УДК 62-253.1

МАХОВИК ДВИГУНА ЗІ ЗМІННИМ МОМЕНТОМ ІНЕРЦІЇ

Самарін О. Є., *к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: kaf_energo@ksma.ks.ua, ORCID: 0000-0002-6304-0777*

Запропоновано конструкцію маховика поршневого двигуна, у якому при запуску двигуна основна маса маховика концентрується у центрі біля маточини, а при досягненні холостих обертів основна маса переміщується до зубчастої реборди на периферію маховика. Це досягається тим, що на диску шарнірно встановлено важелі, на кінцях яких закріплено грузи або на диску жорстко закріплено напрямні, у яких розташовано грузи. Важелі притягнуто пружинами до маточини так, що грузи впираються у неї, або грузи притягнуто пружинами до маточини так, що вони впираються у неї. Сила пружин розрахована так, що при частоті обертання маховика, яка дорівнює холостим обертам двигуна, важелі відхиляються і грузи впираються у реборду маховика або грузи переміщуються по напрямних і впираються у реборду маховика.

Маховик зі змінним моментом інерції працює наступним чином. Перед запуском двигуна пружини діють на важелі з грузами або на грузи і притягують їх до маточини так, що вони впираються у неї. Тому при запуску двигуна сила інерції маховика мінімальна. Після запуску двигуна на грузи діє відцентрова сила, яка їх відхиляє від маточини і при досягненні двигуном холостих обертів притискає до зубчастої реборди. У такому положенні грузів сила інерції маховика максимальна. Застосування маховика дозволить полегшити запуск двигуна та зменшити витрати енергії з переравдяки перерозподілу основної маси маховика між центром та периферією і відповідного зменшення або збільшення сили інерції.

Ключові слова: *маховик, колінчастий вал, поршневий двигун, момент інерції, відцентрова сила.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.048-054

Вступ. Маховик являє собою спеціальне дископодібне механічне пристосування, що кріпиться болтами до заднього кінця колінчастого вала і слугує головним чином для створення інерції обертання колінчастого вала й трансмісії [1]. Завдяки силам інерції маховик виводить поршні з мертвих точок і забезпечує рівномірність обертання колінчастого вала. Він виконує наступні функції:

- зниження нерівномірності обертання колінчастого вала;
- передача крутного моменту від двигуна до коробки передач;
- передача крутного моменту від стартера на колінчастий вал двигуна.

Враховуючи масове використання маховиків у двигунах внутрішнього згоряння і високі вимоги до пускових характеристик та стабільності роботи при експлуатаційному режимі навантаження, а також вимоги до зниження витрат палива, проблема зменшення пускового моменту та його підвищення при експлуатації двигуна набуває практичної значущості.

Аналіз конструкції маховиків. Розрізняють такі різновиди конструкції маховика[2]:

- суцільний;
- двомасовий;
- полегшений.

Найбільшого поширення набув маховик суцільної конструкції, що являє собою масивний чавунний диск. На зовнішню поверхню диска напресовано сталевий зубчастий вінець, що забезпечує провертання колінчастого вала при запуску двигуна за допомогою стартера. З одного боку маховика виконана маточина для кріплення до фланця колінчастого вала, інший бік грає роль ведучого диска зчеплення.

При роботі двигуна на різних оборотах колінчастий вал постійно закручується і розкручується, тобто піддається крутильним коливанням. У двигуні застосовуються гасителі крутильних коливань різної конструкції. Одним з таких пристроїв є двомасовий маховик (інша назва – амортизаційний маховик).

Маховик включає два диски, з'єднані за допомогою пружинно-демпферної системи, яка дозволяє повністю ізолювати трансмісію від крутильних коливань і забезпечити рівномірну роботу її елементів. Із застосуванням двомасових маховиків відпадає необхідність демпфувального пристрою у відомому диску зчеплення.

Перевагами двомасових маховиків є гасіння коливань, зниження вібрацій, ізоляція шумів, зручність перемикання передач, зниження зносу синхронізаторів, захист трансмісії від перевантаження і навіть економія палива. З іншого боку, інтенсивна робота двомасового маховика призводить до посиленого зносу пружинно-демпферної системи і навіть поломки її основного елемента – дугової пружини. Все це стримує масове застосування демпферного маховика на двигунах.

Сучасні тенденції розвитку автомобільних двигунів, такі як даунсайзинг (зменшення обсягу і маси двигуна зі збереженням потужності) і даунспідинг (розширення діапазону крутного моменту двигуна з можливістю роботи на низьких оборотах), зажадали нового рівня гасіння коливань. З 2008 року на двигунах застосовується двомасовий маховик з маятниковим гасителем коливань.

