

УДК 629.7.015.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804182018134710>

**Сайченко І. О.**<sup>1</sup>, *бакалавр*, **Вірченко Г. А.**<sup>2</sup>, *професор кафедри, д.т.н.*,  
**Сердюкова Н. В.**<sup>3</sup>, *професор кафедри, к.ф-м.н.*

## **ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ПІДВІСКИ НА НАВАНТАЖЕННЯ СТІЙКИ ОСНОВНОГО ШАСІ ТРАНСПОРТНОГО ЛІТАКА ПІД ЧАС СИМЕТРИЧНОЇ ПОСАДКИ**

**En** The task of calculating external loads on an airplane and its structural elements is important for designing and manufacturing an aircraft, as well as for further testing of its strength. The solution of such task provides correct calculation of the aircraft strength. One of the most important elements of the aircraft, which requires a fairly accurate calculation of the strength, is the means of landing. Afterall, the planes suffer the greatest number of accidents and catastrophes during landing and takeoff.

Chassis provide takeoff and landing of the aircraft, maneuvering while moving on the ground and the dynamic loads level reducing. The type of chassis, as a consequence of a possible depreciation system for each aircraft, is selected taking into account the features of its design and conditions in which the aircraft is operated.

---

<sup>1</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», факультет авіаційних і космічних систем

<sup>2</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки

<sup>3</sup> Національний університет Каліфорнії, кафедра математики та природничих наук

Currently, most aircraft use a passive hydraulic suspension. One of the main features of the hydraulic suspension is the use of hydraulic oil as a shock absorber. Whenever an aircraft crosses the inequalities on the runway, the surface excitation power is absorbed by the damper. The absorbed energy turns into heat inside the damper. However, there are some disadvantages of the hydraulic system.

As a result of the carried out researches it is determined that at symmetrical landing the main chassis rack load of the transport aircraft and the maximum load arises from the horizontal load on the chassis rack in the case of landing on the dirt runway. The electromagnetic suspension system works well with peak and working loads due to its low response time and the absence of fading self-stabilizing oscillations of the system.

The use of the electromagnetic suspension system allows fast and effective damping of the load perceived by the stable chassis at symmetrical landing, reducing the necessary mileage for braking, giving the pilot more time to analyze and assess the landing process and compensating for possible miscalculations when choosing the pitch angle at approaching the concrete runway.

**Ru** В процессе конструирования и изготовления самолета, а также при последующих испытаниях его на прочность важное значение имеет задача вычисления внешних нагрузок на самолет и элементы его конструкций. Правильный расчет на прочность обеспечивает решение поставленной задачи.

Одним из важнейших элементов самолета, а именно, средства приземления, требуют достаточно точного расчета на прочность. Ведь именно при посадке и взлете самолетов происходит наибольшее количество аварий и катастроф.

Для обеспечения взлета-посадки, маневрирования в движении по земле и для понижения уровня динамических нагрузок на самолет существуют средства приземления - шасси. Тип шасси и его система амортизации для каждого самолета выбирается с учетом особенностей его конструкции и условий эксплуатации.

## **Вступ**

Під час конструювання і виготовлення літака, а також подальших випробуваннях його на міцність важливе значення має задача обчислення зовнішніх навантажень на літак та елементи його конструкції [1]. Розв'язок такої задачі забезпечує правильний розрахунок міцності літака.

Одним із найважливіших елементів літака, який потребує досить точного розрахунку на міцність, є засоби приземлення. Адже саме під час посадки та зльоті літаки зазнають найбільшу кількість аварій та катастроф.

Для забезпечення зльоту й посадки літака, маневрування у разі руху по землі і для пониження рівня динамічних навантажень на літаках присутні засоби приземлення – шасі. Тип шасі і, як наслідок, можлива система амортизації для кожного літака вибирається із урахуванням особливостей його конструкції і умов експлуатації.

### Постановка задачі

Метою статті є порівняння з існуючими системами амортизації вперше запропонованої електромагнітної системи підвіски. Провести розрахунки навантаження стійки основного шасі середнього транспортного літака із багатостійковим основним шасі у разі симетричної посадки за традиційною і запропонованою системами амортизації. Порівняти отримані результати та зробити висновки про обґрунтованість використання запропонованої системи амортизації.

