

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

з наукової роботи ІТМ НАНУ і ДКАУ

Володимир ПОШИВАЛОВ

09 2023

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
ОК 2.6 Математичне моделювання та комп'ютерні технології орбітальної динаміки космічних апаратів

здобувачів освітньо-наукового рівня доктора філософії зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

рівень освіти третій (освітньо-науковий)

галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

спеціальність (осі), напрямок 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)

спеціалізація _____
(шифр і назва)

освітня(-і) програма(-и) Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (назва)

факультет/центр Аспірантура ІТМ НАНУ і ДКАУ, Відділ 9

(назва)

вид дисципліни вибіркова

(обов'язкова/вибіркова)

Робоча навчальна програма дисципліни «Математичне моделювання та комп'ютерні технології орбітальної динаміки космічних апаратів» складена на основі освітньо-кваліфікаційної характеристики та освітньо-професійної програми підготовки аспірантів фахового напрямку «151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Розробник: Маслова Анна Іванівна, кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування (відділ 9).

*Робоча навчальна програма розглянута:
на семінарі відділу 9: протокол № 4 від 06. 09. 2023.*

Завідувач відділу  Алпатов А.П.

1. Мета дисципліни.

Формування у аспірантів уявлення про математичні моделі та комп'ютерні технології, що можуть бути використані при дослідженнях орбітального руху космічних апаратів на низьких навколосемних орбітах.

2. Завдання вивчення дисципліни.

Ознайомити з основними моделями і методами вирішення прикладних задач орбітальної динаміки космічних апаратів на низьких навколосемних орбітах. Оволодіння навичками математичного моделювання орбітальної динаміки космічних апаратів у процесі наукових досліджень та навичками використання комп'ютерних інструментів, що знаходяться у вільному доступі.

3. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни (за наявності).

Для успішного засвоєння основних положень курсу достатньо базових знань з загальноосвітніх та інженерних дисциплін: вищої математики, фізики, теоретичної механіки та навичок проведення розрахунків з використанням сучасних комп'ютерних технологій.

4. Результати навчання за дисципліною та їх співвідношення із програмними результатами навчання.

Знання фізичних процесів динаміки орбітального руху космічних апаратів та вміння оцінювати основні збурюючі фактори, що впливають на рух низькоорбітальних супутників. Вміння користуватися сучасними даними міжнародних організацій для високоточного прогнозу руху космічних апаратів.

Розподіл навчальних годин

Форма навчання	Денна
Курс	1
Усього за навчальним планом, (годин)	150
<i>Аудиторні заняття, годин:</i>	54
- лекції	36
- лабораторні	18
- практичні (семінарські)	
<i>Самостійна робота, годин:</i>	96
- підготовка до лекції	36
- підготовка до лабораторних робіт	18
- підготовка до практичних занять	
- підготовка до домашніх завдань	
- опрацювання тем, які не викладаються на лекціях	18

- підготовка до комплексної контрольної роботи (іспит)	24
Виконання індивідуальних завдань, годин:	
- рефератів, аналітичних оглядів, есе та ін.	
- розрахункових, графічних, розрахунково-графічних робіт	
- курсових робіт (проектів)	
Контрольні заходи, год:	4
- підсумковий контроль	Іспит

5. Структура навчальної дисципліни.

2 семестр

Форма навчання _____ денна _____

№ п/п	Номер і назва теми	Кількість годин				Примітки			
		лекції	семінарські/практичні вибрати необхідне	Лабораторні заняття	Самостійна робота				
3 семестр									
<i>Розділ 1. Математичне моделювання орбітальної динаміки космічних апаратів (КА).</i>									
1	Тема 1. Основні поняття орбітальної динаміки КА.	10		2	2				
2	Тема 2. Математичні моделі описання руху Землі.	4							
3	Тема 3. Збурюючі прискорення, що діють на орбітальний рух КА.	8		4	6				
4	Тема 4. Проектування орбіт супутників дистанційного зондування Землі.	4		2	2				
<i>Розділ 2. Моделювання орбітальної динаміки КА з використанням сучасних комп'ютерних технологій.</i>									
5	Тема 5. Моделі орбітального	2		2	2				

	руху NORAD та двохрядкові елементи TLE.								
6	Тема 6. Міжнародна служба обертання Землі та її сервіси.	2		2	2				
7	Тема 7. Моделі розрахунку орбітального руху КА провідних космічних агентств.	2		2	2				
8	Тема 8. Ефемериди планет та Horizons System від NASA.	2		2					
9	Тема 9. Апроксимація та інтерполяція.	2		2	2				
	Підготовка до лекцій				36				
	Підготовка до лабораторних робіт				18				
	Підготовка до екзамену				24				
	ВСЬОГО	36		18	96				
		150							

6. Схема формування оцінки.

