

DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-24-34

УДК 621.313.13-047.72-028.45

ББК 3291.5:326-028

А.А. АФАНАСЬЕВ, В.С. ГЕНИН, Л.Н. ВАСИЛЬЕВА,  
Н.Н. ИВАНОВА, В.А. ВАТКИН, Д.А. ТОКМАКОВ**АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕГО ОБМОТОК**

**Ключевые слова:** скалярный магнитный потенциал, магнитная индукция, магнитные листы, намагниченность, ферромагнитные среды, индуктивные параметры обмоток.

Для реализации высоких динамических характеристик проектируемых вентильных двигателей и достижения должного качества переходных процессов в приводах сложных механизмов необходимо проведение исследований их электромагнитных и функциональных свойств с расчетом индуктивных параметров обмоток.

**Цель исследования** – анализ электромагнитных и функциональных характеристик магнитоэлектрического вентильного двигателя и определение индуктивных параметров его обмоток.

**Материалы и методы.** Единое магнитное поле машины разбивается на совокупность горизонтальных полос (сред), анализируемых независимо друг от друга. Приняты допущения, что магнитное поле в этих полосах является плоскопараллельным, а на границах выделяемых полос выполняются условия сопряжения: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва). В качестве источников магнитного поля рассматриваются магнитодвижущая сила обмотки статора, коэрцитивная сила магнитов и намагниченности магнитомягких ферромагнитных сред. Выражения для описания скалярных магнитных потенциалов и нормальных составляющих магнитной индукции в выделенных полосах получены с помощью метода разделения переменных Фурье.

**Результаты исследования.** Выполнено исследование электромагнитных и функциональных характеристик двигателя с использованием математической модели магнитоэлектрического вентильного двигателя на основе технологии разделения переменных Фурье с разбиением активной области на однородные участки в виде магнитных листов. Модель позволяет определить магнитные индукции для любых координатных точек  $x$  и  $y$  активной области магнитной системы двигателя. Получены выражения, описывающие индуктивные параметры обмоток, приведены уравнения состояния двигателя для случая, когда токи в фазных обмотках статора в противофазе с их ЭДС холостого хода.

**Выводы.** Математические модели вентильных двигателей, построенные на основе метода разделения переменных Фурье, позволяют определить электромагнитные характеристики двигателей и индуктивные параметры обмоток, необходимые для расчёта переходных процессов. Наиболее эффективным является управление вентильным двигателем, при котором фазные токи находятся в противофазе с ЭДС холостого хода. В этом режиме с отсутствием продольного тока и коэффициентом мощности, близким к единице, уравнения состояния двигателя имеют второй порядок.

**Введение.** Современные магнитоэлектрические вентильные двигатели имеют сравнительно небольшие габаритные размеры при сохранении достаточно высоких технических характеристик благодаря применению высококоэрцитивных магнитных материалов. Они характеризуются высокими энергетическими показателями ( $\cos\varphi \approx 1$ ,  $\eta = 0,85\div 0,98$ ), весьма значительной кратковременной перегрузочной способностью по моменту, достигающей 5–10-кратного

значения от номинального, высокими массогабаритными показателями [5, 7, 13].

В последнее время в результате организации взаимодействия устройств электроники и электромеханики появляются «умные», самонастраивающиеся электрические машины [8]. Чтобы эффективно управлять такой машиной, необходимо уже на стадии проектирования с высокой точностью рассчитать ее параметры и характеристики, что можно сделать, лишь определив ее электромагнитное поле [3].

Для обеспечения высоких динамических характеристик вентильного двигателя в приводах сложных механизмов, которые в большинстве случаев работают в режимах частых пусков, остановов и реверсов, и достижения должного качества переходных процессов необходимо рассчитывать в том числе и индуктивные параметры обмоток [2].

Необходимо отметить, что использование редкоземельных постоянных магнитов связано с рядом специфических проблем. Во-первых, дороговизна высококоэрцитивных магнитных материалов заставляет искать пути их экономии. Во-вторых, сложность механической обработки таких магнитных материалов вынуждает использовать простые формы магнитов, например, в виде параллелепипедов или цилиндров, что вызывает известные ограничения при разработке и модернизации двигателей [6, 12].

