

*В.Ф. БОЛЮХ*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

*Н.А. ГАЕВСКАЯ*, аспирант, НТУ "ХПИ"

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Проведен обзор и анализ существующих конструкций волновых электродвигателей. Выявлены конструктивные особенности и варианты исполнений основных элементов волнового электродвигателя. Приведена классификация волновых электродвигателей по основным элементам и способам управления. Определены основные тенденции развития волновых электродвигателей.

**Ключевые слова:** волновой электродвигатель, конструктивные элементы, гибкий ротор, тенденции развития.

**Введение.** В настоящее время в тихоходных высокомоментных безредукторных электроприводах находят применение волновые электродвигатели (ВЭД). Эти электродвигатели могут использоваться в качестве исполнительных двигателей в высокоточных позиционных и следящих электроприводах, робототехнике, системах управления летательных аппаратов и космических системах. ВЭД является объединением волновой передачи и электромагнитного преобразователя. Основным достоинством ВЭД является низкая частота вращения его выходного вала при значительном вращающем моменте, что позволяет непосредственно соединять его с производственным механизмом. Массо-габаритные показатели привода оказываются ниже, чем у привода той же мощности, выполненного по обычной схеме двигатель – редуктор. Двигатель обладает хорошим быстродействием. Время его пуска при питании от сети 50 Гц составляет сотые доли секунды, а при отключении двигателя от сети ротор останавливается примерно за то же время практически без выбега. Двигатель имеет также низкий уровень вибраций, чем выгодно отличается от двигателей с катящимся ротором. Перечисленные выше преимущества этих двигателей вызывают к ним интерес у инженеров-электромехаников. Об этом свидетельствуют многочисленные авторские свидетельства и патенты на изобретения. Обзор патентной и научно-технической литературы позволяет выявить основные конструктивные особенности ВЭД.

**Целью статьи** является обзор существующих конструкций ВЭД с последующей систематизацией и выявление тенденций их развития.

© В.Ф. Болюх, Н.А. Гаевская, 2013

**Исследования.** Характерной конструктивной особенностью ВЭД является гибкий ротор. По характеру движения ротора ВЭД делятся на

- 1) ротативные [1, 2, 3, 4];
- 2) линейные [4, 5].

Ротор ротативных двигателей может иметь цилиндрическую форму или дисковую (для торцовых ВЭД). Линейный двигатель имеет ротор в форме гибкой пластины.

Ротор ВЭД состоит из гибкого магниточувствительного элемента (ГМЧЭ) и силовопередающего элемента (СПЭ).

Существуют следующие варианты исполнения ГМЧЭ:

1) витой – ГМЧЭ выполняется в виде плотно намотанной в один слой ферромагнитной проволоки – витого стального троса [1, 6],

2) ленточный – ГМЧЭ выполняется в виде изгибаемой в радиальном направлении однослойной ферромагнитной ленты [1]. Эта лента также может сопрягаться с цилиндрическим СПЭ узкой гранью по спирали [7],

3) пластинчатый – ГМЧЭ выполняется в виде ферромагнитных пластин, расположенных:

а) вдоль оси ротора [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Пластины могут быть П-образной, Т-образной и Г-образной формы [15, 16],

б) в плоскости, перпендикулярной оси ротора [1],

4) в виде шайб – такой ГМЧЭ используется для торцового электродвигателя [17, 18],

5) с использованием ферромагнитного порошка – ГМЧЭ выполняется в виде:

а) обрешеченной ленты, заполненной мелкодисперсным ферромагнитным порошком [1],

б) гибкой цилиндрической оболочки, внутри которой размещен жесткий шихтованный магнитопровод, имеющий на наружной поверхности множество полостей, заполненных ферромагнитным порошком [19],

в) с использованием магнитопроводящей жидкости – кольцевая полость, образованная наружной поверхностью жесткого цилиндрического магнитопровода и внутренней поверхностью СПЭ, заполнена магнитопроводящей жидкостью [20, 21].

Среди недостатков вышеперечисленных вариантов исполнения ГМЧЭ можно выделить следующие. В случае витого магнитопровода магнитный поток часть пути проходит поперек витков магнитопровода и вследствие этого возникают повышенные потери на вихревые токи. Для их уменьшения в ленте штампуются продольные прорезы [22]. В

ленточном магнитопроводе из-за характера ее намотки "на ребро" происходит наоборот снижение потерь на вихревые токи. Недостатком пластинчатого ГМЧЭ с пластинами, расположенными вдоль оси ротора, являются невысокая надежность, поэтому он не может выдержать большое число циклов деформации, а также большая инерционность и как следствие низкое быстродействие. ГМЧЭ в виде шайб предполагает их размещение в оболочке, но как показали испытания опытного образца, при деформации шайбы смещаются относительно оболочки и с течением времени происходит износ внутренней полости оболочки. ГМЧЭ с использованием ферромагнитного порошка не находит применения из-за низкой магнитной проницаемости по сравнению с магнитной проницаемостью ферромагнитной ленты. Подобный недостаток наблюдается и у ферромагнитной жидкости, кроме того ферромагнитная жидкость предполагает наличие герметичной оболочки, что усложняет и удорожает конструкцию.

