

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Васильев Л.А., Мнускин Ю.В.

Донецкий государственный технический университет

Yuri@mn.dc.donetsk.ua

In this article the problems of definition parameters of control switched reluctance motor (SRM) for deriving the greatest power of the drive under condition of the least expense energy are considered. The expressions for definition of a rational number of coils of a phase winding and look-ahead angle of inclusion current of a phase are obtained.

Важной особенностью вентильно-реактивных двигателей (ВРД) является дискретность цикла преобразования энергии и несинусоидальность потока и токов в фазах обмотки.

При этом возникает необходимость определения значений параметров управления силовым преобразователем (СП) ВРД и конструктивных особенностей электро-механического преобразователя (ЭМП), позволяющих повысить эффективность привода. Эта задача отличается многовариантностью, в связи с чем оптимизация возможна по разным показателям. По этой причине не существует единого подхода к управлению ВРД.

Обычно к маломощным двигателям предъявляются менее жесткие требования, чем к мощным, и для них используются относительно простые алгоритмы управления. Устройство управления на жесткой логике, СП с двумя режимами работы: подключение к источнику питания и отключение с быстрым снижением тока до нуля позволяют применять относительно простое широтно-фазовое регулирование [1].

Для мощных тяговых ВРД такой подход малопримем, поэтому используются более сложные СП с возможностями формирования и контроля тока в каждой фазе, попарной работы фаз и защитой от сквозных токов. Соответственно, ВРД с такими СП требуют более сложных алгоритмов управления, которые реализуются интеллектуальными устройствами управления на цифровых сигнальных процессорах. На рисунке 1 показана типичная форма тока ВРД с СП, обеспечивающим три режима работы, на интервале работы фазы.

Вращающий момент создается на участке $(\theta_1; \theta_2)$ с изменяющейся магнитной проводимостью $\Lambda(\theta)$. На линейном участке вебер-амперных характеристик момент ВРД можно определить с помощью выражения:

$$M(\theta) = \frac{I}{2} \cdot (i(\theta) \cdot W)^2 \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta} \quad (1)$$

где $i(\theta)$ – ток фазы; W – число витков фазы.

Из рисунка 1 и выражения (1) видно, что величина момента ограничивается с одной стороны величиной предельного тока фазы, связанного с нелинейностью кривой намагничивания, а с другой стороны – величиной тока уставки $I_{уст}$, определяющего заполнение импульсов тока, которое характеризуется коэффициентом заполнения тока:

$$K_T = \frac{I_{уст}}{I_{max}(\theta_2)} = \frac{\Lambda_{max}}{\Lambda_{нас}} \quad (2)$$

где $I_{уст}$ – величина тока уставки; $I_{max}(\theta_2)$ – величина предельного тока при угловом положении ротора θ_2 ; Λ_{max} – величина магнитной проводимости в согласованном положении зубцов ротора и статора; $\Lambda_{нас}$ – величина магнитной проводимости в положении ротора $\theta_{нас}$, когда ток фазы становится равным предельному току.

Рациональный выбор коэффициента заполнения тока и, следовательно, тока $I_{уст}$ зависит от критерия, который используется при оптимизации. Как следует из выражения (1), момент нелинейно зависит от магнитодвижущей силы (МДС) $F=iW$, при этом её увеличение с возрастанием K_T дает всё меньшую прибавку среднего момента на интервале работы фазы. Выразив МДС и средний момент в относительных единицах в функции K_T и приравняв их производные, можно определить рациональный коэффициент заполнения тока, которому соответствует одинаковая скорость увеличения момента и МДС. Завышение значений K_T ведет к росту затрат мощности на формирование МДС, а увеличение момента замедляется. Таким образом,

$$\frac{\partial (M_{cp}(K_T) / M_{cp}(K_A))}{\partial K_A} = \frac{2 \cdot \Lambda_{I1} \cdot (K_A - K_T)}{K_A^2 \cdot (\Lambda_{I1} - \Lambda_{min})} \quad (3)$$