**Цель исследования** – анализ электромагнитных и функциональных характеристик магнитоэлектрического вентильного двигателя и определение индуктивных параметров его обмоток.

**Материалы и методы.** Единое магнитное поле машины разбивается на совокупность горизонтальных полос (сред), анализируемых независимо друг от друга. Приняты допущения, что магнитное поле в этих полосах является плоскопараллельным, а на границах выделяемых полос выполняются условия сопряжения: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва). В качестве источников магнитного поля рассматриваются магнитодвижущая сила обмотки статора, коэрцитивная сила магнитов и намагниченности магнитомягких ферромагнитных сред. Выражения для описания скалярных магнитных потенциалов и нормальных составляющих магнитной индукции в выделенных полосах получены с помощью метода разделения переменных Фурье.

**Результаты исследования.** Выполнено исследование электромагнитных и функциональных характеристик двигателя с использованием математической модели магнитоэлектрического вентильного двигателя на основе технологии разделения переменных Фурье с разбиением активной области на однородные участки в виде магнитных листов. Модель позволяет определить магнитные индукции для любых координатных точек  $x, y$  активной области магнитной системы двигателя. Получены выражения, описывающие индуктивные параметры обмоток, приведены уравнения состояния двигателя для случая, когда токи в фазных обмотках статора в противофазе с их ЭДС холостого хода.

**Исходный инструментарий для расчёта электромагнитных параметров.** Поскольку рассчитать единое поле магнитное машины задача весьма сложная, оно разбивается на ряд локальных участков, анализируемых независимо друг от друга. На границах выделяемых участков (полос или колец) выполняются условия сопряжения магнитных полей: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва). В рассматриваемом случае выполнено разбиение активной расчётной области на совокупность горизонтальных полос (сред), отличающихся своими конфигурациями и магнитными свойствами. Считая, что длина электрической машины велика по сравнению с её поперечными размерами, и пренебрегая кривизной поверхности ротора статора, принято допущение, что магнитное поле в элементах расчётной области является плоскопараллельным.

В качестве источников магнитного поля вентильного двигателя выступают магнитодвижущая сила (МДС) обмотки статора, коэрцитивная сила магнитов  $H_{св}$  и намагничённости магнитомягких (ферромагнитных) сред [10]. Намагничённость  $M_i$  такой  $i$ -й среды:

$$M_i = \frac{B_i}{\mu_0} - H_i$$

(где  $B_i$  – магнитная индукция;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $H_i$  – напряжённость магнитного поля) может находиться с помощью известных кривых намагничивания.

Скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции в выделенных полосах, согласно методу разделения переменных Фурье, описываются выражениями [9, 11]

$$\begin{cases} u_n(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} (B_{nk} e^{k\sigma y} + C_{nk} e^{-k\sigma y}) \sin k\sigma x, \\ B_{ny}(x, y) = \mu_0 \left( -\frac{\partial u_n}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x \right) = \\ = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} (-k\sigma B_{nk} e^{k\sigma y} + k\sigma C_{nk} e^{-k\sigma y} + M_{nyk}) \sin k\sigma x, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – номер полосы;  $\sigma = \pi / \tau$ ;  $\tau$  – полюсное деление;  $\sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x$  – средняя намагничённость  $n$ -й полосы, представленная в виде тригонометрического ряда;  $B_{nk}$ ,  $C_{nk}$  – неизвестные постоянные, определяемые из условий равенства магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах полос.

**Результаты исследования.** На границах полосы с постоянными магнитами располагаются магнитные листы с током

$$F_M = \frac{4}{\pi\alpha} H_{св} h_M \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)\alpha}{(2k-1)^2} \sin(2k-1)\sigma x,$$

где  $\alpha = \frac{\tau - b_M}{\tau}$ ;  $h_M$  и  $b_M$  – высота и ширина магнитов соответственно.

