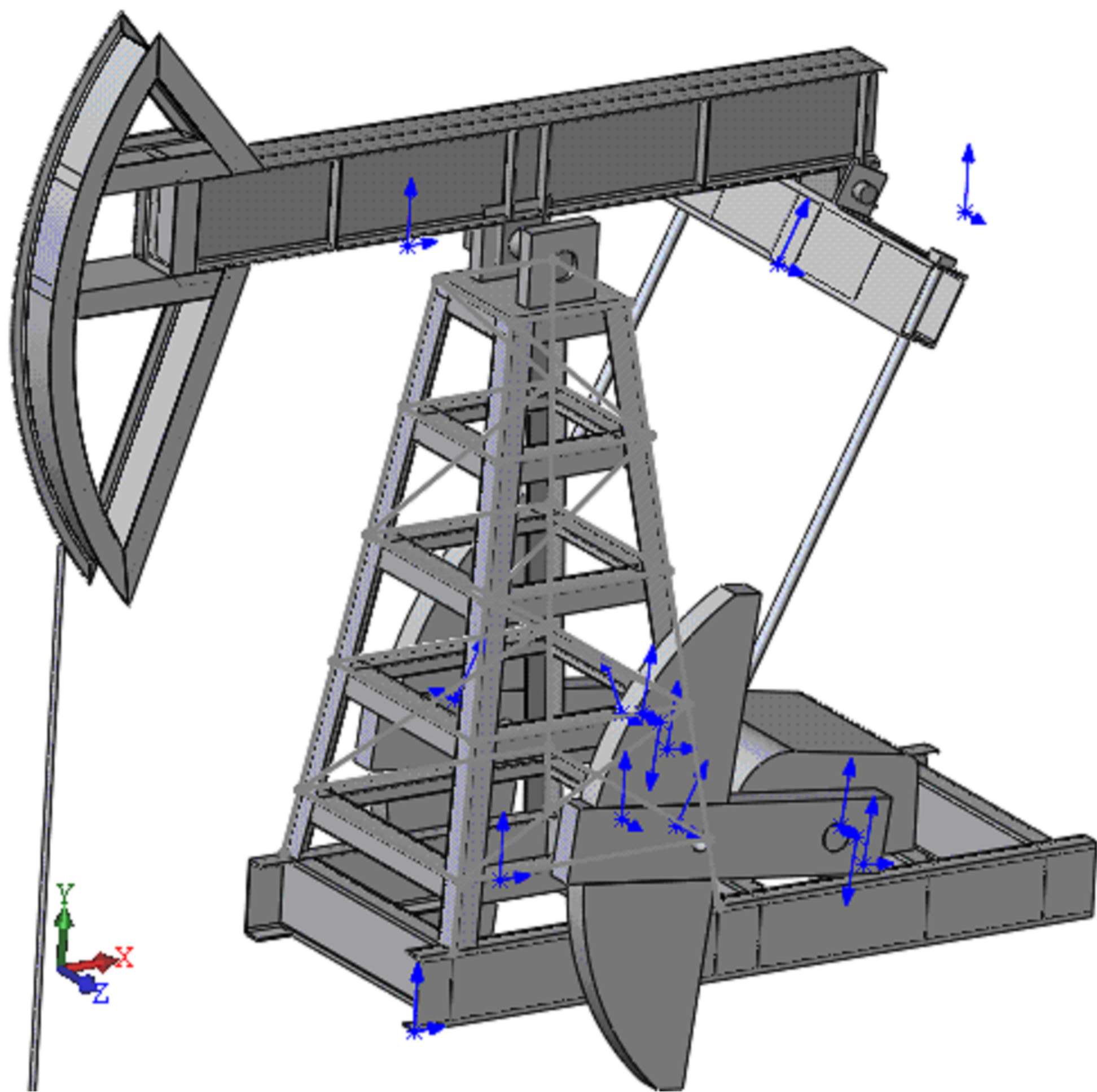


Динамічна модель ШСНУ

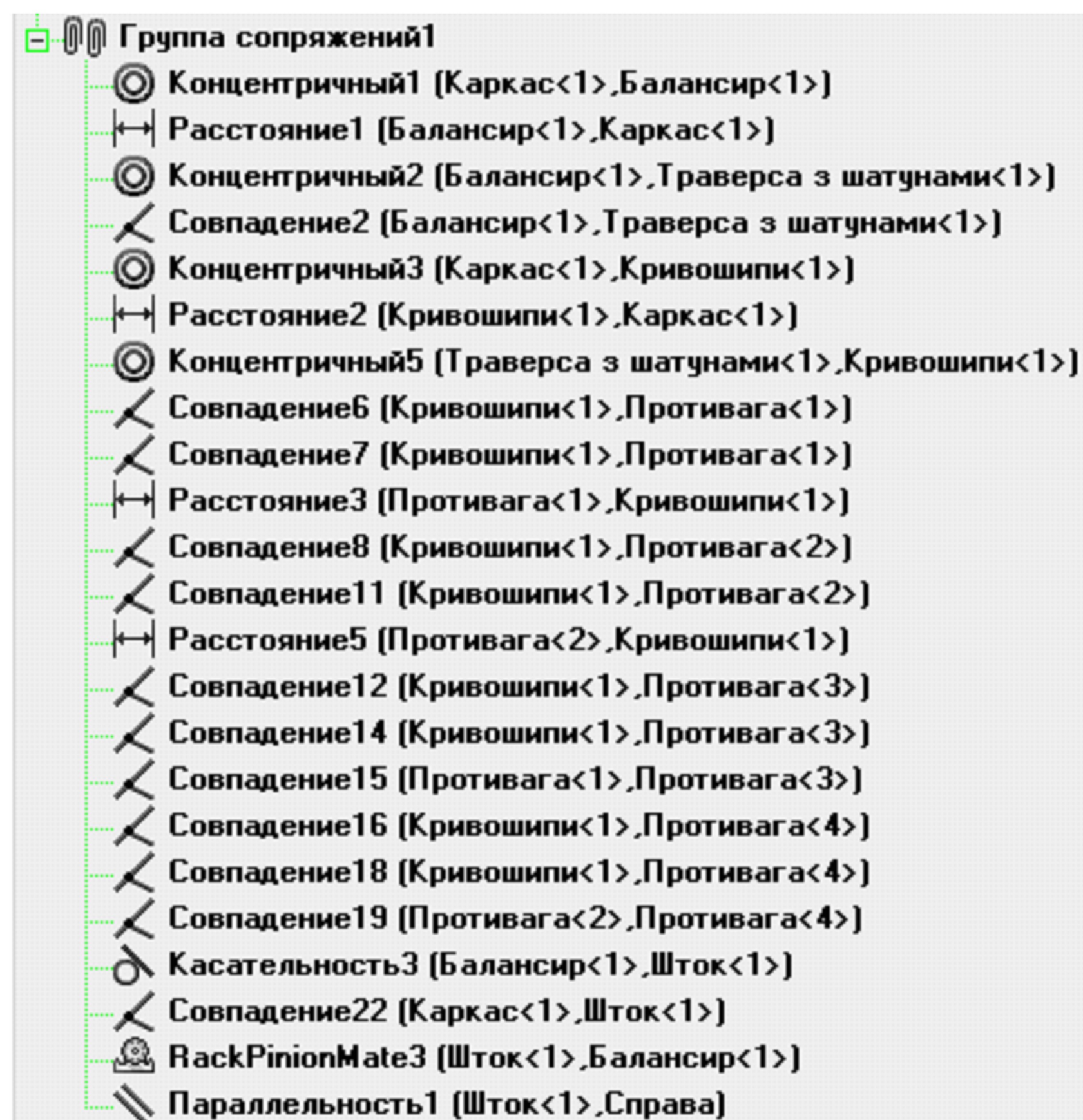
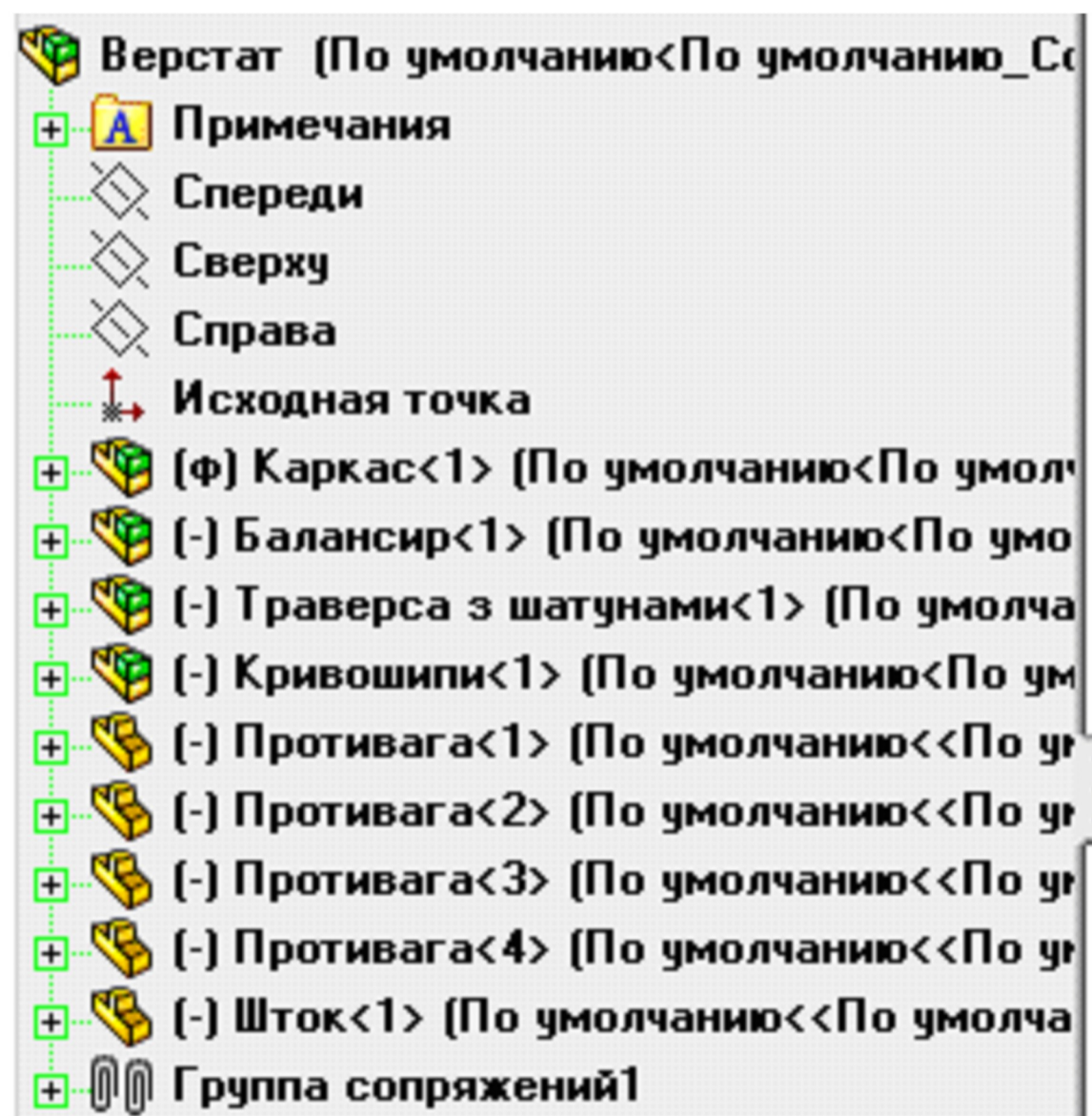


