Лабораторна робота
Надлишковість зв'язків (спряжень) при динамічному дослідженні механізмів

Мета роботи: *засвоєння знань та навичок формування мінімальної, але достатньої з точки зору степенів свободи спряжень в SolidWorks Motion для одержання адекватних результатів динамічного дослідження механізмів.*

Порядок виконання:

1. Ознайомитися з наступними теоретичними відомостями:
1.1. степені свободи твердого тіла;
1.2. кількість обмежень, які накладаються різними спряженнями та примітиви спряжень;
1.3. кінематичні та динамічні механізми.
2. Дослідити вплив спряжень на обмеження степенів рухомості на прикладі повзункового механізму.
3. Дослідити вплив надлишковості зв'язків на достовірність результатів дослідження на прикладні шарнірного механізму кріплення дверей.
4. Ознайомитися з теоретичними відомостями про податливі втулки між рухомими з'єднаннями.
5. Узагальнення способів усунення надлишковості зв'язків на прикладі гідравлічного піднімаючого пристрою.

1. КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1. Степені свободи твердого тіла

У механіці, **степені свободи** - це сукупність незалежних координат переміщення та/або обертання, повністю визначає положення системи або тіла (а разом з їх похідними по часі - відповідними швидкостями - повністю визначає стан механічної системи або тіла - тобто їх положення і рух).

Іншими словами: тверде тіло (наприклад, в декартовій системі координат) може рухатись вздовж 3-х осей і може здійснювати обертання навколо 3-х осей системи координат, як це схематично показано на рис.1.

Таким чином тверде тіло може мати 6 степенів вільності (свободи).

В *SolidWorks Motion* за допомогою спряжень, двигунів, чи контактів обмежується певна кількість (від 1-го до всіх 6-ти) степенів свободи.

© О.Л. Мельник

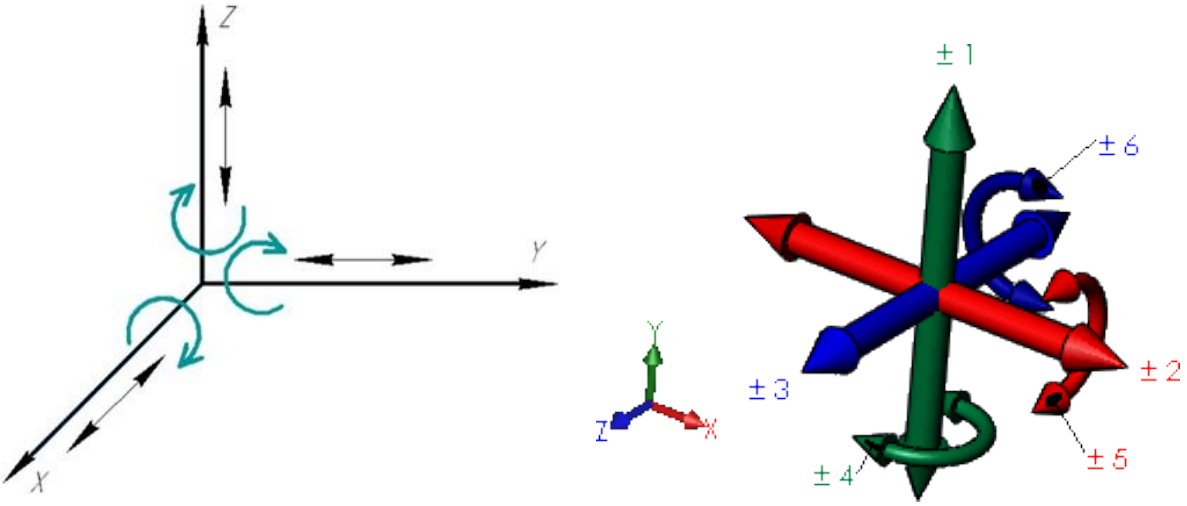


Рис.1.

Спряження створюють геометричні взаємозв'язки між компонентами збірки. **При додаванні спряжень слід визначити допустимі напрямки лінійного або обертального руху компонентів**.

1.2. Кількість обмежень, які накладаються різними спряженнями та примітиви спряжень.

При додаванні обмеження, наприклад, спряження **концентричності**, між двома жорсткими тілами,ви видаляєте степені свободи, що існують між тілами. Два тіла стають обмеженими, розташованими по відношенню один до одного незалежно від наявності руху або дії сили в механізмі. Можна використовувати спряження для обмеження руху шляхом видалення ступенів свободи.

В таблиці 1 показано скільки степенів свободи «видаляє» те, чи інше спряження

Таблиця 1.

Обмеження «видалення» степенів свободи деякими спряженнями

Тип спряження	**Видалення переміщення вздовж осей**	**Видалення обертання навколо осей**	**Загальна «видалена» кількість степенів свободи**
Механічне спряження **Шарнир**	3	2	5
Механічне спряження **Универсальный шарнир**	3	1	4
Механічне спряження **Гвинт**	2	2	4

© О.Л. Мельник

Стандартне спряження **Концентричность** (для 2-х циліндрів)	2	2	4
Стандартне спряження **Концентричность** (для 2-х сфер)	3	0	3
Стандартне спряження **Совпадение** (для 2-х точок)	3	0	3 (таке спряження ідентично спів падінню 2-х сфер)
Стандартне спряження **Заблокировать**	3	3	6

Часто для уникнення пере визначеності (**redundancies constrain**) обмежень потрібно використовувати спряження об'єктів (точок, ліній, площин, тощо) які не існують в реальних механізмах, але повністю адекватно визначають взаємні рухи спряжених деталей. Такі спряження називаються **примітивами спряжень**. Деякі з них наведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Обмеження «видалення» степенів свободи деякими спряженнями

Тип спряження	**Видалення переміщення вздовж осей**	**Видалення обертання навколо осей**	**Загальна «видалена» кількість степенів свободи**
Совпадение (точка на осі)	2	0	2
Параллельность (2 площини)	0	2	2
Параллельность (2 осі)	0	2	0
Параллельность (вісь і площина)	2	2	4
Перпендикулярность (2 осі)	0	1	1
Перпендикулярность (2 площини)	0	1	1
Перпендикулярность (вісь до площини)	0	2	2

Звичайно, в таблицях 1 та 2 вказані найбільш широко використовувані випадки, а список спряжень і примітивів спряжень за тим же принципом можна продовжувати.

Підстановка примітивів спряжень - це процес, який виконується вручну і вимагає ретельного вивчення необхідного руху. Необхідно поставити

© О.Л. Мельник

належну орієнтацію примітивів спряжень, щоб оптимізувати скорочення обмежень.

1.3. Кінематичні та динамічні механізми.

Судячи з числа ступенів свободи, механічні системи розділити на дві категорії:

1. **Кінематичні системи**.
2. **Динамічні системи**.

Для **кінематичних систем** шляхом накладання обмежень (спряження і двигуни) обмежує всі степенів свободи в механізмі, що дозволяє в будь-який час визначати положення, швидкість і прискорення кожної частини системи.

Для аналізу руху не потрібно інерційно-масові характеристики.

Такі системи чи механізми називають системами з нульовим степенем свободи.. Наприклад, розглянемо гвинтовий домкрат (рив. рис. 2.).

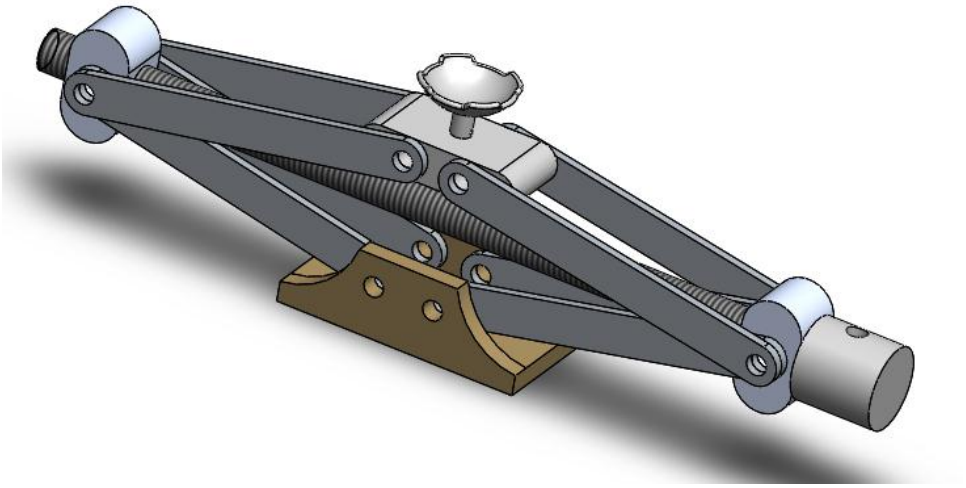


Рис.2. Гвинтовий домкрат

Рух домкрата завжди буде однаковим незалежно від маси його ланок або зовнішнього навантаження. При зміні зовнішнього навантаження (наприклад, маси автомобіля, котрий піднімається) буде змінюватися споживана потужність приводу обертання гвинта і тільки.

Для **динамічних систем** результати дослідження руху будуть залежати від інерційно-масових характеристик та прикладених сил. Такі механічні системи мають не нульову степінь свободи.

2. Дослідити вплив спряжень на обмеження степенів рухомості на прикладі повзункового механізму.

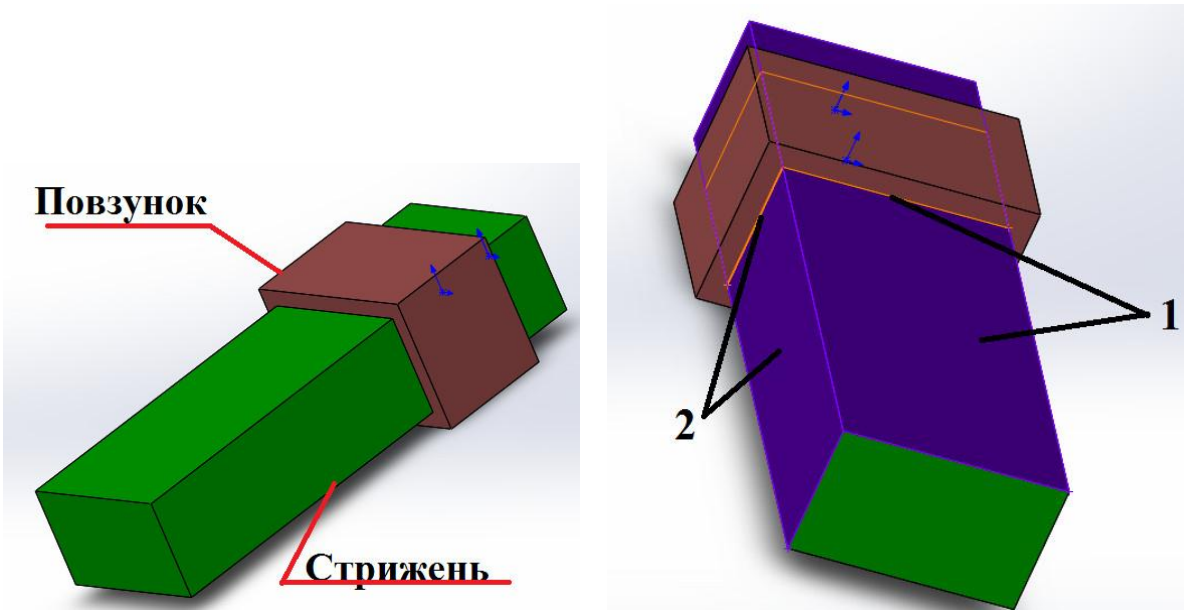
Для дослідження впливу спряження на обмеження степенів свободи створимо з’єднання повзунка з квадратним стрижнем за допомогою створення пари спряжень **Совпадение** для площин, кожне з яких буде посилатися на одну з двох перпендикулярних граней стрижня. Такі спряження представляють собою повторювані обмеження, так як обидва унеможливлюють обертанню навколо осі стержня.