### Дослідження впливу вертикальної швидкості приземлення, кута тангажа, поздовжньої швидкості і коефіцієнтів тертя на навантаження останньої стійки основного шасі

Навантаження, що виникає у разі удару і діє на стійку шасі, може бути представлене вертикальною  $P_y$ , лобовою  $P_x$  та боковою  $P_z$  складовими. У нашому випадку розглядається симетрична посадка, тобто бокова складова навантаження  $P_z$  дорівнює нулю. Отже за симетричну посадку на шасі діють лише горизонтальна і вертикальна складові навантаження (рис. 1).

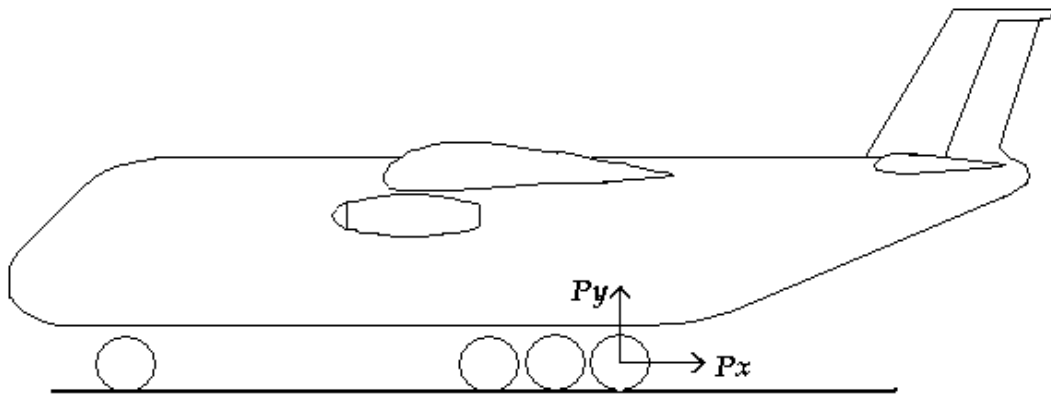


Рис. 1. Схема дії на шасі горизонтальної і вертикальної складових навантаження за симетричної посадки

Для забезпечення міцності літака і шасі розглядаються певні випадки навантажень (нормовані випадки), які характеризуються вимогами щодо розрахункових умов і сформульовані у Нормах міцності.

Під час приземлення літак дотикається до землі не розкрученими колесами, а тому на навантаження, що діють на шасі, впливає сила тертя ковзання пневматиків об поверхню аеродрому, яка визначається через коефіцієнт  $\mu$ . Коли колеса розкрутяться, розглядається коефіцієнт тертя кочення. Коефіцієнт тертя може змінюватись залежно від типу злітно-посадкової смуги (ЗПС), тобто ґрунтова чи штучна (бетонувана) ЗПС, а також і від погодних умов.

## Розділ 2. Механіка

На двох наведених нижче графіках на рис. 2 – рис. 3 показано розраховану зміну горизонтальних навантажень по часу за різних кутах тангажа та коефіцієнтах тертя.