Подача на виході насоса (м3)

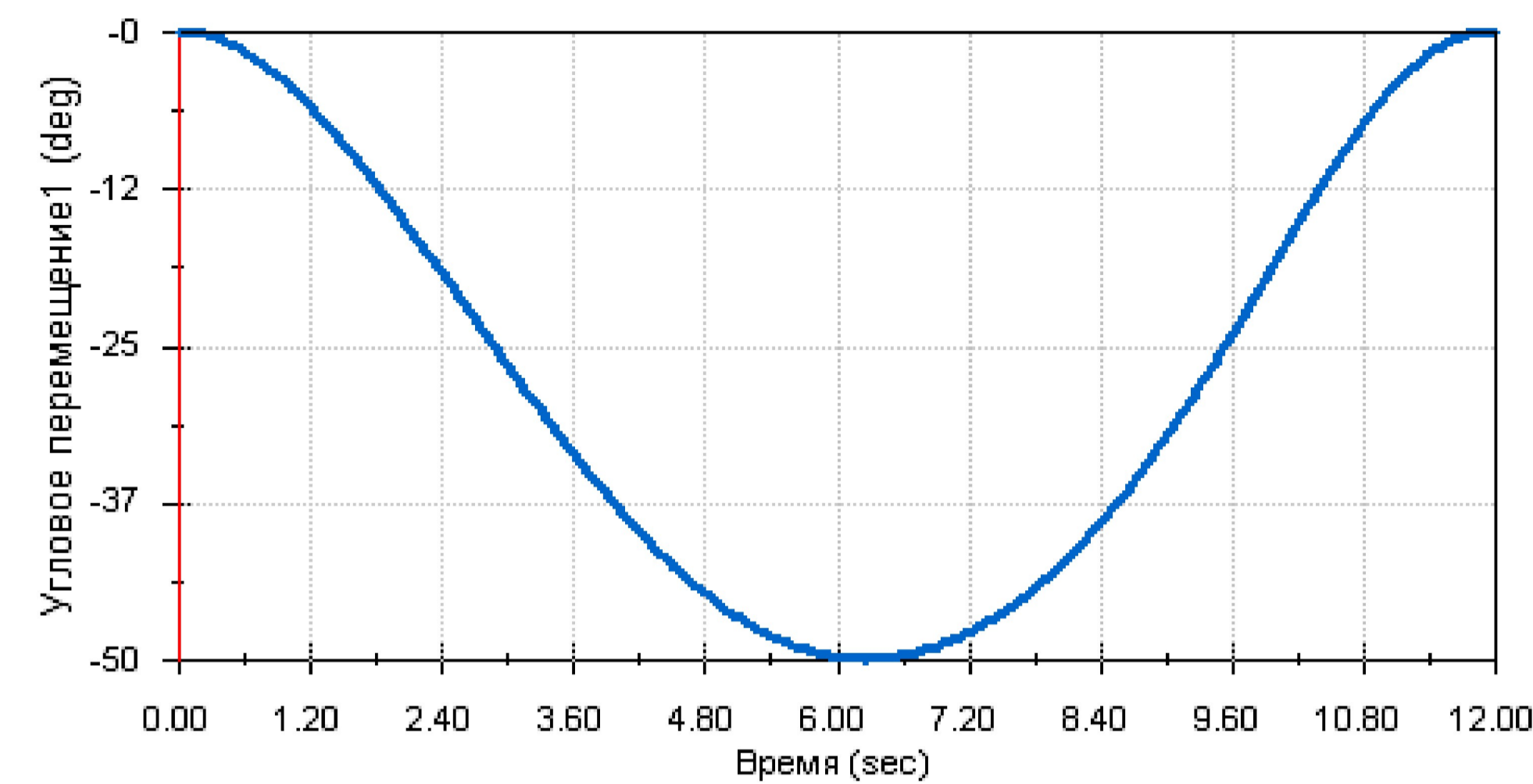
				MP.ПМК-127.00.002		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Лист	Масштаб
Разраб.		Кушнірук М.І.				1:1
Проб.		Копей В.Б.			Лист	Листов 1
Т.контр.		Копей В.Б.			ІФНТУНГ	
Реценз.		Копей В.Б.			ПМКМ-20-1	
Н.контр.		Панчук В.Г.			Формат А1	
Утв.					Копіював	