На границе полос воздушного зазора и зубцов статора фиксируется магнитный лист с МДС обмотки статора.

Для повышения точности расчёта можно увеличивать количество полос (т.е. дискретизацию) активной области.

Предлагаемый метод позволяет найти магнитные индукции для любых координатных точек  $x, y$  активной области двигателя. Следовательно, первоначально заданный набор индукций, и одновременно намагниченностей, в полосах с ферромагнитными участками будет уточняться в последующие итерации.

Рассмотрим вентильный двигатель 12ДВМ 250 мощностью 150 кВт, выпускаемый Чебоксарским электроаппаратным заводом, расчётная схема которого с девятью средами показана на рис. 1.

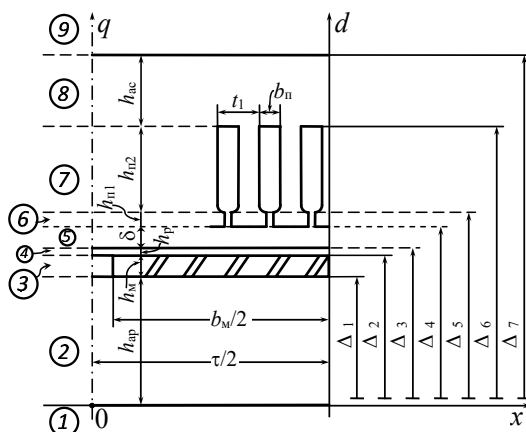


Рис. 1. Расчётная схема двигателя с девятью средами:

- 1, 9 – немагнитное внешнее пространство;
- 2, 8 – яра сердечников соответственно ротора, статора; 3 – постоянные магниты;
- 4 – верхняя стенка магнитных окон «карманов»; 5 – воздушный зазор;
- 6 – первый зубцовый слой с пазовыми шлицами;
- 7 – второй зубцовый слой, пазы которого содержат клинья и проводники обмотки статора

Индуктивности взаимоиндукции двигателя будут находиться применительно к величинам магнитного потока в воздушном зазоре (полосе 5 на рис. 1), связанном в отдельности с магнитами ротора и МДС обмотки статора.

Для нормальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре в соответствии с выражением (1) будет справедливо

$$B_{5y}(x, y) = \mu_0 \sigma \sum_{k=1}^{\infty} \left( -k B_{5k} e^{k\sigma y} + k C_{5k} e^{-k\sigma y} \right) \sin k\sigma x .$$

Эта магнитная индукция, вызванная только магнитами ротора, будет формировать с фазой А обмотки статора потокосцепление

$$\Psi_A(\gamma) = l w_k \sum_{n=1}^q \left[ \int_{t_z(n-1)}^{t_z(n-1)+\tau} B_{5y}(x - \gamma, y) dx + \int_{t_z(n-1)+\tau-y}^{t_z(n-1)+2\tau-y} B_{5y}(x - \gamma, y) dx \right], \quad (2)$$

где  $w_k$  – число витков в катушке обмотки статора;  $y$  – шаг катушки;  $q$  – число катушек в катушечной группе обмотки;  $l$  – активная длина сердечника статора;  $\gamma$  – сдвиг продольной оси ротора  $d$  относительно магнитной оси фазы А статора.

Индуктивность взаимоиндукции фазы А обмотки статора с магнитами ротора будет равна

$$L_{Af}(\gamma) = \Psi_A(\gamma) / H_{cB} h_m. \quad (3)$$

График функции (3) показан на рис. 2. Он имеет стандартный вид с периодом  $2\tau$ .