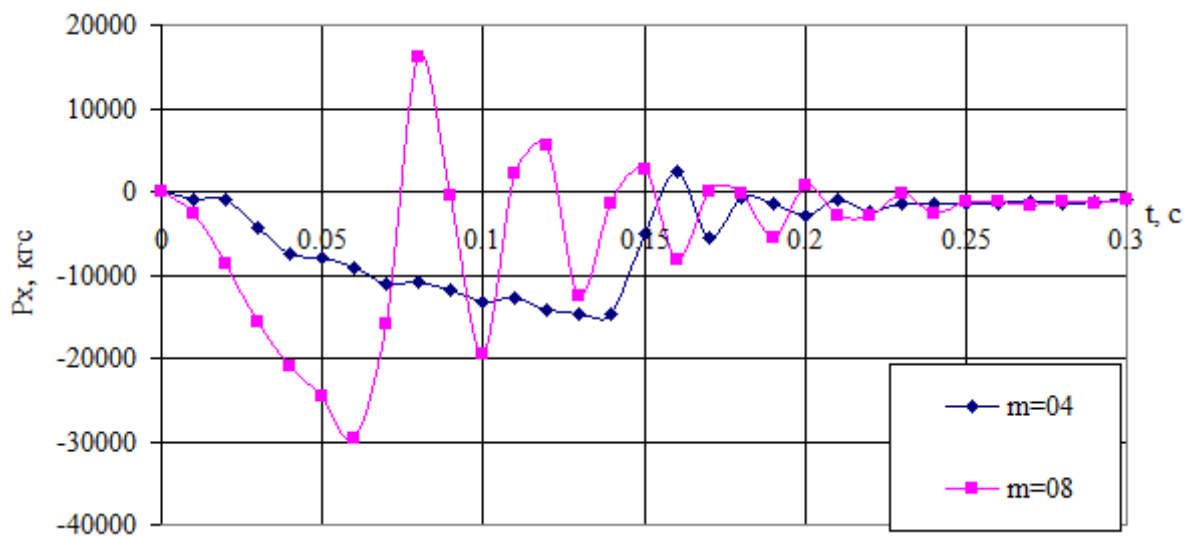


Рис. 2. Зміна горизонтальних навантажень на стійку шасі по часу за  $V_y = 5$  м/с,  $V_x = 230$  км/год,  $\theta = 0^\circ$

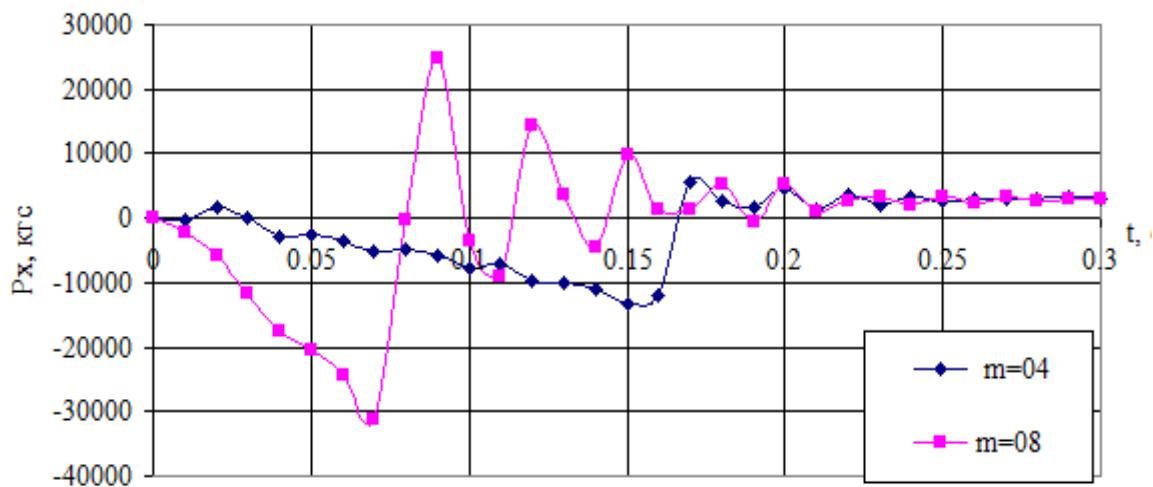


Рис. 3. Зміна горизонтальних навантажень на стійку шасі по часу за  $V_y = 5$  м/с,  $V_x = 280$  км/год,  $\theta = 8^\circ$

Дані, відображені на графіках, отримані у результаті самостійних розрахунків. Легко бачити, що за коефіцієнт тертя  $\mu=0,8$  горизонтальне навантаження значно більше ніж за  $\mu=0,4$ . Під час посадки літака на бетонну зльотно-посадкову смугу ( $\mu=0,4$ ) горизонтальне навантаження на стійку шасі у 3 рази менше ніж за умови посадки на ґрунтову злітно-посадкову смугу ( $\mu=0,8$ ). Залежність горизонтальних навантажень від горизонтальної швидкості не значна за малих значень вертикальних

швидкостей, але спостерігається значний приріст, якщо значення вертикальної швидкості зростає до  $V_y = 5$  м/с (рис. 4).

