

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Локомотиви»

В авторській редакції

САПР В ЛОКОМОТИВНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Навчально-методичні рекомендації
до виконання розрахунково-графічної роботи

Електронне видання

ДНІПРО
2023

УДК 004:629.42

С 19

Упорядники:

О. Б. Очкасов, Д. В. Бобирь, А. Є. Десяк

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми

«Локомотиви та локомотивне господарство»

Протокол № 1 від 25.09.2023

С 19 САПР в локомотивному господарстві : навчально-методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи / упоряд. О. Б. Очкасов, Д. В. Бобирь, А. Є. Десяк ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 29 с.

Навчально-методичні рекомендації містять систематизовані нормативно-довідникові відомості та методику необхідні для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «САПР в локомотивному господарстві».

Для студентів усіх форм навчання освітнього ступеня «бакалавр» за ОПП «Локомотиви та локомотивне господарство» спеціальності 273 «Залізничний транспорт».

© Очкасов О. Б., Бобирь Д. В., Десяк А. Є. укладання, 2023

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ЛОКОМОТИВА	6
1.1. Послідовність проєктування тягового редуктора	6
1.2. Порядок виконання роботи та вимоги формування звіту	15
2. РОЗРАХУНОК ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ НА МІЦНІСТЬ	16
2.1. Послідовність проєктування осі колісної пари	17
2.2. Побудова та розрахунок осі колісної пари за допомогою вбудованої бібліотеки побудови валів	17
2.3. Визначення максимальних напружень за допомогою модуля «Аналіз напружень»	20
2.4. Порядок виконання роботи та вимоги формування звіту	24
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	25
Додатки	28

ВСТУП

Система автоматизованого проектування (САПР) – автоматизована система, призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу, результатом якого є комплект проектно-конструкторської документації, достатньої для виготовлення та подальшої експлуатації об'єкта проектування. Реалізується на базі спеціального програмного забезпечення, автоматизованих банків даних, широкого набору периферійних пристроїв.

При вивченні дисциплін «САПР в локомотивному господарстві» та виконання розрахунково-графічної роботи однією з основних цілей є оволодіння здатністю виконувати плоскі технічні креслення та твердотільні моделі деталей, вузлів та складальних одиниць локомотивів та вузлів що мають відношення до локомотивного господарства в цілому із проведенням необхідних розрахунків та розробкою технічної документації, застосовуючи при цьому сучасні комп'ютерні технології та відповідне спеціалізоване програмне забезпечення.

Моделі деталей та вузлів, а також подальший аналіз геометрії, та інженерні розрахунки пропонується створювати в середовищі Autodesk Inventor.

Розрахунково-графічна робота складається з двох розділів:

- розрахунок та проектування циліндричного тягового редуктора локомотива;
- перевірка статичної та динамічної міцності осі колісної пари.

Теоретичні відомості та основні можливості програмного пакету Autodesk Inventor. Autodesk Inventor – 3D САПР для створення і вивчення поведінки цифрових прототипів виробів і деталей. Розробник компанія Autodesk. Використовується в основному в машинобудуванні. В комплект входить декілька продуктів: Autodesk Inventor Suite, Autodesk Inventor Routed Systems Suite (проектування кабельних і трубопровідних систем, в том числі для розводки складних ділянок трубопроводів, електричних кабелів і проводів), Autodesk Inventor Simulation Suite (засоби моделювання руху і аналізу навантажень, які спрощують вивчення поведінки виробу в реальних умовах ще на стадії проектування).

Інструменти Inventor забезпечують повний цикл проектування та створення конструкторської документації:

- 2D/3D-моделювання;
- створення виробів з листового матеріалу та отримання їх розгорток;
- розробка електричних і трубопровідних систем;
- проектування оснащення для відливання виробів;
- динамічне моделювання;
- статичний розрахунок;
- параметричний розрахунок напружено-деформованого стану деталей і зборок;

- візуалізація виробів;
- автоматичне отримання і оновлення конструкторської документації (оформлення по ЄСКД чи до вимог технічного кресленика).

В Autodesk Inventor є велика конструкторська бібліотека стандартизованих елементів, деталей та вузлів з можливістю доповнення цих бібліотек стандартних елементів. Також за допомогою вбудованих додатків є можливість швидко прорахувати та підібрати необхідні елементи та вузли.

Конструкторська бібліотека стандартизованих елементів містить елементи практично усіх світових стандартів таких як: ANFOR, ANSI, AS, BSI, CNS, CSN, DIN, GB, GOST, IS, ISO, JIS, KS, PN, SFS, SS, STN, UNI та інші. Найбільш поширеними в Україні є: ANSI, ISO і GOST.

Студентські версії Autodesk Inventor, призначені виключно для використання студентами та викладачами в освітніх цілях, доступні для безкоштовного завантаження з сайту Освітньою спільнотою Autodesk. Функціонально така версія Autodesk Inventor нічим не відрізняється від повної, за одним винятком: всі файли, створені або відредаговані в ній, мають спеціальну позначку (так званий educational flag), яка буде розміщена на всіх видах. Отже, даний продукт є безкоштовний для використання у навчальних цілях.

Мета методичних рекомендацій полягає у формуванні в студентів системи компетенцій для розв'язання професійних завдань з ефективного використання САПР під час проектування локомотивів та їх вузлів, опанування методики та набуття навиків самостійного вирішення завдань огляду, розрахунку та оцінки характеристик вузлів локомотивів.

Видання сприяє досягненню таких результатів навчання:

- здійснювати професійну діяльність використовуючи інформаційні технології, «Інформаційні бази даних», Internet-ресурси, програмні засоби та інші інформаційно-комунікаційні технології;
- володіти основами розробки та впровадження у виробництво документації щодо визначеності технологічних процесів виробництва, експлуатації, ремонту та обслуговування локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів та інших інструктивних вказівок, правил та методик;
- виконувати розрахунок основних характеристик та параметрів технологічних процесів виробництва, експлуатації та ремонту локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів з метою їх порівняння та формування управлінських рішень щодо подальшого функціонування підприємства з оцінкою якості його продукції;
- розробляти проєктно-конструкторську та технологічну документацію зі створення, експлуатації, ремонту та обслуговування локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів використовуючи спеціалізовані сучасні програмні засоби.

1. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ЛОКОМОТИВА

Майже всі локомотиви, що експлуатуються на магістральних ділянках, мають індивідуальний редукторний тяговий привід, що розміщується на колісній парі. Його розміри та найбільша потужність обмежуються шириною колії, діаметром коліс та габаритом верхньої будови колії. Тому головними вимогами до тягового редуктора локомотива є компактність та малі габарити з можливістю надійної та безпечної передачі великих потужностей та крутного моменту до рушійних колісних пар.

Зубчаста передача є обов'язковим елементом тягового приводу сучасних локомотивів з електродвигунами. Тягові зубчасті колеса та шестерні є тими елементами конструкції локомотивів, працездатність яких треба підвищувати. Тривалість справної роботи тягового редуктора складає близько 1,5 млн км пробігу.

На магістральних тепловозах використовують односторонній тяговий редуктор, на електровозах – на кожній колісній парі по два редуктори із косозубими зубчастими колесами. На деяких локомотивах застосовують пружні зубчасті колеса, що сприяє зменшенню динамічних зусиль у зачепленні зубів.

Тому, для забезпечення вищевказаних вимог проєктування і розрахунок вінця тягових редукторів локомотивів пропонується виконати за допомогою програмного пакету Autodesk Inventor з використанням вбудованих стандартизованих бібліотек.

