



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 89072

(13) C2

(51) МПК (2009)

H02K 21/12

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) ТОРЦЕВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З КОМБІНОВАНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

1

2

(21) а200708842

(22) 31.07.2007

(24) 25.12.2009

(46) 25.12.2009, Бюл.№ 24, 2009 р.

(72) БУЛГАР ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ, ІВЛЄВ АНАТОЛІЙ ДМИТРОВИЧ, ЯКОВЛЕВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ, ІВЛЄВ ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ

(73) БУЛГАР ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ, ІВЛЄВ АНАТОЛІЙ ДМИТРОВИЧ, ЯКОВЛЕВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ, ІВЛЄВ ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ

(56) UA 69069, (Севастопольський військово-морський ордена червоної зірки інститут ім. П.С. Нахімова), 16.08.2004

US 5289072, (J.M. Voith GmbH, Heidenheim, Fed. Rep. of Germany), 22.02.1994

US 5973436, (Rolls-Royce Power Engineering plc), 26.10.1999

US 4211945, (Gen-Tech, Inc.), 08.07.1980

UA 60003, (Піришин Віктор Іванович), 15.09.2003

UA 200604920, (Булгар Віктор Васильович), 12.11.2007

(57) Торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням, що містить

статор з пазами для укладання обмотки якоря, ротор з феромагнітними полюсами й постійними магнітами, шихтований пакет якоря з якірною обмоткою й тороїдальну обмотку збудження, який відрізняється тим, що статор виконаний з ряду окремих, магнітно не зв'язаних феромагнітних елементів П-подібної форми, основа - стрижні, які закріплені в немагнітних дисках торцевих щитів, а зубці кожного П-подібного елемента формують основні внутрішні й зовнішні кільцеві магнітопроводи якоря разом із проміжними нерухомими магнітопроводами якоря, що складаються з ряду зубцевих пластин, зафіксованих у немагнітних кільцях, що утворюють магнітопровід статора, в проміжках між П-подібними елементами статора розташовані модулі дискового ротора, що містять рівну кількість феромагнітних полюсів і постійних магнітів, установлених симетрично внутрішніх і зовнішніх магнітопроводів, що несуть секції обмотки якоря, струми яких комутуються комутатором-колектором, установленим нерухомо в торцевій частині двигуна, при цьому щітковий вузол комутатора-колектора жорстко з'єднаний з валом двигуна.

Винахід відноситься до галузі електромашинобудування й може бути використаним в електроприводах загальнопромислових механізмів, зокрема в електроприводах транспортних установок, механізмах ліфтів, прокатних станів й інших промислових пристроїв, які мають потребу у високій швидкодії в динамічних режимах.

Відомі різноманітні конструктивні схеми електричних машин, в яких реалізується спосіб комбінованого збудження. При цьому робочий магнітний потік створюється за рахунок одночасної дії обмоток збудження (ОЗ) і постійних магнітів (ПМ), магніторушійні сили (МРС) яких можуть бути включені в загальний магнітний ланцюг електричної машини як паралельно, так і послідовно. Так, наприклад, відома модифікація безконтактної електричної машини з кігтеподібними полюсами й зовнішньо замкненим магнітним потоком, в якій між шайбами ротора поміщений кільцевий магніт з осьовим намагнічуванням. При знеструмлених обмотках збу-

дження основний магнітний потік створюється тільки постійними магнітами. При включенні обмотки збудження електрична машина переходить у режим змішаного збудження, коли частина робочого потоку створюється магнітом, а частина - обмотками збудження [див. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. - М.: Высшая школа, 1990. - С.175].

Недоліком подібних електричних машин є підвищена маса, наявність додаткових технологічних перевитрат зазорів, а також підвищене розсіювання через наявність зовнішнього магнітопроводу.

Найбільш близьким до конструкції, що заявляється, є індукторний генератор з комбінованим збудженням, в якому в проміжках між феромагнітними полюсними виступами ротора розміщені призматичні постійні магніти, прикріплені до ротора за допомогою заливки немагнітним сплавом, а статор містить шихтований пакет якоря з якірною обмоткою й кільцеву обмотку збудження. Магнітний потік

(13) C2

(11) 89072

(19) UA

$\Phi_b$ , створений обмотками збудження, замикається в поздовжньому напрямку, як і у відомій індукторній машині, проходячи послідовно всі елементи магнітного ланцюга електричної машини, включаючи феромагнітні полюсні виступи, робочий повітряний зазор  $\delta_o$  і додатковий технологічний повітряний зазор  $\delta_r$ . Магнітний потік постійних магнітів  $\Phi_m$  має два контури замикання: частина магнітного потоку замикається в поперечній площині якоря, складаючись з потоком  $\Phi_b$ ; друга частина магнітного потоку  $\Phi_m$  замикається в поздовжньому напрямку електричної машини. Причому, при узгодженому напрямку поперечних потоків  $\Phi_b$  і  $\Phi_m$  у робочому зазорі  $\delta_o$  їхні напрямки в поздовжньому напрямку ( $\delta_r$ ) протилежні [див. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. - М.: Высшая школа, 1990. - С.137, 178].