© О.Л. Мельник

Збірка з повзунком і квадратним стрижнем показана на рис.3.

2.1. **Відкрити папку з деталями** (папку отримати у викладача). Відкрити деталі (розпізнавання деталей не виконувати).

2.2. **Створення нового документу – збірки.**



а б

Рис.3. Збірка з повзунком і квадратним стрижнем

2.3. Додавання компонентів збірки.

Першим додати **Вал**. Використати команди **Сборка-Вставить компоненты** у відкритому вікні **FeatureManager Деталь/Сборка для вставки** обрати **Стрижень.**

Потім аналогічним шляхом додати деталь **Втулка**.

2.4. Формування спряжень збірки.

Використати по черзі спряження «**Совпадение**» для горизонтальних, а також вертикальних площин деталей як це показано на рис.3,б. В графічній області натисніть на площину 1 повзунка (Грань<1>@вал-1), в панелі **FeatureManager** застосувати команду **Сопряжение**, з'явиться спливаюча панель інструментів **Сопряжение**. У вікні **PropertyManager** в розділі **Выбор сопряжений** вказати площину 1 (Грань<1>@вал-1) та площину 1 деталі **Втулка** (Грань<2>@втулка-1) , у вікні **PropertyManager** в розділі **Выбор сопряжений** вісі перераховані в списку **Объекты для сопряжения**.

У спливаючій панелі інструментів **Сопряжение**:

- Натисніть кнопку **Совпадение** як тип спряження.
- Виберіть **Добавить/завершить сопряжение**.

З'явиться спряження "**Совпадение**" в розділі **Сопряжение** в вікні **PropertyManager** (див. рис.4,а).

Аналогічно п.2.4 виконати спряження **Совпадение** між вертикальними площинами (див. рис. 4,б). За допомогою команд **Переместить компонент** і

© О.Л. Мельник

Вращать компонент спробуйтее зміщувати деталь Втулка для оцінки її рухомості.

2.5. Підключення SolidWorks Motion.

- У розділі **Інструменти**, надбудови, переконайтеся, що підключено **SolidWorks Motion**.

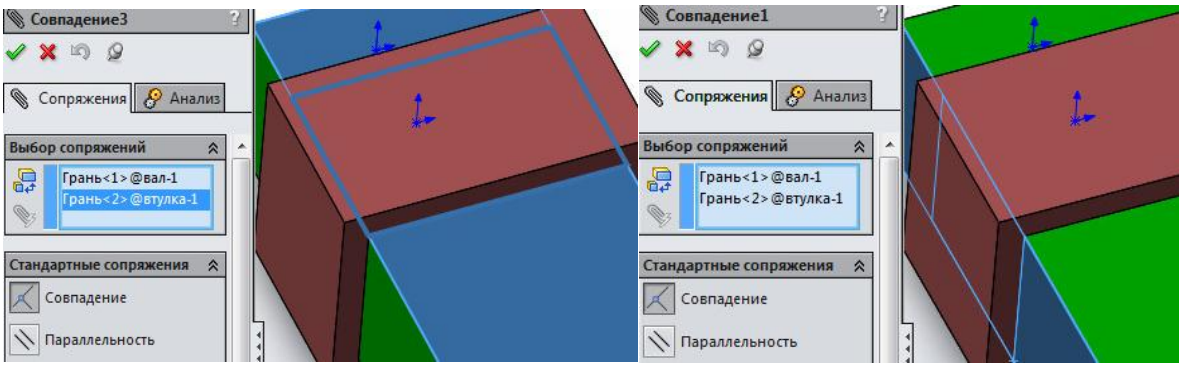
2.6 Вибір одиниць вимірювання.

- Виберіть **Інструменти**, **Параметри**, **Властивості документа**.

- Виберіть **MMGS** (мм, грам, секунда) для збірки кулачкового механізму. Це дозволить встановити одиниці вимірювання довжини в міліметрах і силу в ньютонах.

2.7. Створення дослідження руху.

Натисніть на вкладку **Motion Study (Анимация)**, яке з'являється в нижньому лівому кутку вікна. Якщо ця вкладка не відображається, виберіть **Motion Manager** в меню **Вид**.



а б

Рис.4. Спряження **Совпадение**

2.8. Тип дослідження.

Переконайтеся, що тип аналізу – **Аналіз руху**. Час дослідження – 1 секунда. Всі інші опції за про мовчанням.

- Натисніть **Расчитать** на панелі інструментів **Motion Manager.**

2.9. В панелі **Motion Manager** натиснути правою кнопкою миші на пункт **Группа Сопряжений1 (**див. рис. 5.**) і брати Степени Свободы.** З’явиться вікно степенів свободи, як показано на рис.6

Як виходить з рис.6 загальне число степенів свободи даної (**DOF-Degree of freedom**) збірки дорівнює нулю (чисто арифметично).

На рис. 1 вказано, що кількість обмежень, котрі повторюються, дорівнює 1. Зокрема це обертання навколо осі **Y**.

Зверніть увагу! В **Группа Сопряжений1** в дужках вказано, що є 1 повторюване обмеження (рис.5).

© О.Л. Мельник

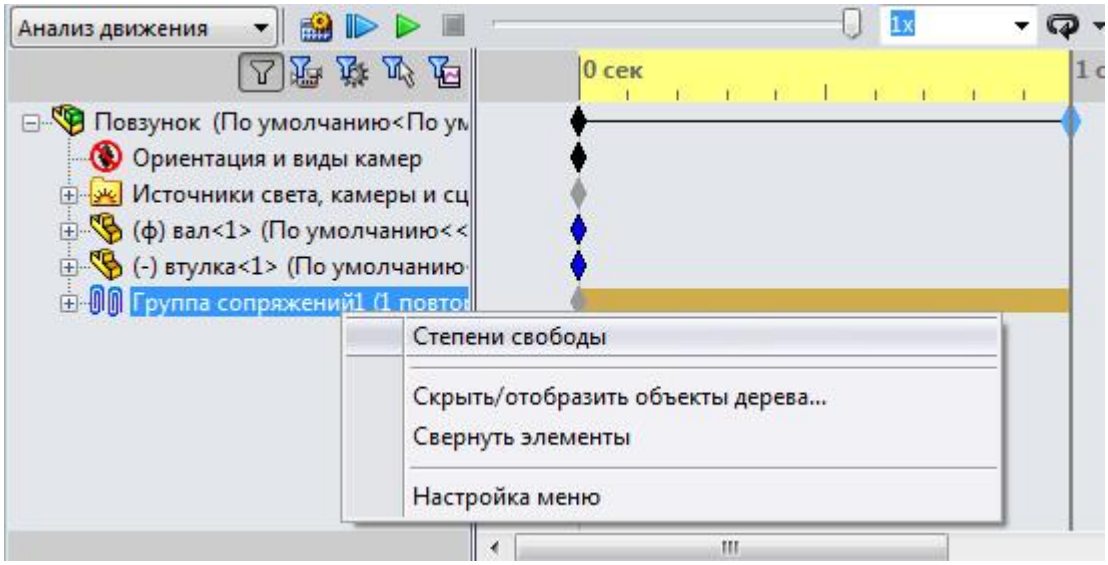


Рис.5.

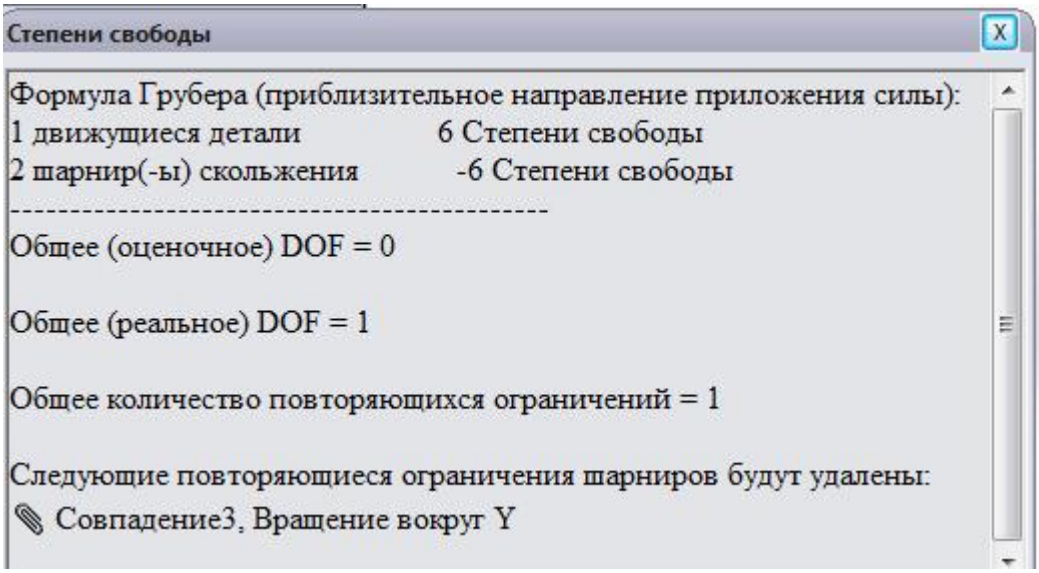


Рис.6.

Для досліджень **Motion Analysis** наявність повторюваних спряжень еквівалентно перевизначенню моделі **SolidWorks**. Тому **SolidWorks** автоматично видаляє повторювальне обмеження.

Взагалі **SolidWorks** формує 6 алгебраїчних рівнянь, котрі відповідають 6-ти степеням свободи. Рівняння обмеження степенів свободи показані на рис. 7.

Сутність проблеми полягає в тому, що **SolidWorks** автоматично видаляє повторювальні обмеження, що алгебраїчно є правильно, але далеко не завжди правильно з точки зору функціонування механізмів та розподілу навантажень між ланками механізму. Приклад неадекватності розподілу навантаження при автоматичному видалені повторювальних обмежень буде розглянутий нижче.