1.1. Послідовність проєктування тягового редуктора

Проєктування тягового редуктора можливо виконувати за попередніми розрахунками в цілком мануальному режимі або з використанням вбудованих стандартизованих бібліотек. Для початку проєктування з використанням вбудованих стандартизованих бібліотек необхідно відкрити на комп'ютері програмний пакет Autodesk Inventor, на головній сторінці натиснути кнопку **створити «Збірка»** та виконати збереження файлу на жорсткому диску комп'ютера чи іншому носію цифрової інформації. Слід зазначити, що в середовищі проєктування «Деталь» відсутня можливість автоматичного проєктування зубчастих передач, проєктування виконується лише в цілком ручному режимі. Далі необхідно натиснути на вкладення **«Проєктування → Привод → Циліндричне зубчасте зачеплення»** (рис. 1.1) після чого відкриється **«Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення»** (рис. 1.2). Autodesk Inventor також має можливість проєктувати циліндричні, конічні, рейкові та черв'ячні передачі. На локомотивах застосовується циліндри-

чна зубчаста передача, а на тепловозах з гідравлічною передачею застосовується конічна зубчаста передача.

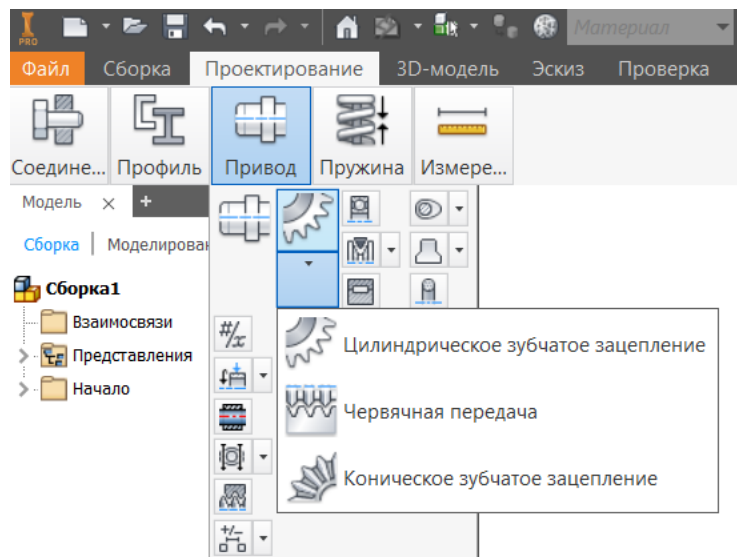


Рис. 1.1. Фрагмент вікна підключення бібліотеки проектування циліндричних зубчастих зацеплень

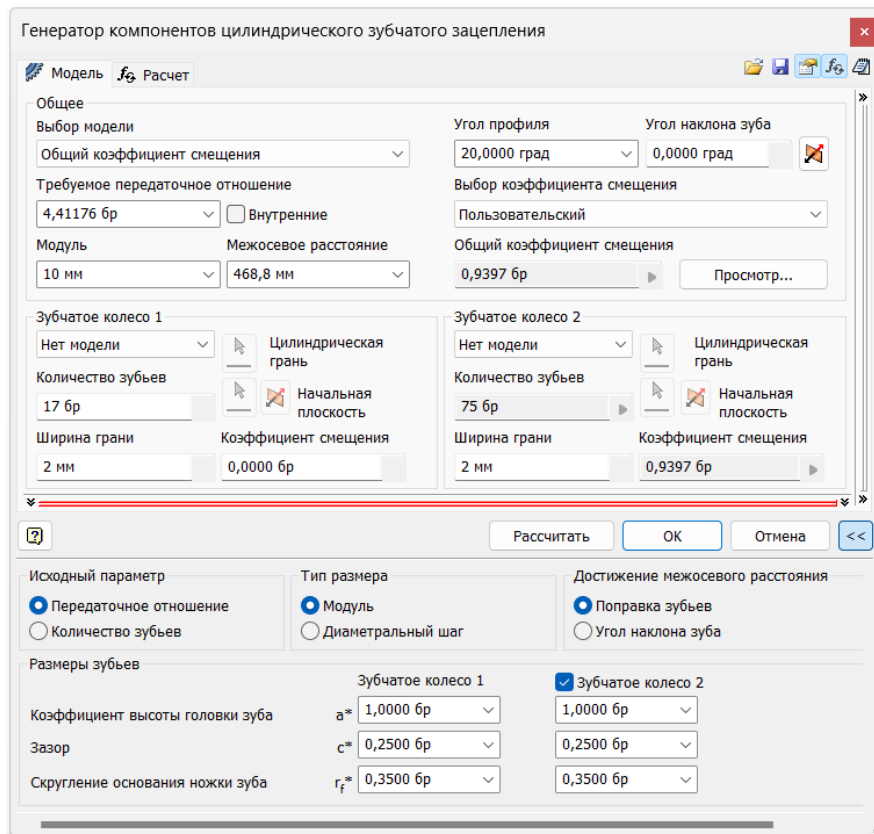


Рис. 1.2. Фрагмент вікна «Генератор компонентів циліндричного зубчастого зацеплення»

«Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення» має два вкладення «Модель» та «Розрахунок». На вкладенні «Модель» задаються необхідні геометричні параметри зубчастого зачеплення, а на вкладенні «Розрахунок» задаються необхідні умови роботи зубчастого зачеплення та проводиться розрахунок на предмет надійної та довговічної роботи даного зачеплення.

Для початкового проєктування зубчастого зачеплення необхідно в загальному мати наступні параметри:

- передаточне відношення;
- модуль;
- міжосьову відстань;
- ділительний діаметр;
- кількість зубів;
- кут профілю (для косозубого зачеплення).

Але якщо виконувати проєктування за допомогою «Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення», то є можливість використовувати не всі параметри, оскільки параметри тісно пов'язані між собою та виражаються одні через одні загальновідомими співвідношеннями.

Передаточне відношення (i) – одна з важливих кінематичних характеристик механічної передачі обертального руху, знаходиться як відношення кількості зубів, діаметрів веденого колеса до ведучого колеса, кутової швидкості, частоти обертання ведучого колеса до веденого колеса, може бути визначене за наступною формулою:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (1.1)$$

де z_1, z_2 – кількість зубів ведучого та веденого колеса відповідно;

d_1, d_2 – діаметри ведучого та веденого колеса відповідно, мм;

w_1, w_2 – кутова швидкість ведучого та веденого колеса відповідно, рад/с;

n_1, n_2 – частота обертів ведучого та веденого колеса відповідно, хв⁻¹.

Модуль зубчастого зачеплення m – це стандартизований найголовніший параметр зубчастого зачеплення, лінійна величина в π разів менша за коловий крок p або відношення кроку по будь-якому концентричному колу зубчастого колеса до π , визначається з розрахунку на міцність зубчатих передач. Чим більш навантажена передача, тим вищим вибирається значення модуля, а далі через нього визначається решта всіх параметрів. Модуль вимірюється в міліметрах і обчислюється за формулою:

$$m = \frac{d}{z} = \frac{p}{\pi}, \quad (1.2)$$

де d – ділительний діаметр, мм;
 z – кількість зубів;
 p – крок зубів.

Міжосьова відстань a_w – відстань між центрами отворів двох зубчастих коліс, що знаходяться в зачеплення і визначається як половина суми ділительних діаметрів

$$a_w = 0,5(d_1 + d_2). \quad (1.3)$$

Ділительне коло (ділительний діаметр) d – це коло зубчастого колеса, на якому його крок і кут зачеплення відповідно дорівнюють теоретичному кроку і куту зачеплення інструменту (наприклад, рейки), а також це коло по якому відбувається розмітка зубців по колесу при їхній нарізуванні та є початковим при зачепленні його з рейкою. Ділительний діаметр визначається за формулою:

$$d = \frac{pz}{\pi} = mz. \quad (1.4)$$

Всі необхідні початкові параметри для проектування зубчастого зачеплення тягового редуктора локомотива наведені в Додатку А та обираються згідно індивідуального шифру студента. Якщо в таблиці А.1 відсутній той чи інший параметр для проектування зубчастого зачеплення тягового редуктора локомотива, то цей параметр можна розрахувати за формулами (1.1–1.4).