Для усунення нерівномірності обертання колінчастого вала в діапазоні низьких оборотів на маховику разом з дуговою пружиною встановлюється відцентровий маятник. Він створює власні коливання, які у протифазі накладаються на згладжені коливання після дугової пружини й повністю їх гасять.

Відцентровий маятник виконаний у вигляді вантажів, розташованих по колу маховика. За низьких оборотів двигуна вантажі маятника розгойдуються сильніше, тому що відцентрові сили, які діють на них малі. При збільшенні оборотів амплітуда коливань вантажів зменшується і їх роль в гасінні коливань знижується.

Полегшений маховик використовується при тюнінгу двигуна. Перерозподіл маси маховика до країв диска дозволяє зменшити його масу і також зменшити момент інерції. Із застосуванням полегшеного маховика двигун швидше досягає максимальних обертів, відповідно має кращу розгінну динаміку, а також спостерігається збільшення потужності до 5 %.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як видно з проведеного аналізу, наявні конструкції маховиків мають постійний момент інерції як при пуску, так і при експлуатації двигуна. Але робота двигуна при вказаних режимах суттєво відрізняється, що викликає різні вимоги до маховиків.

При запуску двигуна момент інерції маховика має бути мінімальним, що полегшує сам запуск і знижує витрати палива, а при робочому навантаженні момент інерції має бути максимальним, що забезпечує рівномірну й стабільну роботу двигуна. Розглянуті конструкції маховиків не відповідають установленим вимогам.

Мета та задачі проведення досліджень. Створити такий маховик поршневого двигуна, у якому при запуску двигуна основна маса маховика концентрується у центрі біля маточини, що зменшує пусковий момент інерції, а при досягненні холостих обертів основна маса переміщується до зубчастої реборди на периферію маховика, що забезпечує максимальний момент інерції і рівномірну роботу двигуна.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз конструкції маховиків, встановити причину указаного недоліку та запропонувати її усунення.

Рішення поставленої задачі. На рис.1 показано загальний вигляд маховика зі змінним моментом інерції.

