

УДК 621.313:629

*І.О. Чурилов, студент гр. ПБ-21, ст. викл. Волошко О.В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРАХУНКУ МОТОР-КОЛІС ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ

Анотація. У роботі запропоновано методику вибору параметрів та розрахунку мотор-колiс для автоматизованих мобільних платформ із диференційною та платформною кінематикою. Методика базується на поетапному визначенні основних експлуатаційних параметрів, розрахунку сумарного тягового зусилля, необхідного крутного моменту та потужності на приводних колесах. Наведено приклад застосування методики підбору мотор-колiс мобільної диференційної платформи, що підтверджує її практичну придатність для проектування.

Ключові слова: автоматизований керований транспортний засіб, автономна мобільна платформа; мотор-колесо; диференційний привід;

ВСТУП

Сучасний етап розвитку складської логістики характеризується стрімким переходом до автоматизованих керованих транспортних засобів (Automated Guided Vehicle - AGV) та автономних мобільних роботів (Autonomous Mobile Robot - AMR) [1]. Ключовим вузлом таких платформ є тяговий електропривід, де використання готових мотор-колiс стає галузевим стандартом завдяки доступності, простоті інтеграції, а також компактності.

У цій роботі запропоновано просту, але в той же час достатньо універсальну методику підбору мотор-колiс для автоматизованих мобільних платформ, що базується на сумарному тяговому зусиллі (Total Tractive Effort - TTE), та перевірці максимального тягового моменту (Maximum Tractive Torque - MTT). Методика враховує додаткові фактори, такі як зчеплення з підлогою, подолання ухилів, вимоги до прискорення та тип кінематики (диференційна, платформна тощо). Методика орієнтована насамперед на двоколiсні диференційні платформи AGV/AMR, але може бути адаптована і для чотириколiсних мобільних роботів та прототипів, у яких застосовуються серійні мотор-колеса.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Метод сумарного тягового зусилля F_{TTE} ґрунтується на визначенні 3-х основних складових [1]:

$$F_{TTE} = F_{rr} + F_{gr} + F_a \quad (1)$$

де F_{rr} – сила, необхідна для подолання сили тертя кочення; F_{gr} – сила, необхідна для подолання підйому; F_a – сила, необхідна для розгону до заданої швидкості за заданий час.

Відповідно, для визначення усіх 3 сил необхідно знати ряд додаткових параметрів: радіус колеса R_w (м); загальна маса мобільної платформи з вантажем m (кг); максимальна швидкість v_{max} (м/с); максимальний кут підйому α (°); час розгону до робочої швидкості t_a (с); кількість ведучих колiс N_{drive} ; коефіцієнт тертя кочення C_{rr} колеса по певній поверхні. Також враховується коефіцієнт опору $RF = 1,1$, що зазвичай приймається як 10 – 15 % [2].

На рис. 1 показано схему сил, що діють на мотор-колесо на похилій поверхні та показано походження складових [3].

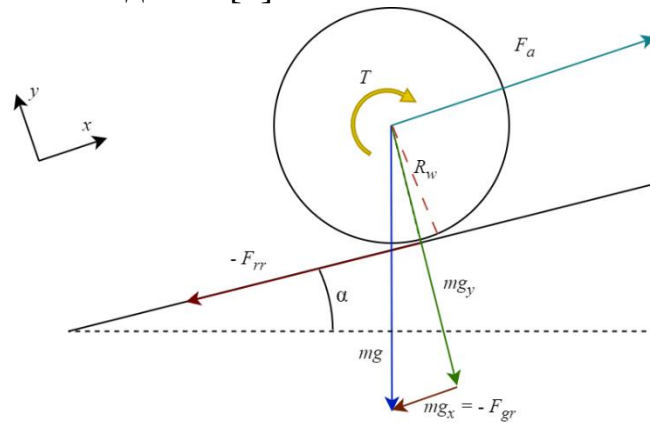


Рис. 1 Схема сил, що діють на мотор-колесо на похилій поверхні

Силу тертя кочення F_{rr} можна визначити як:

$$F_{rr} = mg \cdot C_{rr} \quad (2)$$

Сила для подолання підйому F_{gr} відповідно до рис. 1 визначається як:

$$F_{gr} = mg \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

Сила F_a , необхідна для розгону знаходиться як:

$$F_a = ma \quad (4)$$

де необхідне прискорення a визначається через:

$$a = \frac{v_{\max}}{t_a} \quad (5)$$

Об'єднавши формули (2 – 5) і врахувавши RF – коефіцієнт отримаємо наступне рівняння, що показує сумарне тягове зусилля:

$$F_{TTE} = m \left(g(C_{rr} + \sin \alpha) + \frac{v_{\max}}{t_a} \right) \cdot RF \quad (6)$$

Тоді, маючи F_{TTE} , легко визначити необхідний момент T_{Wheel} та механічну потужність P_{Wheel} на одне мотор-колесо:

$$T_{Wheel} = \frac{F_{TTE} \cdot R_w}{N_{drive}}; \quad (7)$$

$$P_{Wheel} = \frac{F_{TTE} \cdot v_{\max}}{N_{drive}}. \quad (8)$$

Важливою частиною методу є перевірка граничного моменту за умовою зчеплення з поверхнею. Тобто, перевіряється, чи буде наявне проковзування колеса по поверхні при знайденому значенні T_{Wheel} . Для цього розраховується параметр MTT_w – максимально допустимий момент для одного колеса:

$$MTT_w = \frac{mg}{N_{drive}} \cdot \mu \cdot R_w \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт тертя колеса об поверхню (для резинового колеса, що їде по бетону, приймається 0,7 – 0,8 [4]).