© О.Л. Мельник

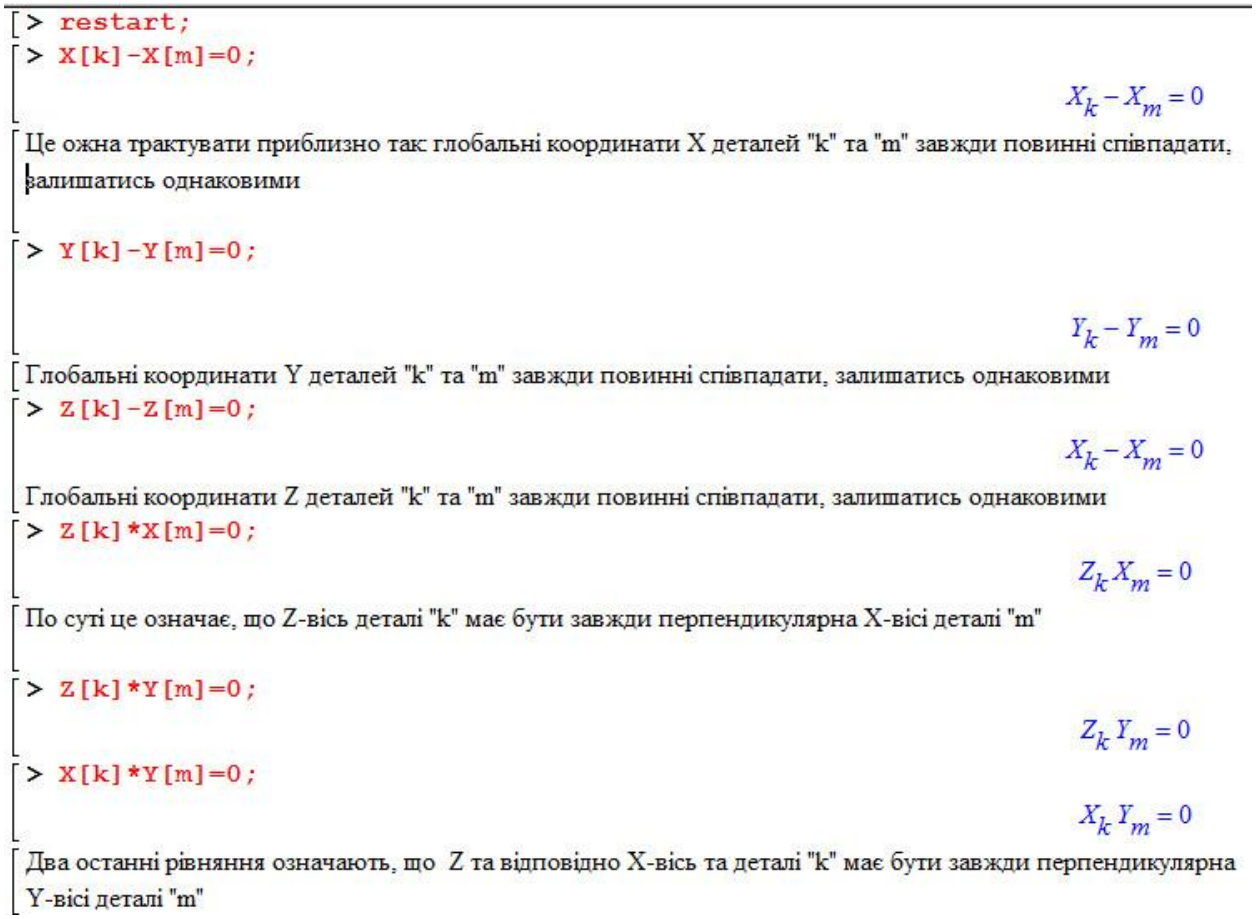


Рис.7. Системи алгебраїчних рівнянь в **SolidWorks** для визначення степенів рухомості

Один з варіантів уникнення утворення повторювальних обмежень і автоматичного їх видалення - використання примітивів спряжень. В даному випадку замінимо одне спряження **Совпадение** (2-х граней) спряженням **Совпадение** (лінії і грані), як це показано на рис. 8.

2.10. В панелі **Motion Manager** розкрити дерево **Группа Сопряжений1**, натиснути правою кнопкою миші на одному з 2-х спряжень і вибрати **Редактировать**. У вікні **PropertyManager** в розділі **Объекты для сопряжения** замінити Грань<2>@втулка-1 **на** Кромка<1>@втулка-1 **(**див. рис. 8.**).**

За допомогою команд **Переместить компонент** і **Вращать компонент** спробуйте зміщувати деталь Втулка для оцінки її рухомості.

Компонент **Втулка** може здійснювати тільки поступальний рух відносно вісі **Z**.

2.11. Повторити пункти 2.5-2.8.

В панелі **Motion Manager** натиснути правою кнопкою миші на пункт **Группа Сопряжений1 (**див. рис. 5.**) і брати Степени Свободы.** З'явиться вікно степенів свободи, як показано на рис.9

Як виходить з рис.9 загальне число степенів свободи даної (**DOF-Degree of freedom**) збірки дорівнює нулю (чисто арифметично).

© О.Л. Мельник

На рис. 1 вказано, що кількість обмежень, котрі повторюються, дорівнює 1. Зокрема це обертання навколо осі **Y.**

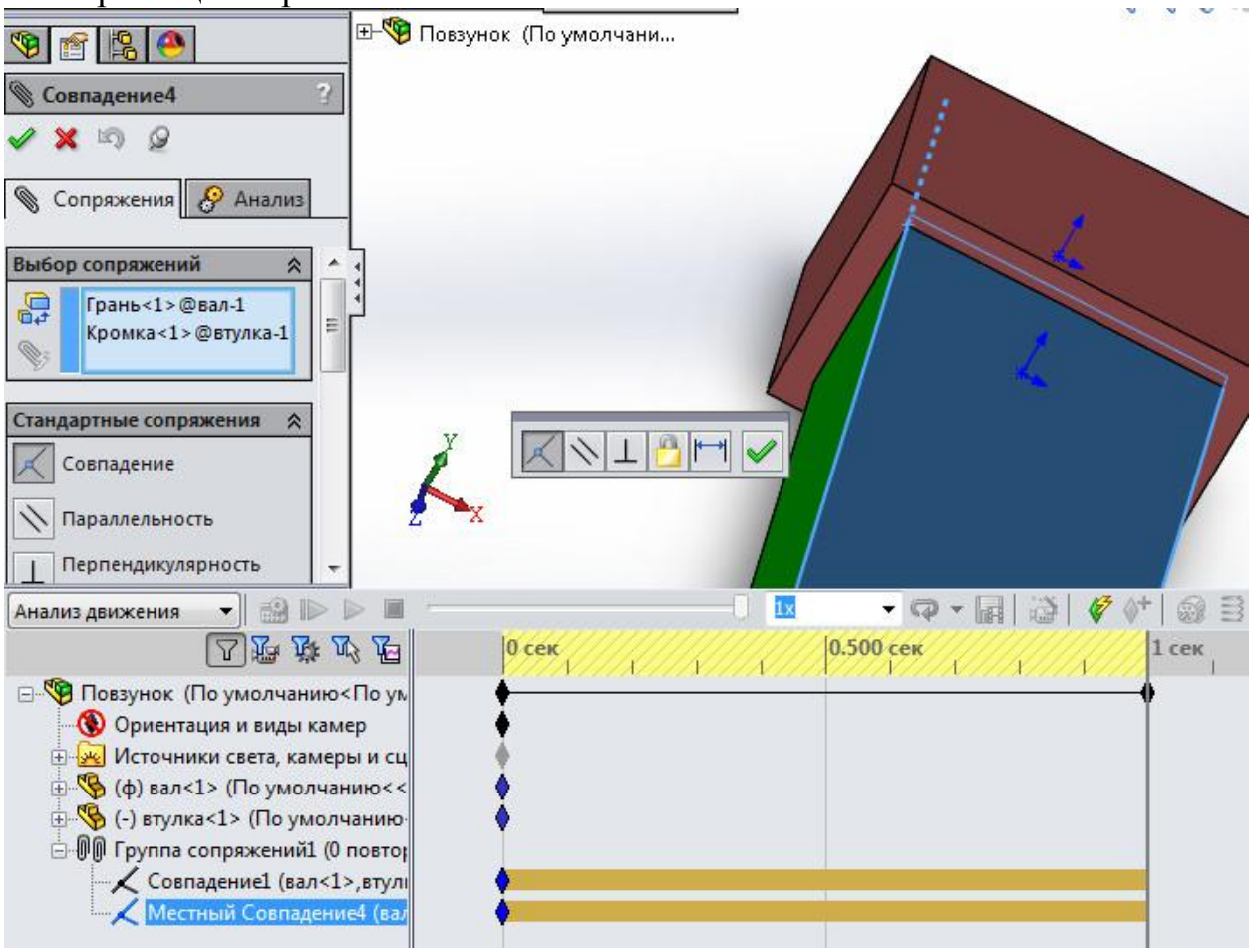


Рис.8. Редагування спряження.

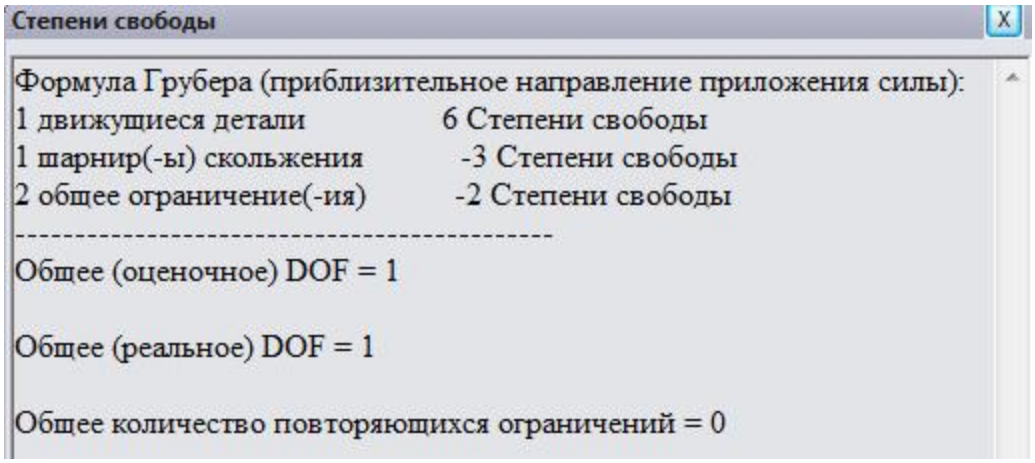


Рис.9. Обмеження в збірці з примітивом спряження

Тобто, система не має надлишкових обмежень, відтак **SolidWorks** автоматично не видаляє жодних обмежень і результати будь-яких динамічних досліджень будуть достовірними.

В цілому черговість видалення повторювальних обмежень в **SolidWorks** наступний:

© О.Л. Мельник

1. видалення обмежень обертання навколо осей
2. видалення обмежень поступального руху вдовж осей
3. видалення двигунів.

Тобто, спочатку програмний алгоритм **SolidWorks** намагається видалити надлишкові обмеження видаляючи обмеження обертання навколо осей, якщо цього недостатньо - видаляються обмеження поступального руху вдовж осей і т.д.

У випадку коли **SolidWorks** не зможе видалити надлишкові обмеження – симуляцію руху не відбудеться взагалі, з'явиться повідомлення про помилку.

Але, як вже зазначалося, використання примітивів спряжень це лише один з методів вирішення проблеми з надлишковістю зв'язків, котрий для великих збірок вимагає значних затрат часу для реалізації примітивів спряжень.

3. Дослідження впливу надлишковості зв'язків на достовірність результатів дослідження на прикладні шарнірного механізму кріплення дверей.

Для розуміння значення надлишковості зв'язків розглянемо приклад дверей з двома петлями (див. рис.10). Тільки одне з'єднання може обмежити вертикальне переміщення дверей. Інше спряження є повторюваним і створює надлишкові обмеження (**redundancies constrain**). Зверніть увагу на те, що компонент сили вертикального напрямку для другої петлі відсутня. Це можна побачити при створенні епюри сил.

3.1. **Відкрити папку з деталями** (папку отримати у викладача). Відкрити деталі (розпізнавання деталей не виконувати).

3.2. **Створення нового документу – збірки.**

Першим додати **Рамку дверей** (frame). Використати команди **Сборка-Вставить компоненты** у відкритому вікні **FeatureManager Деталь/Сборка для вставки** обрати frame**.** Повторити вищевказані дії для деталі **Двері (door).**

3.3. Формування спряжень збірки.

Використати по черзі механічного спряження «**Шарнир**» для компонентів петлі дверей, як це показано на рис.11.

Виконати команди **Сопряжения-Механические** сопряжения.