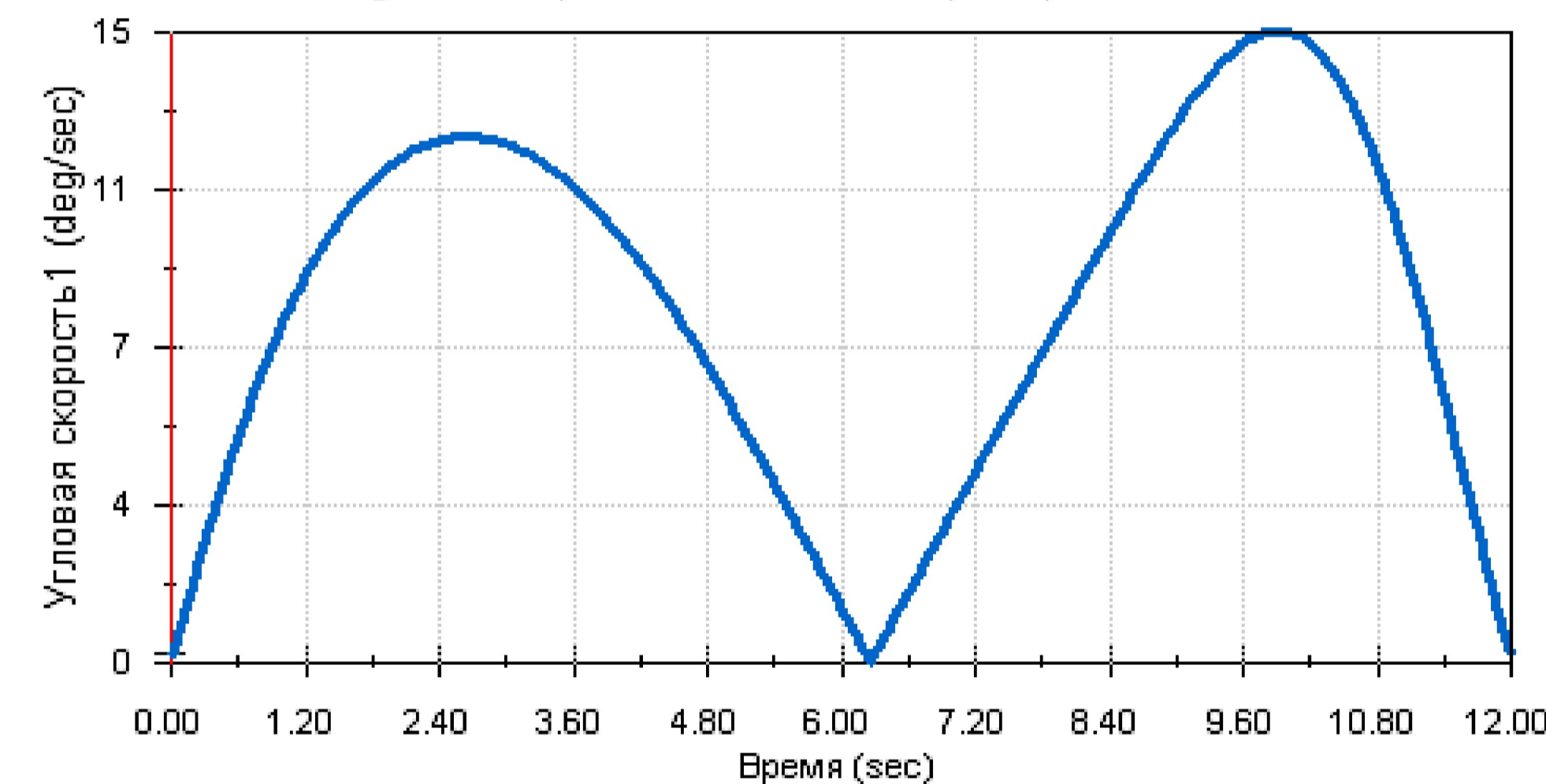
Модель верстата-качалки в SolidWorks



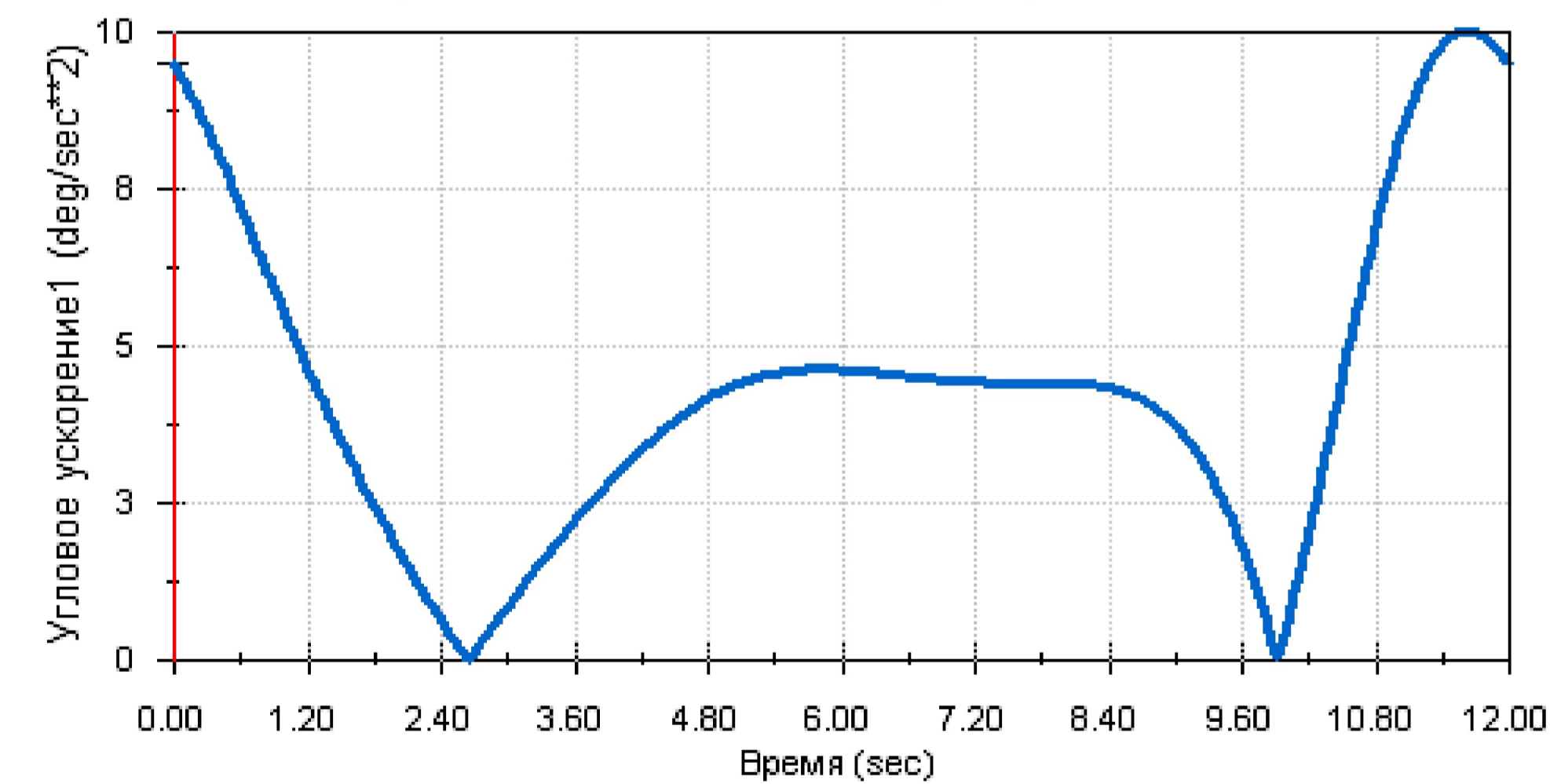
Дерево построения модели верстата-качалки



Кутове переміщення балансира, град



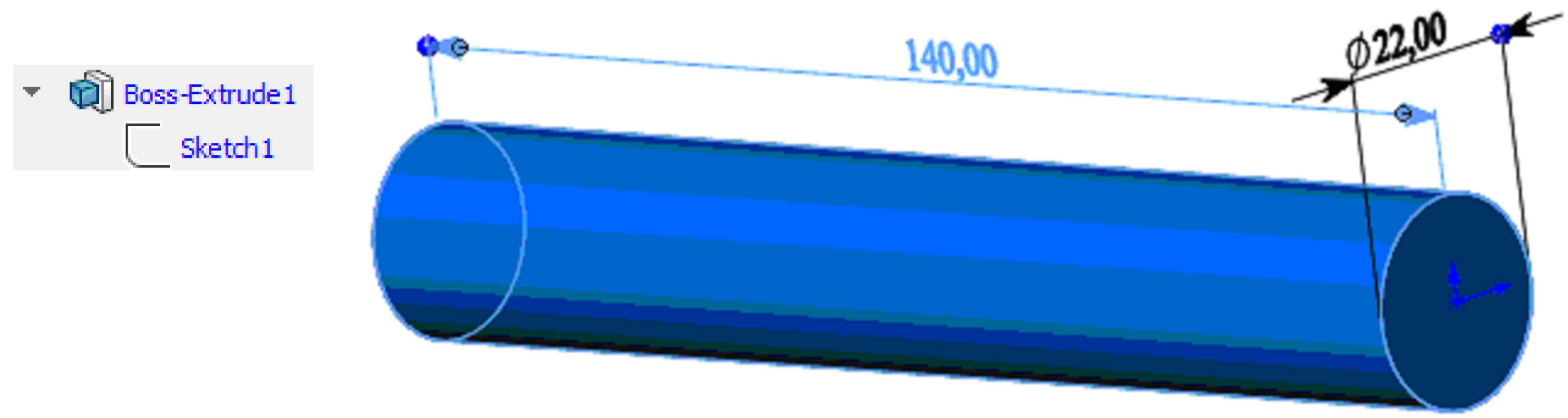
Кутова швидкість балансира, град/с.



