

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОММУТАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Радимов И.Н., к.т.н., доц.

Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"

Украина, 65005, Одесса, ул. Мельницкая, 26/2

Тел. (048) 738-58-55, E-mail: [npo@omsp.od.ua](mailto:npo@omsp.od.ua)

Рымша В.В., д.т.н., доц., Процина З.П., Гулый М.В.

Одесский национальный политехнический университет

Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин

Тел. (048) 738-58-55, E-mail: [rimsha@omsp.od.ua](mailto:rimsha@omsp.od.ua)

*Показано, що за рахунок раціонального вибору параметрів комутації можна здобути значного поліпшення енергетичних показників та характеристик вентильно-реактивного електропривода.*

*Показано, что за счет рационального выбора параметров коммутации можно добиться значительного улучшения энергетических показателей и характеристик вентильно-реактивного электропривода.*

Известно, что выбор параметров коммутации фаз вентильно-реактивного электропривода (ВРЭП) оказывает существенное влияние на его рабочие свойства и энергетические показатели [1,2,3].

Цель настоящей статьи – анализ возможных технических решений при формировании углов коммутации фаз и разработка рекомендаций для улучшения характеристик и энергетики ВРЭП.

При проведении анализа в качестве объекта исследования принят четырехфазный низкоскоростной ВРЭП (рис. 1) со следующими данными: число полюсов статора – 16, число полюсов ротора – 12, внешний диаметр статора – 130 мм, диаметр расточки – 81 мм, активная длина – 80 мм, воздушный зазор – 0,25 мм, число витков фазы – 132.

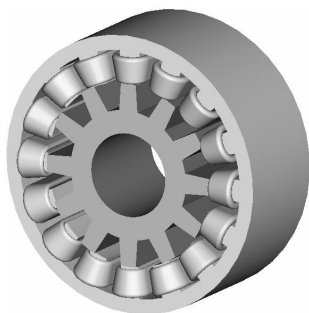


Рис. 1. Электромеханический преобразователь ВРЭП

Электромеханический преобразователь ВРЭП спроектирован с коэффициентами полного перекрытия статора  $\alpha_S = 0,5$  и ротора  $\alpha_R = 0,42$ , которые обеспечивают для статического режима максимальное значение среднего электромагнитного момента  $M_{cp}$  в зоне коммутации  $\Theta_{КОМ} = 90$  эл. град. при минимальном уровне его пульсаций [4]. Так, например, на рис. 2 приведена зависимость электромагнитного момента  $M$  от угла

рассогласования  $\Theta$  для тока фазы  $I_\phi = 10A$ . При этом  $M_{cp} = 4,3Hm$ , а коэффициент пульсаций статического момента  $K_{пульс.} = 5,3\%$ .

Для коммутации фаз ВРЭП с указанной выше зоной достаточно применения двухканального датчика положения ротора с числом периодов выходного сигнала, равным числу полюсов ротора. Разрешение на включение фаз получается комбинацией логических сигналов с выхода каналов датчика. Эти сигналы, со скважностью, равной 2, смещены друг относительно друга на 90 эл. град.

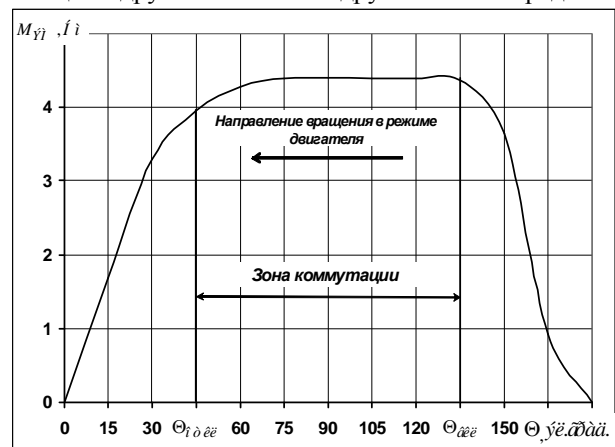


Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента  $M$  от угла рассогласования  $\Theta$

В динамических режимах из-за переходных процессов изменения тока при коммутации фаз происходит снижение среднего момента, увеличивается уровень пульсаций момента, по сравнению с рассчитанными в статике.