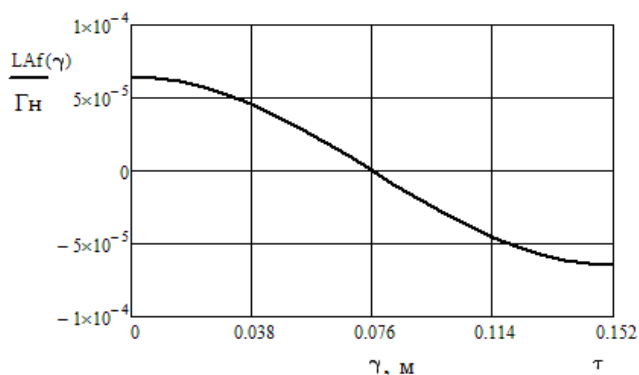


Рис. 2. Зависимость индуктивности взаимоиндукции ротора с фазой А статора от расстояния сдвига продольной оси ротора

Выражение (2) может использоваться для нахождения потокосцепления фазы А, вызванного собственным током этой фазы. Тогда для индуктивности самоиндукции фазы будем иметь

$$L_{AA}(\gamma) = \Psi_A(\gamma) / I_m. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) можно распространить на фазы В и С, сдвинув интервал  $\gamma$  соответственно на расстояния  $\frac{2}{3}\tau$  и  $\frac{4}{3}\tau$ .

График функции (4) показан на рис. 3 для случая, когда ток статора вентильного двигателя является поперечным ( $I = I_q$ ) и ось его МДС совпадает с направлением поперечной оси ротора. Период зависимости  $L_{AA}(\gamma)$  будет равен  $\tau$ .

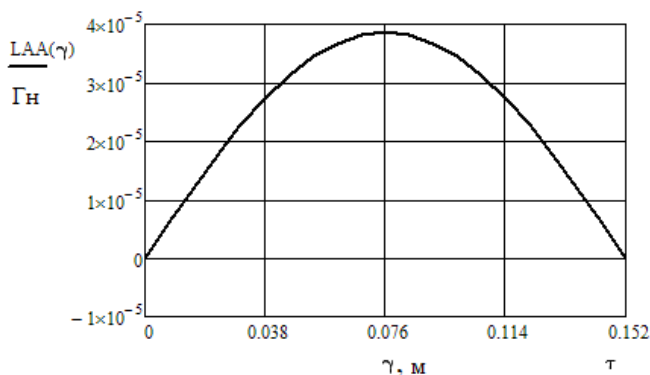


Рис. 3. Зависимость индуктивности взаимоиндукции фазы А статора от сдвига продольной оси ротора

Для продольных и поперечных индуктивностей обмотки статора можно принять

$$L_d = L_q = L_\sigma + \frac{3}{2} L_{AA} \left( \frac{\tau}{2} \right),$$

где  $L_\sigma$  – индуктивность рассеяния обмотки статора [4].

**Дифференциальные уравнения вентильного двигателя в переходных режимах.** Вентильные двигатели с постоянными магнитами за счёт широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразователя частоты и цепей фильтрации имеют в обмотке статора практически синусоидальные ток и напряжение, фазные углы которых аппаратными и программными средствами могут быть привязаны к угловому положению ротора.

Будем рассматривать математическую модель двигателя, абстрагируясь от ШИМ технологии и технических средств, связывающих управление напряжением или током в обмотке статора с положением ротора.

Целесообразно, как у коллекторных двигателей постоянного тока, вводить ток в каждую фазную обмотку статора в противофазе с её ЭДС холостого хода. В этом случае в токе статора отсутствует продольная составляющая  $i_d$ , а электромагнитный момент имеет максимальное значение для данного тока. Выберем положительное направление оси  $q$  совпадающим с направлением вектора ЭДС холостого хода  $E_{0m}$ . Ось  $d$  «отстаёт» от оси  $q$  на  $90^\circ$  [1]. В координатах  $d$ ,  $q$  токи и потокосцепления обмотки равны

$$i_d = 0, \quad i_q = I, \quad \psi_d = -L_{AM} I_M, \quad \psi_q = L_q i_q = L_q I, \quad (5)$$

где  $I$  – амплитуда тока статора;  $I_M = H_{CB} h_m$ ;  $H_{CB}$  и  $h_m$  – коэрцитивная сила и высота магнита соответственно.