Після відкриття вікна «Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення», необхідно обрати тип моделі (рис. 1.3). Тип моделі – це тип автоматичного розрахунку всіх параметрів зубчастого зачеплення по відношенню до тих параметрів які вже є відомі або бажаними. Autodesk Inventor розраховує зубчасте зачеплення за наступними моделями:

- модуль та кількість зубів;
- кількість зубів;
- міжосьова відстань;
- загальний коефіцієнт зміщення;
- модуль.

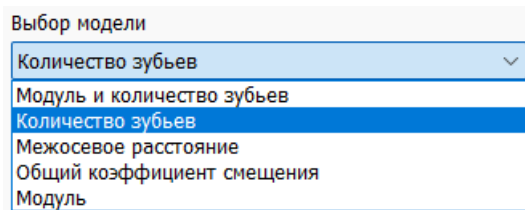


Рис. 1.3. Фрагмент вікна вибору моделі проектування зубчастого зачеплення

Наприклад, якщо обрати модель **«модуль та кількість зубів»**, то це означає, що модуль та кількість зубів будуть не відомими і програма буде сама їх розраховувати на основі таких параметрів як передаточне відношення та міжосьова відстань. За даною аналогією працюють і решта чотири моделі.

Autodesk Inventor дозволяє проєктувати як зовнішні зачеплення так і внутрішні, а також як прямозубі так і косозубі циліндричні передачі. Оскільки тяговий редуктор локомотива має зовнішнє зачеплення, то в **«Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення»** поле **«Внутрішнє»** залишаємо пустим. Якщо проєктуємо прямозубе зачеплення, то в полі **«Кут профілю»** вводимо з клавіатури **«0»** градус, якщо ж проєктуємо косозубе зачеплення, то відповідно вводимо необхідний кут.

Зубчасте колесо складається з двох основних елементів: диска та зубчастого вінця. Слід зазначити, що **«Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення»** на сам перед проєктує та розраховує зубчастий вінець, тому для створення твердотільної моделі зубчастого колеса спочатку необхідно спроектувати сам диск, тобто базову основу з усіма додатковими елементами, такими як отвори, проточки, фаски, заокруглення, галтелі, шпоноківі пази, різьби і т.д., або просто диск, а всі решту елементів спроектувати на завершальній стадії. Також є можливість в даному генераторі проєктувати зубчастий вінець без попередньо створеного диску основи, а створити його в самому ж генераторі. А решту елементів зубчастого колеса проєктувати за межами **«Генератор компонентів циліндричного зубчастого зачеплення»**.

Після введення початкових параметрів та розрахунку всіх решти параметрів необхідно визначитися з тим на основі чого буде побудована модель зубчастого зачеплення. Autodesk Inventor пропонує три типи побудови твердотільної тривимірної моделі зубчастого зачеплення для кожного з двох елементів (колесо 1 та колесо 2) (рис. 1.4):

- **компонент** – дозволяє побудувати зубчасте зачеплення в довільному місці без заздалегідь спроектованої основи. Але якщо ця основа є, то можна вказати початок розташування моделі за допомогою таких параметрів як **«Циліндрична грань»** та **«Початкова площість»** при цьому обрати необхідні грані та площини на початковій моделі;

- **елемент** – дозволяє побудувати зубчасте зачеплення тільки на основі заздалегідь спроектованого диска, при цьому обов'язково необхідно задати початкові параметри розташування зубчастих коліс натиснувши на кнопки **«Циліндрична грань»** та **«Початкова площість»** та обравши необхідні початкові елементи для побудови;

- **немає моделі** – дозволяє побудувати лише одне зубчасте колесо за розрахованими параметрами. Розрахунок зубчастого зачеплення завжди виконується лише для пари коліс, але нам не завжди необхідно проєктувати та візуалізувати пару. Тому, яке колесо не потребує візуалізації, для того колеса необхідно обрати параметр **«немає моделі»**, а для колеса яке потребує візуалізації обрати один з двох вище описаних параметрів.

Тому, для спрощення та пришвидшення побудови зубчастого вінця рекомендується обрати побудову на основі **«компонент»**.

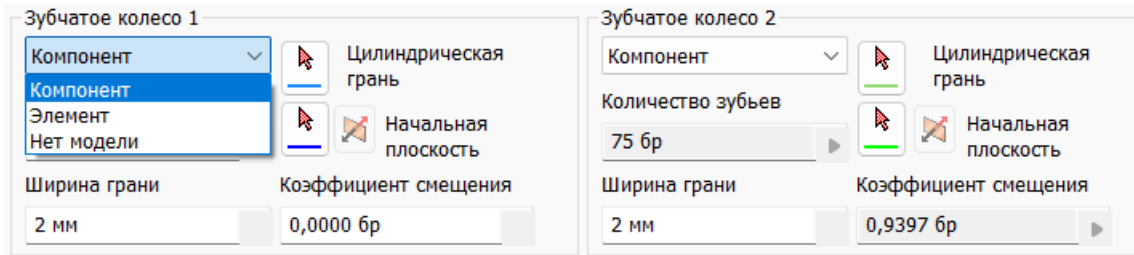


Рис. 1.4. Фрагмент вікна для вибору типу побудови твердотільної тривимірної моделі зубчастого зачеплення для кожного з двох елементів (колесо 1 та колесо 2)

Також, якщо після проектування зубчастого зачеплення (зубчатої пари) виникає необхідність приховати чи видалити одне з зубчатих коліс, то це можна зробити через дерево моделі, натиснувши праву кнопку миші на відповідне зубчате колесо, в контекстному меню обрати пункт **«видимість»**, якщо необхідно просто приховати елемент, при цьому це ніяким чином не вплине на функціонування моделі чи механізму в цілому. Якщо обрати пункт **«подавити»**, при цьому компонента як не буде видно, також він буде виключений з розрахунку та механізму в цілому. Якщо в моделі присутні взаємозв'язки між компонентами, то це може суттєво вплинути на роботу механізму в цілому. Ще можна обрати пункт **«прозорий»**, що дасть змогу частково приховати компонент та бачити лише видимі контури компонента (рис. 1.5).

Після вибору типу побудови твердотільної тривимірної моделі зубчастого зачеплення необхідно ще задати товщину кожного з елементів зубчастого зачеплення прописавши з клавіатури необхідну товщину в вікні «ширина грани» (рис. 1.4). По завершенні введення всіх параметрів та способів побудови, необхідно натиснути на кнопки **«розрахувати»** та **«Ок»**, після чого в робочому полі з'явиться зубчасте зачеплення чи його елемент.

Також, під час введення параметрів є змога переглядати усі параметри та кінематику зубчастого зачеплення та керувати цими параметрами. Для цього необхідно натиснути ну кнопку **«Перегляд...»** (рис. 1.2). Відкриється вікно перегляду параметрів зубчастого зачеплення (рис. 1.6) де можна буде переглянути проміжні розрахунки та кінематику зубчастого зачеплення.

Якщо виникне необхідність в редагуванні параметрів зубчастого зачеплення, то необхідно натиснути праву кнопку миші в дереві моделі на саме зубчасте зачеплення та обрати з контекстного меню пункт **«редагувати за допомогою майстра проектування»**.

Але поки що виконана лише візуалізація зубчастого зачеплення. Для того щоб виконати остаточний розрахунок, необхідно визначитися з призначенням та умовами роботи зубчастого зачеплення та провести розрахунок на міцність. Для цього необхідно натиснути на вкладення **«Розрахунок»** у вікні **«Генератора компонентів циліндричного зубчастого зачеплення»** де від-

криється вікно розрахунку на міцність (рис. 1.7). Вхідні дані згідно варіанту наведені в Додатку А таблиці А.2.