Конструкція даної електричної машини обрана прототипом.

Прототип і конструкція, що заявляється, мають наступні спільні ознаки:

- статор з пазами для укладки обмотки якоря;
- ротор з феромагнітними полюсами і постійними магнітами;
- шихтований пакет якоря з якірною обмоткою;
- тородальна обмотка збудження.

Прототип має наступні недоліки:

- наявність масивного осердя ротора, який необхідний для замикання загального магнітного потоку електричної машини;

- наявність додаткового технологічного повітряного зазору;

- асиметрія магнітних ланцюгів, внаслідок наявності двох контурів замикання магнітного потоку постійних магнітів.

В основу винаходу поставлена задача створити торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням, в якому за рахунок іншого виконання статора й схеми з'єднання нових і відомих вузлів та деталей, забезпечити зменшення маси обертових частин двигуна, спрощення виготовлення й зниження собівартості двигуна, а також підвищення питомих значень потужності й моменту.

Поставлена задача вирішена в конструкції торцевого електричного двигуна постійного струму з комбінованим збудженням, що містить статор з пазами для укладання обмотки якоря, ротор з феромагнітними полюсами й постійними магнітами, шихтований пакет якоря з якірною обмоткою й тородальну обмотку збудження який відрізняється тим, що статор виконаний з ряду окремих, магнітно не зв'язаних феромагнітних елементів П-подібної форми, основа - стрижні яких закріплені в немагнітних дисках торцевих щитів, а зубці кожного П-подібного елемента формують основні внутрішні й зовнішні кільцеві магнітопроводи якоря разом із проміжними нерухомими магнітопроводами якоря, що складаються з ряду зубцевих пластин, зафіксованих у немагнітних кільцях, що утворюють магнітопровід статора, окрім того в проміжках між П-подібними елементами статора розташовані модулі дискового ротора, що містять рівну кількість феромагнітних полюсів і постійних магнітів, установлених симетрично внутрішніх і

зовнішніх магнітопроводів, що несуть секції обмотки якоря, струми яких комутуються комутатором - колектором, установленим нерухомо в торцевій частині двигуна, при цьому щітковий вузол комутатора - колектора жорстко з'єднаний з валом двигуна.

У заявленому двигуні комбіноване збудження забезпечується наявністю однієї загальної тородальної обмотки збудження й ряду постійних магнітів, у певній послідовності установлених на дисковому роторі таким чином, що на одному його полюсному поділу розташований феромагнітний полюс, а на наступному - постійний магніт, причому число феромагнітних полюсів завжди дорівнює числу постійних магнітів, забезпечуючи загальне число полюсних поділів, рівне 2Р. За рахунок особливого способу виготовлення магнітної системи статора забезпечується можливість різкого ослаблення реакції якоря двигуна, що призводить до підвищення його перевантажувальної здатності, і, відповідно, до підвищення його швидкодії й зменшенню споживаної електроенергії в перехідних режимах. При цьому значно зменшується маса обертових частин, спрощується технологія виготовлення двигуна, зменшується його собівартість, а конструктивна схема двигуна забезпечує можливість модульного принципу його побудови, тобто послідовного чергування модуля якоря (зубцева зона і секції обмотки якоря) і модуля дискового ротора (немагнітний диск із феромагнітними полюсами й постійними магнітами). Це значною мірою підвищує питомі значення потужності й моменту.

