

УДК 621.313.062.4:621.314.632

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПО СХЕМЕ НАДСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

Ю.Н. Дементьев

Томский политехнический университет
E-mail: dementiev@mail2000.ru

Рассмотрена схема надсинхронного вентильного каскада с промежуточным звеном постоянного тока и различным управлением коммутацией вентилей трехфазного мостового роторного преобразователя. Представлены выражения и характеристики, поясняющие принципы управления по потокосцеплению.

Ключевые слова:

Регулирование, электропривод, переменный ток, тиристорный управляемый мост, надсинхронный вентильный каскад, переключение, преобразователь ротора, управление, потокосцепление.

Key words:

Regulation, electrical drive, alternative current, silicon controlled bridge, above-synchronous wound-rotor slip recovery system, commutation, rotor converter, control, flux linkage.

Одной из актуальных проблем современных электромеханических систем является разработка и исследование регулируемых электроприводов с улучшенными энергетическими показателями. Особенно остро эта проблема ставится в настоящее время в связи с широким применением вентильных преобразователей для электроприводов постоянного и переменного тока, позволяющих создавать высокоэффективные системы электропривода. Проблема создания экономичного регулируемого асинхронного электропривода решается в настоящее время путем расширения областей применения частотного регулирования и каскадных схем с использованием вентильных преобразователей.

Одним из перспективных, экономичных и простых в схемном решении является электропривод переменного тока по схеме асинхронного вентильного каскада (АВК), причем наиболее простыми и распространенными являются каскадные схемы с промежуточным звеном постоянного тока [1–3].

В этом электроприводе (рис. 1) напряжение ротора выпрямляется с помощью неуправляемого мостового роторного преобразователя-выпрямителя (РП-В), и в цепь переменного тока вводится добавочная ЭДС с помощью сетевого вентильного преобразователя-инвертора (СП-И), состоящего из управляемых вентилей.

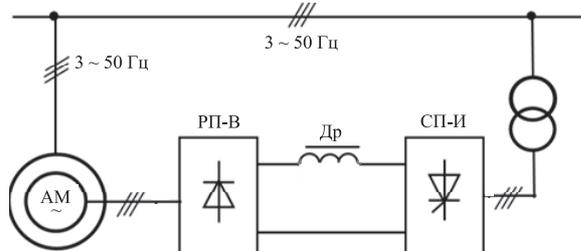


Рис. 1. Электропривод по схеме асинхронного вентильного каскада

Благодаря непосредственному подключению асинхронной машины (АМ) к питающей сети пе-

ременного тока и частичной рекуперации энергии скольжения выпрямительно-инверторным преобразователем в сеть АВК обеспечивают консервативное (экономичное) регулирование скорости.

Применение управляемых вентилей, как для сетевого (СП), так и для роторного преобразователя (РП) обеспечивает получение особого двигательного (надсинхронного) режима работы, при котором энергия к АМ подводится как со стороны статора, так и со стороны ротора (надсинхронный вентильный каскад) (рис. 2). Как видно из рис. 2, а, надсинхронный вентильный каскад (НВК) представляет собой каскадное соединение ротора асинхронной машины с вентильным преобразователем, состоящим из РП и СП на управляемых вентилях.

На рис. 2, б, представлены диаграммы возможных режимов работы НВК и направления потоков энергии в роторной цепи. Как видно из диаграмм, при работе АМ в двигательном режиме $M > 0$ при подсинхронной и сверхсинхронной скоростях мощность, потребляемая из сети P_1 , всегда положительна, а знак мощности P_2 зависит от знака скольжения.

Мощность, отдаваемая со стороны ротора или получаемая в ротор (1), определяется знаком напряжения U_d и при пренебрежении потерями в РП определяется по следующей зависимости:

$$P_d = \frac{2}{3} U_d \cdot I_d = P_2 = P_{20} - P_{V_2} = \\ = M(\omega_0 - \omega) - P_{V_2} = SM\omega_0 - P_{V_2}, \quad (1)$$

где (2/3) – множитель, появляющийся из-за применения системы относительных единиц; U_d – среднее значение выпрямленного напряжения; I_d – среднее значение выпрямленного тока; P_2 – мощность, подводимая или отводимая со стороны ротора; P_{20} – мощность, подводимая или отводимая со стороны ротора, при пренебрежении потерями цепи ротора; P_{V_2} – потери в роторной цепи АМ; ω_0 – синхронная угловая скорость АМ; ω – угловая скорость вала АМ; M – момент на валу асинхронной машины.