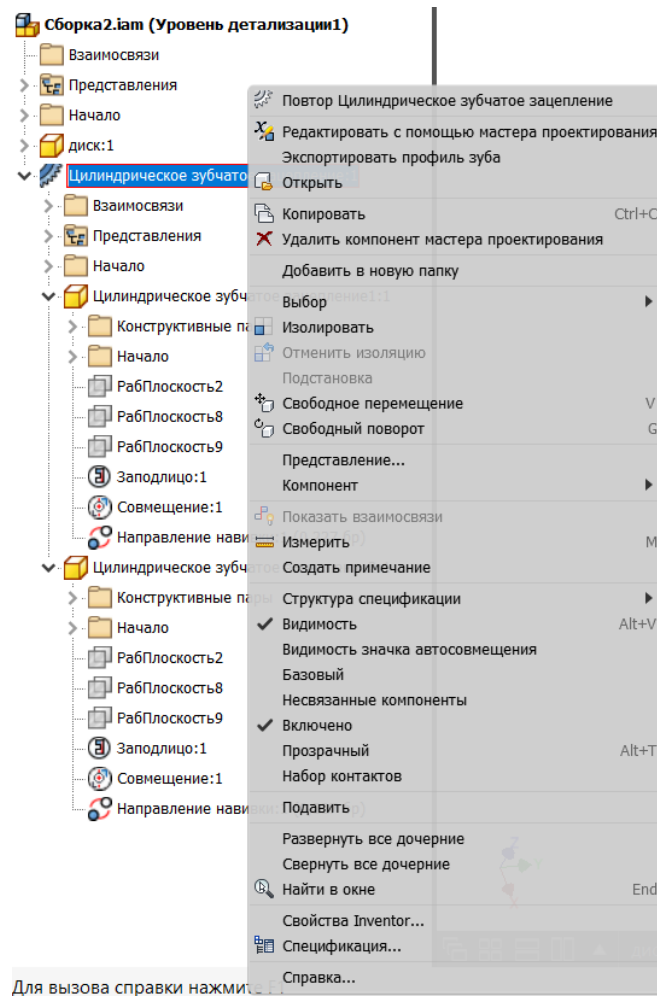


Рис. 1.5. Контекстне меню одного з елементів дерева моделі

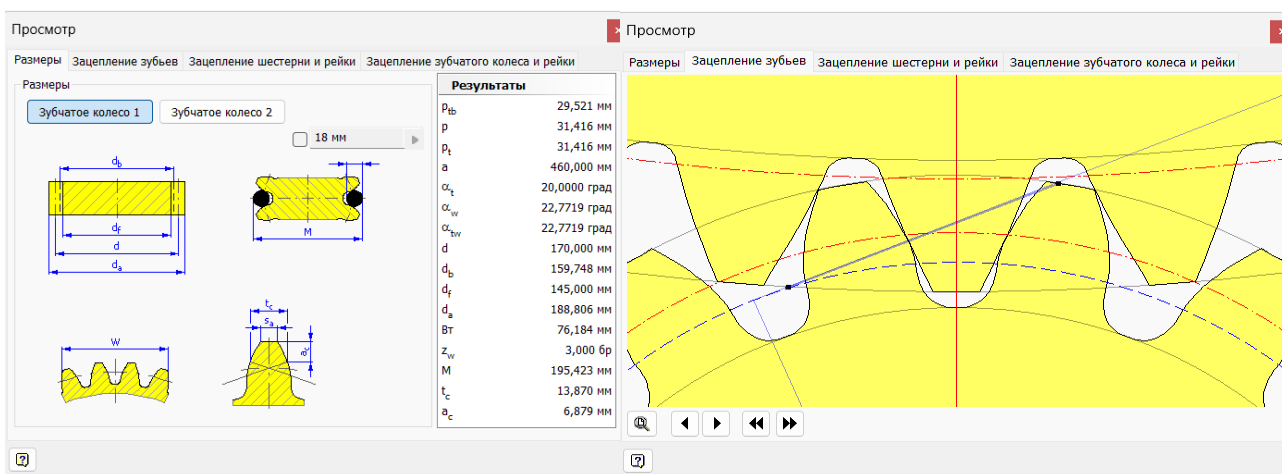


Рис. 1.6. Вікно перегляду параметрів зубчатого зацеплення

На першому етапі розрахунку необхідно визначитися з методом розрахунку на міцність, який визначається відповідними стандартами. Стандартні методи розрахунків приведені на рис. 1.8. Метод розрахунку обирається на основі того які параметри зубчастого зачеплення необхідно контролювати, а також на основі того які параметри матеріалу нам відомі.

Генератор компонентов цилиндрического зубчатого зацепления

Метод расчета прочности: ISO 6336:1996

Нагрузка

	Зубчатое колесо 1	Зубчатое колесо 2
Мощность	P 350 кВт	343,000 кВт
Скорость	n 2000 об_мин	453,33 об_мин
Крутящий момент	T 1671,127 Н м	7225,166 Н м
КПД	η 0,980 бр	

Характеристики материалов

Зубчатое колесо 1 ☒ Углеродистая сталь

Зубчатое колесо 2 ☒ Углеродистая сталь

	Зубчатое колесо 1	Зубчатое колесо 2
Предел усталости при изгибе	σ_{Flim} 316,0 МПа	316,0 МПа
Предел контактной усталости	σ_{Hlim} 1140,0 МПа	1140,0 МПа
Модуль упругости	E 206000 МПа	206000 МПа
Коэффициент Пуассона	μ 0,300 бр	0,300 бр
Термообработка	2 бр	2 бр

Требуемый срок службы L_h 20000 ч

Кoeffициенты Точность

Тип расчета нагрузки: ☒ Мощность, скорость --> момент

Тип расчета прочности: Проверочный расчет

Предельные значения

	При контакте	При изгибе
Минимальный коэффициент запаса прочности	1,200 бр	1,300 бр

Результаты

F_t	19291,266 Н
F_r	8098,156 Н
F_a	0,000 Н
F_n	20922,072 Н
v	17,802 м_с
n_{E1}	7973,939 об_мин
Зубчатое колесо 1	
S_H	0,243 бр
S_F	0,084 бр
S_{Hst}	0,182 бр
S_{Fst}	0,193 бр
Зубчатое колесо 2	
S_H	0,296 бр
S_F	0,099 бр
S_{Hst}	0,222 бр
S_{Fst}	0,220 бр

Рассчитать OK Отмена

Рис. 1.7. Вікно розрахунку на міцність зубчатого зачеплення

В даній роботі рекомендується обрати метод розрахунку на основі стандарту ISO 6336:1996, де буде виконуватися контроль наступних параметрів (блок справа «Результати» (рис. 1.7)):

- сили, Н: колова F_t , радіальна F_r , осьова F_a ;
- цикл навантаження F_n , Н;
- колова швидкість v , м/с;
- резонансна частота обертання n_{E1} , хв^{-1} ;

- запас міцності, бр^1 : по корозії S_H , на злам зуба S_F , при контакті S_{Hst} , при згині S_{Fst} .

При виборі одного з інакших доступних методів розрахунку міцності зубчатого зачеплення (ANSI/AGMA 2001-D04:2005, Bach, Merrit, DIN 3990:1998, CSN 01 4686:1988) буде змога контролювати інші параметри.

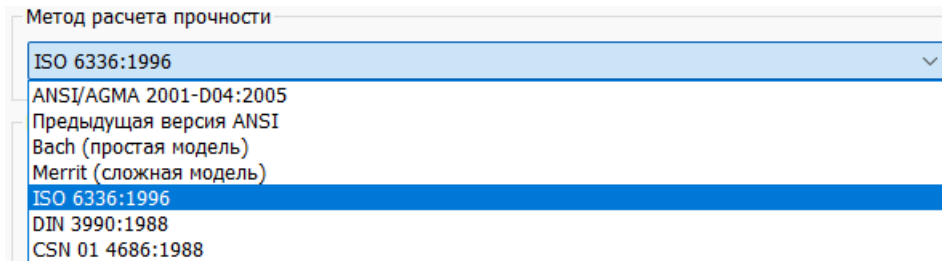


Рис. 1.8. Доступні методи розрахунку зубчатих коліс на міцність в Autodesk Inventor

Наступним кроком слід визначитися з тяговими характеристиками тягового редуктора та задати їх в полі «**Навантаження**». Такими основними характеристиками (параметрами) є:

- потужність P , кВт;
- швидкість обертання n , хв^{-1} ;
- крутний момент T , Н·м;
- ККД η .