5.1 Шкала відповідності оцінювання:

Відмінно	Зараховано	90-100
Добре		82-89
Задовільно		75-81
		64-74
		60-63
Незадовільно	Не зараховано	0-59

5.2 Форми та організація оцінювання:

5.3 Поточне оцінювання:

пропонується такий перелік форм оцінювання, який може бути доповнено (скорочено)

Форма оцінювання	Терміни оцінювання (тиждень)	Максимальна кількість балів
Контрольне тестування за темами	(2-16)	20
Оцінювання рівня	(14-17)	20

виконання завдань для самостійної роботи		
Іспит (залік)	семестр	60
Максимальна кількість балів за поточне оцінювання 100		

Примітка: сумарна максимальна кількість балів: 40 балів у разі наявності лише лекційних занять з навчальної дисципліни, 60 балів у іншому випадку (у разі екзамену); 100 балів за семестр (у разі диференційованого заліку, заліку).

7. Рекомендована література:

Основна:

- Vallado D. A. Fundamentals of astrodynamics and applications 4th Ed. / D. A. Vallado. – Space Technology Library, 2013. – 1108 p.
- Montenbruck O., Gill E. Satellite Orbits: Models, Methods, and Applications. – 2000. – 369 p.
- Алпатов А. П. Динаміка космічних літальних апаратів. - Київ. Наукова думка, 2016. - 490 с.
- Фриз П. В. Основи орбітального руху космічних апаратів : підручник / П. В. Фриз. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. – 348 с.
- Павловський М.А. Теоретична механіка. Київ, 2002
- Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1961. – 824 с.
- Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г.Н. Дубошина. — М.: Наука, 1976. — 864 с.
- Аксенов Е. П. Теория движения искусственных спутников Земли / Е. П. Аксенов. – М. : Наука, 1977. – 360 с.
- Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах / М. Ф. Решетнев и др. – М. : Машиностроение, 1988. – 336 с.
- NORAD Two-Line Element Set Format // Celestrak.com: website [Electronic resource]. – Mode of access: <http://celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.asp>.
- Hoots F. R. Models for Propagation of NORAD Element Sets. / F. R. Hoots, R. L. Roehrich // Space track Report no. 3. Colorado Springs: Peterson AFB, CO, 1980. – 91 p [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf>
- Beutler G. Methods of celestial mechanics V.II: Application to Planetary System, Geodynamics and Satellite Geodesy / G. Beutler. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 468 p.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., and Factor, J. K., 2008, “An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008,” [Електронний ресурс] presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, April 13-18, 2008, Режим доступа: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/NPavlis&al_EGU2008.ppt.
- General Mission Analysis Tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gmatcentral.org>.
- General Mission Analysis Tool (GMAT) Version R2018a [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://software.nasa.gov/software/GSC-18094-1>.

16. International Earth Rotation and Reference Systems Service [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html.
17. IERS Conventions 2010 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#official_target.
18. Standards Of Fundamental Astronomy [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.iausofa.org>.

Додаткова:

