

3.П. ПРОЦЫНА, аспирант, ОНТУ, Одесса

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВ ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫКЛЮЧЕНИЯ ФАЗ ВЕНТИЛЬНО- РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлено можливі технічні рішення при формуванні кутів вмикання/вимикання фаз вентильно-реактивного електродвигуна. Запропоновано рекомендації з поліпшення його характеристик та енергетичних показників шляхом оптимізації параметрів комутації.

Представлены возможные технические решения при формировании углов включения/выключения фаз вентильно-реактивного электродвигателя. Предложены рекомендации по улучшению его характеристик и энергетических показателей путем оптимизации параметров коммутации.

Введение. Существенное влияние на рабочие характеристики и энергетические показатели вентильно-реактивного электродвигателя (ВРД) оказывают параметры коммутации [1, 2, 3]. Известен ряд способов изменения параметров коммутации ВРД, среди которых можно выделить следующие:

1. Симметричное расширение зоны коммутации фаз.
2. Расширение зоны коммутации с опережением включения фаз.
3. Применение инкрементного или абсолютного энкодера, позволяющего определять текущее положение ротора ВРД, и с помощью системы управления программно задавать углы включения и отключения фаз. Аналогичные возможности предоставляет бездатчиковое управление ВРД.

Учитывая, что способы 1 и 2 рассмотрены в [3], ниже приведены расчетные исследования способа 3.

Цель данной статьи – улучшить рабочие характеристики и энергетические показатели ВРД путем оптимизации значений углов включения и выключения фаз.

Базовая конструкция. При выполнении работы в качестве объекта исследования принят 4-х фазный ВРД (рис. 1) с соотношением числа полюсов статора к ротору 16/12, геометрические размеры которого приведены в табл. 1.

На рис. 2 представлена зависимость электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ от угла поворота ротора θ для тока фазы $I_{Ф} = 2,5\text{А}$. При этом

средний момент для зоны коммутации $\theta = 11,25 \div 3,75^\circ$ составляет $M_{\text{ср}} = 3,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а коэффициент пульсаций статического момента $K_{\text{пульс}} = 8,7 \%$.

Коэффициент пульсаций момента рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{пульс.}} = \frac{(M_{\text{MAX}} - M_{\text{MIN}}) \cdot 100\%}{2 \cdot M_{\text{ср}}},$$

где M_{MAX} и M_{MIN} – максимальный и минимальный момент в зоне коммутации.

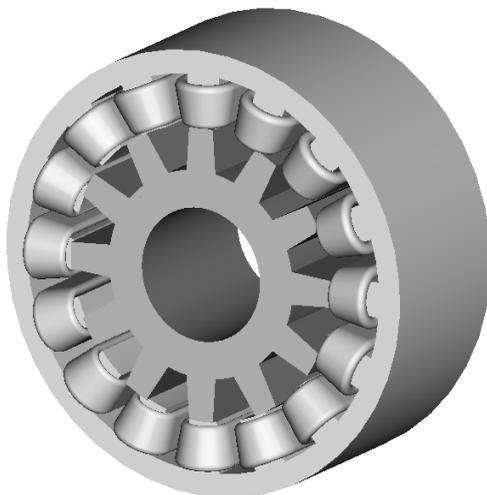


Рис. 1. Электромеханический преобразователь ВРД

Таблица 1 – Геометрические размеры ВРД

Размер	Значение
Внешний диаметр статора, мм	115
Активная длина, мм	40
Воздушный зазор, мм	0.25
Число витков в фазе	220

За $\theta = 0^\circ$ принимается положение, при котором ось зубца статора совпадает с осью зубца ротора. Зона коммутации равна $7,5^\circ$. При этом угол включения $\theta_{\text{вкл}} = 11,25^\circ$, а угол выключения $\theta_{\text{выкл}} = 3,75^\circ$.

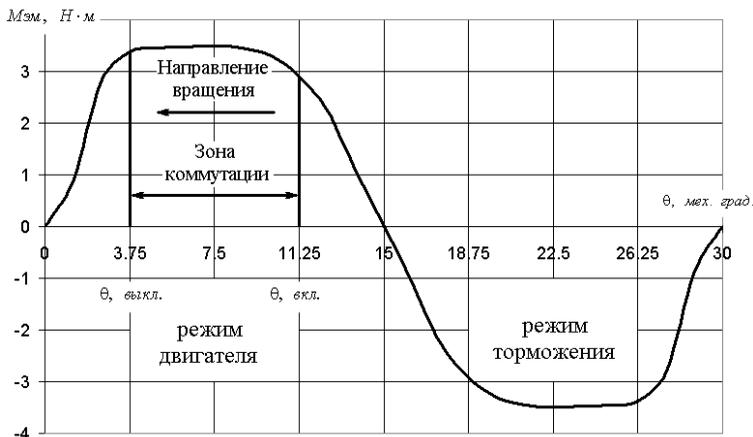


Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента M от угла рассогласования θ

