

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **239726**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **433289**

(51) Int.Cl.

F16F 15/03 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **18.03.2020**

(54) **Aktywne urządzenie wiroprowadowe do tłumienia drgań skrętnych w ruchu obrotowym**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

20.09.2021 BUP 25/21

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

03.01.2022 WUP 01/22

(73) Uprawniony z patentu:

**INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW
TECHNIKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK,
Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**TOMASZ SZMIDT, Warszawa, PL
ROBERT KONOWROCKI, Otwock, PL
DOMINIK PISARSKI, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Anna Grzelak

PL 239726 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest aktywne urządzenie wiroprądowe do tłumienia drgań skrętnych w ruchu obrotowym (obracających się wałów) – bazującego na oddziaływaniu siłowym powstającym w bezkontaktowych aktuatorach elektromagnetycznych w wyniku indukowania się prądów wirowych.

Zjawiska elektromagnetyczne wykorzystywane są przy konstrukcji różnorodnych tłumików drgań, w tym magneto- i elektroreologicznych oraz wiroprądowych (ECD – eddy current damper). Znakomitym źródłem wiedzy na temat ich konstrukcji są artykuły naukowe oraz bazy patentowe.

W artykule „Evaluation of eddy current damper for vibration control of a frame structure” J. Phys. Commun. 3 (2019) 055013, DOI: 10.1088/2399-6528/ab1deb, przedstawiono prototypowy tłumik wiroprądowy i przetestowano możliwość jego zastosowania do tłumienia drgań konstrukcji ramowej. Tłumik składa się z trzech głównych elementów: neodymowych magnesów trwałych (NdFeB), miedzianych płyt (materiał przewodzący) i aluminiowej ramy. Zastosowane magnesy mają prostokątny kształt i mogą być montowane biegunowo w orientacji alternatywnej lub jednokierunkowej oraz w dwóch prostopadłych kierunkach. Kluczową zaletą tego rozwiązania jest jego bezkontaktowa charakterystyka; nie istnieje tarcie mechaniczne. Przeprowadzone testy pokazują, że ten ECD jest w stanie zapewnić znaczny poziom tłumienia o wydajności porównywalnej z idealnym konwencjonalnym, liniowym amortyzatorem lepkim.

W 2010 r. w pracy zatytułowanej „Electromechanical Dampers for Vibration Control of Structures and Rotors” opublikowanej jako rozdział książki „Vibration Control” autorstwa A. Tonoli, N. Amati, M. Silvagni, DOI: 10.5772/10040, przedstawiono analizy teoretyczne i eksperymentalne czterech różnych typów tłumików elektromagnetycznych. Pierwszy jest typu ruchowego, co oznacza, że siła tłumiąca generowana jest wskutek indukcji prądów wirowych w metalowej płytce poruszającej się prostopadle do przechodzącego przez nią strumienia pola magnetycznego. Trzy pozostałe tłumiki są typu transformatorowego, a więc istotą ich działania jest zmiana – wskutek ruchu tłumionego elementu w obrębie szczeliny aktuatorów – strumienia magnetycznego przechodzącego przez obwody magnetyczne aktuatorów, co prowadzi do indukcji prądów wirowych w ich cewkach i rdzeniach.

Znany jest z opisu patentowego PL/EP 3180542 amortyzator magnetyczny dla absorberów drgań o prostoliniowym kierunku roboczym, który stosowany jest do eliminowania i redukcji wibracji w maszynach i urządzeniach, w szczególności w turbinach wiatrowych, gdzie tłumienie odbywa się przy wykorzystaniu generowanych magnetycznie prądów wirowych. W szczególności wynalazek dotyczy amortyzatorów wiroprądowych, które są umieszczone w sposób obrotowo symetryczny w stosunku do osi wzdluznej i składają się z jednego lub więcej pierścieniowych magnesów ułożonych w stos, lub pierścieniowych układów magnetycznych z odpowiednio ustawionymi magnesami stałymi i/lub elektromagnesami, które są rozmieszczone, tworząc kształt pierścienia wokół rzeczonyj osi wzdluznej. Wynalazek ten dotyczy ponadto wahadłowych absorberów drgań.