1. Fortescue P. W. Spacecraft Systems Engineering / P. W. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. – 4th Edition. – Wiley and Sons, Inc, 2011. – 728 p.
2. Shaaban I. Design of Remote Sensing Satellite Orbit : thesis of Master of Science in Electrical Engineering / Ibrahim Shaaban. – Cairo, 2013. – 190 p.
3. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли / П. Е. Эльясберг. – М : Наука, 1965. – 540 с.
4. Грушинский Н. П. Теория фигуры Земли / Н. П. Грушинский. – М. : Наука, 1976. – 512 с.
5. Гребенников Е.А. Метод усреднения в прикладных задачах. – М.: Наука, 1986. – 255 с.
6. Ковтуненко В. М. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов / В. М. Ковтуненко, В. Ф. Камеко, Э. П. Яскевич. – Киев : Наукова думка, 1977. – 156 с.
7. Коган Н. М. Динамика разреженного газа / Н. М. Коган. – М. : Наука, 1967. – 440 с.
8. Математические методы классической механики / В. И. Арнольд, В. В. Козлов, А. И. Нейштадт. – М. : Наука, 1989. – 472 с.
9. Larson W. J. Space Mission Analysis and Design / W. J. Larson, J. R. Wertz. – 3rd edition. – Springer, 1999. – 996 p.
10. Кугаенко Б. В. Эволюция почти круговых орбит ИСЗ под влиянием зональных гармоник / Б. В. Кугаенко, П. Е. Эльясберг // Космические исследования. – 1968. – Т.6, № 2. – С. 186-202.
11. Маслова А. И. Изменение орбиты под действием малого постоянного торможения / А. И. Маслова, А. В. Пироженко // Космічна наука і технологія. – 2016. – Т. 22, № 6. – С. 20–25.
12. Kelso T. S. Frequently Asked Questions: Two-Line Element Set Format [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://celestrak.com/columns/v04n03/>.
13. Kelso T. S. Orbital Coordinate Systems, Part I [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://celestrak.com/columns/v02n01/>.
14. Vallado D. A., Crawford P., Hujsak R., Kelso T.S. "Revisiting Spacetrack Report #3," [Электронный ресурс]. – AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, CO, 2006 August 21–24. Режим доступа: <http://celestrak.com/publications/AIAA/2006-6753/>.
15. GMAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sourceforge.net/projects/gmat/>.
16. Tutorials GMAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gmat.sourceforge.net/docs/R2012a/html/ch01s03.html>.
17. Маслова А. И. Оценка возможных значений плотности атмосферы для различных условий орбитального полета / А. И. Маслова // Техническая механика. – 2019. – № 4. – С. 54 – 65.
18. Пироженко А. В. О влиянии второй зональной гармоники на движение спутника по почти круговым орбитам / А. В. Пироженко, А. И. Маслова, А. В. Васильев // Космическая наука и технология. – 2019. – Т. 25, № 2. – Р. 3 – 11.
19. Pirozhenko A. V. Development of a New Form of Equations of Disturbed Motion of a Satellite in Nearly Circular Orbits / A. V. Pirozhenko, A. I. Maslova, D. A. Khramov, O.

- L. Volosheniuk, A. V. Mischenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 4, № 5 (106). – P. 70 – 77.
20. Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006, “Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004,” *Ocean Dyn.*, 56(5-6), pp. 394–415, doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
 21. Mathews, P. M., Herring, T. A., and Buffett, B. A., 2002, “Modeling of nutation-precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth’s interior,” *J. Geophys. Res.*, 107(B4), doi: 10.1029/2001JB000390.
 22. Buffett, B. A., Mathews, P. M., and Herring, T., 2002, “Modeling of nutation and precession: Effects of electromagnetic coupling,” *J. Geophys. Res.*, 107(B4), doi: 10.1029/2000JB000056.
 23. Capitaine, N., Guinot, B., and McCarthy, D. D., 2000, “Definition of the Celestial Ephemeris origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame,” *Astron. Astrophys.*, 355(1), pp. 398–405.
 24. Capitaine, N., Mathews, P. M., Dehant, V., Wallace, P. T. and Lambert, S. B., 2009, “On the IAU 2000/2006 precession-nutation and comparison with other models and VLBI observations,” *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 103, 2, pp. 179–190, doi:10.1007/s10569-008-9179-9.

Інформаційні ресурси

1. Бібліотека ІТМ НАНУ і ДКАУ;
2. Бібліотека ДНУ;
3. Електронні посібники;
4. Інтернет-ресурси.

8. Перелік питань з навчальної дисципліни

«Математичне моделювання та комп'ютерні технології орбітальної динаміки космічних апаратів»

1. Рівняння руху супутників по орбіті.
2. Рівняння Кеплера і проблема Кеплера.
3. Класичні орбітальні елементи та інші набори орбітальних параметрів.
4. Зв'язок між класичними орбітальними елементами та положенням супутника, що задається векторами \vec{r} та \vec{V} .
5. Зв'язок між новими повільними орбітальними елементами та положенням супутника, що задається векторами \vec{r} та \vec{V} .
6. Зв'язок між положенням супутника та його проекцією на поверхні Землі (Groundtracks).
7. Системи координат, що використовуються для описання руху супутників та збурюючих прискорень (GCRF, ITRF, IJK та інші).
8. Основні поняття про перетворення координат (обертання координат).
9. Алгоритм перетворення геоцентричних екваторіальних координат в довготу та широту для визначення наземних шляхів супутника.
10. Перетворення швидкості та прискорення між різними системами координат.
11. Земля, як центральне тіло руху супутника (розміри, форма поверхні, швидкість обертання).
12. Геопотенціал та сучасні моделі, що його описують.