При определении динамических характеристик использована следующая математическая модель (для одной фазы):

$$\begin{cases} U_{\Phi} = I_{\Phi} \cdot R_{\Phi} + \frac{d\Psi_{\Phi}}{dt}, \\ M_{\Phi} = M_C + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

где U_{Φ} – напряжение фазы, I_{Φ} – ток фазы, R_{Φ} – сопротивление фазы, Ψ_{Φ} – потокосцепление фазы, M_{Φ} – электромагнитный момент от одной фазы, M_C – момент сопротивления, J_{Σ} – суммарный момент инерции системы электропривода, ω – угловая скорость ротора, t – время.

Первое уравнение системы (1) – дифференциальное уравнение электрического равновесия, записываемое для каждой из фаз ВРД в предположении о том, что фазы являются независимыми в магнитном отношении, а сама магнитная система – симметрична относительно фаз. Второе уравнение системы (1) – дифференциальное уравнение механического равновесия движущихся частей ВРД.

Решение системы (1) позволяет найти динамические характеристики ВРД $I_{\Phi}, M, \omega = f(t)$, а также построить его механическую характеристику $\omega = \varphi(M)$.

Для решения системы (1) первоначально требуется получить зависимости для фазы ВРД:

$$\Psi_{\Phi} = f_1(I_{\Phi}, \theta), \quad (2)$$

$$M_{\Phi} = f_2(I_{\Phi}, \theta). \quad (3)$$

Зависимости (2), (3) являются существенно нелинейными, что определяется принципом работы и геометрическими особенностями ВРД. Наиболее быстро и точно они могут быть получены путем численного расчета магнитного поля методом конечных элементов, т.е. на базе полевой математической модели [4].

Моделирование и оптимизация. Для расчета режимов работы ВРД разработана подсистема компьютерного моделирования [5]. Для решения оптимизационных задач в подсистеме реализован модуль, позволяющий проводить оптимизацию геометрических размеров электромеханического преобразователя и параметров схемы управления. Реализованы методы полного перебора и генетический алгоритм (ГА).

Ввод исходных данных осуществляется в таблицу (рис. 3). При этом формируется вектор варьируемых переменных и ограничений, выбирается критерий оптимизации и метод поисковой оптимизации. Настройка параметров генетического алгоритма выполняется в отдельном окне (рис. 4). В модуле оптимизации применена реализация ГА [6].