Znany jest również z patent nr US 8193670 zintegrowany układ zawierający tłumik magnetoreologiczny drgań skrętnych i przetwornik elektromagnetyczny ruchu obrotowego. Urządzenia te zabudowane są na jednym wale i zamknięte w jednej obudowie. Tłumik magnetoreologiczny jest umiejscowiony wewnątrz obudowy cewki generatora lub równolegle do tej cewki. Możliwe jest aktywne działanie układu przez zasilanie przetwornika prądem elektrycznym i wtedy działa on jak silnik elektryczny albo zasilanie cewki tłumika magnetoreologicznego prądem sterującym opory ruchu tłumika przy jednoczesnym obrocie cewki przetwornika względem magnesów trwałych umieszczonych w nieruchomej obudowie urządzenia powodującym działanie przetwornika jak generator prądu.

Z opisu patentowego PL 65128 znany jest tłumik magnetyczny z ciągłą zmianą stopnia tłumienia, przeznaczony do stosowania w miernikach elektrycznych lub jako regulator prędkości obrotowej w członie zwłocznym przekaźników. Ten tłumik magnetyczny posiadający obwód magnetyczny składający się z co najmniej dwóch magnesów trwałych i z elementu ruchomego, znamieny jest tym, że magnes trwały ruchomy umieszczony jest naprzeciw magnesu trwałego nieruchomego, a element ruchomy umieszczony jest pomiędzy tymi magnesami.

Z opisu patentowego US 8707822 B2 znany jest tłumik drgań skrętnych, który składa się ze stałej obudowy zamontowanej na wałku, obudowy ruchomej względem obudowy stałej, cewek elektromagnetycznych i stałych elementów wytwarzających pole magnetyczne. Wynalazek ten pozwala wytworzyć przejściowy przeciwskrętny ruch ruchomej obudowy względem drgań wałka, o tej samej częstotliwości, przeciwnym kierunku i tej samej amplitudzie. Takie działanie pozwala wyeliminować drgania skrętne w układzie mechanicznym, do którego zostało zamontowane.

W opisie patentu CN106015420A przedstawiono półaktywny tłumik wiropądowy o prostoliniowym kierunku roboczym, w skład którego wchodzi: moduł zużycia energii wiropądowej, moduł sterowania, osłony ekranujące magnetycznie, sprężyny buforowe i łączniki. Moduł zużycia energii wiropądowej składa się z układu magnesów trwałych i miedzianej płyty. Moduł automatycznego sterowania składa się z zewnętrznego źródła zasilania, przełącznika wibracji i przetwornika rezystancyjnego. Obudowa ekranu magnetycznego jest prostokątną zamkniętą obudową wykonaną z miękkiego żelaza o stosunkowo dużej przewodności magnetycznej. Kiedy struktura wibruje, włącza się przełącznik wibracji, obwód automatycznego sterowania jest zamknięty, a płytka miedziana zaczyna wykonywać ruch cięcia linii indukcji magnetycznej, w celu wygenerowania zużycia energii wiropądowej. Taki mechanizm działania wpływa na rozproszenie energii a tym samym na wytłumienie układu. Rozwiązanie to charakteryzuje się prostotą budowy, zmiennością tłumienia i bardzo małym tarcie mechanicznym.

Celem niniejszego wynalazku jest opracowanie nowego urządzenia o prostej budowie pozwalającego uzyskać względnie najwyższe tłumienie drgań skrętnych w ruchu obrotowym.

Istotą wynalazku jest aktywne urządzenie wiropądowe do tłumienia drgań skrętnych w ruchu obrotowym zawierające co najmniej dwa dyski, wał, pierścienie ślizgowe, łożysko, co najmniej jeden aktuator elektromagnetyczny, bezkontaktowy czujnik zbliżeniowy, oraz moduł sterowania, które charakteryzuje się tym, że co najmniej jeden bezkontaktowy aktuator elektromagnetyczny jest umieszczony radialnie wokół pierwszego dysku sztywno połączonego z wałem i jest sztywno zamocowany do osadzonego na łożysku drugiego dysku, który za pośrednictwem wspomnianego łożyska osadzony jest obrotowo na wale, do którego na sztywno przytwierdzony jest pierwszy dysk, w którym znajduje się co najmniej jeden znacznik, przy czym pierwszy dysk i drugi dysk zamontowane są na wale współosiowo, tworząc szczelinę umiejscowioną między rdzeniem co najmniej jednego aktuatora elektromagnetycznego a dyskiem.