Слід зазначити, що вводити параметри можна лише в поля які підсвічені білим кольором, поля які підсвічені сірим кольором розраховуються автоматично на основі попередніх даних. Тому, необхідно лише вказати тягові характеристики зубчастого колеса 1, характеристики зубчастого колеса 2 розраховуються автоматично. «**Тип розрахунку навантаження**» дозволяє проводити розрахунок лише по двох з трьох основних параметрів, третій розраховується на основі трьох попередніх. В Autodesk Inventor є три «**Типи розрахунку навантаження**» зубчатого зачеплення (Додаток А.2):

- «**Потужність, швидкість**», момент невідомий;
- «**Момент, швидкість**», потужність невідома;
- «**Потужність, момент**», швидкість обертання невідома.

За наявності тягових параметрів редуктора рекомендується обирати «**Тип розрахунку навантаження**» «**Потужність, швидкість**», та натисну кнопку «**Розрахувати**». Проте можна обирати і інший тип розрахунку навантаження при відомих інших параметрах, адже ці параметри взаємопов'язані та виражаються одні з одних.

¹ «бр» – безрозмірна одиниця виміру запасу міцності під час аналізу за методом кінцевих елементів

Якщо в полі «Результати» з'являться параметри підсвічені червоним кольором, то це свідчить про те, що одна з умов міцності чи довговічності роботи не виконується. Тому слід переглянути вхідні дані для розрахунку редуктора чи матеріал та повторити розрахунок повторно.

1.2. Порядок виконання роботи та вимоги формування звіту

1. Згідно варіанту обрати параметри тягового редуктора та зазначити їх в звіті про виконану роботу.

2. Виконати розрахунок та проєктування зубчастого вінця тягового редуктора локомотива згідно з вищезазначеною методикою. Привести короткий поетапний опис виконання роботи з додаванням скріншотів результатів розрахунків та загального вигляду моделі тягового редуктора (рис.1.9).

3. Зробити необхідні висновки про працездатність та ресурс спроектованого редуктора та за необхідності вказати способи покращення довговічності даного редуктора.

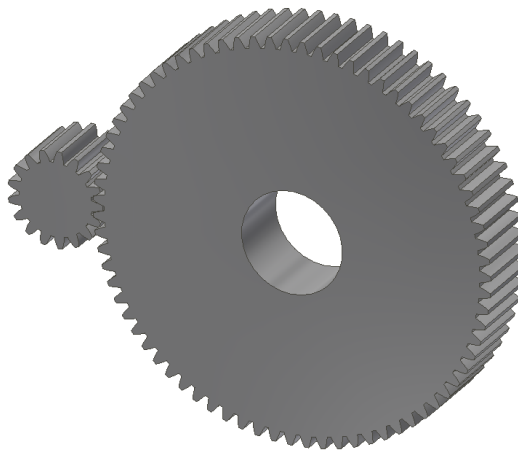


Рис. 1.9. Зубчатий вінець тягового редуктора тепловоза

Контрольні запитання та завдання

1. Які тягові редуктори використовують на локомотивах?
2. Які параметри необхідні для початкового проєктування зубчастого зачеплення?
3. Яким чином визначається передаточне відношення тягового редуктора?
4. Визначення модулю зубчастого зачеплення.
5. Визначення міжосьової відстані зубчастого зачеплення.
6. Типи моделей розрахунку зубчастого зачеплення в Autodesk Inventor.
7. Стандартні методи розрахунку на міцність в Autodesk Inventor.

2. РОЗРАХУНОК ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ НА МІЦНІСТЬ

Проектування та конструювання машин нерозривно пов'язані з розрахунками, за допомогою яких встановлюються технічні характеристики, кінематичні параметри, розміри деталей навантаження, запас міцності та довговічність для всіх умов експлуатації і для всіх навантажень. Розрахунки вказують шлях, за яким треба рухатися в напрямі отримання найоптимальнішого технічного результату.

У проектуванні використовують такі види розрахунків:

- *геометричний* – розрахунок геометричної прохідності та геометричної взаємодії компонентів, координат, зазорів;
- *кінематичний* – розрахунок переміщень, швидкостей, прискорень, передавальних чисел кінематичних ланок;
- *динамічний* – розрахунок навантажень деталей машин та їхніх змін у часі;
- *розрахунки на міцність та жорсткість* – визначення напружень та деформацій деталей машини при навантаженнях у робочих режимах;
- *енергетичні* – розрахунки затрат енергії, параметрів енергетичного балансу;
- *техніко-економічні* – розрахунки продуктивності, вартості, ефективності використання.

Розрахунки на міцність та жорсткість залежно від їх місця в усьому процесі проектування і конструювання поділяють на проектні та перевірочні.

Проектні розрахунки використовують для визначення вихідних розмірів деталей чи їхніх елементів, до того ж ці розрахунки в більшості випадків виконують за спрощеними методиками. Розміри, отримані в проектному розрахунку – це основа для вибору форми деталі та її конструктивних елементів і подальшої ув'язки з іншими деталями в конкретному вузлі машини. Інколи доцільно вибирати конструктивну форму і розміри деяких деталей машин, керуючись досвідом проектної роботи, рекомендаціями стандартів або беручи до уваги відомі аналоги елементів машини, що пройшли перевірку в експлуатації.

Перевірочні розрахунки є обов'язковими і найбільш точними. Вони виконуються за потрібними критеріями працездатності на кінцевих етапах проектування і конструювання для всіх відповідальних деталей машин. Якщо форма і розміри деталі не відповідають критеріям міцності чи жорсткості, то змінюють її розміри, конструкцію чи матеріал і повторюють розрахунок. Для деталей високого ступеня відповідальності або деталей складної форми з точно не встановленим характером навантаження доцільно проводити експериментальну перевірку розрахунків.

2.1. Послідовність проектування осі колісної пари

Виконання твердотільної моделі осі колісної пари в Autodesk Inventor можливо двома способами:

- за допомогою стандартних операцій тривимірного моделювання на основі плоских елементарних ескізів;
- за допомогою вбудованої бібліотеки побудови валів, оскільки вісь колісної пари являється насамперед валом.

Побудова за допомогою стандартних елементарних операцій тривимірного моделювання. Даний метод чітко представлений в лекційному та практичному матеріалах. До переваг даного методу можна віднести конструювання валів будь-якої складності та конфігурації. До недоліків – велика кількість додаткових операцій пов'язаних з побудовою елементарних ескізів.

Побудова за допомогою вбудованої бібліотеки побудови валів. До переваг даного методу можна віднести швидкість побудови та відсутність плоских ескізів на кожному з етапів. До недоліків – неможливість побудови валів складної конфігурації. Як вихід, для проектування валів складної конфігурації рекомендовано поєднувати ці два методи: за допомогою бібліотек та за допомогою ескізів.

Оскільки вісь колісної пари можна віднести до простих багатоступеневих валів, тому при виконанні роботи рекомендується для проектування осі колісної пари використовувати метод за допомогою вбудованих бібліотек. Слід зазначити, в Autodesk Inventor бібліотеки стандартних конструкторських елементів доступні лише в режимі «Збирання».

2.2. Побудова та розрахунок осі колісної пари за допомогою вбудованої бібліотеки побудови валів

Для побудови осі колісної пари локомотива необхідно створити та зберегти файл типу «Збірка». Далі виконати операції за наступним шляхом: «Проектування – Вал» (рис. 2.1), після чого відкриється вікно автоматичного проектування валів (рис. 2.2).