У вікні **PropertyManager** в розділі **Выбор сопряжений** в частині **Выбор концентричности** з графічної області обрати Грань<1>@door-1 та Грань<2>@frame-1; в частині **Выбор совпадения** з графічної області обрати Грань<3>@door-1 та Грань<4>@frame-1 як це показано на рис.11

Виберіть **Добавить/завершить сопряжение**.

Повторити дії п.3.3 для іншого шарніра (петлі дверей).

© О.Л. Мельник

Рис.10. Двері з шарнірними механізмами (петлями)

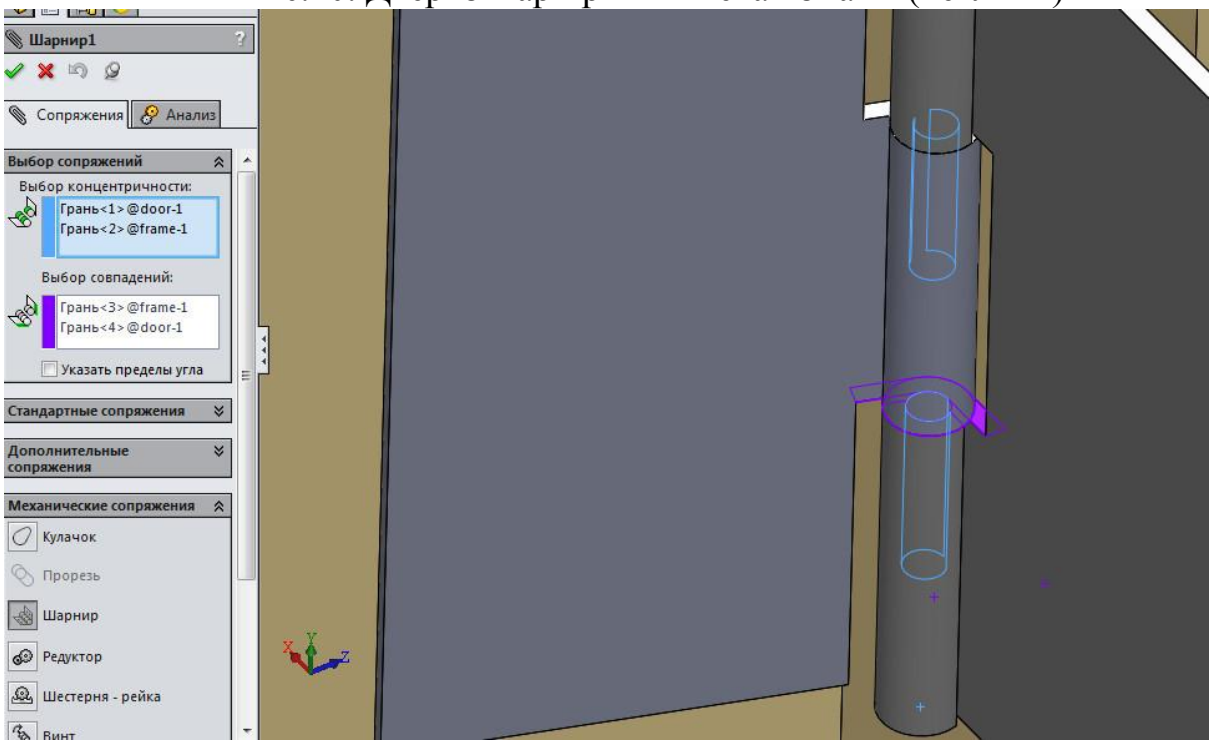


Рис. 11. Формування механічних спряжень

3.4. Вибір одиниць вимірювання.

© О.Л. Мельник

- Виберіть **Інструменти**, **Параметри**, **Властивості документа**.

- Виберіть **MMGS** (мм, грам, секунда) для збірки кулачкового механізму. Це дозволить встановити одиниці вимірювання довжини в міліметрах і силу в ньютонах.

3.5. Створення дослідження руху.

Натисніть на вкладку **Motion Study (Анимация)**, яке з'являється в нижньому лівому кутку вікна. Якщо ця вкладка не відображається, виберіть **Motion Manager** в меню **Вид**.

3.6. Тип дослідження.

Переконайтеся, що тип аналізу – **Аналіз руху**. Час дослідження – 1 секунда. Всі інші опції за про мовчанням.

На панелі панелі інструментів **Motion Manager** додати силу тяжіння до дослідження.

- Натисніть **Расчитать** на панелі інструментів **Motion Manager.**

3.7. Епюра сили протидії по осі Y.

1. Виберіть **Результати й епюри**/ (панель інструментів **Motion manager**).

Відобразиться вікно **Propertymanager** Результати.

2. У вікні **Propertymanager** Результати виберіть:

a. **Сили** для Категорія.

b. **Сила** противодействия для параметра **Подкатегория**.

c. **Y – состав ляющая** для **Результуючий компонент**.

3. Виберіть шарнірне спряження **Шарнир 1**:

a. Натисніть поле Вибір компонента/ (вікно **Propertymanager** Результати).

b. Виберіть **Шарнир 1**.

4. Натисніть ОК .

У графічній області відображається епюра, і папка **Результати** додається в дерево конструювання **Motionmanager**.

Повторіть дії п.3.7 тільки в полі Вибір компонента/ (вікно **Propertymanager** Результати) виберіть **Шарнир 2**.

У графічній області відображається епюра, і папка **Результати** додається в дерево конструювання **Motionmanager**.

Переглянути епюри сил протидії (див.рис.13 а,б). Як виходить з епюри 1 сила протидії по осі Y складає близько 275 Н. Відкриємо деталь **Двері** в новому вікні та визначимо масу дверей, використавши наступні команди: **Анализировать – Массовые характеристики**. Маса дверей становить близько 28 кг, що приводить до вертикальної сили протидії величиною 275 Н.

Але вертикальна складова сили протидії на епюрі 2 рівна нулю, що очевидно неправильно.

Така неадекватність результатів дослідження спричинена надлишковістю обмежень.

© О.Л. Мельник

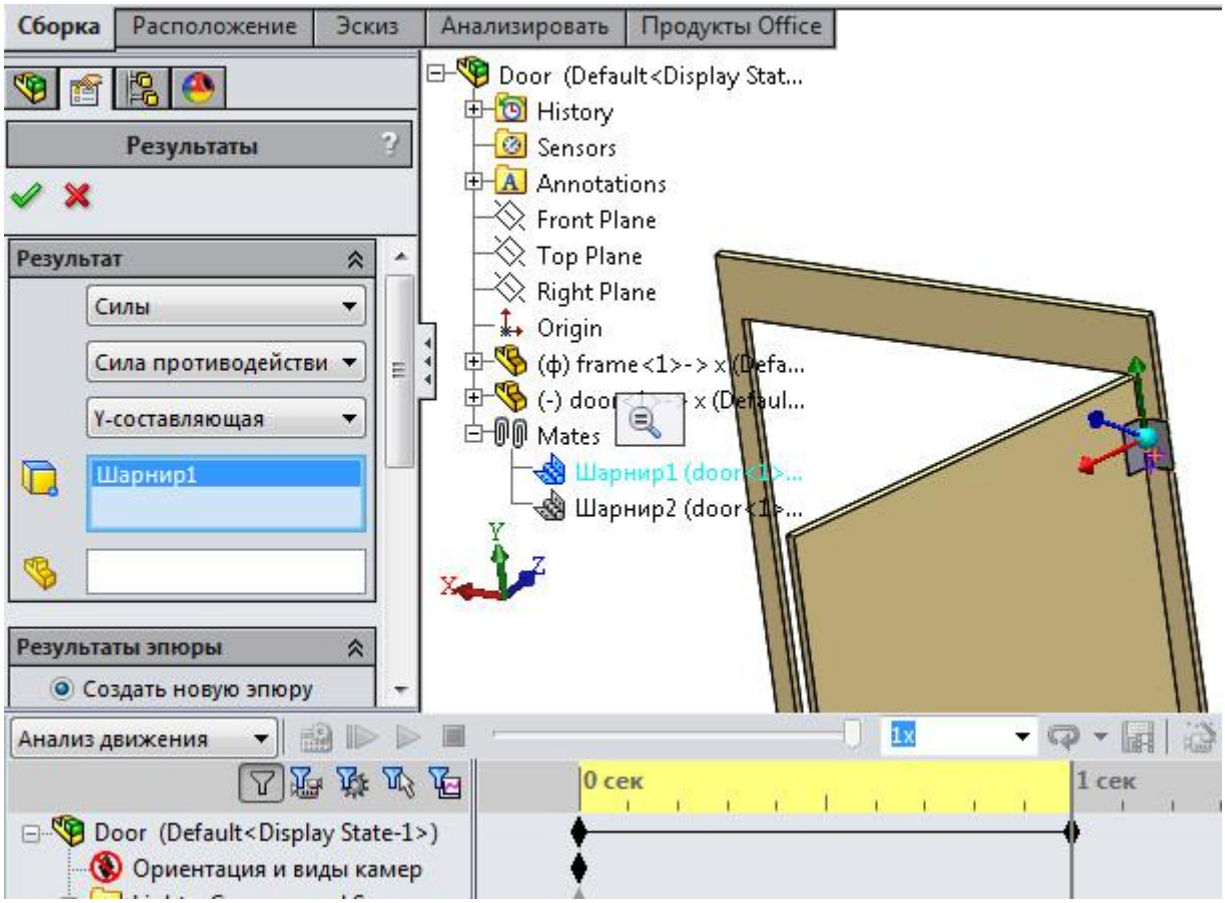
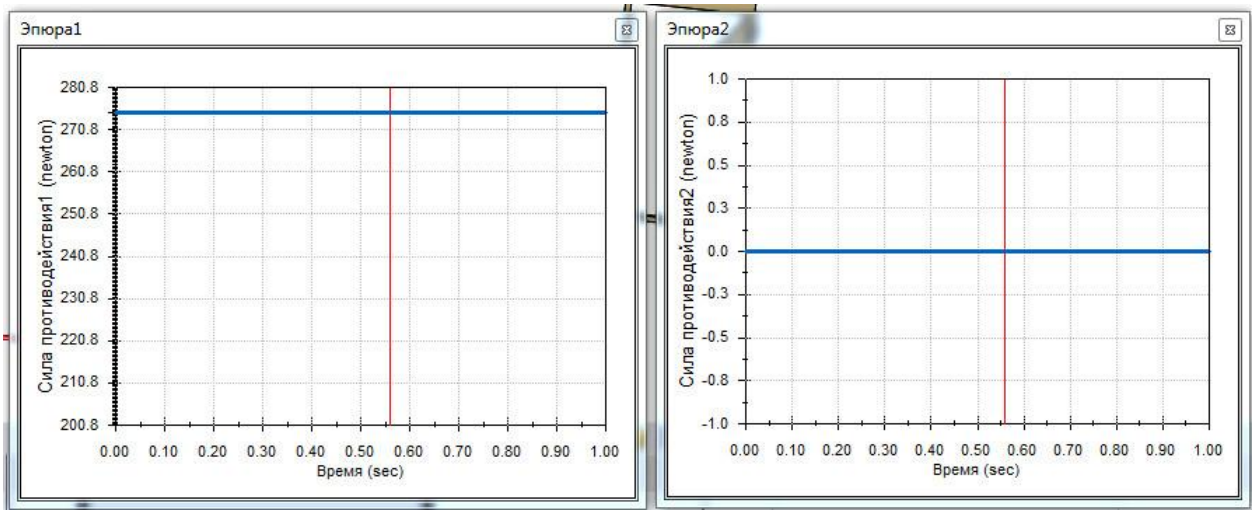


Рис. 12. Побудова епюри сили протидії



а б

Рис. 13. Епюри сил для 2-х шарнірів

3.7. Надлишкові обмеження.