Korzystnie przekrój poprzeczny rdzenia aktuatora elektromagnetycznego w płaszczyźnie zawierającej oś wału ma kształt litery C.

Korzystnie co najmniej jeden aktuator magnetyczny jest zamontowany do drugiego dysku za pomocą mechanicznego połączenia rozłącznego.

Korzystnie urządzenie zawiera co najmniej dwa aktuatory elektromagnetyczne umieszczone radialnie wokół pierwszego dysku w równych odstępach względem siebie.

Korzystnie moduł sterowania zawiera jednostkę pomiarowo-sterującą ze zintegrowanym algorytmem sterującym oraz moduł zasilania.

Korzystnie bezkontaktowy czujnik zbliżeniowy jest podłączony przez pierścień ślizgowy do jednostki pomiarowo-sterującej, która podłączona jest do modułu zasilania, przy czym moduł zasilania podłączony jest przez pierścień ślizgowy do cewki każdego aktuatora elektromagnetycznego.

Korzystnie bezkontaktowy czujnik zbliżeniowy zamontowany jest niezależnie na tym samym promieniu, na którym zlokalizowany jest znacznik na dysku.

Przedmiotowy wynalazek dostarcza następujących korzyści:

- Znane rozwiązania dotyczące tłumików drgań skrętnych z reguły bazują na elementach pasywnych, na przykład pierścieniach nałożonych na wał poprzez elastomerową przekładkę. Podejście takie pozwala zredukować drgania dla określonego zakresu roboczej prędkości obrotowej, a tym samym stałej częstotliwości drgań. Proponowane urządzenie ma charakter aktywny, a więc zapewnia tłumienie drgań w znacznie szerszym zakresie częstotliwości niż znane ze stanu techniki rozwiązania bazujące na elementach pasywnych.
- Ponadto urządzenie według wynalazku cechują niskie opory tarcia oraz niewielka bezwładność, które wynikają z osadzenia na wale drugiego dysku podpierającego aktuatorów poprzez łożysko o niskim współczynniku tarcia oraz niskiej masie własnej dysku pierwszego – sztywno zespolonego z wałem. Zaproponowane urządzenie wyróżnia się pod tymi względami w stosunku do istniejących tłumików drgań skrętnych wykorzystujących ciecz magnetoreologiczną.

Aktywne urządzenie wiropądowe do tłumienia drgań skrętnych według wynalazku w przykładach wykonania zostało przedstawione na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia widok przestrzenny urządzenia według wynalazku ze szczególnym uwzględnieniem rozmieszczenia łożyska; fig. 2 przedstawia widok przestrzenny urządzenia według wynalazku ze szczególnym uwzględnieniem połączenia cewek aktuatorów elektromagnetycznych z modułem zasilania; fig. 3 przedstawia fragment widoku bocznego urządzenia wzdłuż osi wału, na którym widoczna jest budowa i dokładne rozmieszczenie aktuatorów zastosowanych w urządzeniu według wynalazku; fig. 4 przedstawia urządzenie według wynalazku zamontowane do generatora prądowłórczego w wariacie z jednym aktuatorem; fig. 5 przedstawia urządzenie według wynalazku zamontowane do generatora prądowłórczego w wariacie z dwoma aktuatorami.

Przykład 1.

W tym nieograniczającym przykładzie wykonania przedstawiono konstrukcję urządzenia według wynalazku do tłumienia drgań skrętnych obracających się wałów, bazującego na oddziaływaniu siłowym powstającym między wirującym dyskiem 1 a zamocowanymi aktuatorami elektromagnetycznymi 3, w wyniku indukowania prądów wirowych.

W tym nieograniczającym przykładzie wykonania urządzenie według wynalazku występuje w wariacie z dwunastoma aktuatorami 3, który przedstawiono na fig. 1 – 2. Urządzenie zawiera dwa dyski 1 i 4, wał 2, pierścienie ślizgowe 14, łożysko 9, bezkontaktowy czujnik zbliżeniowy 6 oraz moduł sterujący. Urządzenie charakteryzuje się tym, że zawiera dysk 1, wykonany z materiału nieferromagnetycznego o wysokiej przewodności elektrycznej i niskim ciężarze właściwym (przykładowo: aluminium, magnez), który jest sztywno zamocowany do wału 2 (fig. 1 oraz fig. 2).