где $K_A = \Lambda_{max} / \Lambda_{min}$ – коэффициент отношения проводимостей; Λ_{min} – величина магнитной проводимости в положении ротора «зубец против впадины»; Λ_{I1} – величина магнитной проводимости в положении ротора θ_{I1} , соответствующего углу выключения тока фазы.

$$\frac{\partial(F(K_T)/F(K_A))}{\partial K_T} = \frac{1}{K_A}. \quad (4)$$

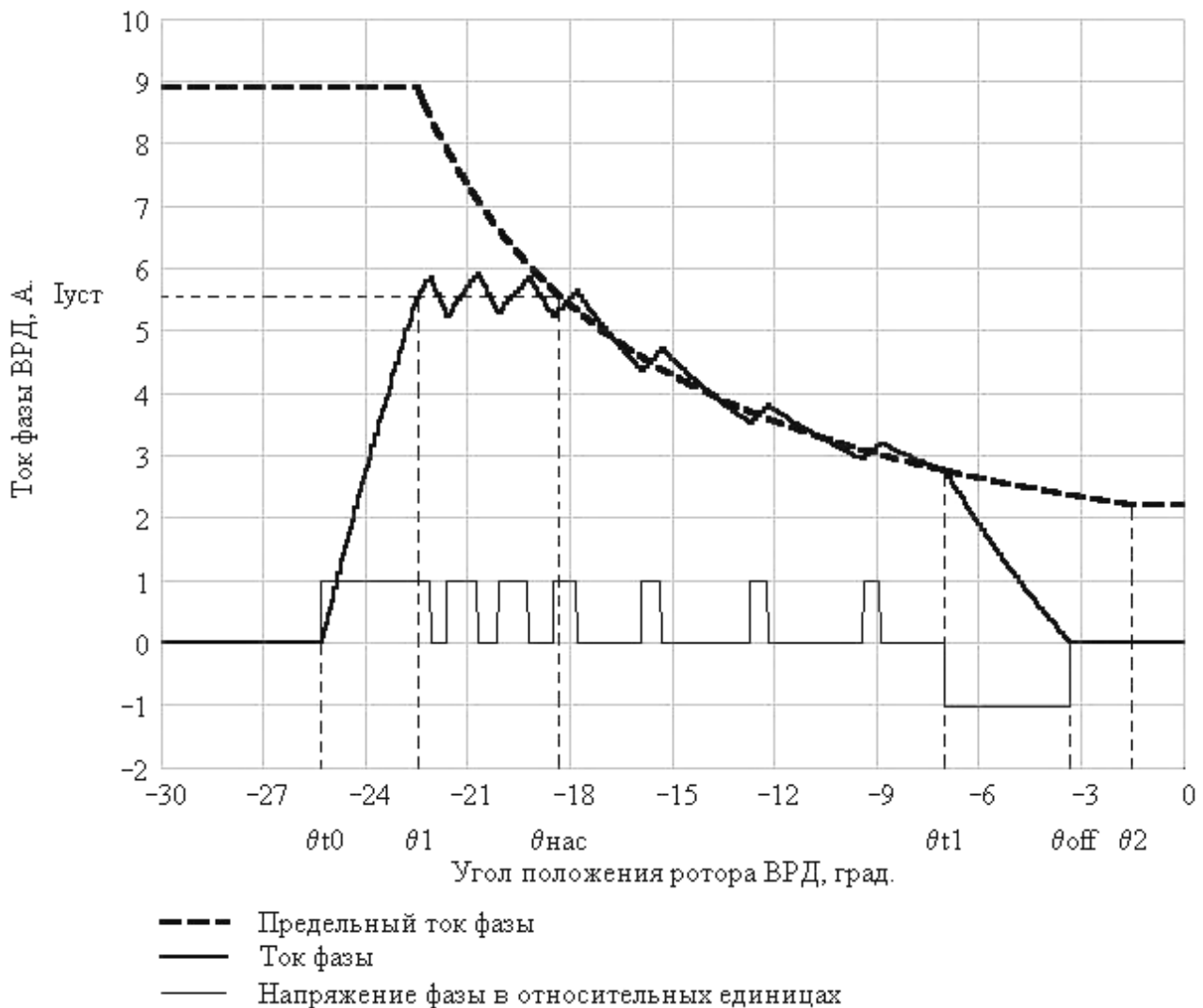


Рисунок 1 – Ток фазы ВРД

Тогда рациональный коэффициент заполнения тока

$$K_{T1} = \frac{K_A}{2} \cdot \frac{A_{min} + A_{t1}}{A_{t1}}. \quad (5)$$

Такое значение K_T обеспечивается МДС

$$F_1 = F_{min} \cdot K_{T1}, \quad (6)$$

где $F_{min} = \frac{\Phi_{\delta max}}{A_{max}}$ - МДС, соответствующая потоку насыщения $\Phi_{\delta max}$ в согласованном положении

зубцов ротора и статора.

Коэффициент токозаполнения, рассчитанный по (2) можно использовать на начальном этапе проектирования, когда выбраны геометрические размеры ЭМП и выполнен расчет магнитной цепи.

В литературе, посвященной исследованиям ВРД [2],[3], недостаточное внимание уделяется обоснованному выбору числа витков фазы обмотки. Однако от этого зависят и энергетические, и динамические показатели привода с ВРД. Так, обмотка с меньшим числом витков имеет меньшую индуктивность, что уменьшает время переходных процессов, меньшее активное сопротивление, однако для формирования МДС F_1 потребуется большее значение тока фазы, чем с обмоткой, содержащей больше витков. При этом увеличивается мощность, рассеиваемая обмотками и элементами СП, причем последние должны быть рассчитаны на большие значения тока, что увеличивает их стоимость. С другой стороны, обмотка с завышенным числом витков потребует увеличения напряжения питания, чтобы получить ту же мощность ВРД, что и с обмоткой с меньшим числом витков; увеличится время переходных процессов тока, ухудшатся условия охлаждения обмотки. Таким образом, число витков фазы обмотки следует поставить в соответствие требуемым параметрам привода.