Варианты выполнения СПЭ для ВЭД зависят от формы гибкого ротора. В случае цилиндрического ротора СПЭ выполняется в виде:

- 1) тонкостенного гибкого стакана;
- 2) жесткого стакана с зубцами, расположенными на внутренней поверхности стакана;
- 3) в виде аксиальных штырей, размещенных в пазах силовых дисков [1].

При выполнении СПЭ в виде тонкостенного гибкого стакана и аксиальных штырей волновое зацепление происходит в рабочем зазоре двигателя, а при выполнении в виде жесткого стакана – зацепление выносится за пределы воздушного зазора. В этом случае недостатком такой конструкции СПЭ является увеличение габаритных размеров ВЭД. В случае дискового ротора СПЭ выполняется в виде диска с жестким зубчатым венцом.

Для наглядности существующие варианты исполнения гибкого ротора ВЭД представлены в виде схемы на рис. 1.

В двигателях с цилиндрическим ротором внутренняя полость ротора может быть использована для размещения в ней дополнительного статора. В такой конструкции один статор расположен снаружи, а другой – внутри ротора, при этом магнитные системы статоров сдвинуты по углу на  $90^\circ$ . Добавление второго статора приводит к деформации гибкого ротора в четырех точках вместо двух (рис. 2), и это способствует повышению нагрузочной способности двигателя [23].

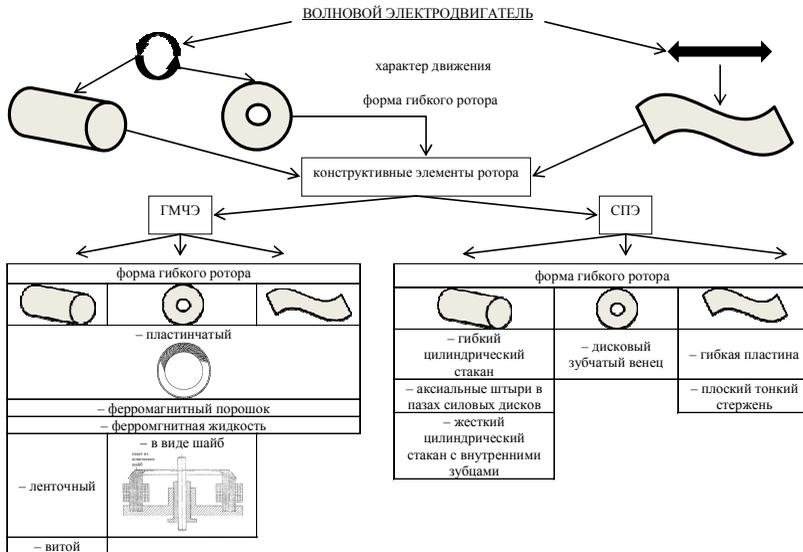


Рис. 1. – Классификация ВЭД по видам ГМЧЭ и СПЭ.

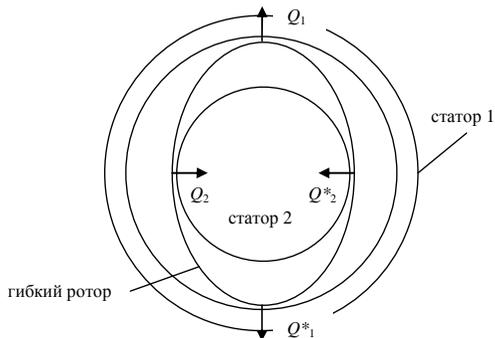


Рис. 2. – Направление сил, действующих на гибкий ротор в случае выполнения ВЭД с двумя статорами.

В рассмотренных выше конструктивных схемах использовался пассивный ротор, т.е. ротор, не создающий собственного магнитного поля.

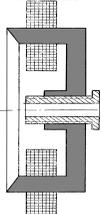
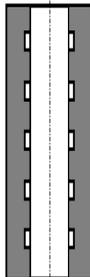
С целью увеличения вращающего момента в ряде авторских свидетельств предлагается гибкий ротор выполнить из диэлектрика в форме цилиндрической оболочки с наружными ребрами. Ребра располагаются между зубцов статора, на плоскостях ребер располагаются

проводники, по которым протекает ток [24, 25, 26, 27]. При взаимодействии этих проводников с током с магнитным полем статора на ребра действуют силы, деформирующие ротор. Недостатком такой конструкции является ее сложность и ненадежность, т.к. в зоне соединения ребер с цилиндрической оболочкой будут возникать механические напряжения, что приведет к повреждениям ротора.