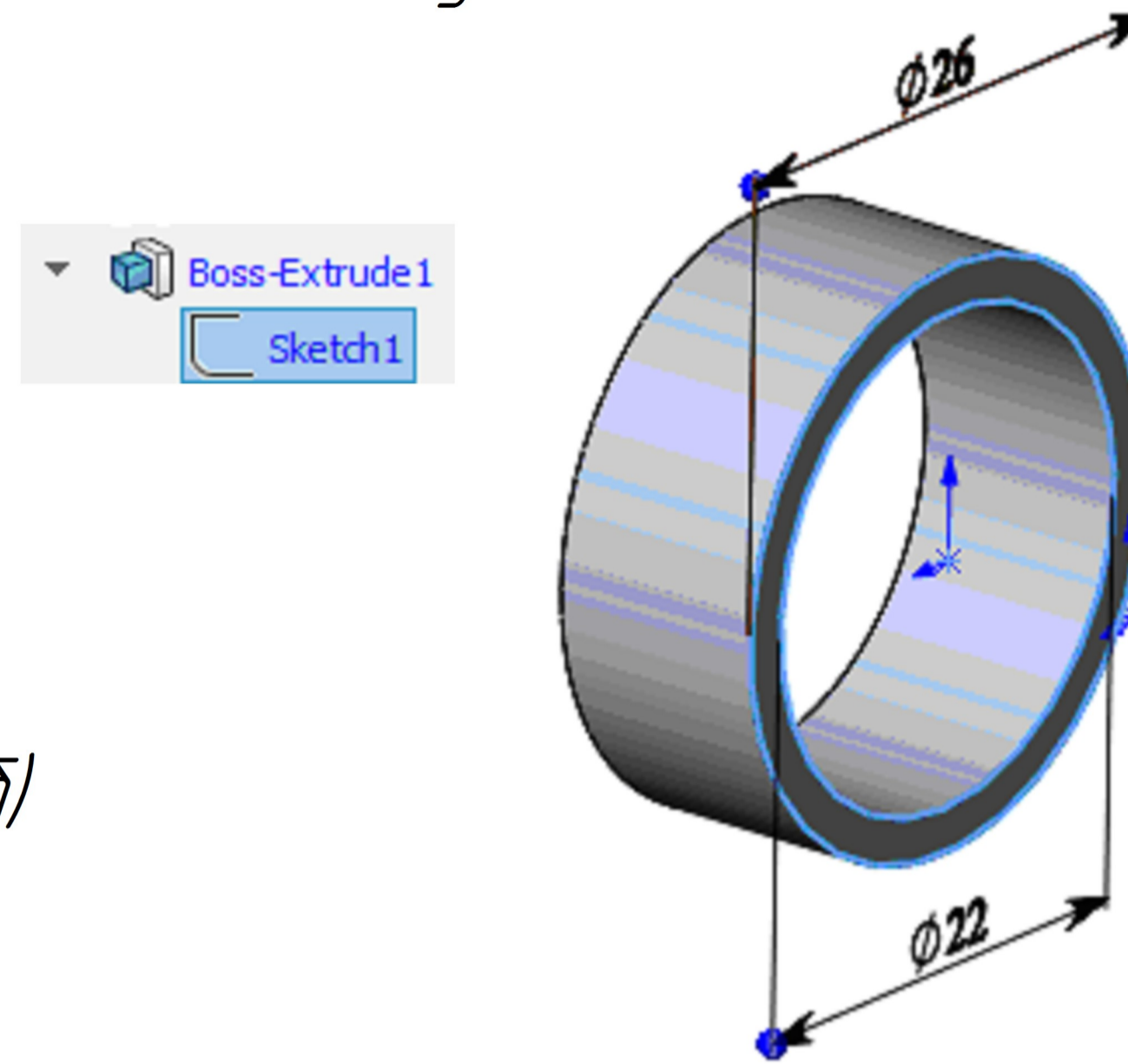
Кутове прискорення балансира, град/с2

				MP.ПМК-127.00.003		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Анализ модели в SolidWorks Motion	
Разраб.	Кушнрик М.				Лист	Масса
Проб.	Копей В.Б.					11
Т.контр.	Копей В.Б.				Листов	1
Реценз.					ИФНТУНГ	
Исполн.	Копей В.Б.				ПМКМ-20-1	
Утв.	Ланчук В.Г.				Формат	A1

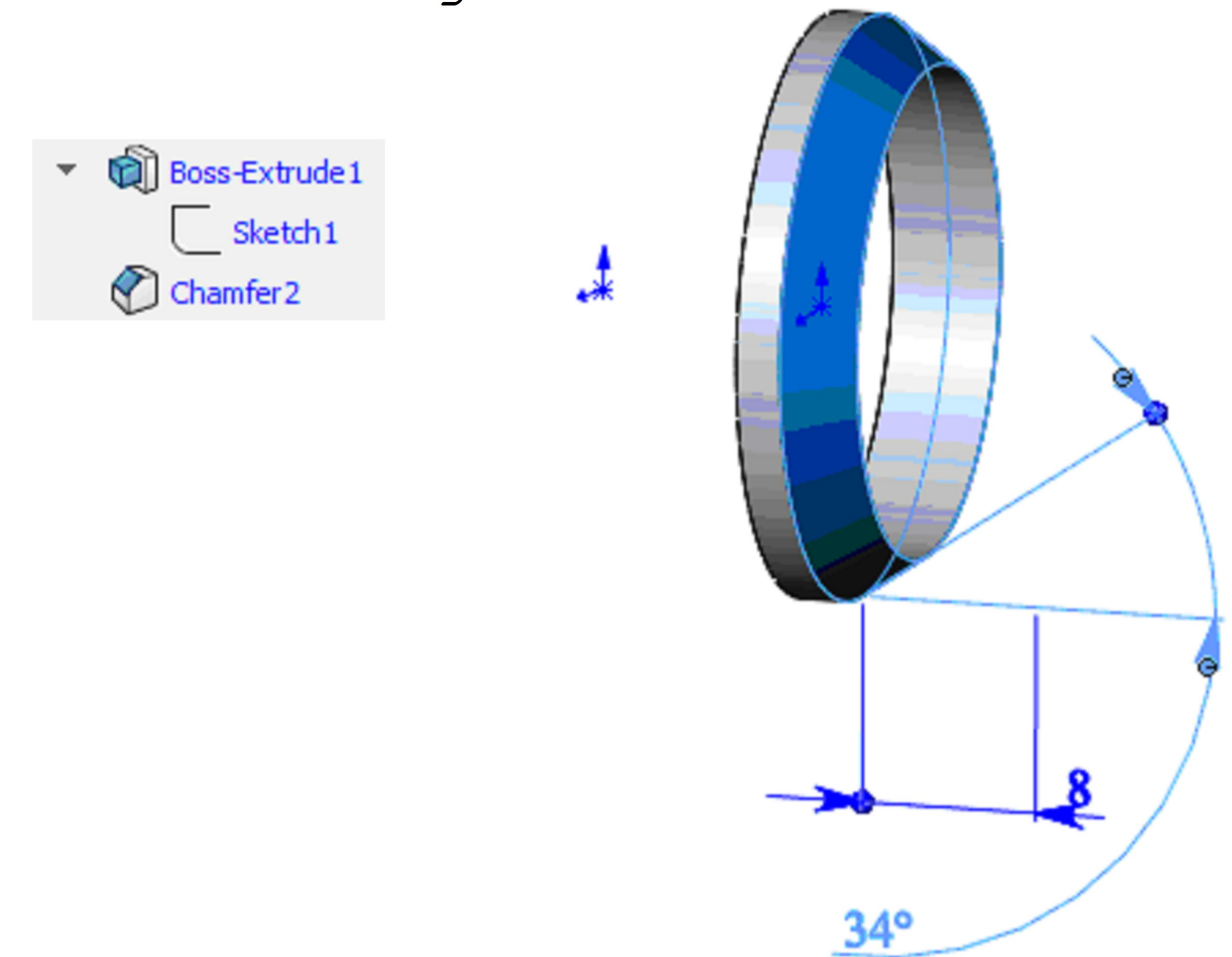
Дерево побудови моделі (а) та модель тіла штанги (б)