W tym nieograniczającym przykładzie wykonania jako materiał nieferromagnetyczny o wysokiej przewodności elektrycznej i niskim ciężarze właściwym zastosowano aluminium. Niemniej jednak można stosować inne materiały, np. magnez. Parametry przykładowych materiałów nieferromagnetycznych przedstawiono poniżej w tabeli 1.

Materiał	Parametry		
	Przewodność elektryczna	Gęstość	Przewodność / Gęstość
	$\sigma = [1/\Omega \cdot m] \times 10^6$	$\rho = [kg/m^3]$	$\sigma/\rho = [m^2/kg \cdot \Omega] \times 10^3$
Metale niemagnesowalne			
Aluminium	37,0	2700	13,7
Magnez	21,7	1740	12,5

Wokół dysku 1 umieszczone są radialnie w równych kątowych odstępach od siebie aktuatory 3, będące elektromagnesami o rdzeniach 10 wygiętych w kształcie litery C (fig. 3), i generujące strumienie magnetyczne skierowane wzdłuż osi wału (prostopadle do dysku 1).

W tym nieograniczającym przykładzie wykonania urządzenie według wynalazku jest wyposażone w dwanaście aktuatorów elektromagnetycznych 3. Natomiast liczba aktuatorów 3 zależy od wymiarów (średnicy) dysku. W przypadku zastosowania więcej niż jednego aktuatora 3 wszystkie aktuatory 3 muszą być rozmieszczone w równych odległościach od siebie, aby strumień magnetyczny przez nie generowany nie oddziaływał na sąsiednie elementy. Równomierny rozstaw aktuatorów 3 wpływa także na równomiernie rozłożoną siłę na całej wirującej tarczy, która jest przymocowana do osi wału 2.

Przy czym, wspomniane aktuatory 3 zamocowane są sztywno do dysku 4 wykonanego z materiału nieferromagnetycznego, który nasadzono na łożysko 9 przymocowane do wału 2 oraz zamocowano sztywno do obudowy maszyny wirnikowej, której drgania skrętne są minimalizowane.

Takie przytwierdzenie aktuatorów 3 uniemożliwia ich kontakt z wirującymi elementami urządzenia, pozwalając na swobodny obrót dysku 1 w szczelinach 12 między rdzeniem 10 aktuatorów 3 a dyskiem 1.

W tym nieograniczającym przykładzie wykonania dysk 4 został wykonany z aluminium. Natomiast do wykonania dysku 4 można zastosować inny materiał nieferromagnetyczny (np. magnez, tworzywa sztuczne: poliuretan, poliwęglan).

W tym przykładzie wykonania aktuatory 3 zostały przytwierdzone do dysku 4 za pomocą mechanicznego połączenia rozłącznego 13 przy wykorzystaniu śrub.

Przy czym, wspomniany moduł sterowania urządzenia zawiera moduł zasilania 8 oraz jednostkę pomiarowo-sterującą 7 ze zintegrowanym algorytmem sterującym w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, bazującym na bieżącej pozycji kąтового położenia i chwilowej prędkości kątowej dysku 1.

Odnośnie do sterowania urządzenia według wynalazku, na dysku 1 znajduje się przynajmniej jeden znacznik 5, który podczas obracania się dysku 1 wywołuje zmianę sygnału pomiarowego w bezkontaktowym czujniku zbliżeniowym 6 w chwili przemieszczania się w jego pobliżu. Sygnał z czujnika 6 przesyłany jest za pośrednictwem pierścieni ślizgowych 14 do jednostki pomiarowo-sterującej 7, która oblicza położenie kątoowe oraz chwilową prędkość kątoową wału. Specjalnie dobrana reguła sterowania (algorytm) zaimplementowana w jednostce pomiarowo-sterującej 7 bazująca na tych zmiennych stanu, w odpowiednich

przedziałach czasowych włącza lub wyłącza moduł zasilania **8** podłączony przez pierścienie ślizgowe **14** do cewki **11** każdego aktuatora **3**. Odpowiednie sterowanie tymi aktuatorami pozwala eliminować drgania skrętne wału. W tym przykładzie wykonania zastosowano dwa pierścienie ślizgowe **14**.

Przy czym, w tym nieograniczającym przykładzie wykonania bezkontaktowy czujnik zbliżeniowy **6** zamontowany jest niezależnie na tym samym promieniu, na którym zlokalizowany jest znacznik **5** na dysku **1**.