Для устранения этого недостатка была предложена конструкция активного ротора [28], в которой обмотка размещена непосредственно на поверхности цилиндрической диэлектрической оболочки. Особенностью данной конструкции является то, что ротор не вращается, а лишь совершает перемещения в радиальном направлении. Вращение выходного вала осуществляется посредством зубчатого зацепления цилиндрической оболочки и СПЭ.

Анализ существующих конструкций ВЭД и способов их управления представлен в табл.

Таблица – Основные конструктивные особенности ВЭД и способы их управления.

Конструктивный элемент		Тип электродвигателя		
		цилиндрический	торцовый	линейный
Ротор	ГМЧЭ	– пластинчатый – ферромагнитный порошок – ферромагнитная жидкость		
	СПЭ	– ленточный – витой	– в виде шайб	– жесткий дисковый зубчатый венец – гибкая пластина; – плоский тонкий стержень
Статор (на рисунках затемнен)	– внешний:  – внутренний:  – 2 статора 	– ленточный магнитопровод с полюсными выступами для размещения обмотки 	– две линейные магнитные системы 	

Тип волнового зацепления	– зубчатое; – фрикционное		
Количество волн деформации	– одна; – две; – четыре	– одна; – две;	– одна; – две;
Способы управления	– синхронный электродвигатель (синусоидальное напряжение на фазах, равномерная частота вращения магнитного поля и ротора); – шаговый электродвигатель (импульсное напряжение на фазах, дискретное вращение магнитного поля и ротора); – волновой вентильный электродвигатель (синхронизация изменения напряжения на фазах и положения волны деформации ротора)		

**Выводы.** Анализ технической литературы и существующих патентов свидетельствует о том, что одним из направлений в альтернативном электромашиностроении являются волновые механизмы. Основным элементом волновых электродвигателей, который определяет его выходные характеристики, является гибкий ротор. Поэтому главным направлением развития волновых электродвигателей является совершенствование конструкции гибкого ротора с целью:

- 1) повышения электромагнитного момента;
- 2) расширения рабочего диапазона частот;
- 3) повышения кинематической точности угла поворота выходного вала;
- 4) достижения плавности хода выходного вала;
- 5) повышения надежности и ресурса;
- 6) упрощения конструкции и технологии изготовления;
- 7) уменьшения массы и габаритов.

**Список литературы:** 1. Пат РФ 2289186 Волновой электродвигатель / Марков А.М. Заявка № 2005104078/09 от 15.02.2005. – Оpubл. 20.07.2006. 2. Авторское свидетельство № 68211 Тихоходный электродвигатель / Москвитин А.И. Заявка № 341164 от 15.12.1944. 3. Авторское свидетельство № 1387129 Волновой электродвигатель / Буров Г.Н. Заявка № 3888766/24-07 от 23.04.1985. – Оpubл. 07.04.1988. 4. Авторское свидетельство № 909769 Волновой электродвигатель / Добролюбов А.И. Заявка № 2591714/24-07 от 20.03.1978. – Оpubл. 28.02.1978. 5. Авторское свидетельство № 1577005 Электродвигатель / Арсеньев В.В. Заявка № 4345096/24-07 от 18.12.1987. – Оpubл. 07.07.1990. 6. United States Patent № 3331974 Stepping motor with a flexible rotor / Proctor H.W. Filed 04.11.1964. Ser. No 409001. – Publ. 18.07.1967. 7. Авторское свидетельство № 448559 Волновой электродвигатель / Алексеев-Мохов С.Н. и др. Заявка № 1870613/24-7 от 12.01.1973. – Оpubл. 30.10.1974. 8. United States Patent № 3496395 Strain wave gearing systems with distributed discontinuities / Newell H.R. Filed 09.05.1968. Ser.