В панелі **Motion Manager** натиснути правою кнопкою миші на пункт **Группа Сопряжений1 (**див. рис. 5.**) і обрати Степени Свободы.** З’явиться вікно степенів свободи, як показано на рис.14

© О.Л. Мельник

Як виходить з рис.14 загальне число степенів свободи даної (**DOF-Degree of freedom**) збірки дорівнює -4 (арифметично).

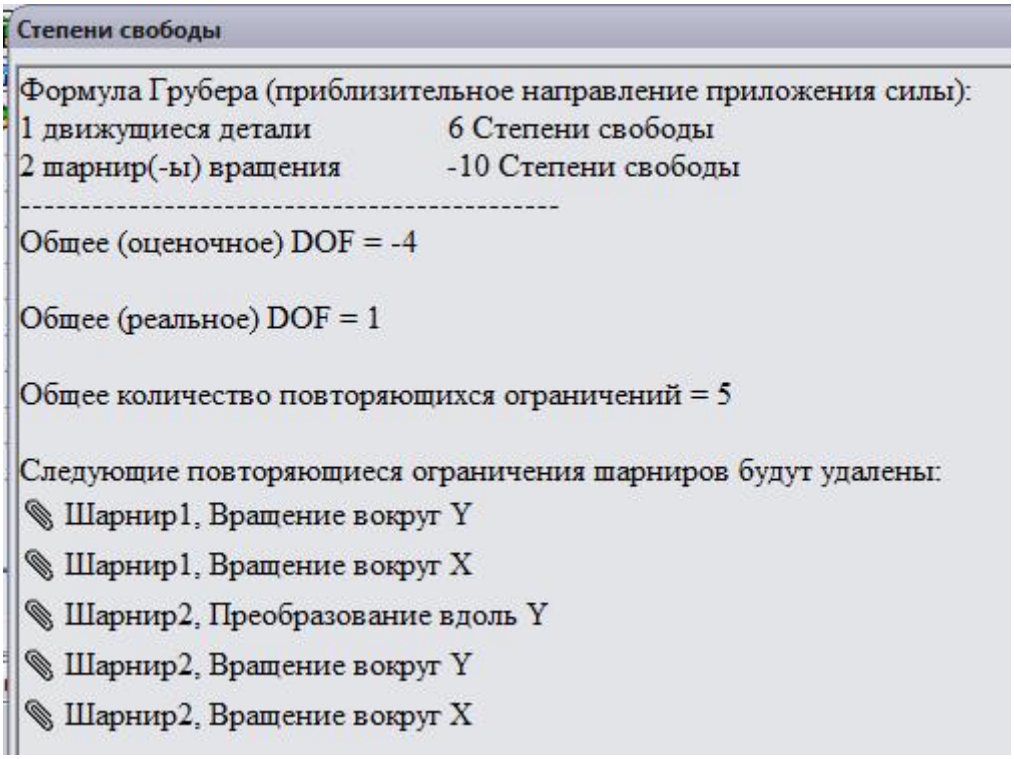


Рис.14. Степені свободи та надлишкові обмеження збірки

Як вже було сказано вище, будь-яке тверде тіло має 6 степенів свободи. Кожне механічне спряження Шарнир накладає 5 обмежень на степені свободи, тоді маємо по формулі Грубера 6-5*2= -4, тобто збірка взагалі не може здійснювати рухів з точки зору алгебраїчних рівнянь. Але по факту двері можуть обертатись в шарнірах, тому штучно додається +1 степінь свободи і в результаті маємо 5 обмежень, котрі повторюються (див. рис.14).

Причому одне з повторюваних обмежень, котре системою видалено автоматично – це «**Шарнир 2, Преобразование вдоль Y**».

Для даного випадку використаємо податливі втулки для компенсації надлишкових обмежень (це ще один з варіантів вирішення проблеми наряду з використаннями примітивів спряжень).

3.8. Включення податливих втулок в дослідження руху.

Натисніть **Свойства исследования движения** на панелі інструментів **Motion Manager**

Активуйте опцію **Заменить повторяющиеся ограничения втулками.** Всі інші опції залишити за про мовчанням.

Натисніть **Расчитать** на панелі інструментів **Motion Manager.**

Переглянути епюри сил протидії (див.рис.15 а,б). Як виходить з епюри 1 сила протидії по осі Y складає близько 135 Н. Тобто, з рис 15 виходить, що відбувся перерозподіл навантажень і імітаційна модель набагато точніше відображає реальний об’єкт.

© О.Л. Мельник

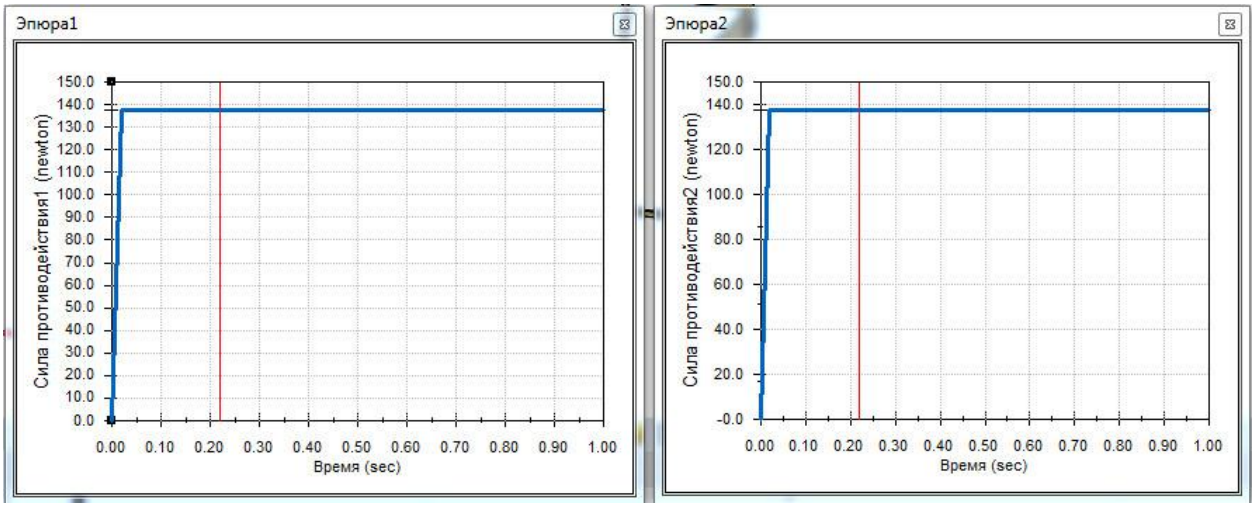


Рис.14. Вертикальна складова реакції в петлях

Біля спряжень в яких надлишкові обмеження замінені податливими втулками зявляється значок як це показано на рис.15.

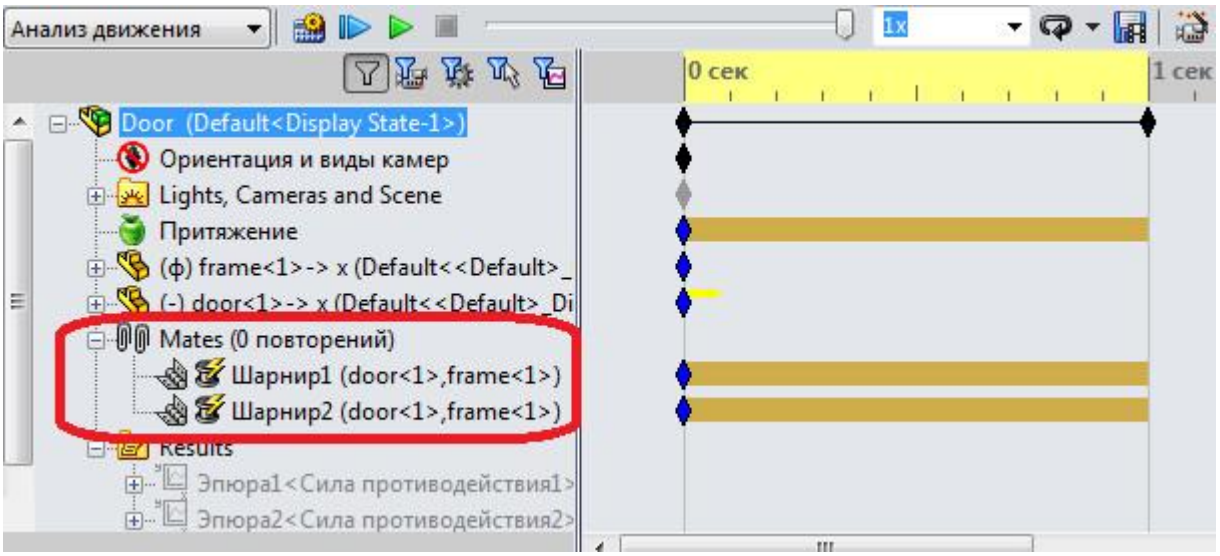


Рис.15.

4. Теоретичні відомості про податливі втулки між рухомими з’єднаннями.

Використання втулок в аналізі руху еквівалентно додаванню вільного спряження. Можна розглядати втулку в якості системи з пружини і демпфера, що містить невеликий нахил.

Вирішуюча (**solver**) програма **SolidWorks Motion** розглядає деталі як нескінченно жорсткі. Відповідно, ви можете визначити одне обмеження (спряженняя), що обмежує певну ступінь свободи деталі. У ситуаціях, коли більш ніж одне обмеження обмежує ступінь свободи, все додаткові обмеження є повторюваними.

© О.Л. Мельник

Можна використовувати втулки, замість спряжень, і встановити жорсткість для обмеження руху в напрямку певного степені свободи. Навантаження в кожній втулці є функцією значення жорсткості.

Використовуючи втулки для репрезентації спряжень і жорсткості деталей, можна зробити так, щоб Аналіз руху включив жорсткість в розрахунок руху. Чим точніше відома жорсткість, тим краще результат.

Використання втулок має певні особливості:

1. так як включення податливих втулок приводить до врахування динамічних ефектів, час розрахунку може суттєво зрости.

2. так як тіла в **Motion** нескінченно жорсткі, використання податливих втулок може змінити розподіл навантаження.

3. не завжди надлишкові обмеження можна замінити податливими втулками, особливо коли використовуються складні спряження (**advanced mates**).

4. при виходи динамічної системи з стану рівноваги можуть виникати пікові навантаження, даного явища можна уникнути плавністю початку руху системи чи механізму.

5. для більш точного аналізу потрібно для кожного з'єднання вводити індивідуальні параметри жорсткості і демпфування (розрахунок буде тим точніший чим відоміші дані параметри.)

5. Узагальнення способів усунення надлишковості зв'язків на прикладі гідравлічного піднімаючого пристрою

У рамках вправи ви вивчите чотири методи скорочення або виключення надлишкові спряження. Ці методи можна застосувати при проектуванні моделей для досліджень у рамках аналізу руху.

У рамках вправи реалізуються зазначені нижче методи.

1. Створення жорсткої групи для пропуску надлишкових спряжень при розрахунках руху
2. Заміна пар повторюваних спряжень, що утворюють шарнір у шарнірних спряженнях
3. Заміна надлишкових спряжень примітивами спряжень
4. Заміна спряжень втулками

Спочатку необхідно відкрити модель і дослідження руху.