Уравнения состояния имеют вид

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = U_m \sin \theta - \psi_q \omega - r i_d, \\ \frac{d\psi_q}{dt} = -U_m \cos \theta - \psi_d \omega - r i_q, \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - M_c. \quad (7)$$

Поскольку из третьего равенства (5) следует, что  $\psi_d = \text{const}$ , то первое уравнение (6) становится алгебраическим и его можно использовать для нахождения угла нагрузки  $\theta$

$$\theta = \arcsin \left( \frac{\psi_q \omega}{U_m} \right). \quad (8)$$

Будем решать уравнения (5)–(8) средствами математического пакета Mathcad применительно к параметрам вентильного двигателя 12ДВМ 250, имеющего  $L_{AM} = 6,425 \cdot 10^{-5}$  Гн;  $I_M = 1,108 \cdot 10^4$  А;  $L_d = L_q = 1,58 \cdot 10^4$  Гн. Примем  $U_m = 220 \cdot \sqrt{2}$  В;  $M_c = 400$  Нм.

Результаты решения уравнений (5)–(8) при фиксированных выше параметрах показаны на рис. 4–5. Они имеют затухающий колебательный характер.

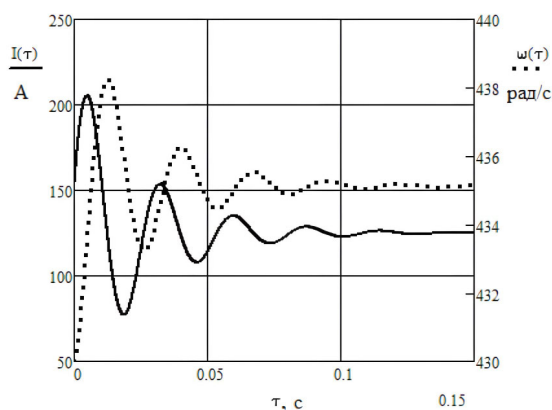


Рис. 4. Амплитуда и угловая частота тока статора

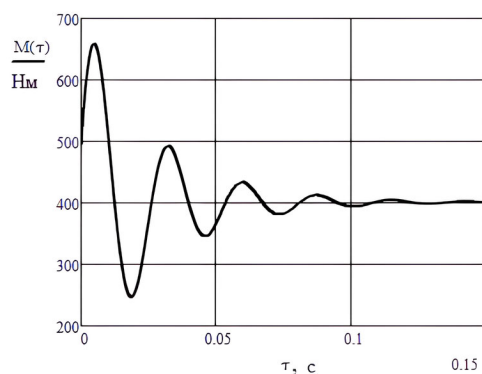


Рис. 5. Электромагнитный момент двигателя

Коэффициент мощности, график которого показан на рис. 6, определялся по формуле

$$\cos \varphi = \frac{\omega L_{AM} I_M + rI}{U_m}$$

Из рис. 6 следует, что установившиеся значения коэффициента мощности и угла нагрузки близки соответственно к единице и нулю.

Продольное и поперечное напряжения обмотки статора, графики которых показаны на рис. 7, находились по формулам

$$U_d = \omega L_q I ; U_q = U_m \cos \theta .$$

Мгновенные значения тока и напряжения фазы А, графики которых показаны на рис. 8, вычислялись согласно выражениям

$$U_A = U_q \cos \omega t - U_d \sin \omega t , i_A = I \cos \omega t .$$

Из рис. 8 следует, что фазовый сдвиг между мгновенными значениями тока и напряжениями фазы А близок нулю.