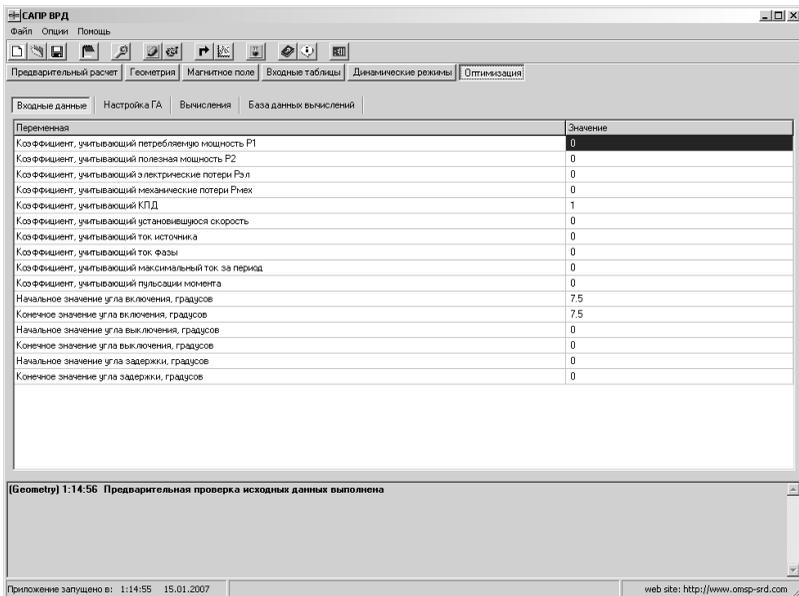


Рис. 3. Окно ввода исходных данных

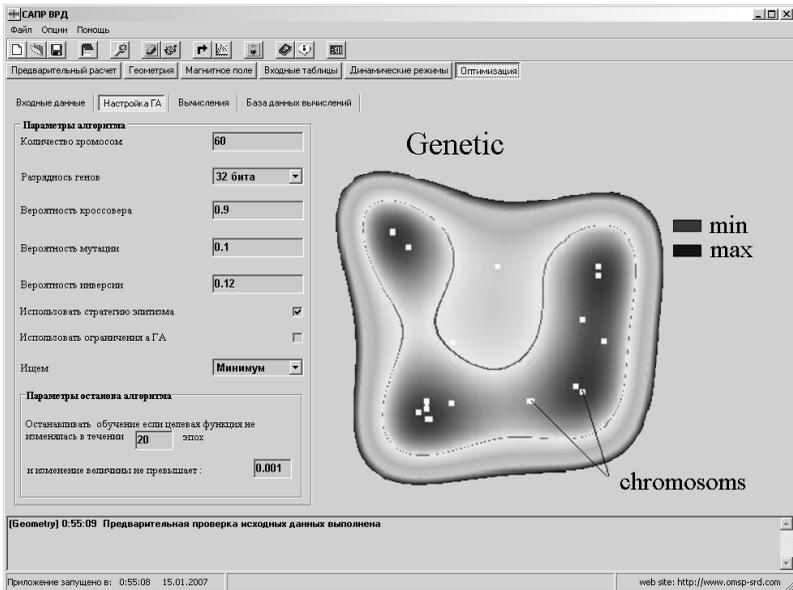


Рис. 4. Окно настройки параметров ГА

При величине зоны коммутации ВРД, равной $7,5^\circ$, с углами включения и выключения $11,25^\circ$ и $3,75^\circ$ соответственно, получаем следующие характеристики: частота вращения $n = 600$ об/мин, коэффициент полезного действия (КПД) $\eta = 59,7\%$ и коэффициент пульсаций $K_{\text{пульс}} = 63\%$. Диаграмма мгновенных значений электромагнитного момента от времени приведена на рис. 5.

С целью уменьшения коэффициента пульсаций момента, улучшения рабочих характеристик и энергетических показателей ВРД проведем оптимизацию углов включения/выключения фаз.

В качестве варьируемых переменных используются величины углов включения и выключения фаз. Варьируемые переменные и границы их изменения представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Границы изменения варьируемых переменных

Варьируемая переменная	<i>min</i>	<i>max</i>
Угол включения, $\theta_{\text{вкл}}$, град.	7,5	20
Угол выключения, $\theta_{\text{выкл}}$, град.	0	11

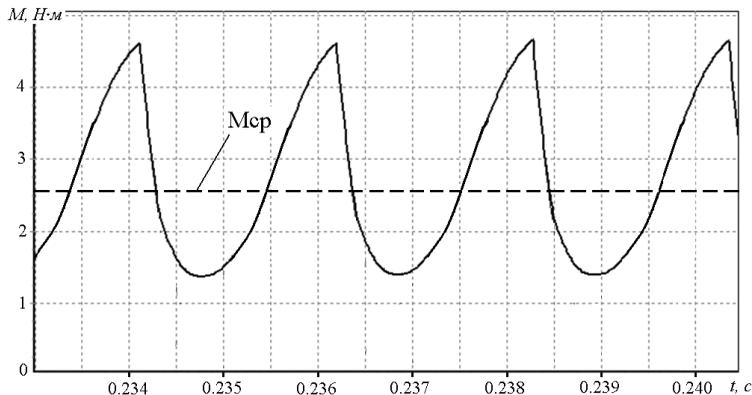


Рис. 5. Диаграмма электромагнитного момента от времени при углах $\theta_{\text{вкл}} = 11,25^\circ$ и $\theta_{\text{выкл}} = 3,75^\circ$, частота вращения $n = 600$ об/мин

Как показывает опыт практического использования ВРД, возникают ситуации, когда заданные углы включения и выключения фаз не позволяют развить ВРД электромагнитный момент, превышающий момент сопротивления. При этом ротор ВРД остается неподвижен. Поэтому в качестве ограничения выступает условие пуска ВРД с заданными параметрами коммутации:

$$\begin{cases} M_{\text{ЭМ}} > M_{\text{С}}, \\ \omega \neq 0. \end{cases}$$

В качестве критерия оптимизации принят минимум коэффициента пульсаций момента, $K_{\text{пульс}}$, и максимум коэффициента полезного действия.

Оптимизация выполнялась методом ГА.

На рис. 6 и 7 приведены фрагменты допустимой области в виде линий уровня, показывающих изменение КПД и коэффициента пульсаций момента $K_{\text{пульс}}$ от двух переменных: углов включения и выключения фазы.