Для виконання умови зчеплення з поверхнею необхідне виконання наступної умови:

$$MTT_w \geq T_{Wheel} \quad (10)$$

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ

В ході розробки власної мобільної платформи були сформовані чіткі технічні вимоги: радіус колеса $R_w = 0,127$ (м); загальна маса мобільної платформи з вантажем $m = 100$ (кг); максимальна швидкість $v_{\max} = 1,5$ (м/с); максимальний кут підйому $\alpha = 5$ (°); час розгону до робочої швидкості $t_a = 2$ (с); кількість ведучих коліс $N_{drive} = 2$ (диференціальна кінематика); коефіцієнт тертя кочення колеса по певній поверхні C_{rr} прийнято за 0,015 (коефіцієнт тертя кочення резинової покришки по бетону [5]).

Тоді, можна визначити сумарне тягове зусилля F_{TTE} :

$$F_{TTE} = 100 \left(9,81(0,015 + \sin 5^\circ) + \frac{1,5}{2} \right) \cdot 1,1 \approx 192,7 \text{ Н} \quad (11)$$

Визначення необхідного моменту T_{Wheel} (12) потужності P_{Wheel} на одне мотор-колесо (13):

$$T_{Wheel} = \frac{192,7 \cdot 0,127}{2} = 12,23 \text{ Н} \times \text{м} \quad (12)$$

$$P_{Wheel} = \frac{192,7 \cdot 1,5}{2} = 144,5 \text{ Вт} \quad (13)$$

Перевірка умови зчеплення з поверхнею:

$$MTT_w = \frac{100 \cdot 9,81}{2} \cdot 0,7 \cdot 0,127 = 43,6 \text{ Н} \times \text{м} \quad (14)$$
$$43,6 \text{ Н} \times \text{м} \geq 12,23 \text{ Н} \times \text{м}$$

Отже, при русі колесо не буде проковзувати по поверхні (бетонній підлозі).

Маючи розраховане значення T_{Wheel} та P_{Wheel} можна обирати конкретне мотор-колесо під задані параметри.

Додатково, для підбору оптимальних параметрів часу прискорення t_a та моменту T_{Wheel} користуються характеристикою $T_{Wheel}(t_a)$ [2], яку можна вивести з (6) та (7):

$$T_{Wheel}(t_a) = \frac{m \left(g(C_{rr} + \sin \alpha) + \frac{v_{\max}}{t_a} \right) \cdot RF \cdot R_w}{N_{drive}} \quad (15)$$

Для характеристик мобільного робота, що розглядався у прикладі, побудовано відповідний графік залежності $T_{Wheel}(t_a)$, рис. 2.

Графік на рис. 2 показує зміну необхідного моменту на мотор-колесі від часу розгону мобільного робота до заданої швидкості. Орієнтуючись на графік легко підібрати оптимальний час розгону, при якому T_{Wheel} залишиться в межах допустимих значень для конкретного мотор – колеса.

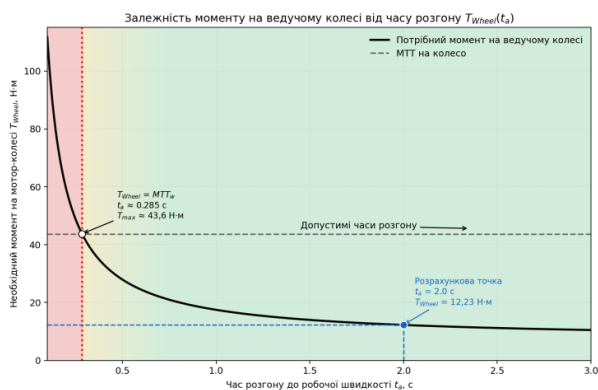


Рис.2 Залежність необхідного крутного моменту T_{wheel} від часу розгону t_a

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано та реалізовано методику вибору параметрів та розрахунку мотор-колів для автоматизованих мобільних платформ, яка базується на визначенні сумарного тягового зусилля ТТЕ та перевірці граничного моменту за умовою зчеплення з поверхнею МТТ.

Показано, що розрахунок складових опору руху (тертя кочення, подолання підйому, розгін до робочої швидкості) дозволяє отримати необхідні значення крутного моменту та потужності на одне мотор-колесо для заданих експлуатаційних умов.

Практичний приклад для диференційної платформи підтвердив придатність методики для вибору серійних мотор-колів та перевірки відсутності проковзування на типових промислових покриттях. Запропонований підхід може бути використаний при проєктуванні AGV/AMR-роботів малого та середнього класу, а також як навчальний приклад при вивченні основ розрахунку приводів мобільних роботів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А.П. Поліщук, Волошко О.В. «Впровадження автономних мобільних роботів для автоматизації складської логістики», Збірник праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Погляд у майбутнє приладобудування”, 13-14 травня 2025р. К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2025. – 76-79с.
- [2] Drive Wheel MotorTorqueCalculations. Design&ManufacturingLaboratory. URL: <https://web.mae.ufl.edu/designlab/motors/EML2322L%20Drive%20Wheel%20Motor%20Torque%20Calculations.pdf> (date of access: 03.05.2026).
- [3] DriveMotorSizingTutorial. RobotShopCommunity. URL: <https://community.robotshop.com/blog/show/drive-motor-sizing-tutorial> (date of access: 03.05.2026).
- [4] RollingResistance. TheEngineeringToolBox. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html (date of access: 03.05.2026).
- [5] Friction - CoefficientsforCommonMaterialsandSurfaces.TheEngineeringToolBox. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html (date of access: 03.05.2026). [0]

Наук. керівник - старший викладач Волошко О.В.