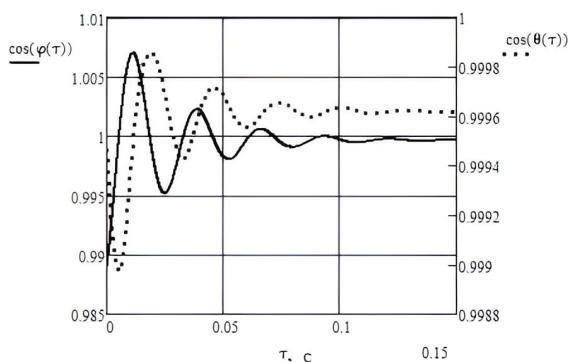


Рис. 6. Косинусы фазового угла тока и угла нагрузки

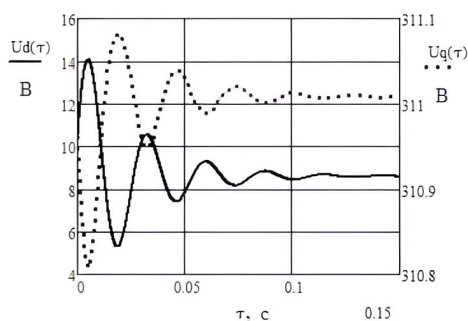


Рис. 7. Составляющие напряжения статора в координатах  $d$  и  $q$

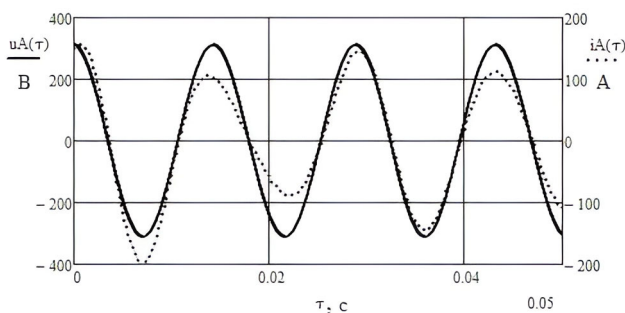


Рис. 8. Напряжение и ток обмотки статора в фазных координатах

**Выводы.** 1. Математические модели вентильных двигателей, построенные на основе метода разделения переменных Фурье, позволяют определить индуктивные параметры обмоток, необходимые для расчёта переходных процессов в соответствующих системах координат.

2. Наиболее эффективным является управление вентильным двигателем, при котором фазные токи находятся в противофазе с ЭДС холостого хода. В этом режиме с отсутствием продольного тока и коэффициентом мощности, близким к единице, уравнения состояния двигателя имеют второй порядок.



## Литература

1. Аналитическое и численное моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей / А.А. Афанасьев, В.С. Генин, В.А. Ваткин и др. // *Электричество*. 2021. № 6. С. 72–78. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-6-72-78.
2. Афанасьев А.А. Расчёт магнитоэлектрических вентильных двигателей методом разделения переменных Фурье // *Электротехника*, 2021. № 2. С. 21–27.
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование работы самонастраивающегося прогностического регулятора скорости вращения ротора синхронного генератора на киберфизической модели турбогенераторной установки // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2022. Т. 15, № 2. С. 177–191. DOI: 10.17516/1999-494X-0381.
4. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М.: Госэнергоиздат, 1960. 312 с.
5. Иванников Ю.Н., Овсянников В.Н. Исследование температурного состояния моментного электродвигателя с ограниченным углом поворота ротора // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. 2022. Т. 30, № 2(74). С. 60–72. DOI: 10.14498/tech.2022.2.5.
6. Исмаилов А.У., Губашева Х.А. Перспективы замены редкоземельных элементов: новые разработки и экологически чистые альтернативы // *Современные наука и образование: достижения и перспективы развития: сб. материалов XXX Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 7 июня 2023 г.): в 4 т. М.: Империя, 2023. Т. 4. С. 24–25.*
7. Король В.И., Ланкин М.В., Ланкин А.М. Метод определения магнитных характеристик высококоэрцитивных постоянных магнитов с применением вейвлет-преобразования // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 6(78). С. 139–150.
8. Новгородские учёные разработали «умные» электродвигатели для буровых установок [Электронный ресурс]. URL: <https://news.novgorod.ru/news/novgorodskie-uchnye-razrabotali-umnye-elektrodvigateli-dlya-burovykh-ustanovok--187824.html>.
9. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Т. 3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969. 352 с.
10. Поливанов К.М. Ферромагнетики. М.: Госэнергоиздат, 1957. 256 с.
11. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
12. Проблемы применения редкоземельных постоянных магнитов в экстремальных условиях эксплуатации / И.И. Акимов, И.Н. Буряков, С.А. Кичко и др. // *Русский инженер*. 2021. № 3. С. 37–39.
13. Chrobak A. High and ultra-high coercive materials in spring-exchange systems – Review, simulations and perspective. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 19, 6506. DOI: 10.3390/ma15196506.