В особенности эти явления имеют место при работе ВРЭП на «естественной» механической характеристике, где отсутствует возможность форсировки тока фазы.

Для улучшения характеристик ВРЭП

возможны следующие способы:

1. Применение буферных конденсаторов, ускоряющих рост тока во включаемой фазе. Недостаток – необходимость применения электронных силовых компонентов на повышенное напряжение.

2. Симметричное расширение зоны коммутации фаз. В этом варианте необходимо применение датчика, имеющего вместо двух каналов уже четыре – по числу фаз ВРЭП.

3. Расширение зоны коммутации с опережением включения фаз, что требует, для реверсивных приводов, увеличения числа сигналов с датчика положения ротора до восьми. При этом угол включения фазы смещается в сторону рассогласованного положения полюсов статора и ротора.

4. Применение инкрементного энкодера с большим числом импульсов на оборот (360 и более), позволяющего определять текущее положение ротора ВРЭП, и с помощью системы управления программно задавать углы включения/отключения фаз в зависимости от скорости вращения ротора, а также формировать токи фаз при их выключении. Аналогичные возможности предоставляет бездатчиковое управление ВРЭП.

Учитывая, что способ 1 достаточно подробно рассмотрен в [1], а способ 4 требует отдельного изложения результатов его применения (что будет сделано в дальнейшем), ниже приведены расчетные исследования способов 2 и 3, а также их сопоставительный анализ с исходным вариантом с  $\Theta_{КОМ}=90$  эл. град.

В основу исследований положена следующая математическая модель:

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

где  $U_{\phi}$  - напряжение,  $I_{\phi}$  - ток фазы,  $R_{\phi}$  - сопротивление фазы,  $\Psi_{\phi}$  - потокосцепление фазы,  $M_{\Sigma}$  - результирующий электромагнитный момент от действия всех фаз,  $M_C$  - момент сопротивления,  $J_{\Sigma}$  - суммарный момент инерции системы электропривода,  $\omega$  - угловая скорость ротора,  $t$  - время.

Первое уравнение системы (1) – дифференциальное уравнение электрического равновесия, записываемое для каждой из фаз ВРЭП 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 ВРЭП.

Решение системы (1) позволяет найти динамические характеристики ВРЭП  $I_{\phi}, M, \omega = f(t)$ , а также построить его

механическую характеристику  $\omega = \varphi(M)$ .

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

$$\Psi_{\phi} = f_1(I_{\phi}, \Theta_{\phi}), \quad (2)$$

$$M_{\phi} = f_2(I_{\phi}, \Theta_{\phi}), \quad (3)$$

где  $M_{\phi}$  - электромагнитный момент фазы,  $\Theta_{\phi}$  - механический угол между осями полюсов фазы статора, возбуждаемой током  $I_{\phi}$ , и ротора.

Зависимости (2)÷(3) являются существенно нелинейными, что определяется принципом работы и геометрическими особенностями ВРЭП. Наиболее быстро и точно они могут быть получены путем численного расчета магнитного поля методом конечных элементов (МКЭ), т.е. на базе полевой математической модели [5].

Для расчета режимов работы ВРЭП разработана подсистема компьютерного моделирования, базирующаяся на положениях, изложенных в [5], отличительными особенностями которой являются:

- по сравнению с подсистемой [1] - использование результатов расчета магнитного поля ВРЭП численным методом с учетом реальной геометрии и уровня насыщения участков магнитной системы;

- по сравнению с подсистемой [6] – увеличенное более чем на порядок быстродействие, что позволяет проводить многочисленные расчетные исследования в сжатые сроки.

Подсистема обладает следующими возможностями:

- ввод исходных данных и выполнение предварительного расчета геометрических размеров, электромагнитных нагрузок и обмоточных данных электромеханического преобразователя ВРЭП;

- передача результатов предварительного расчета в программу FEMM [7] для моделирования магнитного поля и получения зависимостей (2) и (3) в табличной форме с последующей их визуализацией;

- расчет полного сопротивления цепи фазы с учетом топологии схемы инвертора, а также расчет суммарного момента инерции, состоящего из момента инерции ротора и момента инерции механизма, приведенного к валу ротора;

- анализ динамических режимов работы ВРЭП с представлением результатов в виде диаграмм (либо таблиц) изменения мгновенных значений:

- а) напряжений и токов фаз, а также тока источника,

- б) моментов фаз и суммарного момента двигателя,

- в) потокосцепления фаз,

- д) скорости двигателя с представлением значений углов коммутации,

- е) полезной мощности, потребляемой мощности и мощности потерь,

- ж) потребленной энергии от источника за время пуска и отдаваемой энергии источнику при торможении;

- анализ квазиустановившихся режимов работы ВРД с представлением:

а) значений потребляемой и полезной мощности, мощности электрических и механических потерь, а также оценки сходимости расчета баланса мощности,

б) значений установившейся скорости и среднего момента  $M_{cp}$  с оценкой величины пульсаций момента,

в) величины КПД ВРЭП,

г) механической характеристики  $\omega = \varphi(M)$ ,

д) рабочих характеристик ВРЭП.

С использованием изложенных выше математических и программных средств моделирования ВРЭП получены следующие результаты по улучшению характеристик ВРЭП.

Способ 2. Исследовалось влияние симметричного расширения зоны коммутации  $\Theta_{КОМ}$  в пределах от 7,5 до 15 градусов на изменение КПД  $\eta$  и коэффициента пульсаций  $K_{пульс.}$  момента при работе ВРЭП на «естественной» механической характеристике. На рис. 3,4 представлены указанные зависимости для ряда значений момента  $M$ . Как следует из рис. 3, 4 для увеличения КПД при одновременном снижении уровня пульсаций момента ВРЭП, по сравнению с вариантом коммутации в 90 эл. град. (7,5 мех. град.), может быть рекомендована зона коммутации в 132 эл. град. (11 мех. град.). Так, например, для значения момента  $M = 4Нм$  имеем: при  $\Theta_{КОМ} = 7,5$  мех. град. КПД составлял 35,9%, при  $\Theta_{КОМ} = 11$  мех. град. он вырос до 41,3%, а  $K_{пульс.}$  снизился с 49,6% до 36,9%. Таким образом, незначительное удорожание датчика положения ротора позволяет улучшить показатели ВРЭП.