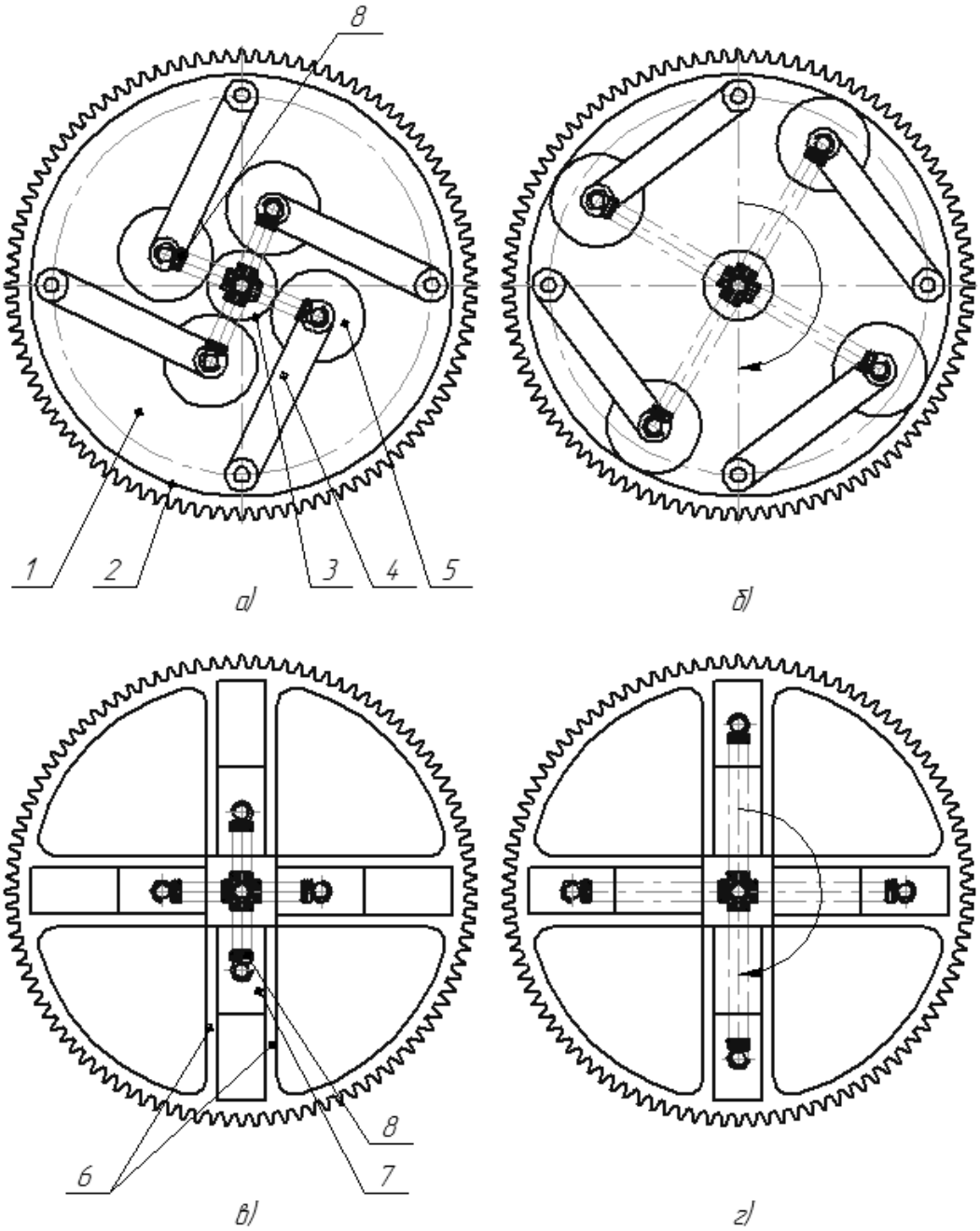

Рисунок 1 – Маховик двигуна зі змінним моментом інерції:
а – маховик з важелями перед запуском; б – маховик з важелями після досягнення холостих обертів двигуна; в – маховик з напрямними перед запуском; г – маховик з напрямними після досягнення холостих обертів двигуна; 1 – диск; 2 – зубчаста реборда; 3 – маточина; 4 – важіль; 5, 7 – груз; 6 – напрямні; 8 – пружина

Поставлена задача вирішується тим, що на диску 1 шарнірно встановлено важелі 4, на кінцях яких закріплено грузи 5 або на диску 1 жорстко закріплено напрямні 6, у яких розташовано грузи 7.

Важелі 4 притягнуто пружинами 8 до маточини 3 так, що грузи 5 упираються у неї, або грузи 7 притягнуто пружинами до маточини 3 так, що вони впираються у неї.

Сила пружин 8 розрахована так, що при частоті обертання маховика, яка дорівнює холостим обертам двигуна, важелі 4 відхиляються і грузи 5 впираються у реборду 2 маховика або грузи 7 переміщуються по напрямних 6 і впираються у реборду 2 маховика.

Шарнірне встановлення на диску 1 важелів 4, на кінцях яких закріплено грузи 5 або жорстке закріплення на диску 1 напрямних 6, у яких розташовано грузи 7, дозволяє грузам вільно переміщатись під дією пружин та сил інерції.

Притягування важелів 4 пружинами 8 до маточини 3 так, що грузи 5 впираються у неї, або притягування грузів 7 пружинами до маточини 3 так, що вони впираються у неї, дозволяє зосередити основну масу маховика біля маточини 3 і максимально зменшити силу інерції при запуску двигуна.

Розрахунок сили пружин 8 так, що при частоті обертання маховика, яка дорівнює холостим обертам двигуна, важелі 4 відхиляються і грузи 5 упираються у реборду 2 маховика або грузи 7 переміщуються по напрямних 6 і впираються у реборду 2 маховика дозволяє максимально збільшити силу інерції маховика при досягненні холостих обертів двигуна. Маховик зі змінним моментом інерції працює наступним чином.

Перед запуском двигуна пружини 8 діють на важелі 4 з грузами 5 або на грузи 7 і притягують їх до маточини 3 так, що вони впираються у неї. Тому при запуску двигуна сила інерції маховика мінімальна.

Після запуску двигуна на грузи 5 або 7 діє відцентрова сила, яка їх відхиляє від маточини 3 і при досягненні двигуном холостих обертів притискає до зубчастої реборди 2. У такому положенні грузів 5 або 7 сила інерції маховика максимальна.

Методика розрахунку маховика. Ємність маховика визначається частотою обертання, масою і його геометричними розмірами (зовнішнім і внутрішнім радіусами).

Енергія, що запасається маховиком, визначається за формулою:

$$W = \frac{E}{3600}, \text{Вт} \times \text{год};$$

де E визначається за формулою:

$$E = \frac{J(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2}, \text{Дж};$$

де ω_1 – максимальна кутова швидкість обертання маховика, $с^{-1}$; ω_2 – мінімальна кутова швидкість обертання маховика, $с^{-1}$; J – момент інерції, кг×м^2.