На відміну від прототипу в двигуні, що заявляється, магнітні потоки обмотки збудження ( $\Phi_z$ ) і постійних магнітів ( $\Phi_m$ ) замикаються у двох паралельних площинах. При цьому на ділянках (полюсних діленнях) дискового ротора з феромагнітними полюсами забезпечується магнітний потік, що замикається через робочий зазор  $\delta_o$ , що відповідає величині потоку  $\Phi_z$ , тобто потоку магніторушійної сили обмотки збудження. На полюсних діленнях дискового ротора з постійними магнітами магнітний потік у робочому магнітному зазорі визначається різницею значень спрямованих на зустріч потоків  $\Phi_m$  і  $\Phi_z$ , тобто  $\Phi_\delta = \Phi_m - \Phi_z$ . Однак, зважаючи на те, що магнітна проникність постійних магнітів, рівна  $(2 \div 10) \cdot 10^6$  (Л1, с.49), де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнітна постійна, для зовнішнього магнітного потоку ( $\Phi_z$ ) ділянка з постійними магнітами представляє великий магнітний опір, чим пояснюється незначне збільшення магніторушійної сили постійних магнітів  $F_m$  у порівнянні із магніторушійною силою обмотки збудження  $F_z$ . У запропонованій конструкції для створення однакових за значенням магнітних потоків  $\Phi_\delta = \Phi_z$  повинно виконуватися співвідношення:  $F_m = (1,1 \div 1,15) \cdot F_z$ , що значно менше, ніж у прототипі через наявність шунтуючого магнітного потоку останнього. У заявленому двигуні відсутні загальні ділянки магнітного ланцюга двигуна, по яким одночасно проходили б магнітні потоки  $\Phi_m$  і  $\Phi_z$ , чим пояснюється, на відміну від прототипу, відсутність асиметрії магнітних ланцюгів.

У заявленому торцевому електричному двигуні постійного струму з комбінованим збудженням

немає масивного феромагнітного осердя ротора, що зменшує масу обертової частини двигуна, відповідно, підвищує його швидкодію. Відсутність загального ярма якоря і ярма обмотки збудження забезпечує шлях замикання магнітного потоку магніторушійної сили обмотки якоря тільки через бічні поверхні зубців модуля якоря й повітряні проміжки між ними (пази), що мають малу магнітну проникність, чим обумовлене обмеження реакції якоря, можливість одержання більших перевантажень по струму, обумовлених, в основному, умовою відсутності перекидання магнітного поля в робочому повітряному зазорі. Підвищення переважувальної здатності двигуна покращує динамічні характеристики (прискорення, час пуску й гальмування), що підвищує продуктивність відповідної промислової установки, зменшує втрати електроенергії в перехідних режимах.

В свою чергу, обмеження реакції якоря наявністю ряду повітряних проміжків (пазів) на шляху замикання магнітного потоку магніторушійної сили обмотки якоря забезпечує можливість вибору величини робочого повітряного зазору між модулем якоря й модулем дискового ротора на шляху замикання основного магнітного потоку двигуна тільки виходячи з технологічних можливостей забезпечення його мінімального значення, чим обумовлене зменшення як розмірів котушок обмотки збудження, так і електричних втрат в них.

У запропонованому двигуні досить просто реалізується модульний принцип побудови сучасних спеціальних електродвигунів, при якому в аксіальному напрямку чергуються два конструктивних елементи, наприклад, модуль якоря, виготовлений на основі немагнітного диска з радіально розташованими феромагнітними стрижнями, що формують зубцеву зону, в пазах якої укладені секції обмотки якоря й модуль дискового ротора, що складається з немагнітного диска з феромагнітними виступами - полюсами, що чергуються, і постійними магнітами. Подібна конструктивна схема двигуна забезпечує підвищення питомих значень потужності й моменту двигуна, що особливо важливо при низьких номінальних (безредукторних) частотах обертання при значному зменшенні трудомісткості його виготовлення (тобто зменшенні собівартості) (див. опис до патенту України №69152 А, Н02Д057/00, Н02Д023/66, і опис до патенту Росії №2286643).

Торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням представлений на кресленнях, де:

Фіг.1 - конструктивна схема двигуна (поздовжній розріз);

Фіг.2 - двигун, аксонометрія (варіант із одним дисковим ротором);

Фіг.3 - модуль дискового ротора, аксонометрія;

Фіг.4 - схема з'єднання секцій обмотки якоря двигуна.

Торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням містить статор 1, що складається з основних 2, 5 і проміжних 3, 4 модулів якоря, ротор 6, що включає в собі два модулі дискового ротора 7, 8 і комутатор - колектор 9. На внутрішній поверхні основних модулів якоря

2, 5 статора 1 розташовані тороїдальні котушки обмотки збудження 10, 11.