1. Перейдіть *каталог_установки*\samples\tutorial\motionstudies\redundancies\Hydraulic Assembly.SLDASM).
2. Збережіть модель як My_Hydraulic Assembly.SLDASM:
   a. Виберіть **Файл** > **Сохранить как**.
   b. Виберіть **Включить все связаные компоненты**, а потім додайте префікс і введіть my_.

© О.Л. Мельник

с. У діалоговому вікні **Сохранить как** к уведіть My_Hydraulic Assembly.SLDASM і натисніть кнопку **Сохранить**.

3. Перейдіть на вкладку дослідження руху 1 (**Motion Manager**) у нижній частині графічної області й у поле Тип дослідження виберіть **Анализ движения**.

Дослідження руху відображає елементи моделі в дереві конструювання **Featuremanager**.

У дереві **Motionmanager**, розташованому в лівій частині графічної області дослідження руху, можна одержати доступ до елементів і командам, пов'язаним з дослідженням руху.

4. У дереві **Motionmanager** натисніть правою кнопкою миші елемент **Force1** і виберіть **Редактировать элемент**.

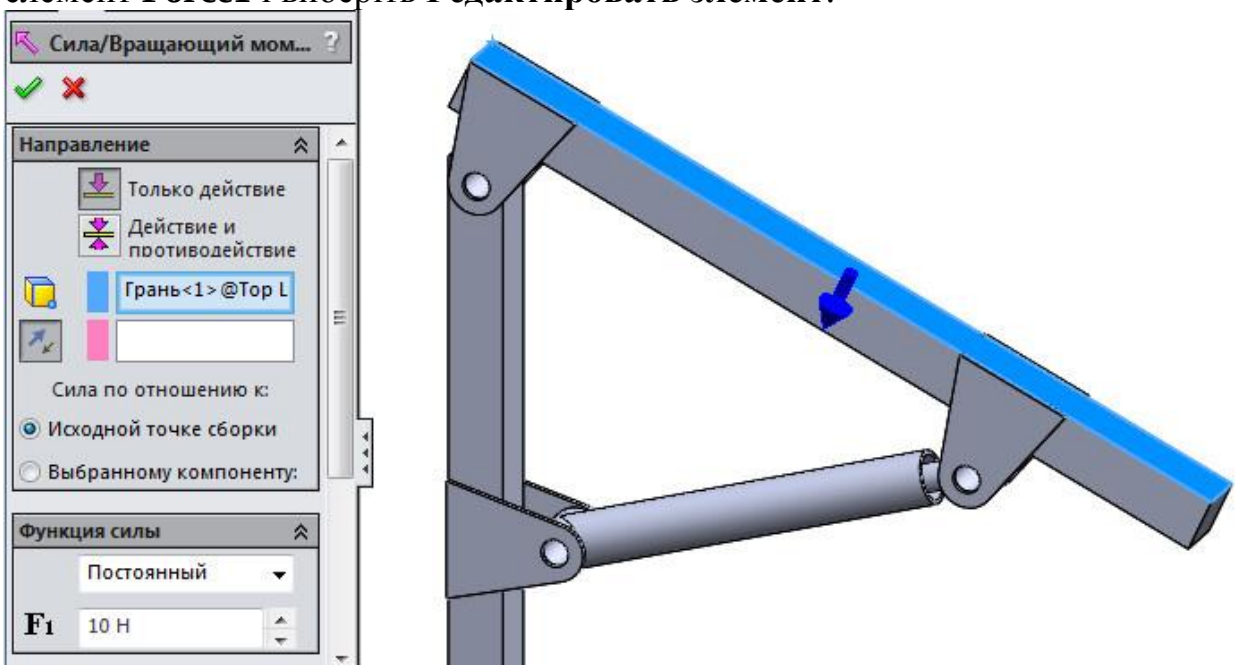


Рис.17

Далі виконується розрахунки руху й перевірка результатів.

1. Натисніть кнопку **Рассчитать** (панель інструментів **Motionmanage**r).

2. Клацніть правою кнопкою миші **Сопряжение** (дерево **Motionmanager**) і виберіть **Степени Свободы**.

Закрийте діалогове вікно й розгорніть Результати (дерево **Motionmanager**).

3. Натисніть правою кнопкою миші Епюра1 і виберіть **Отобразить епюру** (див.рис. 17).

Щоб переглянути специфікації епюри, клацніть правою кнопкою миші елемент Епюра1 (дерево **Motionmanager**) і виберіть **Редактировать элемент** Епюра відобразить реактивний момент спряження "**Совпадение**" між вхідним поршнем і з'єднувачем. Пік реактивного моменту буде припадати на момент проходження поршня через точкумаксимального зсуву – приблизно

© О.Л. Мельник

через 2,5 секунди при моделюванні руху. Це не показується в епюрі результатів.

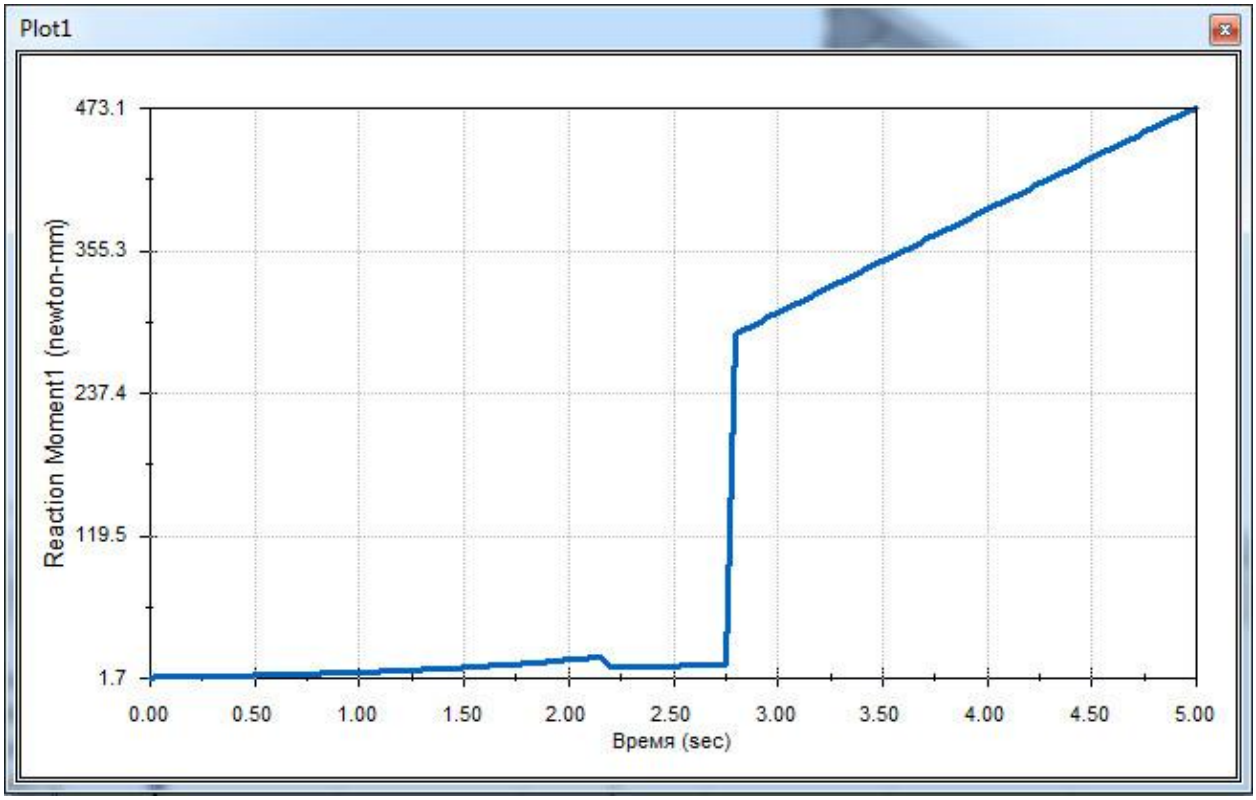


Рис. 17.

Епюра результату дає неточне значення по наступних причинах:

- У моделі є надмірне обмеження.
- Повторюване спряження "**Внешнее выравнивание поршня**", використовуване для обчислення епюри, не було враховано.

4.2. Створення твердої групи

У дослідженні руху можна визначити тверді групи для обробки компонентів у групі як твердого тіла. Далі слід створити тверду групу з базового з'єднання, що містить кілька повторюваних спряжень.

Тверді групи є об'єктами дослідження руху й не входять до числа елементів моделі складання в дереві конструювання **Featuremanager**.

1. У дереві Motionmanager виберіть кілька елементів і клацніть правою кнопкою миші.
   - my_Base Linkage<1>
   - my_Connector<1>
   - my_Connector <2>
2. Виберіть **Добавить к новой жесткой группе**.

Жорстка група 1відображається в дереві **Motionmanage**r. Папку можна розгорнути для перегляду компонентів.

3. Натисніть кнопку **Рассчитать** (панель інструментів **Motionmanager**).

© О.Л. Мельник

4. Переглянете уважно папку **Сопряжение** (дерево **Motionmanager**).

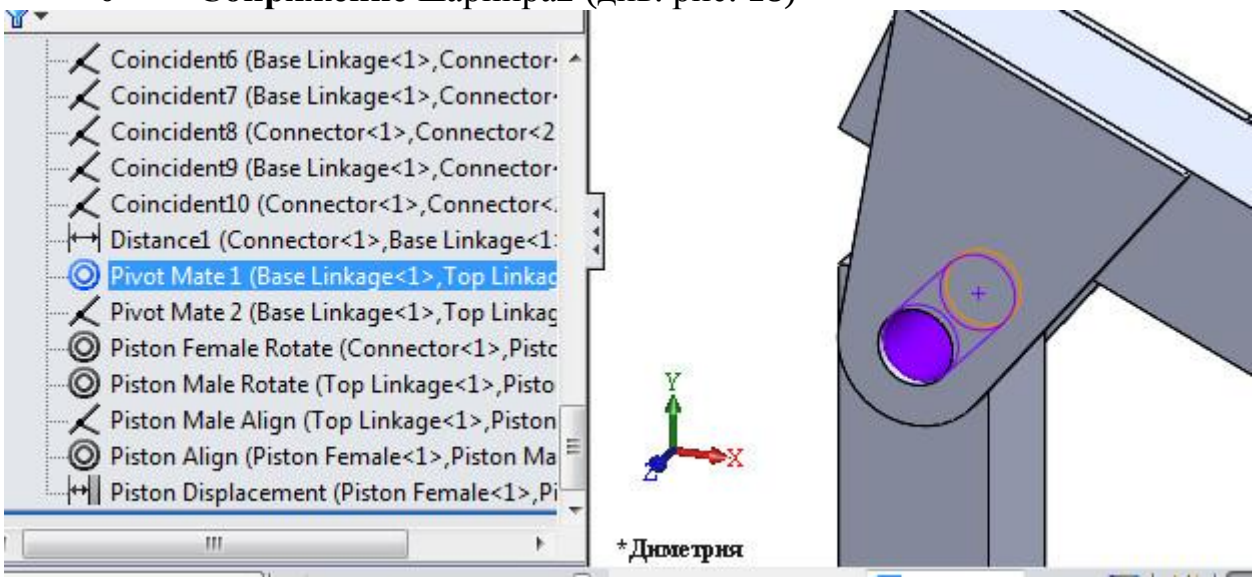
Завдяки угрупованню компонентів у жорстку групу число повторюваних спряжень змінюється з 12 до 8.