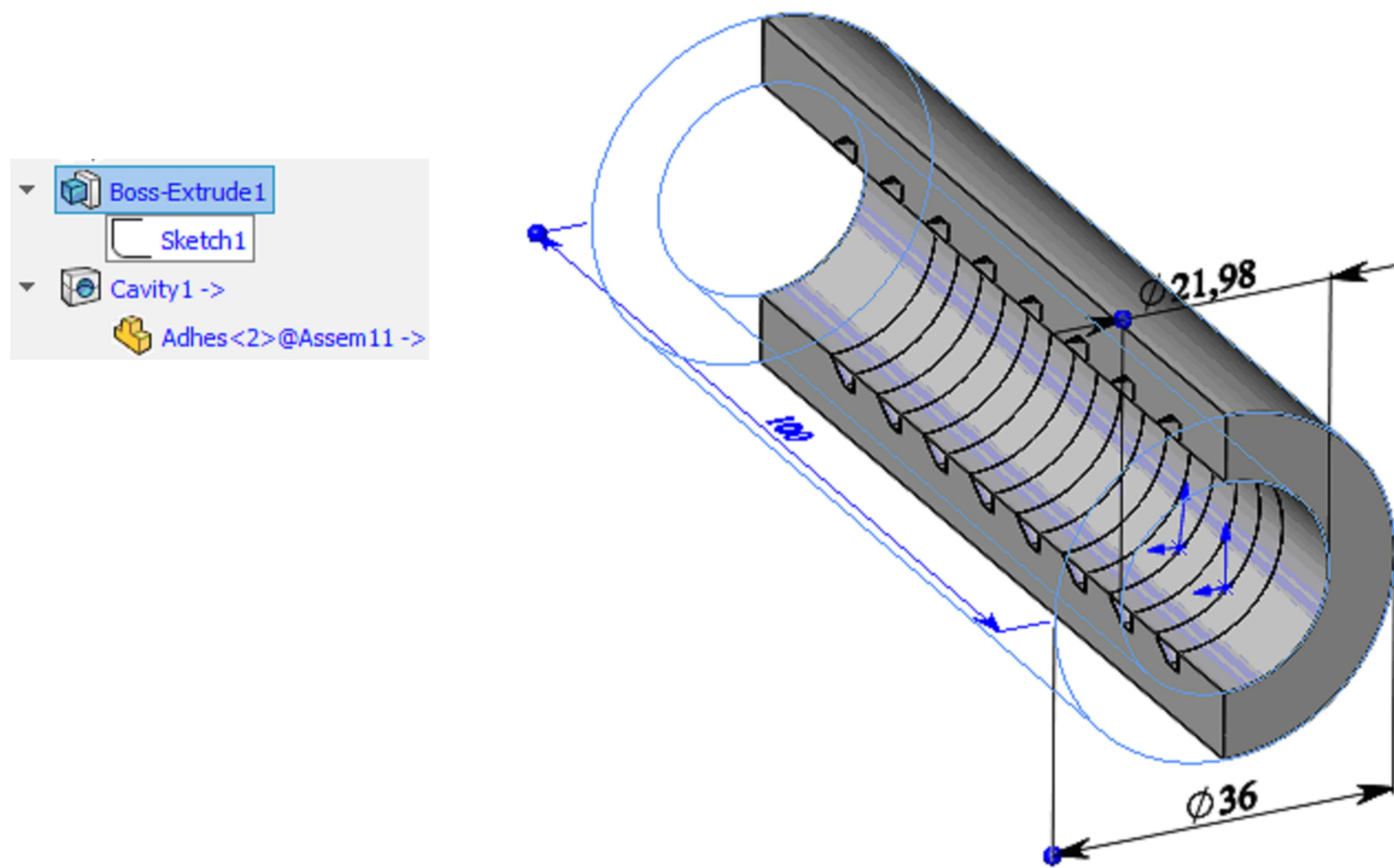
Дерево побудови моделі (а) та модель епоксидного клина (б) на першому етапі побудови моделі



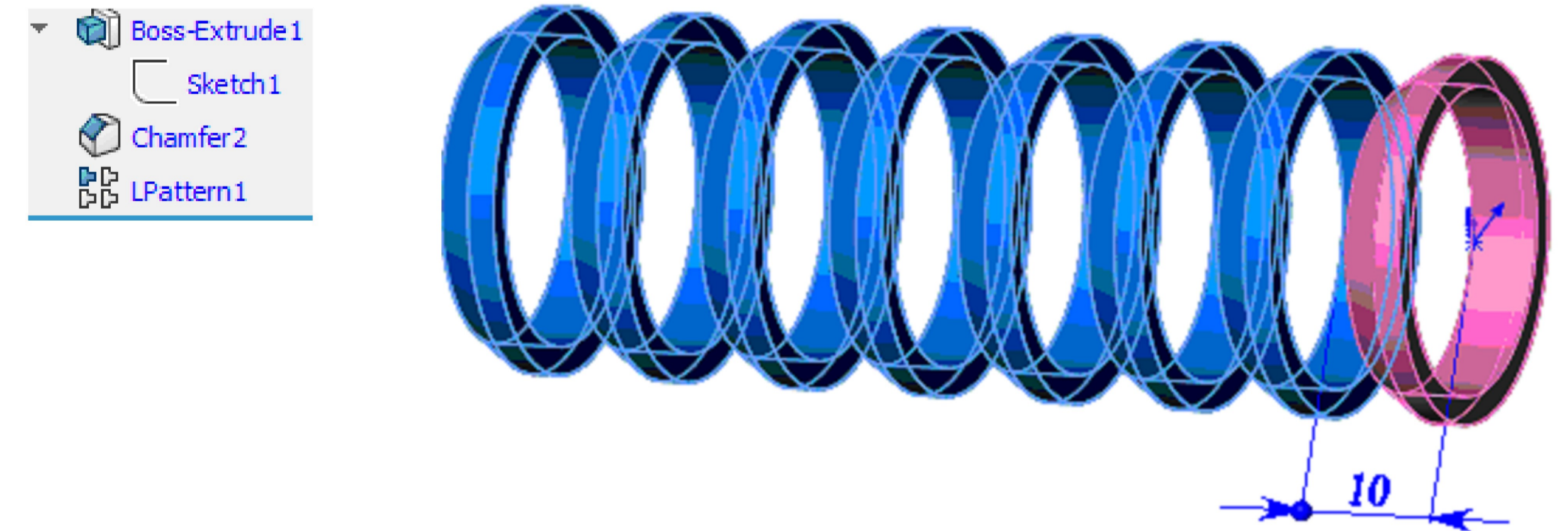
Дерево побудови моделі (а) та модель епоксидного клина (б) на другому етапі побудови моделі