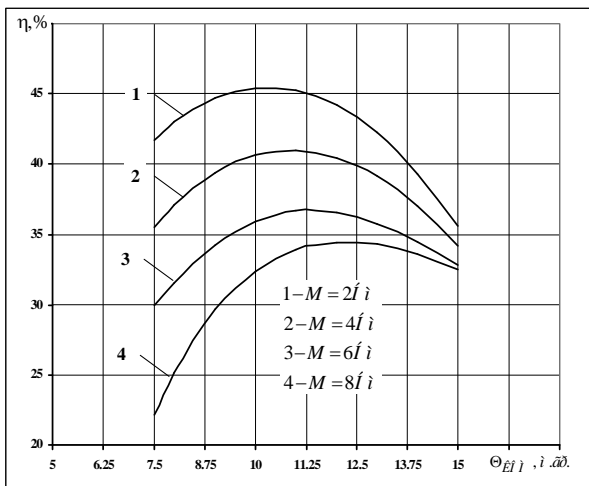


Рис. 3. Зависимости  $\eta = f(\Theta_{КОМ})$  для ряда значений момента  $M$

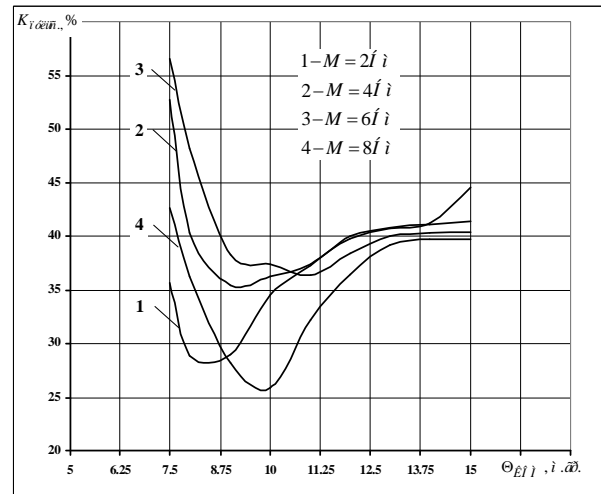


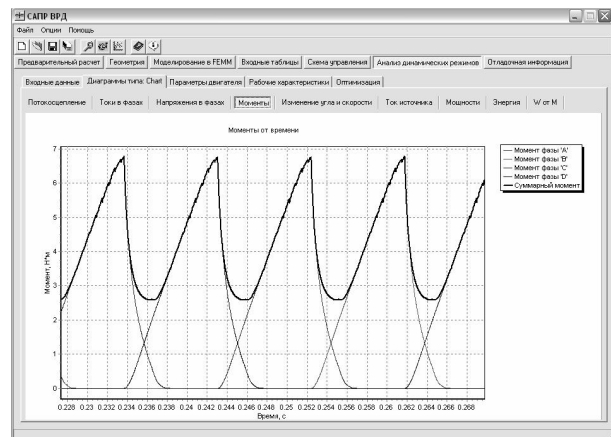
Рис. 4. Зависимости  $K_{пульс.} = f(\Theta_{КОМ})$  для ряда значений момента  $M$

Способ 3. Исследовалось влияние расширения зоны коммутации и смещения угла включения фазы в сторону рассогласованного положения полюсов статора и ротора. Результаты расчетов позволяют рекомендовать следующие параметры коммутации:

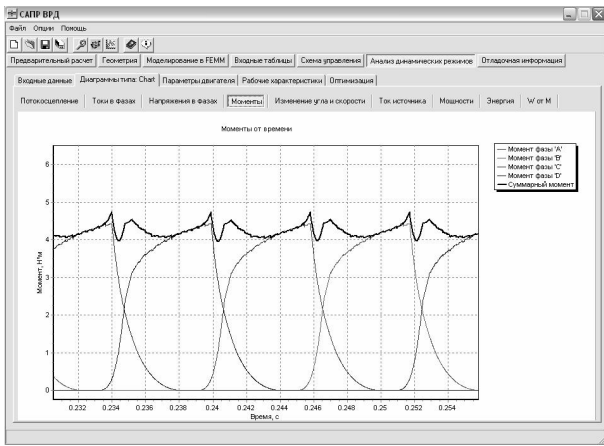
$\Theta_{КОМ} = 8,5$  мех. град.,  $\Theta_{вкл} = 0,5$  мех. град. При таких параметрах наблюдается дальнейший рост КПД – до 47,7%, а также существенное снижение коэффициента пульсаций момента – до 9,4% при  $M = 4Нм$ , что хорошо иллюстрируется рис. 5.

Сопоставление результатов.

На рис. 6,7 представлены результаты расчетов значений  $\eta$  и  $K_{пульс.}$  в зависимости от момента для предложенных выше способов коммутации в сопоставлении с исходным вариантом с  $\Theta_{КОМ} = 90$  эл. град., а также механические характеристики ВРЭП (рис. 8). На рисунках: зависимости 1 – исходный вариант, 2 – коммутация по способу 2, 3 – коммутация по способу 3.



а)



б)

Рис. 5. Зависимости момента ВРЭП от времени при:

а)  $\Theta_{КОМ} = 7,5, \Theta_{вкл} = 3,75$

б)  $\Theta_{КОМ} = 8,5, \Theta_{вкл} = 0,5$



Рис. 6. Зависимости  $\eta = f(M)$

Как видно из приведенных зависимостей применение способа коммутации 2 позволяет, по сравнению с исходным вариантом, увеличить КПД ВРЭП в среднем на 6%, снизить  $K_{пульс.}$  в среднем на 10%, а переход к способу 3 способствует дополнительному увеличению КПД в среднем еще на 6% при снижении  $K_{пульс.}$  в среднем до 13%.