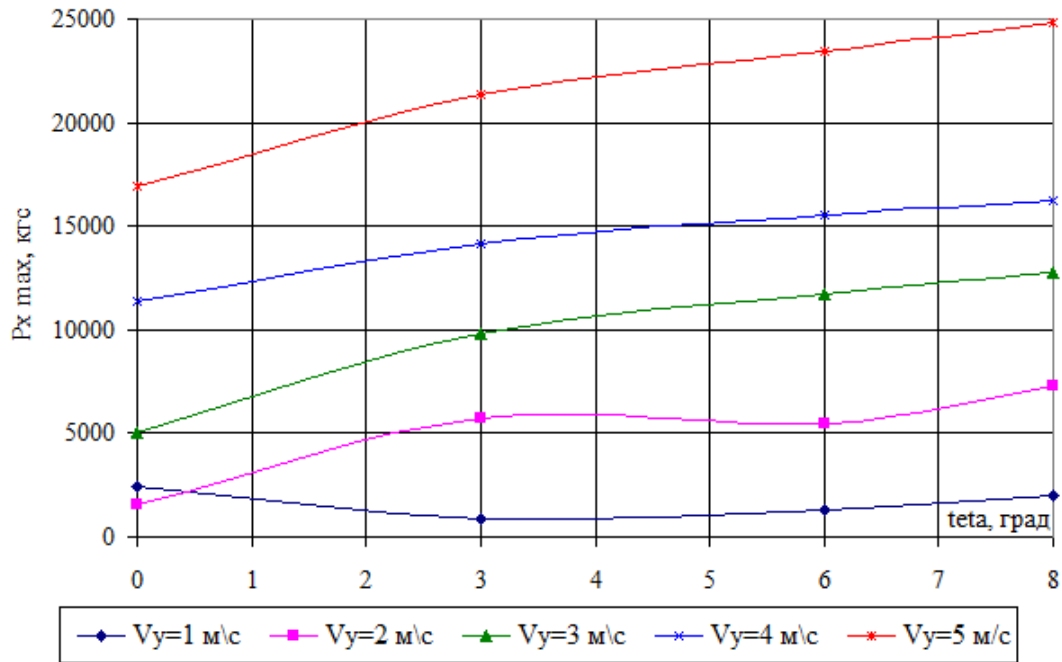


Рис. 4. Залежність  $P_{x \max}$  від кута тангажа у разі різних вертикальних швидкостях за  $V_x = 280$  км/год,  $\mu = 0,8$

Максимальні вертикальні навантаження практично не залежать від горизонтальної швидкості руху літака при посадці та типу поверхні злітно-посадкової смуги (рис. 5).