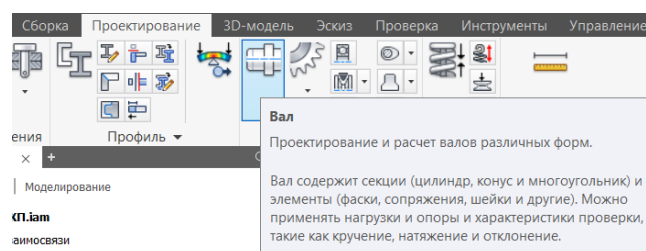


Рис. 2.1. Фрагмент вікна бібліотек Autodesk Inventor

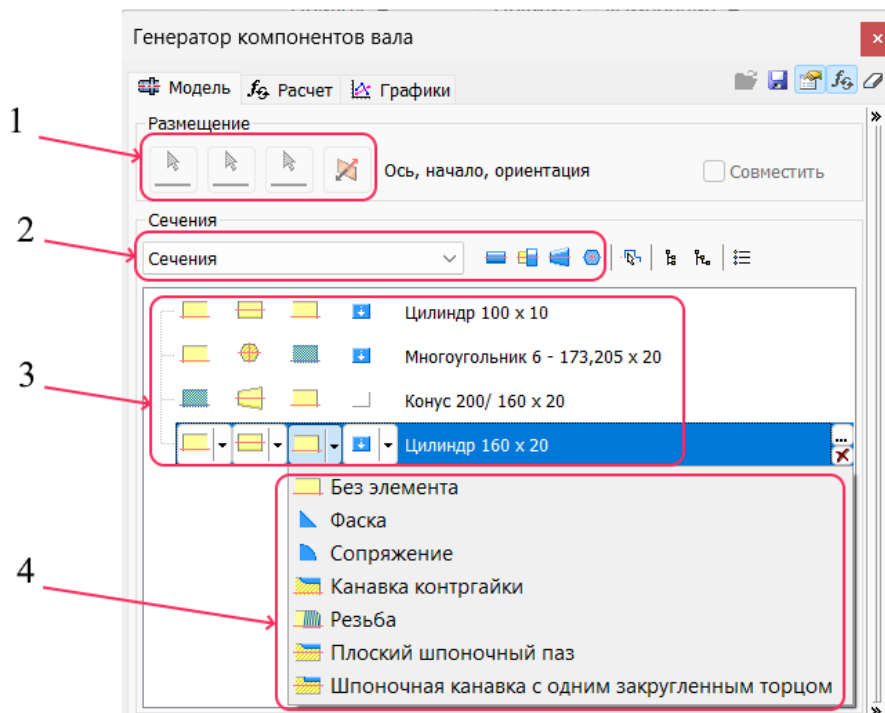


Рис. 2.2. Загальний вигляд вікна «Генератора компонентів валів»

«Генератор компонентів вала» має три вкладення:

- «Модель» – виконується проектування компонентів валу;
- «Розрахунок» – задаються умови для розрахунку валу такі як опори та навантаження;
- «Графіки» – виводяться результати розрахунків у вигляді числових значень та епюр.

Побудову валу можна виконувати на основі вже існуючої деталі або як самостійну деталь. Якщо виконувати побудову на основі існуючої деталі, то необхідно обрати розміщення початку валу на деталі, за допомогою інструментів позначених цифрою 1 (рис. 2.2). Якщо ж вал виконується як самостійна деталь, то інструментарій 1 можна не використовувати, що і пропонується в даній розрахунково-графічній роботі. Тому необхідно перейти до кроку 2 – «Перетини». Є чотири типи «Перетини» (ступенів валу):

- «циліндр» – для побудови циліндричного ступеня валу, параметри що задаються: діаметр та довжина ступені валу;
- «розділення» – це той же самий «циліндр» з тими ж параметрами, але без фізичного контакту ступенів валу;
- «конус» – для побудови конусних ступенів валу, параметри що задаються: діаметр 1, діаметр 2 та довжина ступені валу;
- «багатокутник» – для побудови ступенів валу n -кутного січення, параметри що задаються: діаметр вписаного або описаного кола, довжина, кількість кутів січення та кут повороту ступені валу.

Відображаються параметри ступенів валу в частині вікна 3 (рис. 2.2) з можливістю їх редагування як геометричних розмірів так і конфігурації валу.

В даній частині вікна кожна ступінь валу відображається в новій стрічці, яка в свою чергу поділена на чотири елементи:

- початок валу (фаска, галтель, канавка, різьба, шпонковий паз);
- середина валу (циліндр, конус, багатокутник);
- кінець валу (фаска, галтель, канавка, різьба, шпонковий паз);
- додавання елементів таких як шпонковий паз, проточка під ключ, поперечний отвір, канавка.

Як відомо, для зменшення концентрації напружень в багатоступінчатих валах необхідно в місцях стикування ступенів валу виконувати перехідні ділянки такі як фаски чи галтелі.

Кожна ступінь валу відображається в головну вікні в тривимірному вигляді. По завершенні проєктування валу (осі колісної пари) згідно варіанту необхідно натиснути кнопку «**Ок**» або перейти до наступного вкладення «**Розрахунок**», де виконати розрахунок валу на міцність.

У вкладенні «**Розрахунок**» (рис. 2.3) для виконання розрахунку на міцність необхідно для валу задати наступні параметри:

- матеріал, обирається згідно варіанту;
- опори (фіксована та переміщенням);
- навантаження (радіальна та осьова сили, розподілене навантаження, згинальний та крутний моменти).

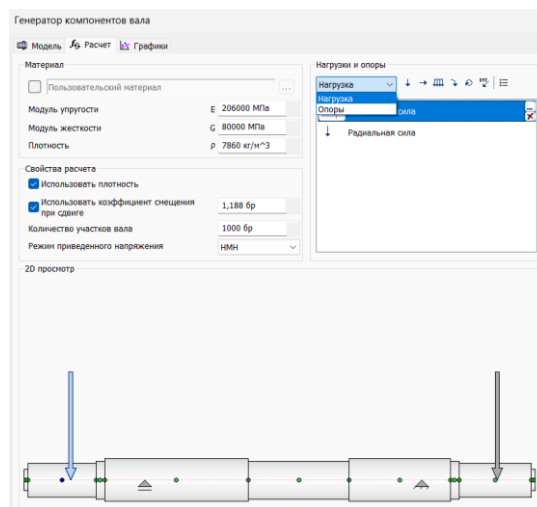


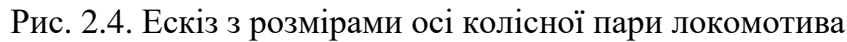
Рис. 2.3. Вікно з параметрами розрахунку валу

Методи розрахунку міцності осі базуються та теоретичних засадах опору матеріалів та будівельної механіки, а розрахункові формули на співвідношенні сил і моментів, що діють на вісь з її деформаціями та напруженнями в перерізах з урахуванням необхідних запасів міцності.

Існує два основні типи розрахунку осі колісної пари на міцність:

- на статичну міцність;
- на втомну міцність (динамічний розрахунок).

Побудова тривимірної моделі осі колінної пари виконується на основі ескізу (рис. 2.4)



Щоб відкрити даний модуль необхідно відкрити вкладення **«Середовища»** та обрати кнопку **«Почати аналіз напружень»**, попередньо спроектувавши твердотільну модель осі колісної пари за допомогою одного з описаних методів (побудова за допомогою стандартних елементарних операцій тривимірного моделювання, побудова за допомогою вбудованої бібліотеки побудови валів.) Відкриється вікно аналізу напружень. Даний метод, на відміну від методу розрахунку напружень через **«Генератор компоненти валу»**, виконується методом кінцевих елементів. Перевага методу кінцевих елементів – розрахунок на міцність на ЕОМ тіла будь-якої конфігурації (обмежується лише продуктивністю ЕОМ). Недоліки методу – складність правильної побудови сітки, час розрахунку та відносна енергоємність.