---

**АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

**ГЕНИН ВАЛЕРИЙ СЕМЕНОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (v.s.genin@mail.ru).

**ВАСИЛЬЕВА ЛИДИЯ НИКОЛАЕВНА** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (oln2404@mail.ru).

**ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (niva\_mail@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7130-8588>).

**ВАТКИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, главный конструктор отдела электрических машин, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (vatkinv@yandex.ru).

**ТОКМАКОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ** – директор по развитию, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (tokmakov\_da@mail.ru).

---

Aleksandr A. AFANASYEV, Valery S. GENIN, Lidia N. VASILEVA,  
Nadezhda N. IVANOVA, Vladimir A. VATKIN, Dmitry A. TOKMAKOV

ANALYTICAL CALCULATION OF MAGNETOELECTRIC  
VALVE MOTOR AND DEFINITION  
OF INDUCTIVE PARAMETERS OF ITS WINDINGS

**Key words:** scalar magnetic potentials, magnetic induction, magnetic sheets, magnetization, ferromagnetic media, inductive parameters of windings.

To implement the dynamic properties of the designed valve motors and achieve the proper quality of transient processes in the drives of complex mechanisms, it is necessary to study their electromagnetic and functional characteristics with the calculation of the inductive parameters of the windings.

**The purpose of the study** is to study the electromagnetic and functional characteristics of the magnetolectric valve motor and determine the inductive parameters of its windings.

**Materials and methods.** The magnetic field of the machine is divided into a set of horizontal stripes (mediums), analyzed independently of each other. It is assumed that the magnetic field in these stripes is plane-parallel, and at the boundaries of the selected stripes the conjugation conditions are met: scalar magnetic potentials and normal components of magnetic induction do not undergo a jump (discontinuity). The magnetomotive force of the stator winding, the coercive force of magnets and the magnetization of soft magnetic ferromagnetic media are considered as sources of the magnetic field. Expressions for describing scalar magnetic potentials and normal components of magnetic induction in selected bands are obtained using the Fourier variable separation method.

**Research results.** A study of the electromagnetic and functional characteristics of the motor was carried out using a mathematical model of the magnetolectric valve motor based on the Fourier method of separation of variables with the division of the active region into homogeneous sections in the form of magnetic sheets. The model enables to determine magnetic inductions for any coordinate points  $x, y$  of the active region of the motor magnetic system. Expressions describing the inductive parameters of the windings are obtained, and the equations of the state of the motor are given for the case when the currents in the phase windings of the stator are in antiphase with their no-load EMF.

**Conclusions.** Mathematical models of valve motors, built on the basis of the Fourier variable separation method, make it possible to determine the electromagnetic characteristics of motors and the inductive parameters of windings necessary for calculating transient processes. The most effective is valve motor control, when the phase currents are in antiphase with the no-load EMF. In this mode, with the absence of longitudinal current and with a power factor close to unity, the equations of state of the motor are of the second order.

#### References

1. Afanasyev A.A., Genin V.S., Vatin V.A. *Analiticheskoe i chislennoe modelirovanie magnitoelektricheskikh ventil'nykh dvigatelei* [Analytical and Numerical Simulation of Magnetolectric Valve Motors]. *Elektrichestvo*, 2021. no. 6, pp. 72–78. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-6-72-78.
2. Afanasiev A.A. Calculating Magnetolectric Valve Motors by the Fourier Variable Separation Method. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 2, pp. 77–83. DOI: 10.3103/S1068371221-020024.
3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. *Issledovanie raboty samonastrayayushchegosya prognosticheskogo regulatora skorosti vrashcheniya rotora sinkhronnogo generatora na kiberfizicheskoi modeli turbogeneratornoi ustanovki* [Investigation of the Operation of a Self-Adjusting Predictive Controller of the Rotor Speed of a Synchronous Generator on a Cyber-Physical Model of a Turbogenerator Plant]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 177–191. DOI: 10.17516/1999-494X-0381.
4. Vazhnov A.I. *Osnovy teorii perekhodnykh protsessov sinkhronnoi mashiny* [Fundamentals of Transient Theory of a Synchronous Machine]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960, 312 p.
5. Ivannikov Yu.N., Ovsyannikov V.N. *Issledovanie temperaturnogo sostoyaniya momentnogo elektrodvigatelya s ogranichennym uglom povorota rotora* [Investigation of Thermal Field of the