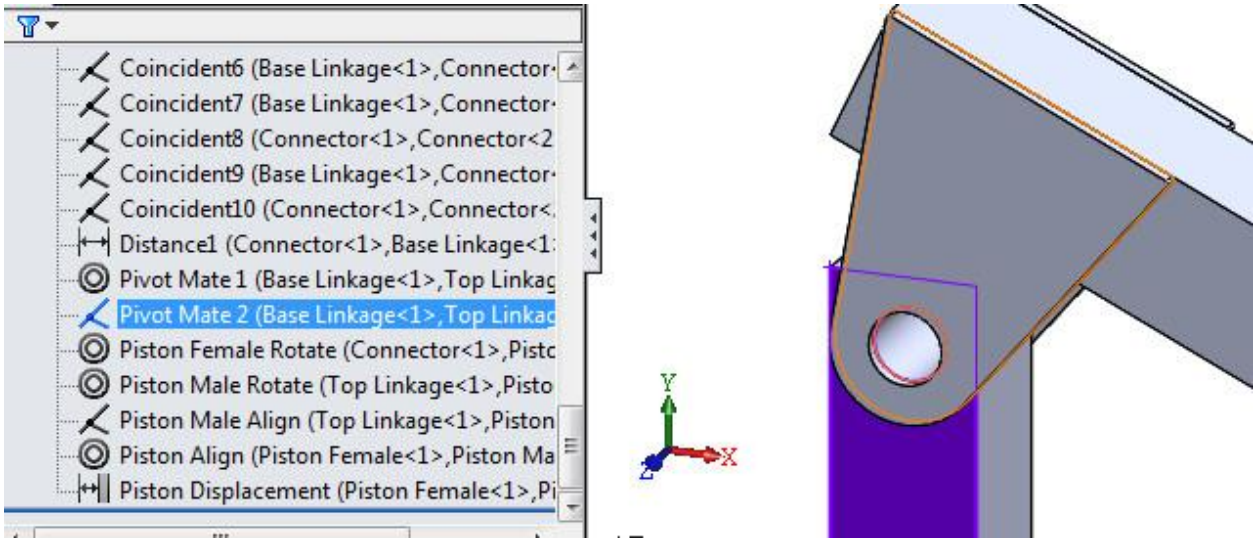
Жорсткі групи діють аналогічно вузлам збірки. Аналогічна поведінка можна спостерігати при створенні вузла складання із цих компонентів.

4.3. Заміна повторюваних спряжень шарнірними спряженнями

Якщо модель містить спряження "**Концентричность**" і спряження "**Совпадение**", які утворюють шарнір, можна скоротити повторення, замінивши два спряження одним шарнірним спряженням. Далі виконується заміна пари спряжень "**Концентричность - Совпадение**" шарнірним спряженням.

- У дереві конструювання **Featuremanager** виберіть наступні два спряження й клацніть **Редактировать элемент**
  - **Сопряжение** шарнира1 (див. рис. 18)
  - **Сопряжение** шарнира2 (див. рис. 18)





© О.Л. Мельник

Рис. 18. Спряження шарніра

Ці два спряження можна замінити одним шарнірним спряженням, тому що вони утворюють шарнір.

2. В **Propertymanager** у розділі **Сопряжение** виберіть **Сопряжение** шарніра 2 і переглянете обрані спряження.

3. Виконаєте аналогічну процедуру для елемента **Сопряжение** шарніра 1.

4. Натисніть , щоб закрити **Propertymanager**.

5. Розгорніть папку **Сопряжение** (дерево Motionmanager), клацніть правою кнопкою миші **Сопряжение** шарнира і виберіть **Удалить из исследования движения** (див. рис. 19)

З появою запиту натисніть **Да** для підтвердження видалення.

Не видаляйте спряження з дерева конструювання **Featuremanager**.

6. Також вилучите спряження **Сопряжение** шарнира 2 з дослідження руху.

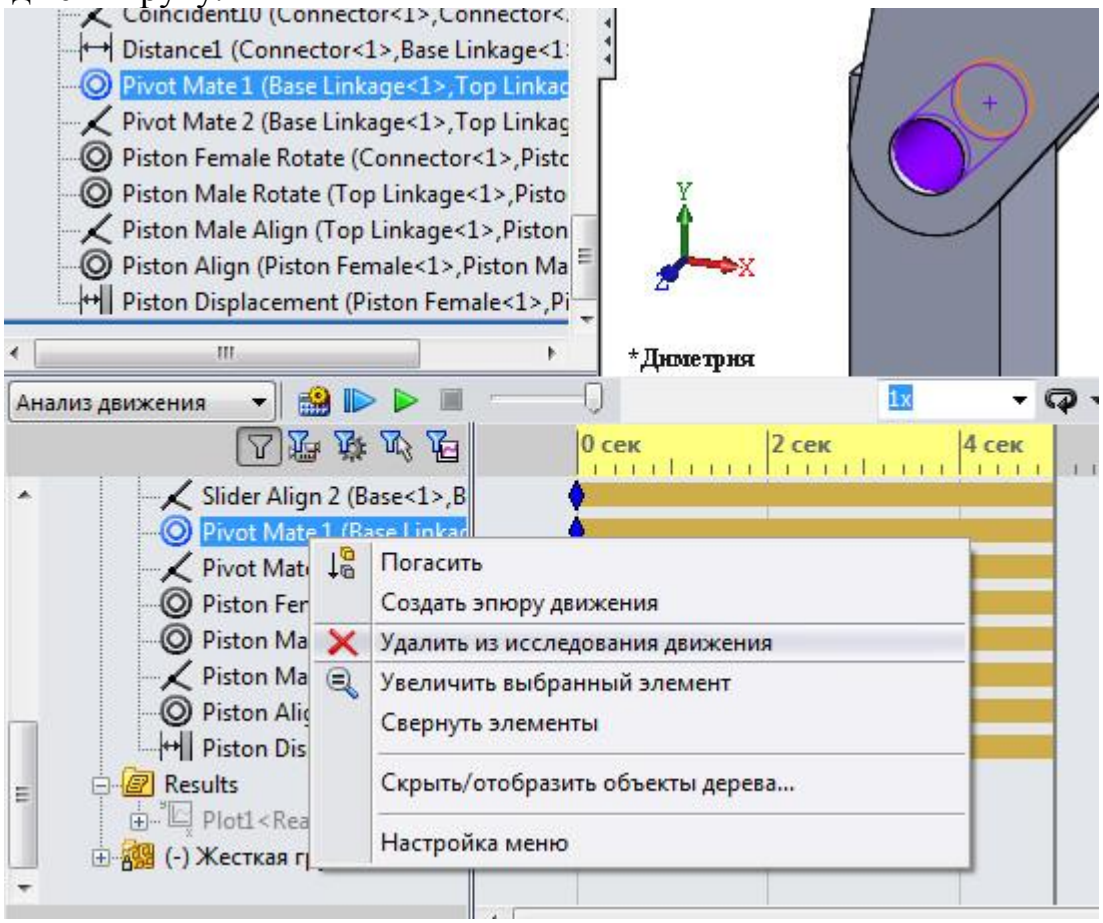


Рис. 19. Видалення спряження з розрахунку

4.4. Завершення шарніра

Далі виконується вставка шарнірного спряження для заміни пари повторюваних спряжень.

© О.Л. Мельник

1. Натисніть кнопку **Сопряжение** (на панелі інструментів "**Сборка**") або виберіть Вставка > **Сопряжение**.

2. У **Механические сопряжения** натисніть **Шарнир**. Виконайте шарнірне з'єднання як це показано на рис.20

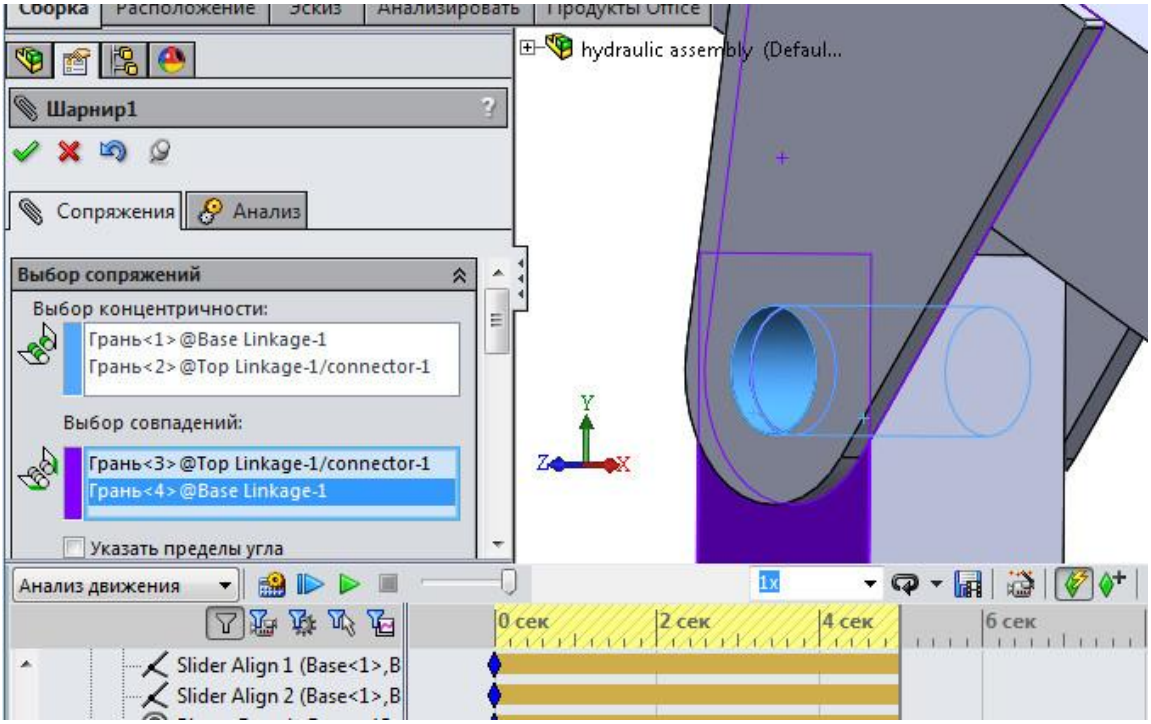


Рис. 20. Спряження шарнір

3. Натисніть кнопку **Рассчитать** (панель інструментів Motionmanager).

Після заміни шарнірне спряження скорочує кількість повторень до 6.

4.5. Заміна спряження двома примітивами спряжень

Спряження **Piston Female Rotate** (див. рис. 21) створює обмеження чотирьох ступенів свободи в тому випадку, коли потрібно тільки три ступені свободи. Крім обмеження обертання навколо горизонтальної осі, а також зсуву по горизонталі й вертикалі, це спряження надмірне обмежує обертання навколо вертикальної осі. Далі для видалення даного повторення виконується заміна спряження концентричності Piston Female Rotate двома еквівалентними примітивами спряження.

1. У дереві **Motionmanager** клацніть правою кнопкою миші спряження **Piston Female Rotate** і клацніть **Удалить из исследования движения**.

З появою запиту натисніть **Да** для підтвердження видалення.

2. У дереві конструювання **Featuremanager** розгорніть компонент **my_Piston Female** і виберіть **Ось2**.

3. Натисніть кнопку **Сопряжение** (на панелі інструментів "Сборка") або виберіть Вставка > **Сопряжение**.

© О.Л. Мельник

4. У графічній області виберіть кромку з'єднувача Кромка<1>@my_Connector-1, як показано на рис. 22.