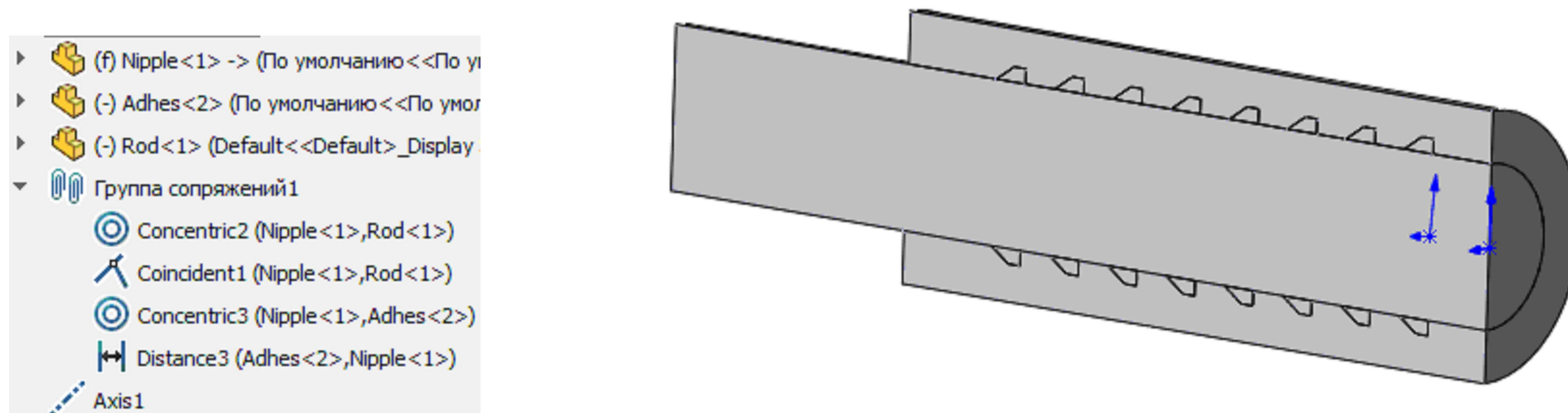
Дерево побудови моделі (а) та модель сталевого ніпеля ШН (б)



Дерево побудови моделі (а) та модель епоксидного клина (б) на третьому етапі побудови моделі

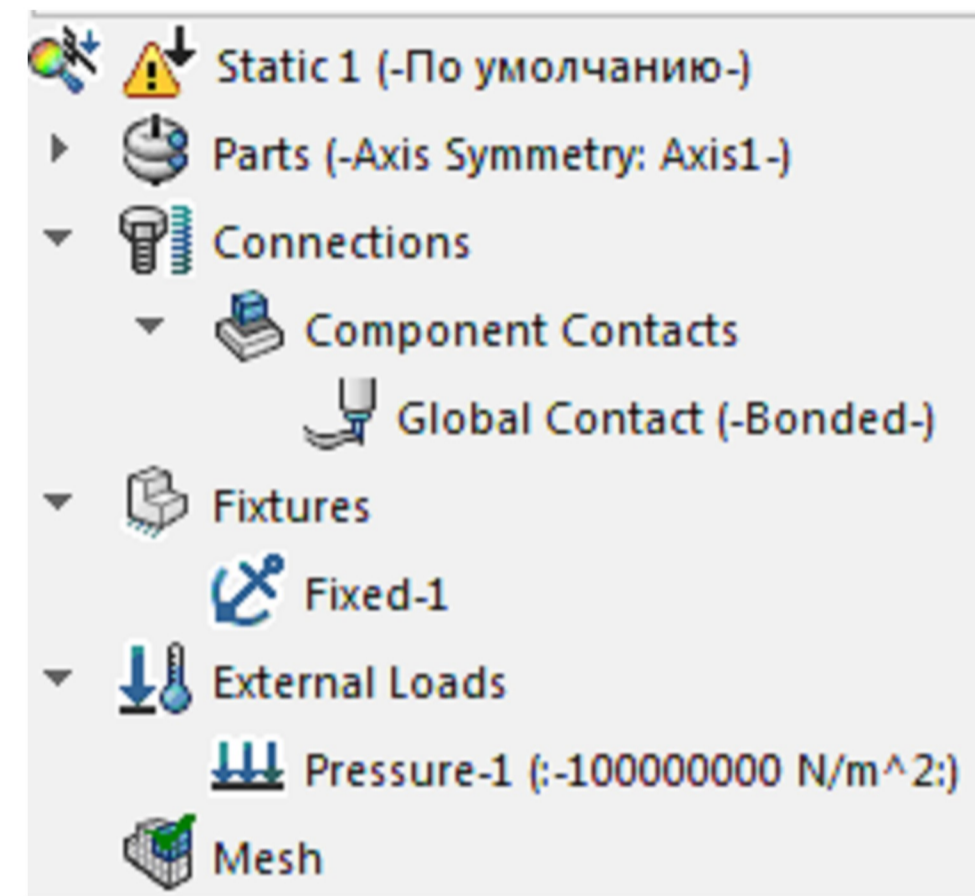


Дерево побудови моделі (а) та модель з'єднання ШН (б)

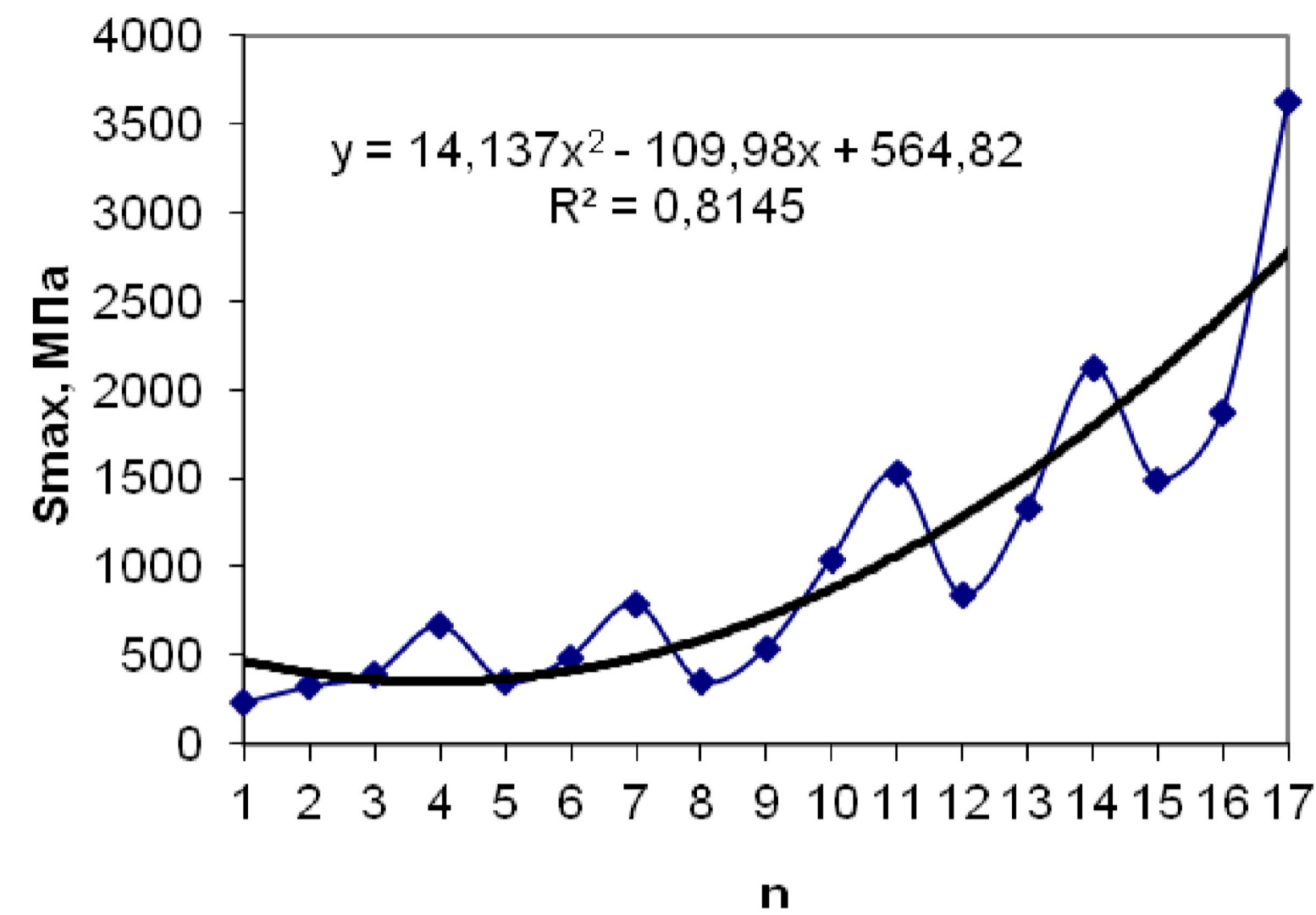


				MP.PMK-127.00.005		
Вар. Лист	№ док.м.	Подп.	Дата	Параметрична геометрична модель з'єднання	Лист	Масштаб
Разраб.	Клишнірук М.І.				1:1	
Проб.	Копей В.Б.			Лист	Листов	1
Т.контр.	Копей В.Б.					
Реценз.				ІФНТЧНГ ПМКМ-20-1		
Н.контр.	Копей В.Б.					
Утв.	Ланчук В.Г.			Формат А1		