На участке $(\theta_1; \theta_2)$ с изменяющейся магнитной проводимостью ток фазы стремится к некоторому установившемуся значению

$$I_y = \frac{E}{\omega \cdot W^2 \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta} + R}, \quad (7)$$

где E – ЭДС источника питания постоянного тока; ω – угловая скорость ротора; R – активное сопротивление цепи.

При $\omega \rightarrow 0$ установившийся ток стремится к $I_y = E/R$ и может достигать очень больших значений, недопустимых для элементов СП. Поэтому используется токоограничение, которое работает во всем диапазоне угловой скорости ротора. Токоограничение, осуществляемое импульсными видами модуляции, сопровождается динамическими потерями мощности при коммутации полупроводниковых приборов СП. Эти потери имеют наибольшее значение при пуске ВРД и уменьшаются с ростом угловой скорости. В связи с этим имеет смысл выбрать число витков таким, чтобы выполнялось условие

$$I_y(\omega = \omega_{ном}) = I_{ycm}, \quad (8)$$

где $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость ротора; $I_{ycm} = F_1/W$ – уставка токоограничения, соответствующая рациональному коэффициенту токозаполнения $K_{Т1}$.

ВРД с таким числом витков при $\omega = \omega_{ном}$ будет работать без токоограничения, т.е. в номинальном режиме работы динамические потери в СП на токоограничение будут отсутствовать.

Из условия (8) можно определить число витков фазы обмотки ВРД

$$W_{1,2} = \frac{E \pm \sqrt{E^2 - 4 \cdot F_1^2 \cdot \omega_{ном} \cdot R \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta}}}{2 \cdot F_1 \cdot \omega_{ном} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta}}. \quad (9)$$

ЭДС источника E , которая обеспечит требуемый ток фазы I_{ycm} при угловой скорости $\omega_{ном}$, должна удовлетворять условию

$$E \geq 2 \cdot F_1 \cdot \sqrt{\omega_{ном} \cdot R \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta}}. \quad (10)$$

Последнее выражение позволяет проверить, обеспечит ли заданное значение E работу ВРД при $\omega = \omega_{ном}$ с заданной мощностью на валу.