Zgodnie z wynalazkiem sposób efektywnego tłumienia drgań skrętnych zapewniany przez urządzenie według wynalazku polega na wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej do generowania siły tłumiącej. Obrotowy ruch przewodzącej płytki (tj. dysku **1**) odbywa się prostopadle do generowanego przez zewnętrzne aktuatory **3** pola magnetycznego. Powoduje to indukowanie prądów wirowych w dysku **1** i proporcjonalnej do prędkości siły przeciwdziałającej ruchowi, co jest konsekwencją reguły Lenza. Włączanie i wyłączanie aktuatorów **3** w odpowiednich chwilach czasowych pozwala tłumić pojawiające się drgania skrętne, minimalizując jednocześnie ich hamujący wpływ na nominalną prędkość wirowania wału **2**.

Przykład 2.

Urządzenie według przykładu 1, z tym że zawiera jeden aktuator **3**, co przedstawiono na fig. 4. Ponadto w tym przykładzie wykonania urządzenie zostało zainstalowane w napędzie generatora prądotwórczego **15**. Niemniej jednak, urządzenie według wynalazku może być stosowane w każdym układzie mechanicznym przeniesienia napędu w ruchu obrotowym, w którym następuje zaburzenie obciążenia (np. napęd elektryczny: wentylatorów, pojazdów szynowych, samochodów elektrycznych, samolotów elektrycznych; napęd spalinowy: silniki lotnicze, samochody itp.).

Przykład 3.

Urządzenie według przykładu 1, z tym że zawiera dwa aktuatory **3**, co przedstawiono na fig. 5. Ponadto w tym przykładzie wykonania urządzenie zostało zainstalowane w napędzie generatora prądotwórczego **15**. Niemniej jednak, urządzenie według wynalazku może być stosowane w każdym układzie mechanicznym przeniesienia napędu w ruchu obrotowym, w którym następuje zaburzenie obciążenia (np. napęd elektryczny: wentylatorów, pojazdów szynowych, samochodów elektrycznych, samolotów elektrycznych; napęd spalinowy: silniki lotnicze, samochody itp.).

Zastrzeżenia patentowe

1. Aktywne urządzenie wiroprądowe do tłumienia drgań skrętnych w ruchu obrotowym zawierające co najmniej dwa dyski, wał, pierścienie ślizgowe, łożysko, co najmniej jeden aktuator elektromagnetyczny, bezkontaktowy czujnik zbliżeniowy oraz moduł sterowania **znamiennie tym**, że co najmniej jeden bezkontaktowy aktuator elektromagnetyczny (**3**) jest umieszczony radialnie wokół pierwszego dysku (**1**) sztywno połączonego z wałem (**2**) i jest sztywno zamocowany do osadzonego na łożysku (**9**) drugiego dysku (**4**), który za pośrednictwem wspomnianego łożyska (**9**) osadzony jest obrotowo na wale (**2**), do którego na sztywno przytwierdzony jest pierwszy dysk (**1**), w którym znajduje się co najmniej jeden znacznik (**5**), przy czym pierwszy dysk (**1**) i drugi dysk (**4**) zamontowane są na wale (**2**) współosiowo, tworząc szczelinę (**12**) umiejscowioną między rdzeniem (**10**) co najmniej jednego aktuatora elektromagnetycznego (**3**) a dyskiem (**1**).
2. Urządzenie według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że przekrój poprzeczny rdzenia (**10**) aktuatora elektromagnetycznego (**3**) w płaszczyźnie zawierającej oś wału (**2**) ma kształt litery C.
3. Urządzenie według zastrz. 1 albo 2, **znamiennie tym**, że co najmniej jeden aktuator magnetyczny (**3**) jest zamontowany do drugiego dysku (**4**) za pomocą mechanicznego połączenia rozłącznego (**13**).
4. Urządzenie według dowolnego z poprzednich zastrzeżeń od 1 do 3, **znamiennie tym**, że zawiera co najmniej dwa aktuatora elektromagnetyczne (**3**), umieszczone radialnie wokół pierwszego dysku (**1**) w równych odstępach względem siebie.
5. Urządzenie według dowolnego z poprzednich zastrz. od 1 do 4, **znamiennie tym**, że moduł sterowania zawiera jednostkę pomiarowo-sterującą (**7**) ze zintegrowanym algorytmem sterującym oraz moduł zasilania (**8**).