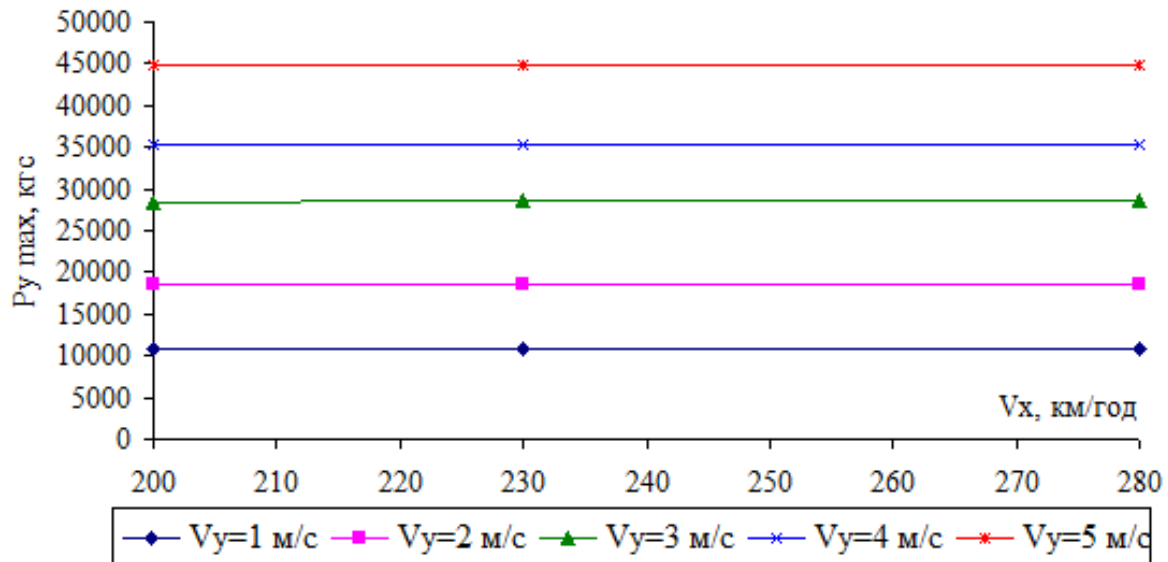


Рис. 5. Залежність  $P_{y \max}$  від горизонтальної швидкості у разі різних вертикальних швидкостях,  $\theta = 8^\circ$ ,  $\mu = 0,8$

Вплив зміни значення кута тангажу за малих значеннях вертикальної компоненти швидкості руху літака під час посадки на значення вертикального навантаження на стійку шасі практично відсутній.

### **Наведення різних типів електромагнітної системи підвіски для визначення можливості використання за існуючих навантажень**

У даний час більшість літаків використовують пасивну гідравлічну підвіску. Однією із головних особливостей гідравлічної підвіски є використання гідравлічного мастила як амортизатора. Кожного разу, коли повітряне судно перетинає нерівності на злітно-посадковій смузі, сила збудження поверхні поглинається демпфером. Поглинута енергія перетворюється на тепло всередині демпфера. Однак існують деякі недоліки гідравлічної системи.

Згідно із [2], гідравлічний клапан сприяє забрудненню навколишнього середовища через витіки мастила та розриви шлангів, де знаходяться токсична гідравлічна рідина. По-друге, гідравлічні системи вважаються неефективними, бо працюють під тиском. Навпаки, системи електромагнітної підвіски (EMS) не вимагають гідравлічної рідини. Вони складаються із наборів постійних магнітів і набору струмів котушок. Кожен із них може виступати у якості передавача або статичної арматури. Взаємодія між потоком постійного магніту та обмоткою арматури, на яку подається напруга, спричинить рух або притягнення до передавача.

Трубчатий лінійний двигун підходить для проектування системи електромагнітної підвіски через відносно високу щільність сили, що дає змогу керувати коливаннями корпусу літального апарата таким же чином, як гідравлічний демпфер [3].

Кілька досліджень були проведені для вивчення продуктивності трубчастого лінійного двигуна. У [4] надано детальний аналіз трубчастих лінійних пристроїв із постійним магнітом. Аналітичний метод використовувався для встановлення розподілу магнітного поля всередині пристрою, а результати перевірялися методом кінцевих елементів. Прогноз розподілу магнітного поля за допомогою аналітичного методу є більш ефективним, ніж використання методу еквівалентної схеми.

Розвиток всіх видів електромагнітної підвіски та її регенеративних властивостей можливий на всіх типах літаків. Для пасивної електромагнітної підвіски не треба зовнішньої системи управління, щоб регулювати коефіцієнт демпферу, щоб підтримувати комфорт та стабільність всередині літака. Як правило, сила демпфування прямолінійна із відносною швидкістю між підвішеною масою (фюзеляж) і підвішеною масою шини шасі літака. Тому споживання енергії для пасивної системи електромагнітної підвіски дуже низьке у порівнянні із напівактивною і повністю активною системою електромагнітної підвіски. На жаль, з точки

зору щільності сили, пасивна електромагнітна підвіска є найслабшою з усіх, тому лише пасивної системи EMS недостатньо для забезпечення бажаного рівня керованого демпфування.

Система напівактивної підвіски містить як активні, так і пасивні елементи, що робить її більш надійною за пасивні EMS, але трохи гіршою, ніж активна EMS, завдяки своїм пасивним властивостям. Демпфер почав використовуватися нещодавно у напівактивній EMS. Але декілька досліджень запропонували енергонезалежну версію напівактивної, яка буде застосовуватися на легковому автомобілі.