Выражение (9) дает два значения W , однако, как было отмечено выше, предпочтение следует отдать большему значению W_1 , что позволит улучшить энергетические показатели.

Для того, чтобы переходный процесс при включении тока фазы не вызывал уменьшения среднего момента, следует производить включение тока с упреждением так, чтобы при угловом положении ротора θ_1 ток фазы принимал значение тока уставки I_{ycm} . На участке $\theta < \theta_1$ имеем $\Lambda(\theta) = \Lambda_{min}$, а ток фазы изменяется в соответствии с выражением

$$i(\theta) = \frac{E}{R} \cdot \left[1 - e^{-\frac{(\theta - \theta_{t0}) \cdot R}{\omega \cdot W^2 \cdot \Lambda_{min}}} \right], \quad (11)$$

где θ_{t0} – угол включения тока фазы.

Поставив условие $i(\theta_1) = I_{ycm}$, можно определить угол для упреждающего включения фазы

$$\theta_{t0}(\omega, I_{ycm}) = \theta_1 + \frac{\omega \cdot W^2 \cdot \Lambda_{min}}{R} \cdot \ln \left[1 - \frac{I_{ycm} \cdot R}{E} \right]. \quad (12)$$

При $\omega \rightarrow 0$ необходимость в упреждающем включении отсутствует, а по мере увеличения угловой скорости угол включения уменьшается.

Для двигателей большой мощности, когда $R \rightarrow 0$, а E достаточно велико, выражение (12) можно упростить

$$\theta_{t0}(\omega, I_{ycm}) = \theta_1 - \frac{I_{ycm} \cdot \omega \cdot W^2 \cdot \Lambda_{min}}{E}. \quad (13)$$

На рисунке 2 представлены результаты моделирования тока фазы ВРД мощностью 130 Вт с формированием упреждающего угла включения согласно выражению (12) для низкой и номинальной угловых скоростей.