Торцеві щити 12, 13 статора 1 являють собою немагнітні диски 14, 15 установлені нерухомо відносно вала 16 за допомогою підшипників 17, 18. З валом 16 жорстко зчленовані два модулі дискового ротора 7, 8, кожний з яких складається з немагнітних кілець 19, 20, 21, у проміжках між якими по черзі закріплені феромагнітні полюси 22 і постійні магніти 23 внутрішніх кільцевих сердечників якоря 24 і феромагнітні полюси 25 і постійні магніти 26 зовнішніх кільцевих сердечників якоря 27 (Фіг.3). Модулі дискового ротора 7, 8 відділені від модулів якоря 2, 3, 4, 5 робочим повітряним зазором  $\delta_0$ . При цьому, кількість феромагнітних полюсів 22 і постійних магнітів 23, і, відповідно, феромагнітних полюсів 25 і постійних магнітів 26 рівне й становить число полюсних поділів одного модуля якоря  $2\tau=2p$ , де  $p$  - число пар обертових полюсів ротора,  $\tau$  - величина полюсного поділу модуля.

На відміну від класичної конструкції двигуна постійного струму (з якорем циліндричного типу) у запропонованому двигуні, незалежно від числа полюсних поділів  $2\tau=2p$ , тільки одна загальна обмотка збудження (що складається з однієї або двох котушок 10, 11 залежно від числа модулів ротора) і немає обмоток додаткових полюсів (тому що обмеження реакції якоря забезпечується конструктивними способами). Цим обумовлене значне зменшення втрат енергії двигуна, що заявляється.

У двигуні, що заявляється, статор 1 складається із двох основних модулів якоря 2, 5 і проміжних модулів 3, 4. Магнітопровід основних модулів якоря 2, 5 складається з ряду магнітної не зв'язаних феромагнітних елементів П-подібної форми 28 (Фіг.1, 2), основи - стрижні 29 яких закріплені в немагнітних дисках 14, 15 торцевих щитів 12, 13. Зубці 30 кожного з елементів П-подібної форми 28 утворюють внутрішні магнітопроводи якоря 24, а зубці 31 П-подібних елементів 28 утворюють зовнішні магнітопроводи якоря 27.

Проміжні модулі якоря 3, 4, що складаються з ряду зубцевих пластин (на кресленні окремо не показано), зафіксовані в немагнітних кільцях 32, 33, 34 за допомогою додаткового підшипника 35. При необхідності кількість проміжних модулів якоря може бути змінена відповідно до заданих параметрів електричного двигуна.

Як видно з Фіг.2, конструкція торцевого електричного двигуна постійного струму, що заявляється, відрізняється від класичних конструктивних схем машин постійного струму відсутністю як загального феромагнітного ярма обмотки збудження, так і спинки якоря. Дана обставина забезпечує різке обмеження реакції якоря торцевого електричного двигуна постійного струму й сприяє підвищенню переважувальної здатності двигуна. Так, наприклад, попередній розрахунок запропонованого двигуна потужністю  $P_n=75\text{кВт}$  при полюсному поділі по середньому діаметру внутрішнього магнітопроводу якоря  $\tau_{\text{сер.1}}=0,1046\text{м}$  і ширині паза (проміжку між феромагнітними елементами П-подібної форми 28)  $vp=0,015\text{м}$ , загальний повітряний зазор на шляху поперечного поля реакції яко-

ря при числі зубцевих поділів на полюсний поділ  $Z\tau=3$  складає (Фіг.2):

$\delta_{\Sigma}=2 \cdot Z\tau \cdot \text{вп} + 4 \cdot \delta_0 = 2 \cdot 3 \cdot 0,015 + 4 \cdot 0,0015 = 0,096\text{м}$  (де  $\delta_0=0,0015$  - величина робочого повітряного зазору, прийнята з умов технологічних можливостей).

Розрахункове номінальне значення магнітної індукції поперечного поля реакції якоря  $B_{я..р..н}=0,09\text{Тл}$ , що забезпечує переважувальну здатність двигуна, виходячи з умов відсутності "перекидання" магнітного поля на ділянці кільцевого магнітопроводу якоря, наприклад, 24, що відповідає полюсному поділу:

$$\lambda = B_{\delta..н.} / B_{я..р..н.} = 0,8 / 0,09 = 9,$$

де  $B_{\delta..н.}=0,8\text{Тл}$  - номінальне значення магнітної індукції в робочому повітряному зазорі.

З огляду на те, що для машин постійного струму серії П коефіцієнт переваження по струму знаходиться в межах  $\lambda=2\div 3$ , очевидно його трикратне перевищення в торцевому електричному двигуні постійного струму, що заявляється, це забезпечує підвищення швидкодії, і, відповідно, продуктивності механізму з даним торцевим електричним двигуном постійного струму.