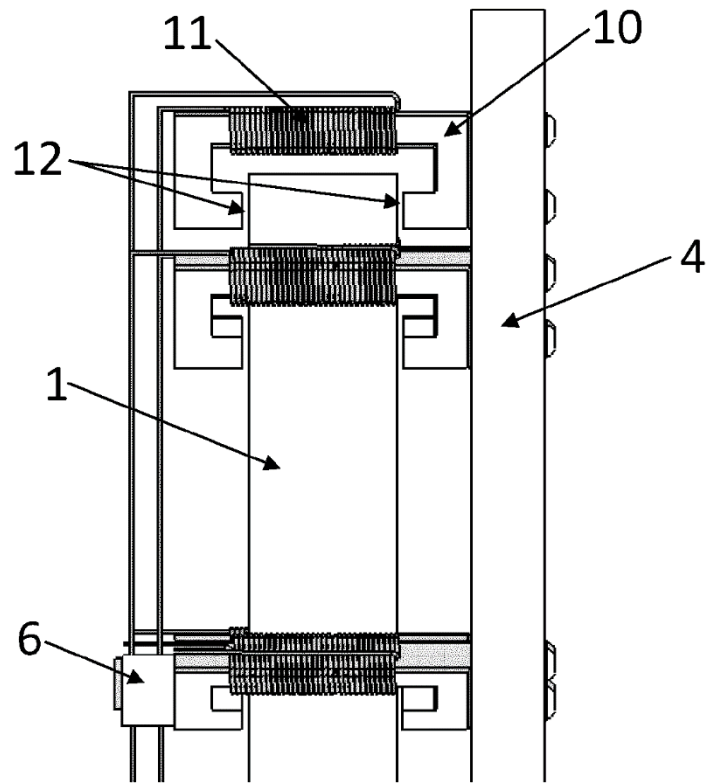


Fig. 3

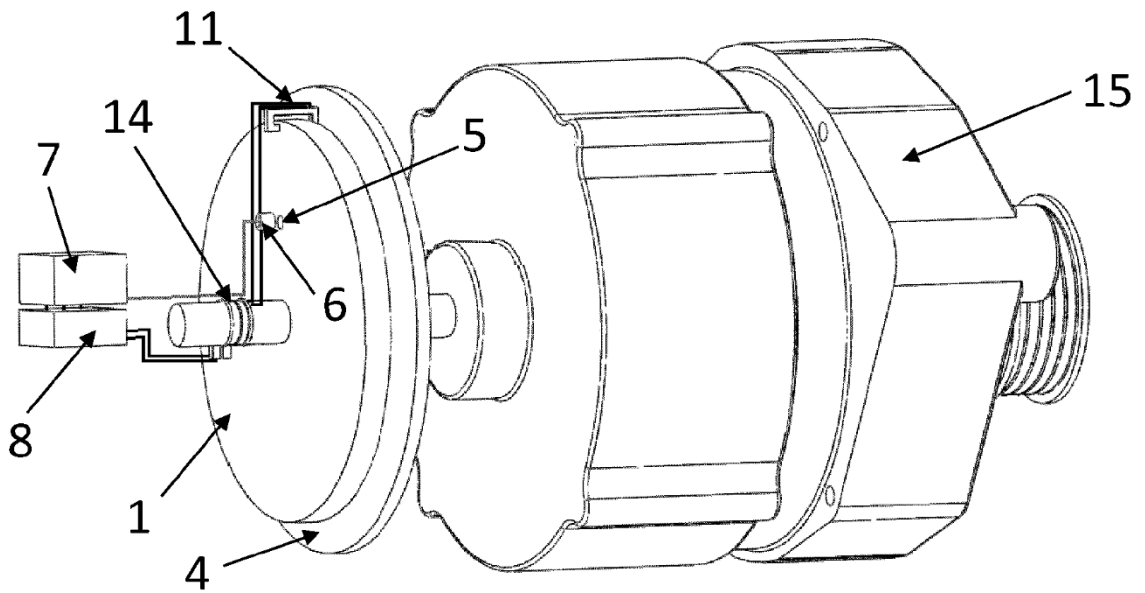


Fig. 4