Активна система підвіски використовує зовнішню систему керування демпфуванням, що підвищує комфорт та стабільність пасажирів. На жаль, система активної підвіски споживає багато енергії, і конструкція складна для дизайну. Проте нові дослідження висвітлюють надійність системи активної підвіски, яка застосовується на легковому автомобілі. Розширений режим для пасивних EMS і напівактивних EMS може бути зроблений у майбутньому, щоб зробити їх продуктивність на тому ж рівні, що і повністю активна EMS, яка може застосовуватися для легких літаків. Завдяки вдосконаленню технології, повністю активна підвіска може стати однією із перспективних напрямків амортизації у складі системи шасі літаків.

### **Розрахунок можливості використання активної електромагнітної підвіски у разі навантаження стійки основного шасі транспортного літака під час симетричної посадки**

Порівняно із гідравлічними приводами головні переваги електромагнітних (рис .6) полягають у наступному:

1. підвищена ефективність;
2. покращена динамічна поведінка;
3. покращена стабільність;
4. точний контроль сили;
5. подвійна робота приводу.

Недоліки такі:

1. збільшений об'єм системи амортизації, оскільки щільність сили активної частини гідравліки вище, ніж для електромагнітної активації, тобто маса та об'єм системи може бути менше;
2. відносно високий струм для системи 12 – 14 В;
3. звичайні конструкції, які потребують збудження для забезпечення безперервною силою;
4. вищі витрати системи.

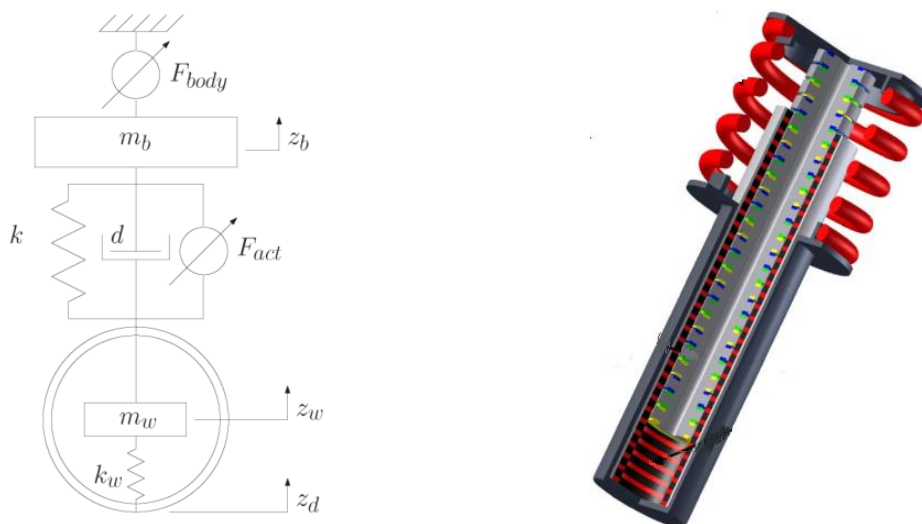


Рис. 6. Принципова схема та будова активної електромагнітної системи підвіски

Незважаючи на численні лінійні топології двигунів, існують постійно магнітні (ПМ) синхронні лінійні виконавчі пристрої, оскільки вони забезпечують високу дозволу щільність потужності. Більш конкретно, трубчастий ПМ синхронний привід, як показано на рис. 6, є кращим, оскільки цей привід здатний повністю використовувати наявну робочу область. Можливі різні схеми намагнічування, такі як:

1. радіально намагнічені північні та південні полюси;
2. осьовий намагнічений північний і південний полюси із залізними стержнями;