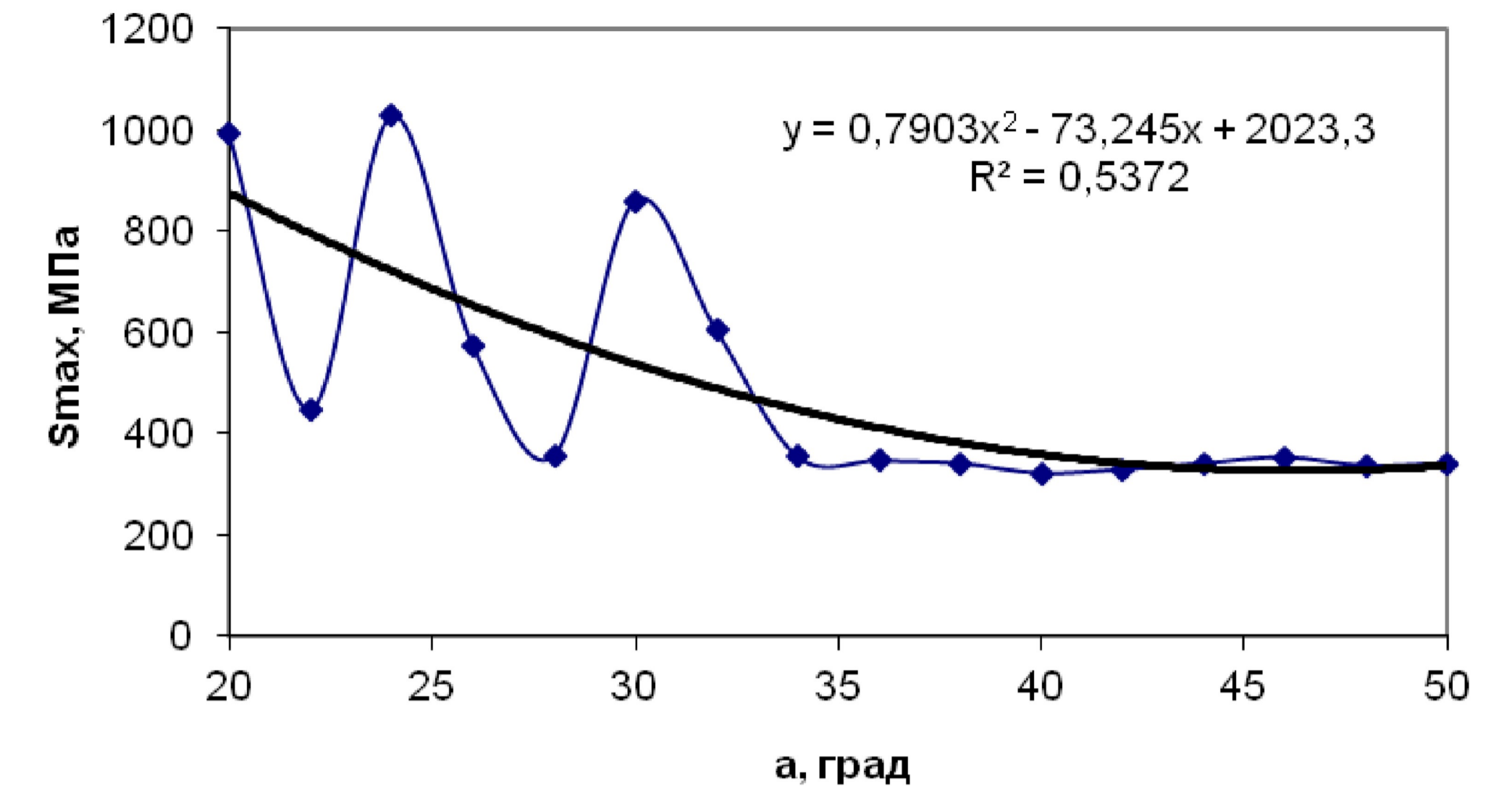
Дерево побудови скінченно-елементної моделі в Simulation



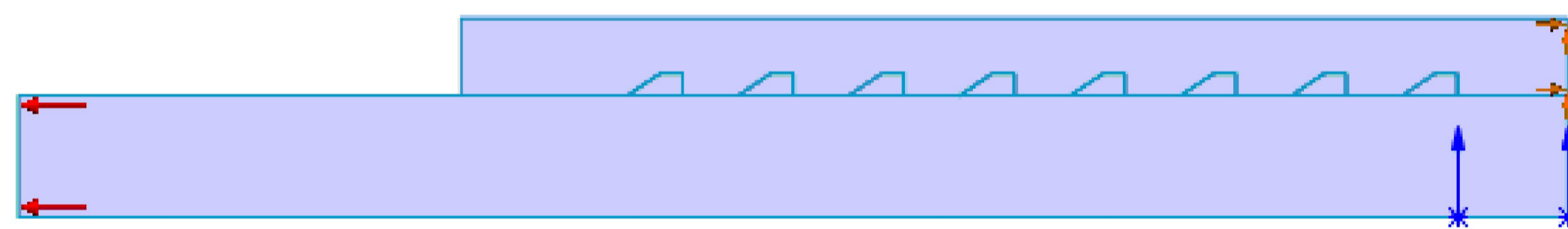
Залежність S_{max} від кількості клинів n