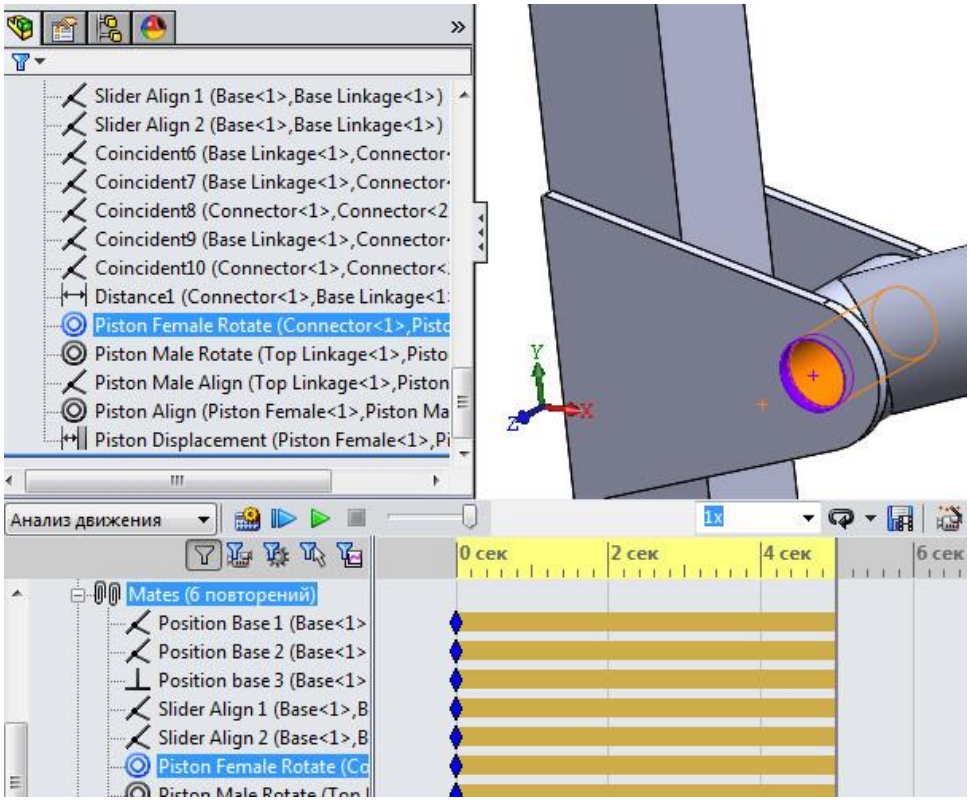


Рис. 24.

Клацніть **Нет**, якщо з'явиться діалогове вікно Відновлення вихідного стану анімації.

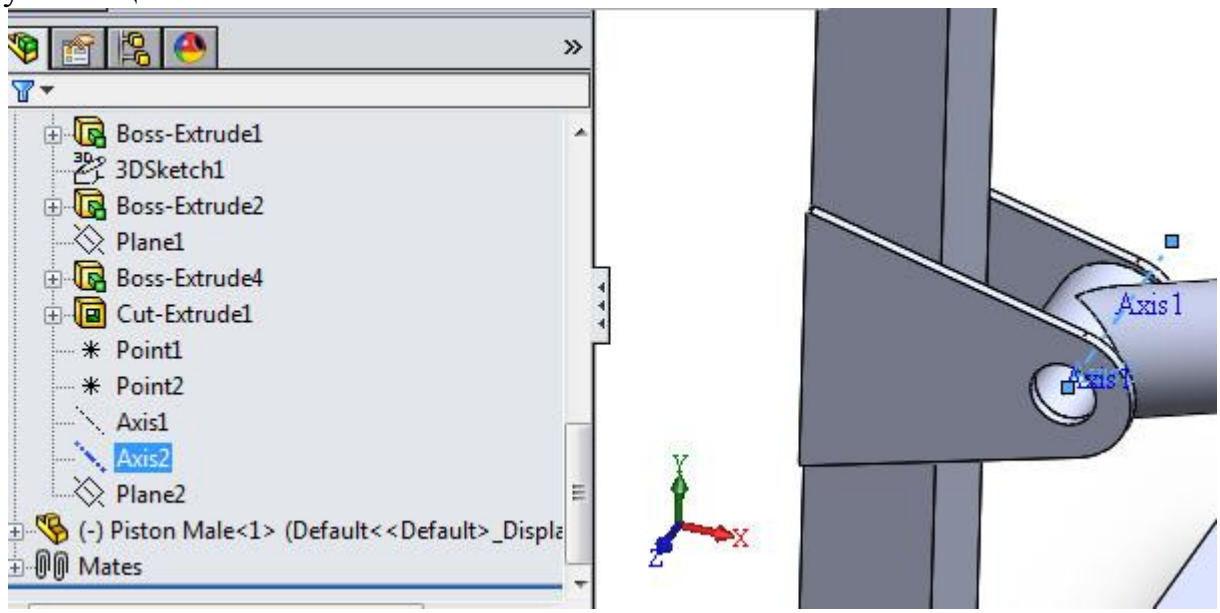


Рис. 25.

5. У вікні **Propertymanager** у розділі **Стандартные сопряжение** виберіть **Перпендикулярно**.

© О.Л. Мельник

Клацніть **Нет**, якщо з'явиться діалогове вікно Відновлення вихідного стану анімації.

6. Натисніть ✔.

Не закривайте вікно Propertymanager.

Вставка примітива спряження "Совпадение"

Далі виконується вставка примітива спряження "**Совпадение**" для заміни повторюваного спряження.

1. У дереві конструювання **Featuremanager** my_Connector <2> і виберіть **Ось1**.
2. Розгорніть my_Piston Female і виберіть Точка1. (рис. 26)
3. У вікні Propertymanager для **Стандартные сопряжение** натисніть **Совпадение**.

Клацніть **Нет**, якщо з'явиться діалогове вікно **Обновление исходного состояния**.

4. Натисніть кнопку ✔, щоб зберегти спряження.
5. Натисніть ✖, щоб закрити Propertymanager.
6. Натисніть кнопку **Рассчитать** (панель інструментів Motionmanager).

Кількість повторень поменшається до п'яти.

4.6. Заміна повторень, що залишилися, втулками

Далі виконується заміна, що залишилися повторюваних спряжень втулками.

1. Натисніть кнопку **Свойства исследования движения** /(панель інструментів Motionmanager).
2. У розділі **Анализ движения** виберіть **Заменить повторяющиеся ограничения втулками** й клацніть ✔.
3. Натисніть кнопку **Рассчитать** (панель інструментів Motionmanager).

Кількість повторень поменшається до 0.

Значки змінених локальних спряжень обновляться для індикації заміни на автоматичні втулки (див. рис. 26).

4. У дереві Motionmanager розгорніть Результаты.
5. Клацніть правою кнопкою миші елемент Епюра<Реактивний момент> і виберіть Отобразить.

Момент реакції має пікову точку, яка приходиться приблизно на 2,0 сек. Це нормальне явище, тому що рух указує на те, що максимальний зсув поршня відбувається в момент часу 2,0 сек. Ця пікова точка пропускається, якщо повторення не видаляється.

© О.Л. Мельник

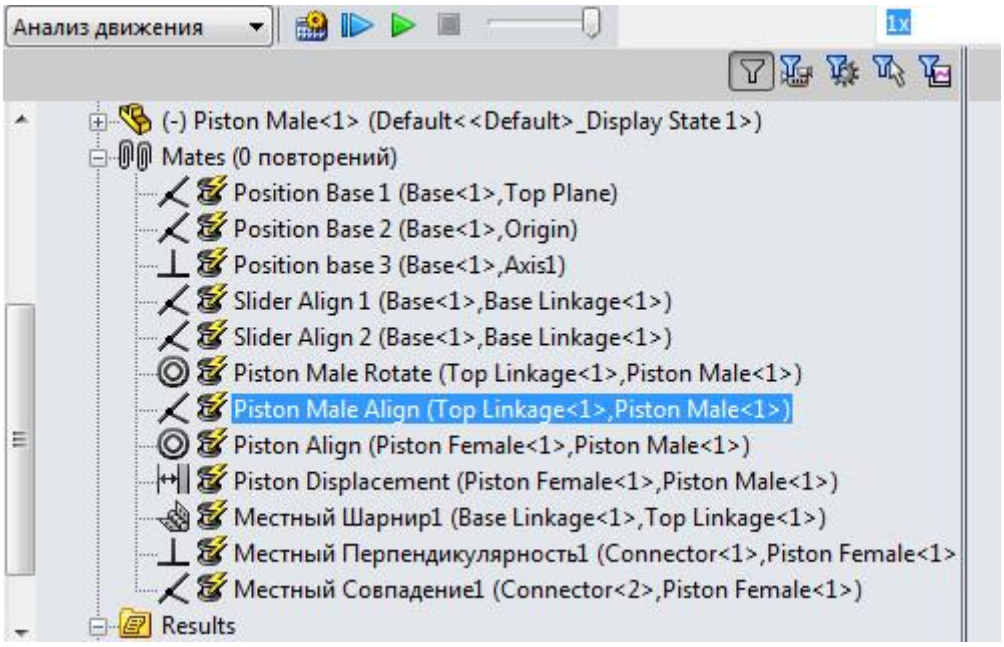


Рис. 26. Індикація використання податливих втулок.

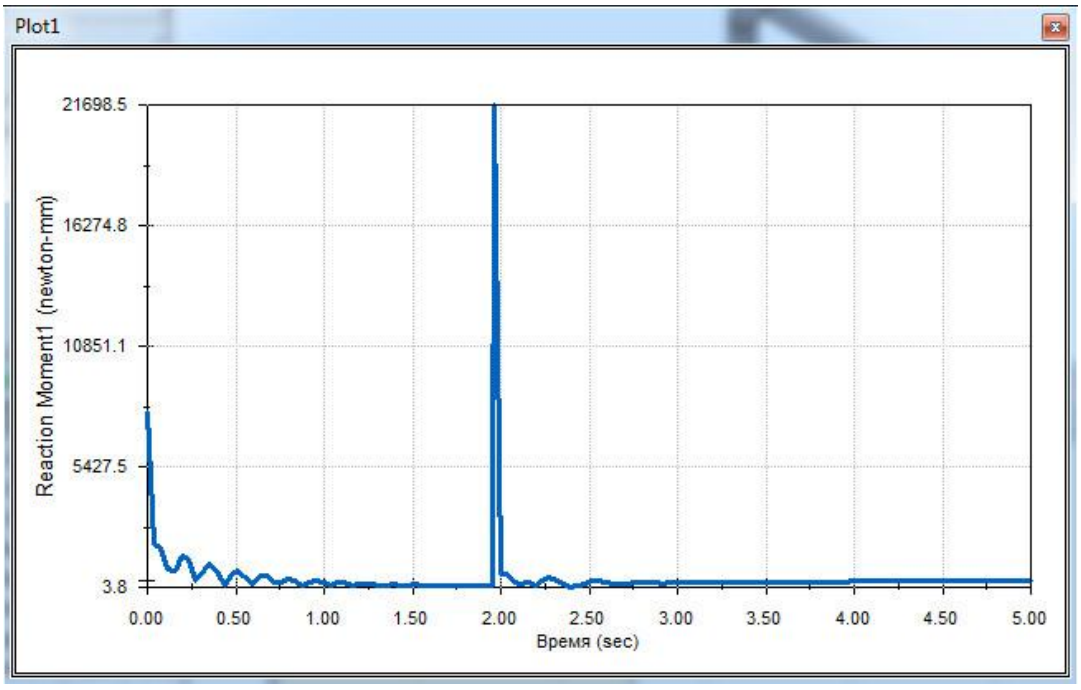


Рис.27

© О.Л. Мельник