У двигуні, що заявляється, для реалізації обраної типової принципової схеми з'єднання секцій обмотки якоря попередньо утворюють укрупнені секції, що складаються із секцій внутрішнього, наприклад, 24, і секцій зовнішнього, наприклад, 27, магнітопроводів основного модуля якоря 2. Укрупнені секції одношарового укладання одного модуля утворюють одну паралельну вітку 36. Друга паралельна вітка 37 подібним чином утворюється з укрупнених секцій другого основного модуля 5. При цьому секції обмотки якоря 37 основного модуля якоря 5 укладаються зі зрушенням у полюсний поділ  $\tau$  відносно провідників секцій обмотки якоря 36 основного модуля якоря 2. Подібним чином реалізуються паралельні вітки 38 проміжного модуля якоря 3 і 39 проміжного модуля якоря 4 (Фіг.4).

Відносне зрушення секцій обмотки якоря кожної пари протилежних модулів якоря 2 і 5, 3 і 4 і т.д. забезпечує компенсацію магніторушійних сил струмів лобових частин обмотки якоря, тобто відсутність пульсуючого магнітного потоку струмів лобових частин на шляху основного робочого магнітного потоку двигуна.

Живлення замкнутої обмотки якоря, утвореної секціями модулів якоря 2, 3, 4, 5 забезпечується комутатором - колектором 9, який за допомогою конструкції 40, що кріпить, і підшипників 41 встановлюється нерухомо і являє собою колектор звичайної машини постійного струму, з обох сторін якої через ізоляційні прокладки 42 додатково встановлені контактні кільця 43, 44. До колекторних пластин 45, у відповідності до схеми обмотки, підключені виводи секцій модулів якоря 2, 3, 4, 5, об'єднані джгутом 46.

Щіткотримачі 47 із щітками 48 (щітковий вузол) конструктивно з'єднані із траверсою 49, жорстко з'єднаної з валом 16. Напруга мережі підводиться до нерухомих, ізольованих від корпусу кілець 43, 44. Щітки 48 комутатора - колектора 9, одночасно контактуючи з контактними кільцями 43, 44 і відповідними колекторними пластинами 45, виконують

функції як струмопроводу, так і струморозподілу секцій 36, 37, 38, 39 модулів якоря 2, 3, 4, 5.

Працює заявлений двигун у такий спосіб. При поданні напруги  $U'$  на секції обмотки якоря 36, 37, 38, 39 і котушки обмотки збудження 10, 11 у двигуні виникає магнітний потік  $\Phi_{\Sigma}$ , який замикається через ділянки ротора 6 з феромагнітними полюсами 22, 25, що разом з магнітним потоком  $\Phi_m$  (Фіг.1, 2, 3, 4), створеним магніторушійною силою постійних магнітів 23, 26 утворює основний магнітний потік  $\Phi_0 = \Phi_{\Sigma} = \Phi_m$ . Взаємодією основного магнітного потоку  $\Phi_0$  й струмів провідників обмотки якоря модулів 2, 3, 4, 5 створюється електромагнітний момент, під дією якого ротор 6 приводиться в обертання. Комутатор - колектор 9 перемикає струми в секціях обмотки якоря 36, 37, 38, 39 таким чином, щоб при обертанні в одну сторону струми провідників, що перебувають у цей момент проти феромагнітних полюсів і постійних магнітів залишалися незмінними. Регулювання частоти обертання й реверс двигуна відбувається відомими для класичних машин способами. Однак у запропонованому двигуні з комбінованим збудженням реалізується й варіант регулювання частоти обертання ослабленням величини основного магнітного потоку повним відключенням обмотки збудження, що забезпечує режим енергозбереження для ряду промислових механізмів, що працюють у режимі частих реверсів, які вимагають підвищеної швидкості переміщення при малих навантаженнях (зворотний хід поздовжньо - стругального верстата, механізмів прокатних станів, підйомно-транспортного устаткування та ін.).

Енергозбереження забезпечує й спеціальна конструкція статора, яка, на відміну від класичних машин, не має загального ярма обмотки збудження й загальної спинки обмотки якоря, чим обумовлене як поліпшення тепловідводу якоря, так і різке ослаблення впливу реакції якоря й, відповідно, відсутність додаткових полюсів і втрат електричної потужності в їхніх обмотках.