Момент інерції визначається за формулою:

– запуск двигуна:

$$J_1 = \frac{MR^2}{2}, \text{Дж};$$

– експлуатаційний режим роботи двигуна:

$$J_2 = \frac{(M+m)R^2}{2}, \text{Дж};$$

де M і m – зосереджена маса маховика при запуску і зосереджена маса маховика при експлуатаційному режимі роботи, кг.

Висновки та рекомендації. Застосування запропонованого маховика дозволить полегшити запуск двигуна та зменшити витрати енергії завдяки перерозподілу основної маси маховика між центром та периферією і відповідного зменшення або збільшення моменту інерції.

Розробка рекомендована для застосування у складі поршневих двигунів, режим роботи яких пов’язано з частими зупинками та запусками.

Для забезпечення синхронізації роботи механізму пружини мають бути однакової довжини і жорсткості.

Перед установленням грузи мають бути зважені. Різниця маси грузів може становити не більше 1…2 % .

Маховик необхідно статично відбалансувати при розведених грузах. Після встановлення маховика на колінчастий вал останній має бути відбалансовано динамічно при робочій частоті обертання.

Для запобігання заклинюванню грузів у напрямних вони повинні бути ретельно механічно оброблені й змащені мастилом.

Кількість грузів у маховику може відрізнятись від кількості, наведеної на рис. 1. Рекомендується встановлювати парну кількість грузів, що значно полегшує вирівнювання дисбалансу як при монтажі, так і при балансуванні.

За необхідності заміни груза протилежні грузи повинні бути підібрані за масою й мінятись парами.

Для досягнення максимального ефекту від запропонованого рішення маса додаткових грузів повинна наближатись до маси основного маховика. В такому випадку зміна моменту інерції буде суттєвою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Что такое маховик и зачем он нужен двигателю – прототип : веб-сайт. URL : http://howcarworks.ru/

2. Двигатель внутреннего сгорания : веб-сайт. URL : http://systemsauto.ru

3. Гоц А. Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей : учеб. пособие. Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. 124 с.

4. Инструкции для дизелей типа 50-98 МС. Компоненты и обслуживание. Часть 1. Копенгаген, Дания : MAN B&W Diesel A/S. 241 с.

5. Инструкции для дизелей типа 50-98 МС. Компоненты и обслуживание. Часть 2. Копенгаген, Дания : MAN B&W Diesel A/S. 249 с.

6. Инструкции для дизелей типа 50-98 МС. Эксплуатация. Часть V, VI. Копенгаген, Дания : MAN B&W Diesel A/S. 339 с.

7. Судновий малообертовий двигун : пат. 117870 України, МПК Ф02Б 39/04 (2006.01). № u 2017 01079 ; заявл. 06.02.2017, опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

8. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Operation. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Rorea 641-370. 544 p.

9. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Maintenance. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Rorea 641-370. 612 p.

10. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Description. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Rorea 641-370. 422 p.

11. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Москва : Машиностроение, 1982. 728 с.

12. Иванов М. Н. Детали машин. Москва : Высш. школа, 1976. 399 с.

13. Кузьмин А. В., Чернин И. М., Козинцов Б. С. Расчеты деталей машин : справ. пособие. Минск : Выш. шк., 1986. 400 с.

14. Таровик Н. Г., Кулик Т. А., Котушенко Е. С. Детали машин : Соединительные муфты : справочное пособие Краматорск : ДГМА, 2013. 35 с.

REFERENCES

1. Chto takoe makhovik i zachem on nuzhen dvigatelyu – prototip. Retrieved from : http://howcarworks.ru/

2. Dvigatelj vnutrennego sgoraniya. Retrieved from : http://systemsauto.ru

3. Goc, A. N. (2005). *Kinematika i dinamika krivoshipno-shatunnogo mekhanizma porshnevihkh dvigateleyj* : ucheb. Posobie. Vladimir: Redakcionno-izdateljskiyj kompleks VlGU.

4. *Komponentih i obsluzhivanie* : instrukcii dlya dizeleyj tipa 50-98 MS. Part 1. Kopengagen, Daniya : MAN B&W Diesel A/S.

5. *Komponentih i obsluzhivanie* : instrukcii dlya dizeleyj tipa 50-98 MS. Part 2. Kopengagen, Daniya : MAN B&W Diesel A/S.

6. *Komponentih i obsluzhivanie* : instrukcii dlya dizeleyj tipa 50-98 MS. Part V, VI. Kopengagen, Daniya : MAN B&W Diesel A/S..

7. Pat. UA117870U Ukrainy, MPK F02B 39/04 (2006.01). Sudnovy maloobertovy dvygun/Samarin O.E.; zayavnyk i vlasnyk patenty Khersonska derzhavna morska akademiy. – № u2017 01079 zayavl. 06.02.2017, opubl. 10.07.2017, Bul. №13.

8. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Operation. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Rorea 641-370.

9. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Maintenance. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Rorea 641-370.

10. Manual Electronic Instruction. Engine Type 8K90MC-C. Description. Doosan Engine Co., Ltd. Engine customer service tesv/ 69-3, Sinchon-dong, Changwon-City, Gyeongnam, Rorea 641-370.

11. Anurjev, V. I. (1982). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya*. Moskva : Mashinostroenie.

12. Ivanov, M. N. (1976). *Detali mashin.* Moskva : Vihsh. shkola.

13. Kuzjmin, A. V., Chernin, I. M., & Kozincov, B. S. (1986). *Raschetih detaleyj mashi*n : sprav. posobie. Minsk : Vihsh. shk.

14. Tarovik, N. G., Kulik, T. A. & Kotushenko, E. S. *Detali mashin* : *Soediniteljnihe muftih* : spravochnoe posobie. Kramatorsk : DGMA.

Самарин А. Е. МАХОВИК ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМ МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

Предложена конструкция маховика поршневого двигателя, в котором при запуске двигателя основная масса маховика концентрируется в центре у ступицы, а при достижении холостых оборотов основная масса перемещается к зубчатой реборде на периферию маховика. Это достигается тем, что на диске шарнирно установлены рычаги, на концах которых закреплены грузы или на диске жестко закреплены направляющие, в которых расположены грузы. Рычаги притянуты пружинами к ступице так, что грузы упираются в неё, или грузы притянуты пружинами к ступице так, что они упираются в неё. Сила пружин рассчитана так, что при частоте вращения маховика, равной холостым оборотам двигателя, рычаги отклоняются и грузы упираются в реборду маховика или грузы перемещаются по направляющим и упираются в реборду маховика.

Маховик с переменным моментом инерции работает следующим образом. Перед запуском двигателя пружины действуют на рычаги с грузами или на грузы и притягивают их к ступице так, что они упираются в неё. Поэтому при запуске двигателя сила инерции маховика минимальна. После запуска двигателя на грузы действует центробежная сила, которая их отклоняет от ступицы и при достижении двигателем холостых оборотов прижимает к зубчатой реборде. В таком положении грузов сила инерции маховика максимальна. Применение маховика позволит облегчить запуск двигателя и уменьшить затраты энергии за счет перераспределения основной массы маховика между центром и периферией и соответствующего уменьшения или увеличения силы инерции.

Ключевые слова: *маховик, коленчатый вал, поршневой двигатель, момент инерции, центробежная сила.*

Samarin O. Ye. ENGINE FLYWHEEL WITH VARIABLE MOMENT OF INERTIA

A piston engine flywheel design is proposed, where, when stratring the engine, the main flywheel mass, concentrates at the center of the hub, and upon reaching the engine idle speed, the main flywheel mass shifts to the tooth flange on the periphery of the flywheel. This is achieved by the fact that the levers are installed pivotally on the disc with the load weights on the end points or there are guides, fixed rigidly on the disc, at which the load weights are located. The levers are tightened to the hub in such a way, that the load weights bump into the hub or the load weights are tightened to the hub by the springs in such a way, that they bump into it. The spring force is designed so that when the flywheel rotation frequency is equal to the engine idle speed, the levers depart and the load weights bump into the flywheel flange or the load weights move by the guides and bump into the flywheel flange.

The following is the performance description of the flywheel with variable moment of inertia. Before the engine is started, the springs exert on the levers with the load weights or on the load weights and tighten the latter to the hub in such a way, that they bump into it. So while starting the engine, the flywheel inertia force is minimal. After the engine is started, the centrifugal force exerts on the load weights and deflects them from reaching the hub and upon engine reaching idle speed, tightens them to the tooth flange. In this position of the load weights, the flywheel inertia force is maximum. The use of the proposed flywheel will make it easier to start the engine and reduce energy consumption due to the redistribution of the bulk of the flywheel between the center and the periphery and the corresponding reduction or increase of the moment of inertia. The development is recommended for use in piston engines whose operating mode is associated with frequent stops and starts. To ensure that the mechanism of the mechanism is synchronized, the springs must be of the same length and rigidity. The proposed flywheel application will ease the engine start and reduce energy costs by redistributing the main flywheel mass between the center and periphery and corresponding increase or decrease of the inertia force.

Keywords: *flywheel, crankshaft, piston engine, the moment of inertia, centrifugal force.*

© Самарін О. Є.

Статтю прийнято
до редакції 21.12.18