- матеріал;
- опори (защемлення, опора, ідеальна опора);
- навантаження (сила, тиск, зусилля в опорі, момент, навантаження на тіло, питоме навантаження, сила тяжіння);
- контакти (задаються лише коли є декілька деталей, щоб вказати яким чином взаємодіють компоненти. Контакти можна створювати як в автомати-

чному режимі, коли невелика кількість компонентів та контакти є очевидними, або в ручному режимі, коли велика кількість компонентів). Слід зазначити, що при автоматичному створенні контактів, необхідно перевірити їх правильність, адже машинна розстановка контактів не завжди може бути вірною. Види контактів представлені на рис. 2.5. Оскільки «вісь колісної пари» являється єдиним компонентом, то в застосуванні контактів немає необхідності.

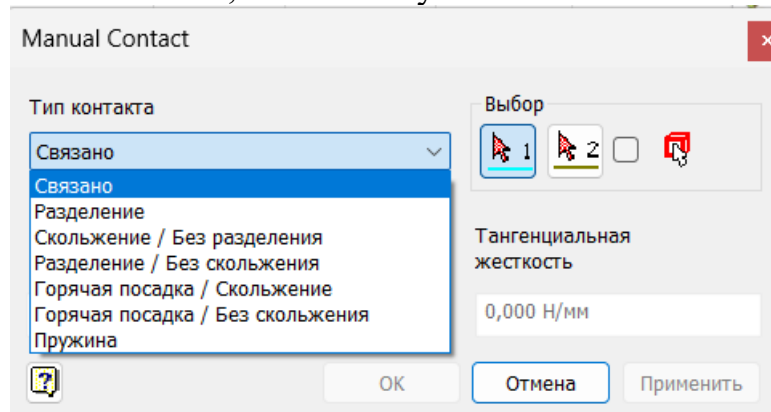


Рис. 2.5. Види контактів

Всі ці параметри моделювання можна призначити як в дереві моделювання (рис. 2.6.) (натиснувши праву кнопку миші) так і панелі інструментів.

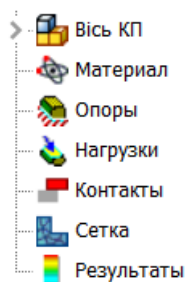


Рис. 2.6. Параметри моделювання

Матеріал. Для розрахунку на міцність необхідно першим кроком задати матеріал деталі, адже від матеріалу залежить надійна робота як деталі так і механізму в цілому. Autodesk Inventor дозволяє розрахувати механізми, де кожна деталь з іншого матеріалу. Що ж стосується осі, то вона виготовляється з осової сталі ОсЛ методом кування.

Опори. Вісь колісної пари слід розглядати як статично визначувану балку з двома опорами, одна – нерухомий шарнір (**опора**), інша – рухомий шарнір (**ідеальна опора**), як показано на рис. 2.3. Опори імітують зв'язок колісної пари з рейками.

Навантаження. Колісна пара локомотива сприймає велику кількість динамічних знакозмінних навантажень, тому від надійності колісної пари на-

самперед залежить безпека руху. На колісну пару діють наступні види навантажень:

- сила ваги локомотива (діє на буксові шийки);
- сила ваги від тягового двигуна підвішеного на вісь (діє на шийки моторно-осьових підшипників);
- вібрації та ударні навантаження зі сторони колії (передаються на маточинну частину);
- крутний момент від тягового двигуна (діє в місці тягового редуктора).

В даній роботі проводимо розрахунок лише на статичну міцність, тому будемо враховувати лише навантаження які діють на локомотив в статичному стані, а саме, навантаження від сили ваги та тягового електродвигуна. Величини прикладених сил вказані в Додатку Б, таблиці Б.1 та Б.2 згідно варіанту, а місця їх прикладення показані на схема на рис. 2.3.

В місці дії сил прикладаємо **«сили»** заданих величин.

Сітка. При розв'язку задач на міцність з використанням ЕОМ методом кінцевих елементів правильно побудована сітка необхідна для отримання достовірних результатів. Аналіз кінцевих елементів забезпечує надійний чисельний метод аналізу проєктних розробок. Процес починається із створення геометричної моделі. Потім програма ділить модель на невеликі частини простої форми (елементи), з'єднані у загальних точках (вузлах). Програми аналізу кінцевих елементів розглядають модель як мережу дискретних пов'язаних між собою елементів.

Створення сітки – дуже важливий етап у аналізі конструкцій. Автоматичний генератор сітки у програмі створює сітку на основі глобального розміру елемента, допуску та характеристик локального керування сіткою. Керування сіткою дозволяє встановити різні розміри елемента для компонентів, граней, кромки і вершин.

Програма визначає розмір елемента для моделі, враховуючи її об'єм, площу поверхні та інші геометричні характеристики. Розмір створюваної сітки (кількість вузлів та елементів) залежить від геометрії та розмірів моделі, допуску сітки, параметрів керування сіткою та характеристик контакту. На ранніх стадіях аналізу конструкцій, де можуть підійти приблизні результати, можна встановити більший розмір елемента для більш швидкого рішення. Для більш точного рішення може знадобитися менший розмір елемента. Але чим дрібніший розмір сітки, тим триваліший процес розрахунку та більше навантажується процесор комп'ютера.

Щоб створити сітку в Autodesk Inventor в автоматичному режимі необхідно натиснути кнопку **«Вид сітки»** на панелі інструментів або праву кнопку миші в дереві моделі на елемент **«сітка – вид сітки»**. Для того щоб налаштувати параметри сітки ручному режимі необхідно натиснути кнопку **«Налаштування сітки»** на панелі інструментів або праву кнопку миші в дереві моделі на елемент **«сітка - налаштування сітки»**. Рекомендований розмір сітки для осі колісної пари не біль 0,1 мм. Якщо в якійсь частині деталі необхід-

но побудували дрібнішу сітку для підвищення точності розрахунків, то необхідно натисну кнопку «**Елемент управління локальною сіткою**». Загальний вигляд сітки осі колісної пари показаний на рис. 2.7.

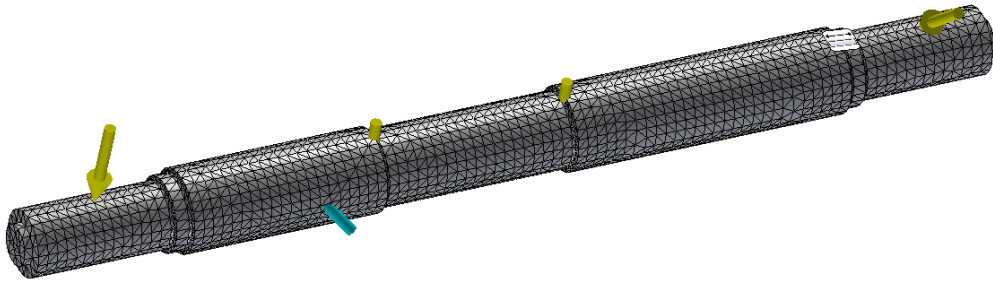


Рис. 2.7. Вигляд сітки кінцевих елементів на осі колісної пари

Результати. Необхідно переконатися що всі вхідні розрахункові параметри задано вірно та натиснути на кнопку «**Розрахунок**» на панелі інструментів. Розрахунок може тривати певний проміжок часу, все залежить від складності моделі, розміру сітки та потужності ЕОМ. В результаті розрахунку отримаємо ряд результатів в різних площинках та по різних осях:

- напруження;
- зміщення;
- деформація.

Для того щоб активувати той чи інший результат розрахунку, необхідно в дереві моделі обрати необхідний результат, натиснувши праву кнопку миші – активувати його. З’явиться візуальна епюра потрібного нам результату. Приклад епюри показаний на рис. 2.8.