13. Розрахунок параметрів часу для визначення положення супутника в просторі, юліанська та грегоріанська дата.
14. Алгоритми переходу між різними часовими параметрами.
15. Полярний рух Землі.
16. Кут обертання Землі.
17. Прецесія і нутація Землі.
18. Минулі та сучасні алгоритми розрахунків прецесії та нутації (IAU-76/FK5 та IAU 2000/2006).
19. Збурюючі прискорення, що діють на супутник, та їх оцінки для низьких навколоземних орбіт.
20. Гравітаційний потенціал Землі.
21. Рекурентні вирази для обчислень гравітаційного потенціалу.
22. Приливні деформації гравітаційного поля.
23. Вплив другої зональної гармоніки геопотенціалу на рух супутників по майже коловим орбітам у першому наближенні за малими параметрами.
24. Вплив другої зональної гармоніки геопотенціалу на рух супутників по майже коловим орбітам у другому наближенні за малими параметрами.
25. Вплив зональних гармонік більш високого порядку ($n > 2$) на рух супутників.
26. Побудова аналітичної моделі зміни середніх елементів орбіти під дією зональних гармонік геопотенціалу на майже кругових орбітах.
27. Зміна класичних орбітальних елементів під дією другої зональної гармоніки (аналітичні наближення).
28. Вплив секторіальних і тессеральних гармонік геопотенціалу на зміни орбітальних параметрів.
29. Сила аеродинамічного гальмування для дослідження руху космічних апаратів (КА).
30. Моделі щільності верхньої атмосфери Землі.
31. Параметри верхньої атмосфери та їх прогнозування (сонячна та геомагнітна активність).
32. Аналіз і оцінки короткоперіодичних змін щільності атмосфери, що виникають при орбітальному русі КА.
33. Аеродинамічний вплив на рух супутників по орбіті.
34. Збурюючі прискорення від дії гравітації третього тіла.
35. Вплив гравітації Місяця на зміну орбітальних параметрів супутника.
36. Вплив гравітації Сонця на зміну орбітальних параметрів супутника.
37. Моделювання сонячного тиску на супутник.
38. Вплив сонячного тиску на зміну орбітальних параметрів супутника.
39. Задачі вибору орбіт КА ДЗЗ.
40. Види орбіт КА ДЗЗ.
41. Побудова гравітаційно-стійких орбіт супутника.
42. Орбіти мінімальної зміни висоти.
43. Особливості сонячно-синхронних орбіт.
44. Особливості орбіт повторюваного наземного маршруту.
45. Особливості «заморожених» орбіт.
46. Двохрядкові елементи (TLE) та проблеми, що виникають при їх використанні.
47. Моделі NORAD для розрахунків точного положення космічних об'єктів (SGP2, SDP2, SGP4, SDP4).
48. Відновлення поточних елементів орбіти за їх TLE.
49. Сучасна конвенція Міжнародної служби обертання Землі (International Earth Rotation and Reference Systems Service).
50. Використання параметрів Earth Orientation Data, що надаються сервісом IERS, в розрахунках руху супутників.

51. Матриця перетворення від земної до інерціальної системи координат згідно IERS Conventions 2010.
52. Приливні варіації обертання Землі згідно IERS Conventions 2010.
53. Програма Standards Of Fundamental Astronomy (SOFA) з відкритим кодом для розрахунку переходу між земною та інерціальною системи координат (ITRF та GCRF).
54. Моделі розрахунку орбітального руху КА провідних космічних агентств, що знаходяться у вільному доступі в мережі Internet.
55. General Mission Analysis Tool (GMAT) – вільне програмне забезпечення для моделювання орбіт.
56. Налаштування параметрів супутника в GMAT.
57. Налаштування параметрів метода розрахунків (Propagator) в GMAT.
58. Вплив вибору Propagator в GMAT на результати розрахунків орбіт КА.
59. Можливості налаштування вихідних параметрів розрахунків в GMAT.
60. Фундаментальні аргументи в небесній механіці.
61. Прогнозування/розрахунки положення Місяця.
62. Прогнозування/розрахунки положення Сонця.
63. Знаходження ефемерид Місяця та Сонця в системі Horizons.
64. Поняття апроксимації та інтерполяції.
65. Метод найменших квадратів.
66. Апроксимація координат Місяця та Сонця в інерціальній системі координат.