Порівняльний аналіз основних показників двигуна постійного струму (ДПС) класичної конструкції типу П-92:  $P_n=75\text{кВт}$ ;  $n_n=1500\text{об/хв.}$ ;  $U'_n=220\text{В}$  і заявленого двигуна постійного струму з дисковим ротором (ДПСДР) з аналогічними вихідними параметрами дає наступні показники:

маса ДПС - 705кг;		
маса ДПСДР - 337кг;		
питомий	момент	ДПС:
$m_{\text{пит.}} = M_n / m_{\text{дв.}} = 0,64\text{Н}\cdot\text{м/кг}$ ;		
питомий момент ДПСДР: $m'_{\text{пит.}} = 1,46\text{Н}\cdot\text{м/кг}$ ;		
маса міді ДПС: $m_m = 90\text{кг}$ ;		
маса міді ДПСДР: $m'_m = 66\text{кг}$ ;		
момент інерції ДПС: $y = 1,75\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;		
момент інерції ДПСДР: $y' = 0,65\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;		
механічна постійна ДПС: $T_m = 0,65\text{с}$ ;		
механічна постійна ДПСДР: $T'_m = 0,24\text{с}$ ;		
втрата енергії при пуску в ДПС:		
$A_{\text{мех.}} = 27300\text{Дж}$ ;		
втрата енергії при пуску в ДПСДР:		
$A'_{\text{мех.}} = 9285\text{Дж}$ .		