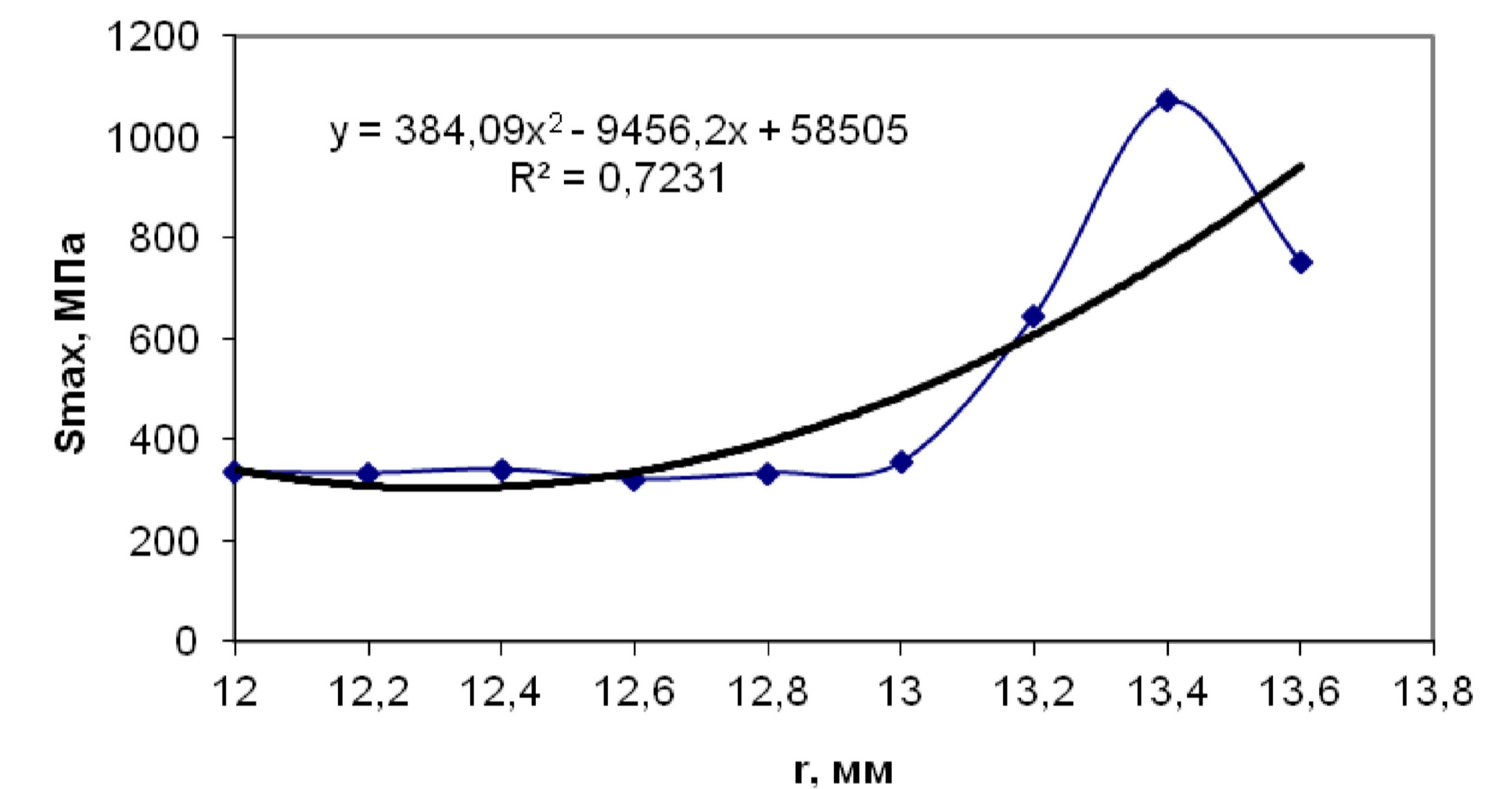
Залежність S_{max} від кута клина α



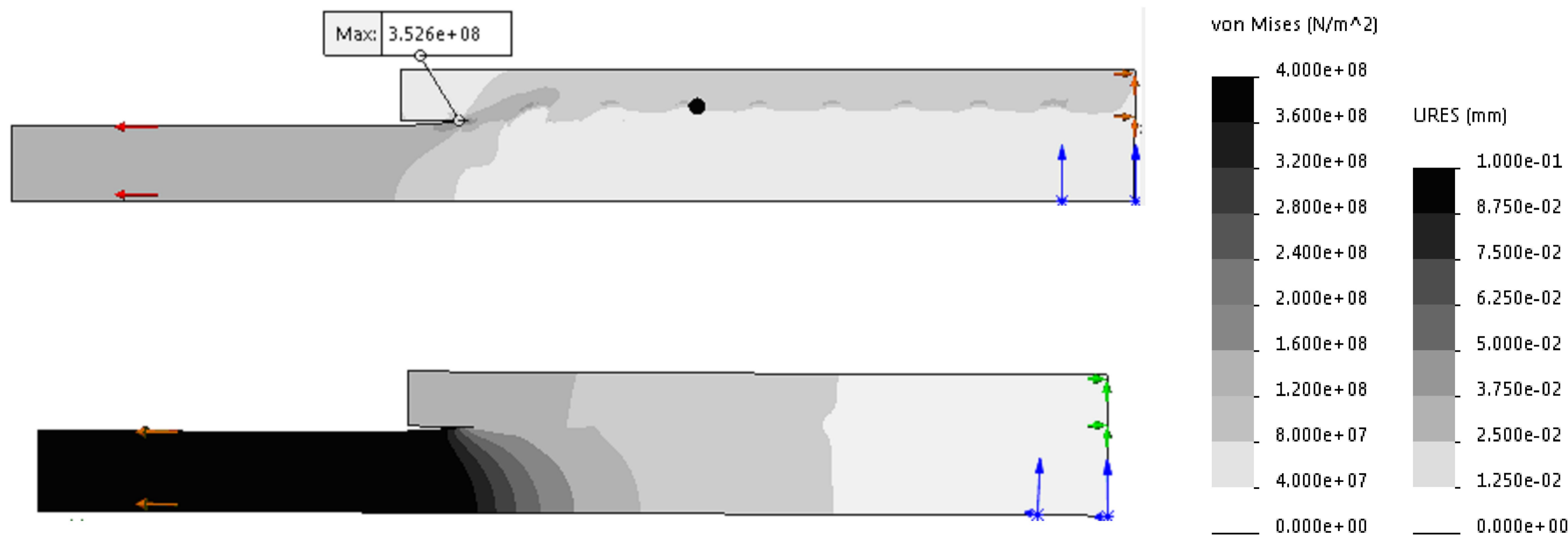
Скінченно-елементна модель в Simulation



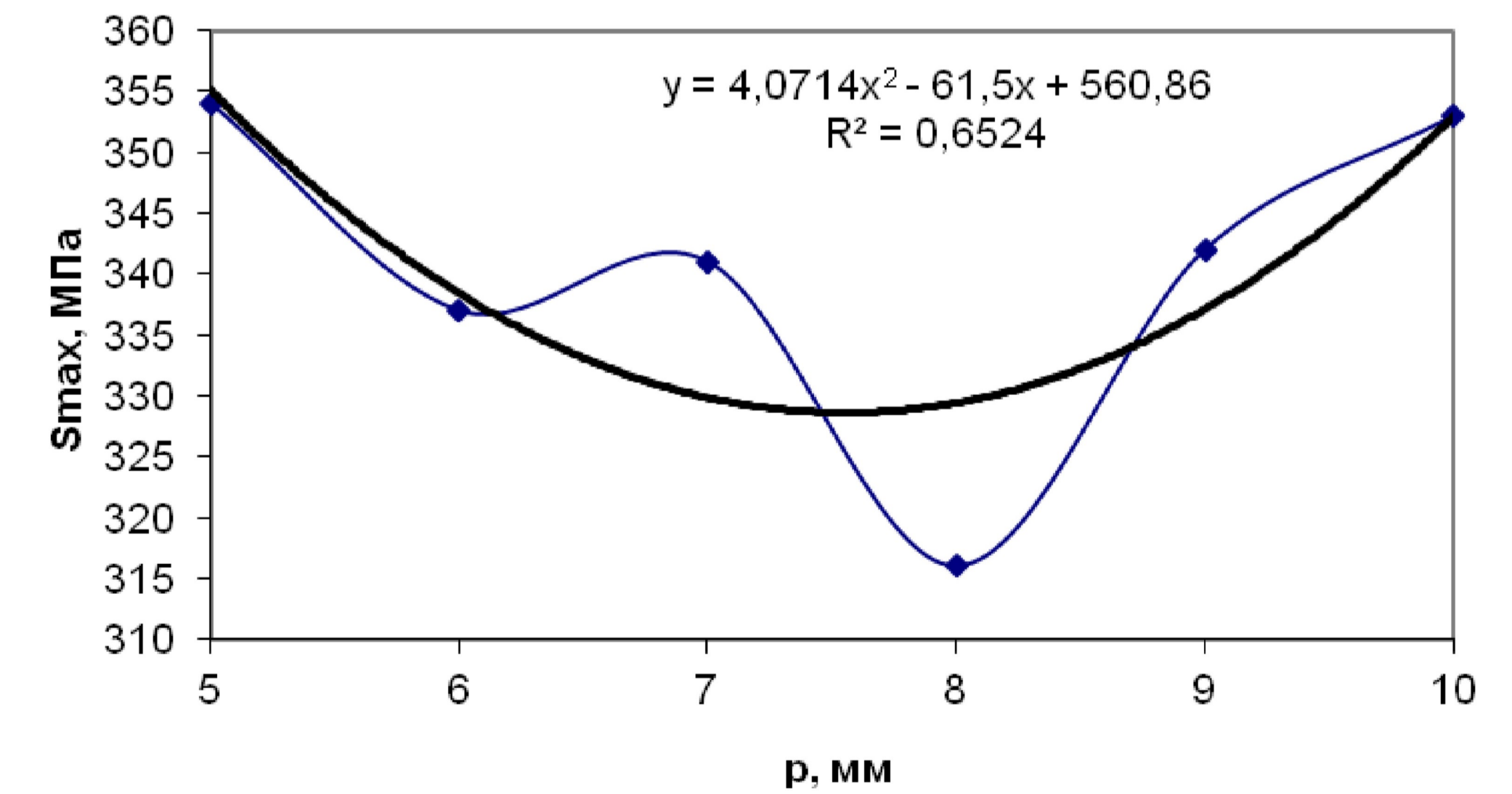
Залежність S_{max} від більшого радіуса клина r



Еквівалентні напруження (σ) і деформації (δ) для варіанта конструкції з $n=8$, $\alpha=34^\circ$, $r=13$ мм, $\rho=10$ мм



Залежність S_{max} від кроку клинів ρ



				MP.ПМК-127.00.006		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	FEA з'єднання тіла склопластикової штанги зі сталевим піпелем	
Розроб.	Кушнірук МІ				Лист	Масштаб
Проб.	Копей В.Б.					1:1
Т.контр.	Копей В.Б.				Листів	Листів
Реценз.						1
Н.контр.	Копей В.Б.				ІФНТУНГ	
Стб.	Панчук В.Г.				ПМК-20-1	
						Формат А1