Limited-Angle Torque Motor]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2022, vol. 30, no. 2(74), pp. 60–72. DOI: 10.14498/tech.2022.2.5.

6. Ismailov A.Yu., Gubasheva Kh.A. *Perspektivy zameny redkozemel'nykh elementov: novye razrabotki i ekologicheski chistye al'ternativy* [Prospects for Rare Earth Element Substitution: New Developments and Environmentally Friendly Alternatives]. In: *Sovremennye nauka i obrazovanie: dostizheniya i perspektivy razvitiya: sb. materialov XXX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 7 iyunya 2023 g.): v 4 t.* [Proc. of 30th Int. Sci. Conf. «Modern Science and Education: Achievements and Development Prospects». 4 vols.]. Moscow, Imperiya Publ., 2023, vol. 4, pp. 24–25.

7. Korol' V.I., Lankin M.V., Lankin A.M. *Metod opredeleniya magnitnykh kharakteristik vysokokoertsitivnykh postoyannykh magnitov s primeneniem veivlet-preobrazovaniya* [Method for Determining the Magnetic Characteristics of High-Coercive Permanent Magnets Using the Wavelet Transform]. *Inzheneryi vestnik Dona*, 2021, no. 6(78), pp. 139–150.

8. *Novgorodskie uchenye razrabotali «umnye» elektrodvigateli dlya burovnykh ustanovok* [Novgorod Scientists Have Developed "Smart" Electric Motors for Drilling Rigs]. Available at: <https://news.novgorod.ru/news/novgorodskie-uchnye-razrabotali-umnye-elektrodvigateli-dlya-burovnykh-ustanovok--187824.html>.

9. Polivanov K.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. T. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 3: Electromagnetic Field Theory]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 352 p.

10. Polivanov K.M. *Ferromagnetiki* [Ferromagnets]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1957, 256 p.

11. Polyaniin A.D. *Spravochnik po lineinym uravneniyam matematicheskoi fiziki* [Handbook of Linear Equations of Mathematical Physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 576 p.

12. Akimov I.I., Buryakov I.N., Kichko S.A. et al. *Problemy primeneniya redkozemel'nykh postoyannykh magnitov v ekstremal'nykh usloviyakh ekspluatatsii* [Problems of Using Rare-Earth Permanent Magnets in Extreme Operating Conditions]. *Russkii inzhener*, 2021, no. 3, pp. 37–39.

13. Chrobak A. High and ultra-high coercive materials in spring-exchange systems – Review, simulations and perspective. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 19, 6506. DOI: 10.3390/ma15196506.

---

**ALEKSANDR A. AFANASYEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).**

**VALERY S. GENIN – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (v.s.genin@mail.ru).**

**LIDIA N. VASILEVA – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (oln2404@mail.ru).**

**NADEZHDA N. IVANOVA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (niva\_mail@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7130-8588>).**

**VLADIMIR A. VATKIN – Candidate of Technical Sciences, Chief Designer, Department of Electrical Machines, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary (vatkinv@yandex.ru).**

**DMITRY A. TOKMAKOV – Director for Development, JSC «ChEAZ», Russia, Cheboksary (tokmakov\_da@mail.ru).**

---

**Формат цитирования:** Афанасьев А.А., Генин В.С., Васильева Л.Н., Иванова Н.Н., Ваткин В.А., Токмаков Д.А. Аналитический расчёт магнитоэлектрического вентильного двигателя и определение индуктивных параметров его обмоток // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 24–34. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-24-34.