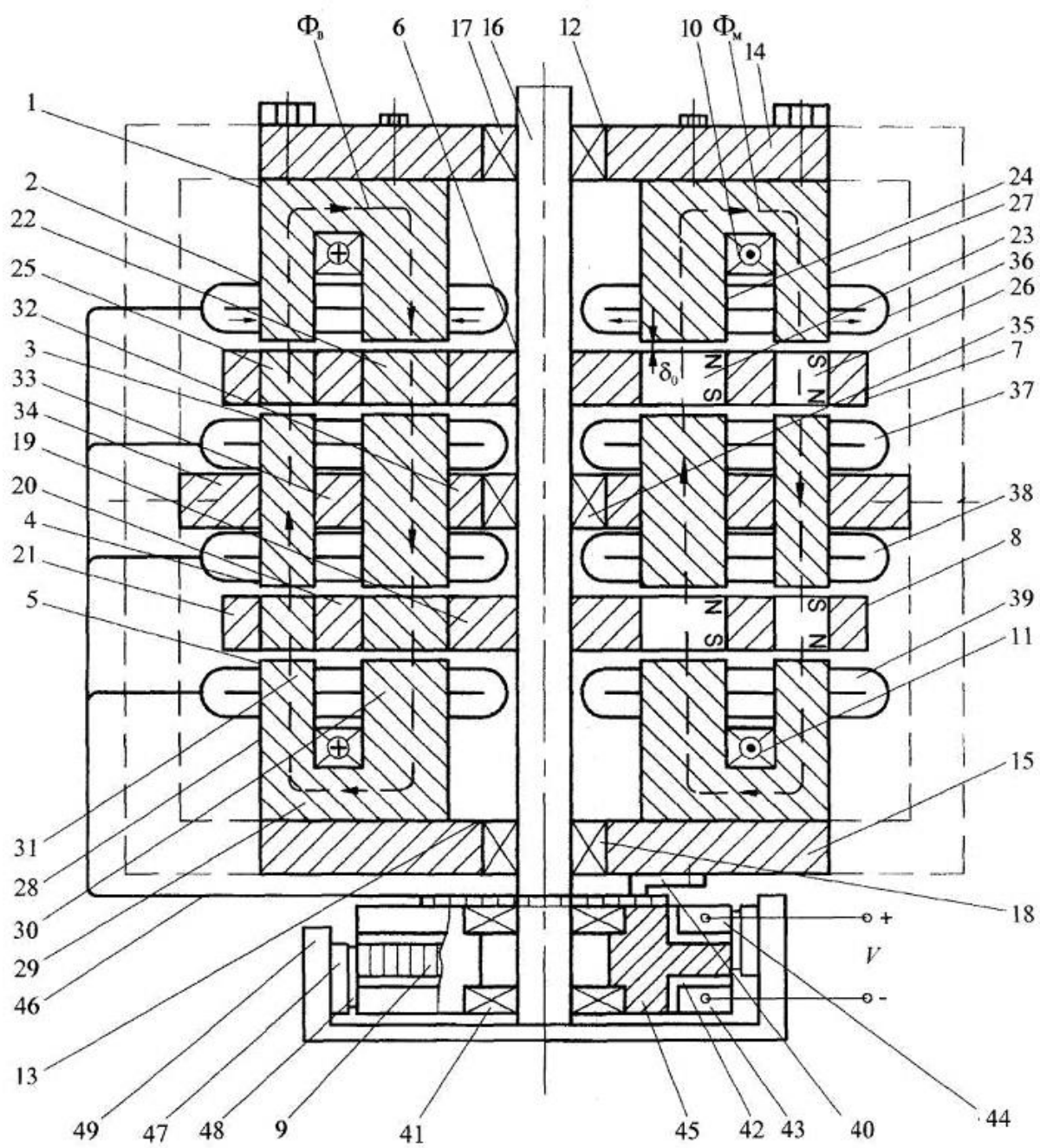


Fig. 1

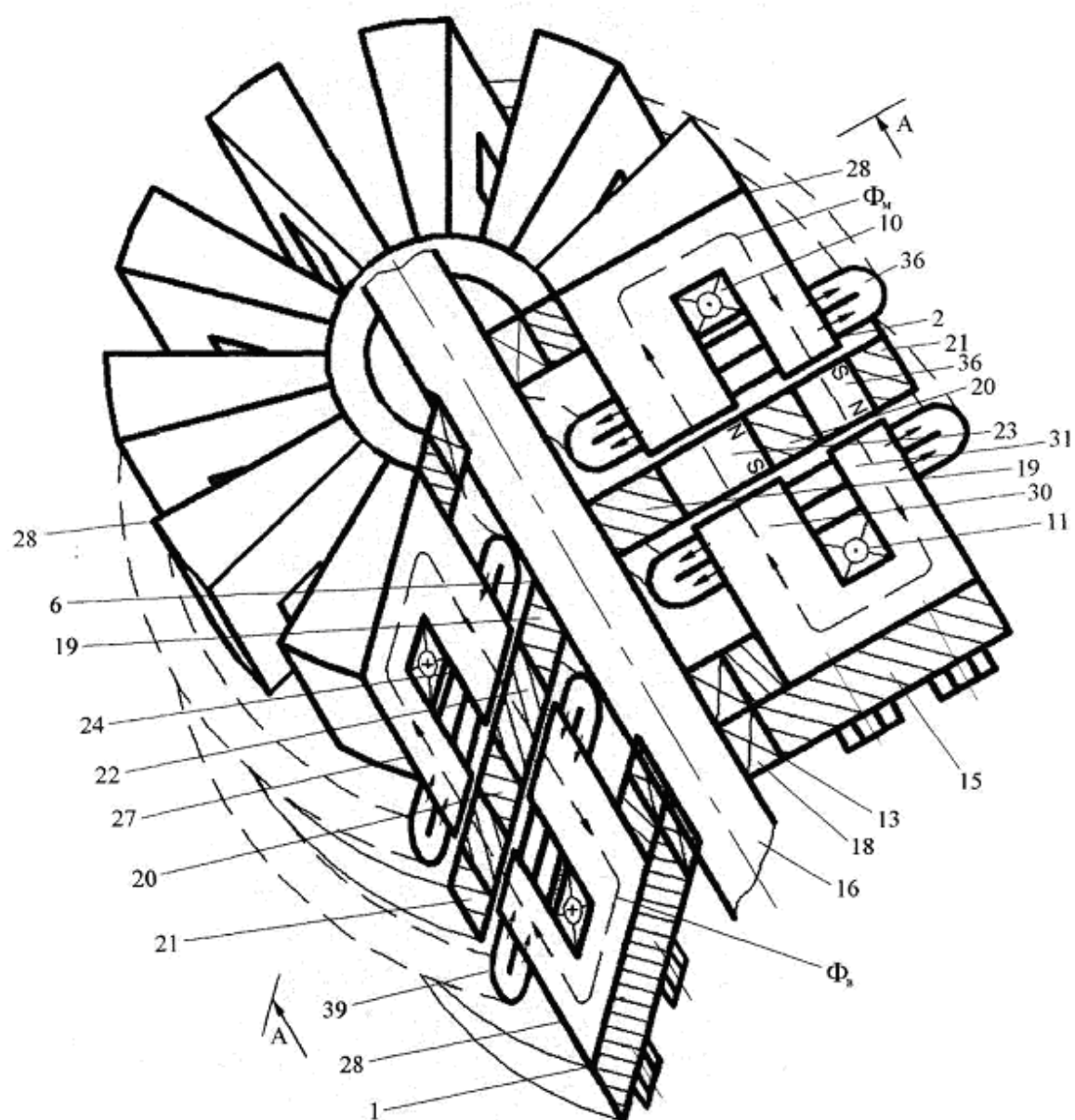


Fig. 2