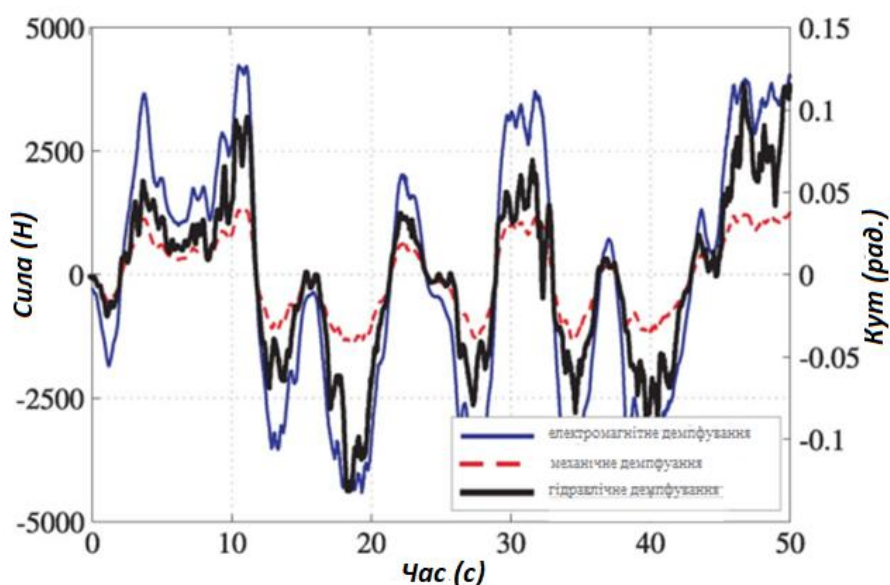


Рис. 7. Часовий інтервал отриманих сил припинення від прискорення разом із кутом спрямовування



Після проведення математичного моделювання у середовищі *Labview* процесу взаємодії обраного електромагнітного активного демпфера та стійки шасі типової будови було порівняно часовий інтервал отриманих сил та прикладених зусиль припинення від прискорення, разом із кутом спрямування. Розглянуто взаємодію системи підвіски під час посадки на ґрунтову злітно-посадкову смугу у двох випадках: використання електромагнітного демпфера у поєднанні із механічним демпфуванням стійки шасі та гідравлічного демпфера у поєднанні із механічним демпфуванням стійки шасі. Механічне демпфування стійкою шасі відбувалося однаково, тому системи демпфування показали якісно відмінні результати роботи (рис. 7).

### **Висновки**

У результаті проведених досліджень визначено, що у разі симетричної посадки навантаження стійки основного шасі транспортного літака та максимальне навантаження виникає від лобового горизонтального навантаження на стійку шасі за умови посадки на ґрунтову злітно-посадкову смугу. Електромагнітна система підвіски добре справляється із піковими та робочими навантаженнями завдяки низькому часу реагування та відсутності затухаючих самостабілізуючих коливань системи.

Використання електромагнітної системи підвіски дозволяє швидко та ефективно демпфувати навантаження, сприйняті стійкою шасі за симетричної посадки, зменшуючи необхідний пробіг для гальмування, надаючи пілоту більше часу на аналіз та оцінку процесу приземлення та компенсуючи можливі прорахунки у разі виборі кута тангажу під час заходу на посадку на бетонну злітно-посадкову полосу.

### **Список використаної літератури**

1. *Torenbeek E.* Advanced aircraft design : conceptual design, analysis, and optimization of subsonic civil airplanes / Egbert Torenbeek. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. – 410 с.
2. *Gysen B. L. J.*, Paulides J. J. H., Janssen J. L. G., et al., “Active Electromagnetic Suspension System For Improved Vehicle Dynamics,” IEEE Conf. on Vehicle Power and Propulsion, vol. 59, pp. 1156-1163, September 2008.
3. *Gysen B. L. J.*, Janssen J. L. G., Paulides J. J. H., et al., “Design Aspects Of An Active Electromagnetic Suspension System For Automotive Applications,” IEEE Conf. on Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-8, 5-9 Oct 2008.
4. *Wang J.*, Jewell G. W., and Howe D., “A General Framework for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines,” IEEE Trans. On Magnetics, vol. 35, May 1999.

5. *Wang J.*, W. Wang, K. Atallah, and D. Howe, “Comparative studies of linear permanent magnet motor topologies for active vehicle suspension,” in Proc. IEEE VPPC, Sep. 2008, pp. 1–6.
6. *Guo S.*, Yang S., and Pan C., “Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors,” J. Intell. Mater. Syst. Struct., vol. 17, no. 1, pp. 3–14, 2006.