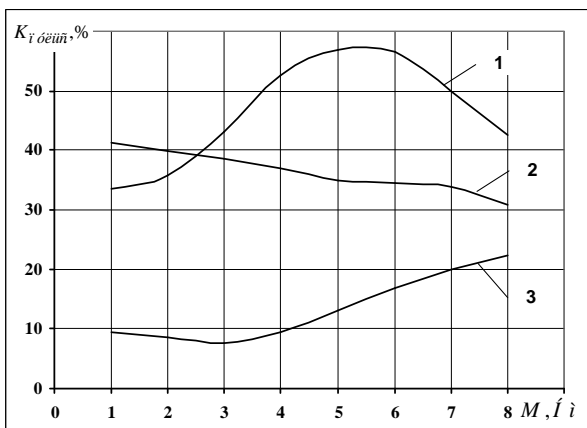


Рис. 7. Зависимости  $K_{пульс.} = f(M)$

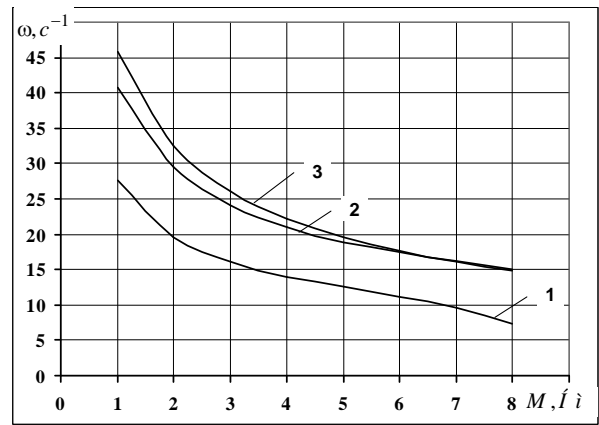


Рис. 8. Механические характеристики  $\omega = \varphi(M)$

Рассмотрение механических характеристик позволяет сделать заключение о том, что способы 2 и 3 дают примерно одинаковое смещение «естественной» механической характеристики ВРЭП в область больших значений скорости. При этом для одних и тех же значений момента скорость отличается в среднем в 1,55 раза от исходного варианта.

Интерес представляет также рассмотрение процесса пуска электропривода при указанных способах коммутации. На рис. 9 представлены результаты моделирования процесса разгона при следующих условиях:

$$M_C = 4H_m,$$

$J_{\Sigma} = 0,0056 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Ток привода ограничен на уровне 20 А.

Видно, что на начальном участке разгона динамические свойства при различных способах коммутации примерно одинаковы. Влияние коммутационных параметров начинает проявляться при выходе на установившуюся скорость, а именно наблюдаются отличия как по среднему значению установившейся скорости, так и по уровню ее пульсаций.

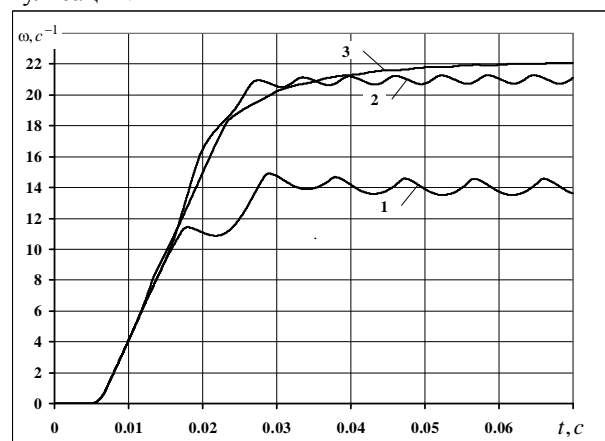


Рис. 9. Моделирование процесса пуска ВРЭП

### Выводы.

1. Существенное улучшение энергетических характеристик и рабочих свойств ВРЭП возможно путем небольшого усложнения датчика положения ротора, что не приводит к заметному удорожанию

электропривода в целом.

2. Соответствующая настройка параметров коммутации с расширением и сдвигом зоны коммутации в сторону опережения угла включения дает значительный выигрыш в виде увеличения КПД, снижения уровня пульсаций момента, повышения степени использования электропривода.

3. Представленные рекомендации по численным значениям параметров коммутации применимы для рассмотренного электропривода. Для других ВРЭП они требуют проведения аналогичного расчетного исследования по приведенной выше методике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”. 2001. – 404 с.

2. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. - 398 p.

3. Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and their Control. - Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993, 203 p.

4. Пуйло Г.В., Порайко А.С., Радимов И.Н., Рымша В.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентильно-реактивного двигателя // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Тематичний випуск: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: Вид-во НУ “ЛП”. – 2003. - № 485. – С. 112-117.

5. Радимов И.Н., Рымша В.В., Малеваный О.Е. Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60-64.

6. Карпович О.Я., Онищенко О.А. Компьютерное исследование динамических свойств вентильно-индукторного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. - № 4. – С. 42-45.

7. <http://femm.foster-miller.net>