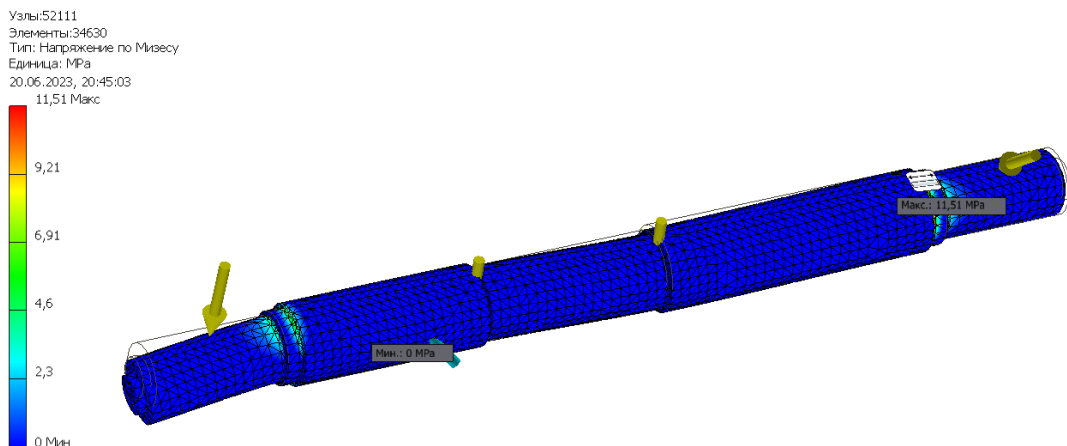


Рис. 2.8. Епюра напружень осі колісної пари з масштабною деформацією

На панелі інструментів на вкладенні «**Відображення**», можна змінити кольорову гаму епюри, масштаб деформації, відобразити мінімальні і максимальні значення епюри, встановити «датчики» – точки в якій потрібно контро-

лювати параметр. Натиснувши на кнопку «Звіт» можна сформувати повний звіт статичного аналізу в форматі html.

2.4. Порядок виконання роботи та вимоги формування звіту

1. Згідно варіанту обрати навантаження що діє на вісь колісної пари та зазначити їх в звіті про виконану роботу.

2. Виконати розрахунок та проєктування осі колісної пари локомотива згідно з вищезазначеними методиками. Привести короткий поетапний опис виконання роботи з додаванням скріншотів результатів розрахунків та загального вигляду моделі осі колісної пари, сітки кінцевих елементів та епюри навантаження.

3. Зробити необхідні висновки про працездатність та міцність осі колісної пари, за необхідності вказали способи зміцнення осі.

Контрольні запитання та завдання

1. Види розрахунків у проєктуванні.
2. Види розрахунків на міцність та жорсткість.
3. Способи виконання твердотільної моделі осі колісної пари в Autodesk Inventor.
4. Типи перетинів в Autodesk Inventor.
5. Вихідні параметри розрахунку на міцність вала.
6. Типи розрахунку осі колісної пари на міцність.
7. Навантаження, що діють на колісну пару.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Боднар Б. Є., Нєчаєв Є. Г., Бобирь Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Допоміжні системи та устаткування : підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / за ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. Дніпропетровськ : ПП Ліра ЛТД, 2010. 369 с.
2. Боднар Б. Є., Нєчаєв Є. Г., Бобирь Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина : підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / за ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. Дніпропетровськ : ПП Ліра ЛТД, 2009. 284 с.
3. Боднар Б. Є., Нєчаєв Є. Г., Бобирь Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування : підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / за ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. Дніпропетровськ : ПП Ліра ЛТД, 2010. 358 с.
4. САПР в локомотивному господарстві : метод. вказівки до виконання лабораторних та практичних робіт. Для студ. денної та безвідривної форм навчання спеціальності «Локомотиви та локомотивне господарство». Ч. II / уклад.: О. Б. Очкасов, Р. О. Коренюк, Д. В. Черняєв ; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. 23 с.
5. САПР у локомотивному господарстві : методичні вказівки до виконання лабор. робіт. Для студ. денної та заоч. форм навч. спец. «Рухомий склад та спец. техніка залізнич. трансп.» / уклад.: О. Б. Очкасов, Д. В. Бобирь, Р. О. Коренюк, А. П. Шепотенко ; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. 29 с.

Основні параметри зубчатого зачеплення тягового редуктора локомотивів

Параметр редуктора	Варіант (передостання цифра індивідуального шифру)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	серія локомотива									
	тепловози							електровози		
	ТЕП60	ТЕП70	М62	2ТЕ10В	2ТЕ116	2ТЕ121	ТЕМ2	ВЛ11	ВЛ80	ВЛ60
Кількість зубів:										
– ведучого колеса	31	25	17	17	17	22	15	23	21	30
– веденого колеса	72	78	75	75	75	95	75	88	88	82
Дільний діаметр, мм										
– ведучого колеса	310	–	170	170	–	–	–	–	–	–
– веденого колеса	720		750	750						
Ширина зуба, мм	140	130	–	–	–	–	–	–	–	–
Повна висота зуба, мм	22,34	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Передаточне відношення	2,323	3,12	4,41	4,41	4,41	4,32	4,53	–	–	3,73
Модуль зачеплення				10	10	10	10	10	10	10
Міжосьова відстань		520	468,8		468,8	595	468,8	617,5	604	618,6
Матеріал										
– ведучого колеса	12ХН3А	12Х2Н4А	12ХН3А	12ХН3А	12ХН3А	12ХН3А	12Х2Н4А	20ХН3А	20ХН3А	20ХН3А
– веденого колеса	45ХН	12Х2Н4А	453ХН	45ХН	45ХН	45ХН	12Х2Н4А	сталь 55	сталь 55	сталь 55
Кут зуба (для косозубого)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	24° 37'12''	24° 37'12''	24° 37'12''

Примітка: якщо відсутній один або декілька параметрів зубчатого зачеплення, то необхідно їх розрахувати за вище вказаною методикою по розрахунку основних параметрів зубчатого зачеплення чи підібрати самостійно таким чином щоб виконувалася умова міцності зубчатого зачеплення, обрані параметри обґрунтувати у висновку

Параметри тягової передачі

Параметр	Варіант (остання цифра індивідуального шифру)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Потужність, кВт	–	300	350	–	270	330	–	370	260	–
Частота обертання (ведуча шестерня), хв^{-1}	2000	–	1800	1500	–	2200	1950	–	2500	2300
Крутий момент (ведуча шестерня), Н·м	1500	2000	–	1900	2400	–	2800	2050	–	2100

Примітка: відсутній параметр розраховується автоматично попередньо обравши відповідний «Тип розрахунку навантаження»

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1

Навантаження на вісь колісної пари

Назва параметру	Величина параметру									
Навантаження на одну буксову шийку, кН	Варіант (передостання цифра індивідуального шифру)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	98	100	120	110	99	102	105	107	103	97
Навантаження на шийки моторно-осьових підшипників, кН	Варіант (остання цифра індивідуального шифру)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	20	15	25	18	23	21	20,5	18,5	17	24

Таблиця Б.2

Завдання для розрахунку осі колісної пари локомотива

Епюри	Варіант (передостання цифра індивідуального шифру)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напруження, МПа	+			+			+			+
Переміщення, мм		+			+			+		
Деформація, бр			+			+			+	

Навчально-методичне видання

Очкасов Олександр Борисович,
Бобирь Дмитро Валерійович,
Десяк Андрій Євгенійович

САПР В ЛОКОМОТИВНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Навчально-методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи

Електронне видання

Експертний висновок склав канд. техн. наук Володимир Сердюк

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 659 від 09. 10 .2023)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка А. Є. Десяк

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 1,68. Обл.-вид. арк. 1,05.
Зам. № 98

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010