Результаты оптимизации приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты оптимизации

	$\theta_{\text{вкл}}$, град.	$\theta_{\text{выкл}}$, град.	η , %	$K_{\text{пульс}}$, %
До оптимизации	11,25	3,75	59,7	63
После оптимизации	15	6	73,8	12,8

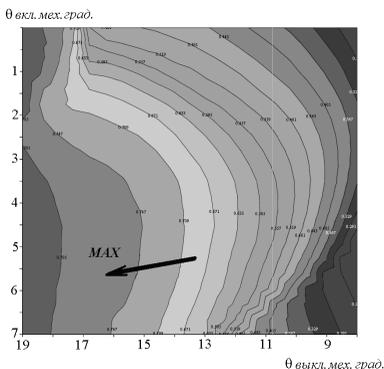


Рис. 6. Изменение КПД в функции двух переменных углов включения и выключения

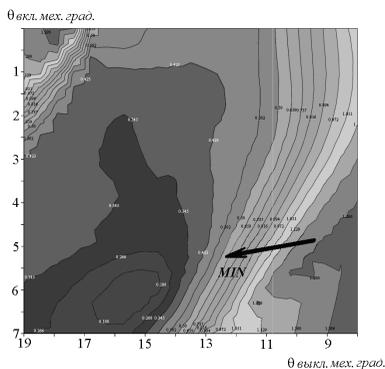


Рис. 7. Изменение коэффициента пульсаций момента в функции переменных углов включения и выключения

Обсуждение результатов. Таким образом, задавая углы включения и выключения из таблицы 3, полученные после оптимизации, можно добиться улучшения КПД на 14 %, и снижения коэффициента пульсаций момента $K_{\text{пульс.}}$ – более чем на 50 %. Диаграмма момента для оптимизированного варианта приведена на рис. 8.

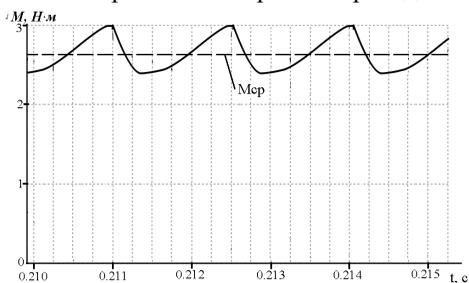


Рис. 8. Диаграммы электромагнитного момента от времени при углах $\theta_{\text{вкл.}} = 15^\circ$ и $\theta_{\text{выкл.}} = 6^\circ$, частота вращения $n = 1000$ об/мин

На рис. 9 показано распределение электромагнитного момента для двух соседних фаз при коммутации с углами $\theta_{\text{вкл.}} = 15^\circ$ и $\theta_{\text{выкл.}} = 6^\circ$.

При заданных углах, $\theta_{\text{вкл.}} = 15^\circ$ и $\theta_{\text{выкл.}} = 6^\circ$, величина зоны коммутации составляет 9° и коммутация производится с перекрытием фаз. Благодаря этому в ВРД создается электромагнитный момент даже тогда, когда момент создаваемый одной из фаз равен нулю. Это показано на рис. 7, при угле поворота ротора на 15° электромагнитный момент от фазы "А" равен нулю, в то же самое время момент от фазы "В" равен максимальному.

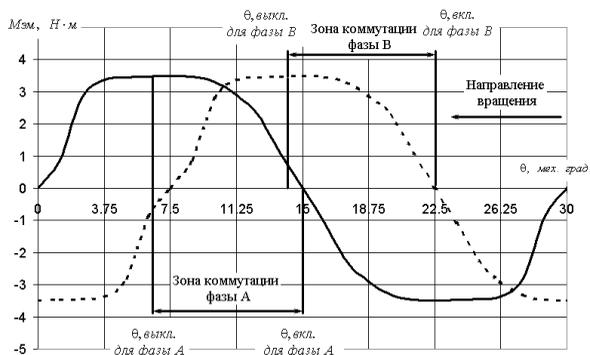


Рис. 9. Распределение электромагнитного момента

Выводы. 1. Существенное улучшение энергетических характеристик и рабочих свойств ВРД возможно путем оптимизации углов коммутации.

2. Для технической реализации управления с оптимальными углами включения/выключения нужно использовать систему управления, которая позволяет определять текущее положение ротора ВРД. В качестве датчика обратной связи возможно использование инкрементного или абсолютного энкодера.

Список литературы: 1. *Krishnan R.* Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p. 2. *Miller T.J.E.* Switched Reluctance Motors and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p. 3. Влияние параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного электропривода / *Радимов И.Н., Рымица В.В., Процына З.П., Гулый М.В.* // Электромашиностроение и электрооборудование № 67 – 2006 – С. 82-87. 4. *Радимов И.Н., Рымица В.В., Малеваный О.Е.* Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя. Электротехника і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60-64. 5. *Рымица В.В., Радимов И.Н., Процына З.П.* Подсистема компьютерного моделирования вентильно-реактивных электродвигателей // Вестник Херсонского национального технического университета. – Вып. 2(25) 2006. – С. 437-442. 6. *Стариков А.* GeneBase – библиотека компонентов для Delphi. <http://www.basegroup.ru/download/freecomponents/genebase/>

Поступила в редакцию 19.02.2009