№ 727837. – Publ. 17.02.1970. **9.** Авторское свидетельство № 320892 Волновой электрический двигатель / *Колосков М.С.* Заявка № 1357468/24-7 от 11.08.1969. – Оpubл. 04.11.1971. **10.** Авторское свидетельство № 561260 Волновой электродвигатель / *Дементьев Н.И.* и др. Заявка № 2144138/07 от 12.06.1975. – Оpubл. 05.06.1977. **11.** Авторское свидетельство № 562045 Волновой электродвигатель / *Колосков М.С., Дементьев Н.И.* Заявка № 2016495/07 от 12.04.1974. – Оpubл. 15.06.1977. **12.** Авторское свидетельство № 571858 Волновой электродвигатель / *Варлей В.В.* и др. Заявка № 2345095/07 от 09.04.1976. – Оpubл. 05.09.1977. **13.** Авторское свидетельство № 675546 Волновой электродвигатель / *Варлей В.В.* и др. Заявка № 2130767/24-07 от 04.05.1975. – Оpubл. 25.07.1979. **14.** Авторское свидетельство № 875551 Ротор волнового электродвигателя / *Наний В.П.* Заявка № 2871746/24-07 от 15.01.1980. – Оpubл. 23.10.1981. **15.** United States Patent № 3169201 Electromagnetic harmonic drive / *Spring W.B.* Filed 15.02.1963. Ser. No 258707. – Publ. 09.02.1965. **16.** United States Patent № 3311766 High response actuators/ *Scott G.P.* Filed 07.09.1964. Ser. No 388065. – Publ. 28.03.1967. **17.** Авторское свидетельство № 312345 Торцовый электрический двигатель с волновым катящимся ротором / *Габов А.П.* Заявка № 1383662/24-7 от 11.12.1969. – Оpubл. 19.08.1971. **18.** Авторское свидетельство № 712908 Торцовый волновой электродвигатель / *Амдуров А.Е.* и др. Заявка № 1943078/24-07 от 16.06.1973. – Оpubл. 30.01.1980. **19.** United States Patent № 3169202 Electromagnetic actuators having continuously rotating field / *Proctor H.W.* Filed 15.02.1963. Ser. No 258734. – Publ. 09.02.1965. **20.** Авторское свидетельство № 855890 Волновой электродвигатель / *Бровальский Ю.А.* и др. Заявка № 2847626/24-07 от 07.12.1979. – Оpubл. 15.08.1981. **21.** Авторское свидетельство № 1104620 Волновой электродвигатель / *Крыков Г.П.* и др. Заявка № 3585643/24-07 от 26.04.1983. – Оpubл. 23.07.1984. **22.** United States Patent № 3609423 Bridging strip for deflectable armatures/ *Spring W.B.* Filed 25.06.1970. Ser. No 49835. – Publ. 28.09.1971. **23.** Авторское свидетельство № 892598 Волновой электродвигатель / *Зайков М.А., Прохоренко В.Ф.* Заявка № 2815409/24-07 от 03.09.1979. – Оpubл. 23.12.1981. **24.** Авторское свидетельство № 340028 Волновой электрический двигатель / *Колосков М.С.* Заявка № 1366655/24-7 от 10.10.1969. – Оpubл. 24.05.1972. **25.** Авторское свидетельство № 372623 Волновой электродвигатель / *Михайлов О.П., Габов А.П.* Заявка № 1204227/24-7 от 18.12.1967. – Оpubл. 01.03.1973. **26.** Авторское свидетельство № 604096 Волновой электродвигатель / *Баранов Е.Н.* Заявка № 2417545/24-07 от 03.11.1976. – Оpubл. 25.04.1978. **27.** Авторское свидетельство № 764054 Волновой электродвигатель / *Баранов Е.Н.* Заявка № 2553610/24-07 от 09.12.1977. – Оpubл. 15.09.1980. **28.** Авторское свидетельство № 696580 Волновой электродвигатель / *Аверьянов А.В.* и др. Заявка № 2306150/24-07 от 30.12.1975. – Оpubл. 05.11.1979.

*Поступила в редколлегию 22.04.2013*



**Болюх Владимир Федорович**, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



**Гаевская Наталья Александровна**. Защитила диплом магистра по специальности "Электрические машины и аппараты" в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2012 г. Аспирант кафедры "Общая электротехника" НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с проблемами волновых электродвигателей.

УДК 621.313

**Анализ современных тенденций развития волновых электродвигателей / Болюх В.Ф., Гаевская Н.А.** // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 35 (1008). – С. 33-40. Бібліогр.: 28 назв.

Проведено огляд та аналіз існуючих конструкцій хвильових електродвигунів. Виявлені конструктивні особливості і варіанти виконань основних елементів хвильового електродвигуна. Приведена класифікація хвильових електродвигунів по основних елементах і способах керування. Визначені основні тенденції розвитку хвильових електродвигунів.

**Ключові слова:** хвильовий електродвигун, конструктивні елементи, гнучкий ротор, тенденції розвитку.

A review and analysis of existing constructions of wave electric motors are conducted. Structural features and variants of executions of basic elements of wave electric motor are exposed. Classification of wave electric motors on basic elements and control methods is presented. Basic trends of wave electric motors progress are determined.

**Keywords:** wave electric motor, structural elements, flexible rotor, progress trends.