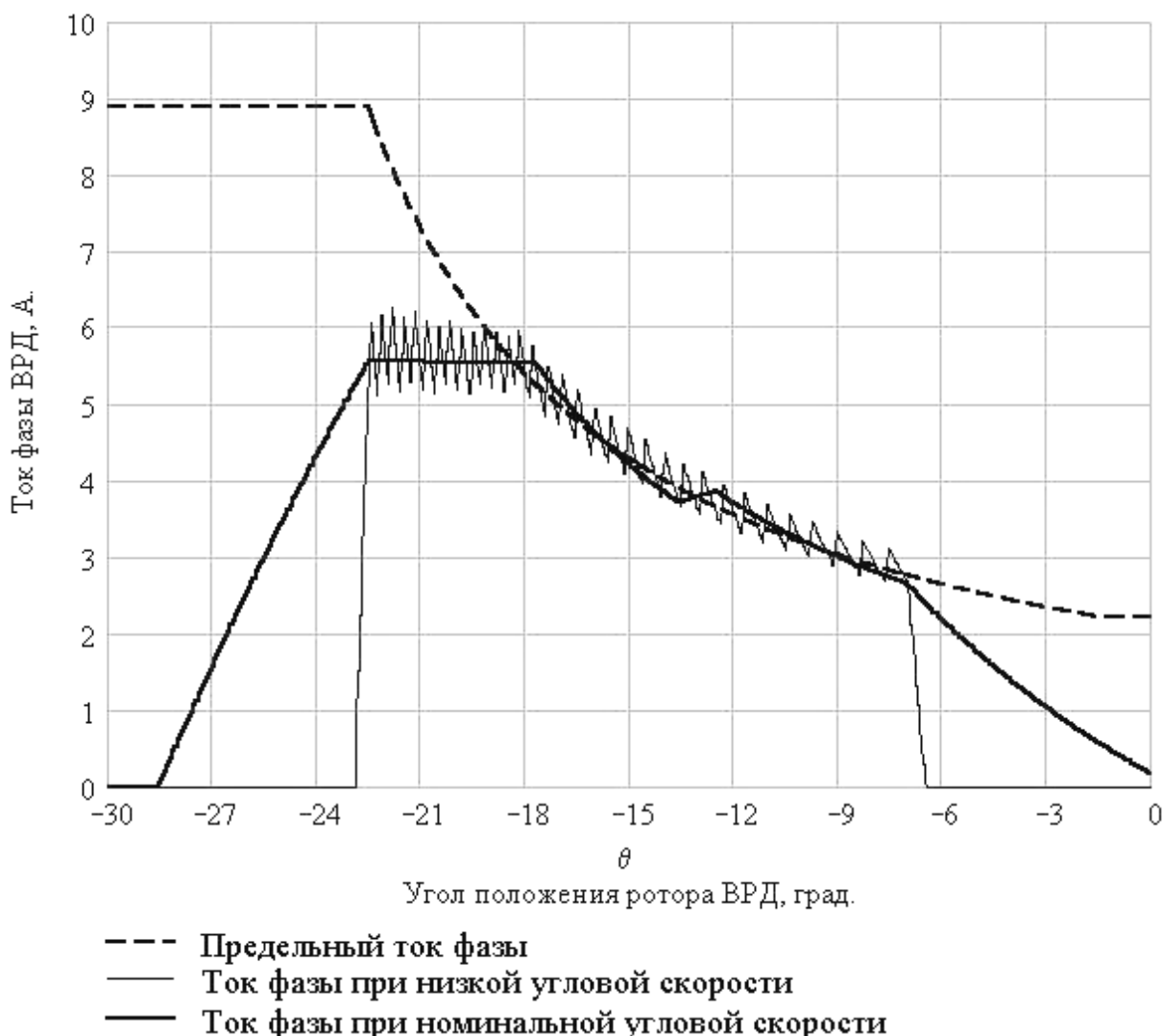


Рисунок 2 – Влияние упреждающего включения на ток фазы ВРД

Анализ показывает, что при пуске ВРД необходимость в упреждающем включении отсутствует и угол включения θ_0 должен соответствовать углу θ_1 , соответствующему началу участка с изменяющейся магнитной проводимостью. По мере увеличения угловой скорости угол включения фазы уменьшается и при достижении номинальной скорости он становится минимальным. Дальнейшее увеличение угловой скорости не сопровождается уменьшением угла включения θ_0 , соответственно ток фазы не достигает значения $I_{уст}$ и средний момент уменьшается.

Таким образом, предложенное выражение для определения коэффициента токоограничения позволяет учитывать промежуток активного состояния фазы, а обмоточные данные фазы двигателя поставлены в соответствие требуемым механическим характеристикам привода с ВРД, что в совокупности с формированием угла упреждающего включения фазы по предложенному принципу позволяет улучшить характеристики привода за счет обоснованного выбора этих величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачук В.І. Явнополусні вентильні реактивні двигуни з буферами енергії. Автореферат дисертації. Львів, 1999.
2. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода. //Электричество, 1997, №6, с.35-44.
3. В.А. Кузнецов, Л.А. Садовский, В.Л. Виноградов, В.В. Лопатин. Особенности расчета индукторных двигателей для вентильного электропривода. // Электротехника, 1998, №6, с.35-43.

INCREASE OF EFFICIENCY SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

L. Vasilyev, Y. Mnuskin

В статье рассмотрены вопросы определения параметров управления вентильно-реактивного двигателя для получения наибольшей мощности привода при условии наименьших затрат энергии. Получены выражения для определения рационального числа витков фазы обмотки и упреждающего угла включения тока фазы.

In this article the problems of definition parameters of control switched reluctance motor (SRM) for deriving the greatest power of the drive under condition of the least expense energy are considered. The expressions for definition of a rational number of coils of a phase winding and look-ahead angle of inclusion current of a phase are obtained.