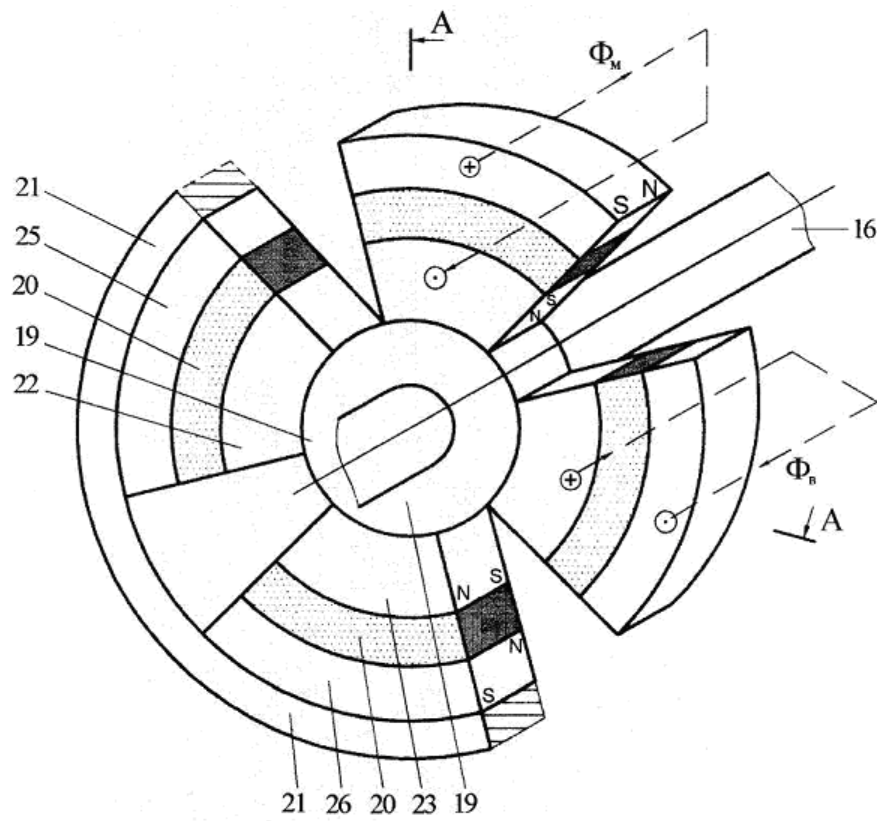


Fig. 3

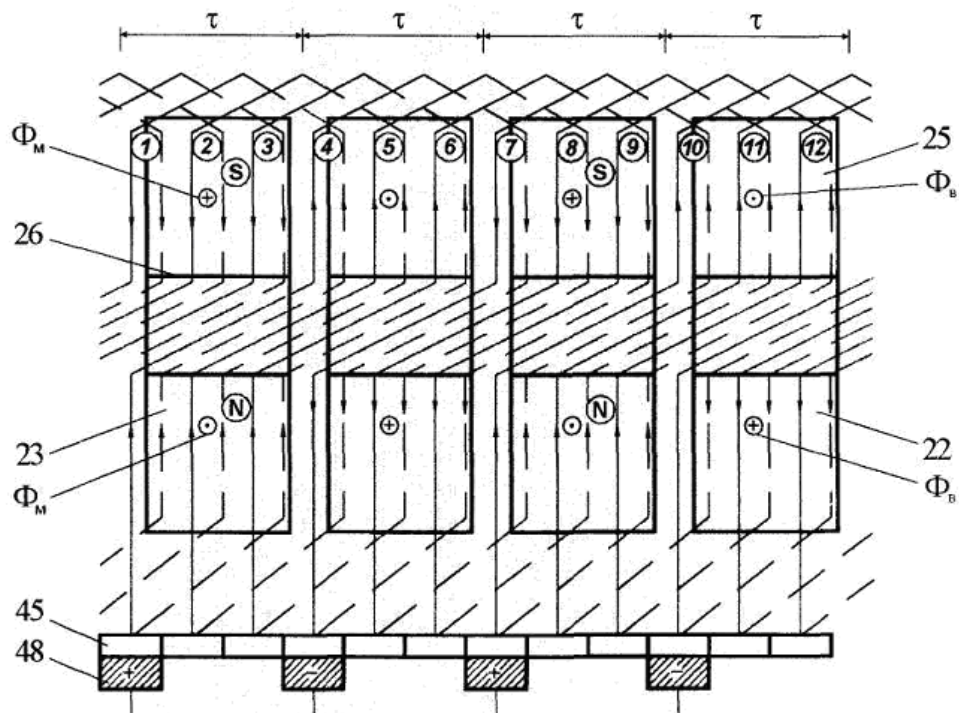


Fig. 4