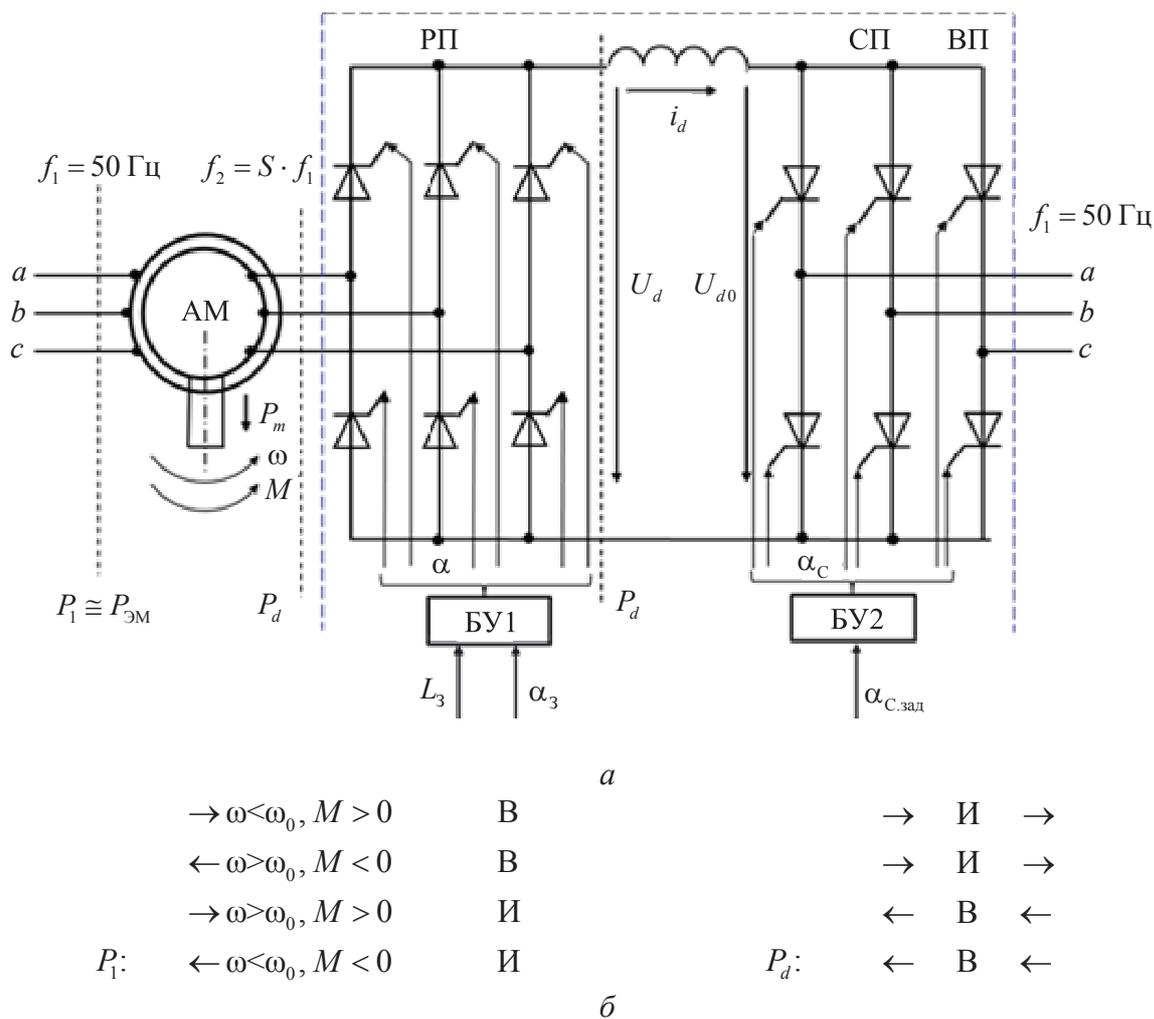


Рис. 2. Электропривод по схеме НВК: а) принципиальная схема НВК; б) энергетическая диаграмма НВК и режимы работы АМ, РП, СП

В надсинхронном режиме ($\omega > \omega_0$) АМ в НВК получает энергию как со стороны статора, так и со стороны ротора, что определяет возможность работы АМ с допустимой мощностью, превышающей номинальную.

Способы управления вентильным преобразователем надсинхронного вентильного каскада с машинной коммутацией вентилей роторного преобразователя и границы ее использования

Работа надсинхронного вентильного каскада с промежуточной цепью постоянного тока и естественной коммутацией во многом зависит от способа управления вентильным преобразователем. Использование машинной коммутации (ЭДС двигателя) для РП позволяет повысить предельную мощность РП, его надежность, упростить силовые цепи и системы управления, снизить стоимость. Кроме того, имеется возможность пропускать мощность в обоих направлениях без дополнительных устройств, что легко реализуется изменением углов управления.

Управление углом открывания α_c сетевого преобразователя (СП) обычно осуществляется традиционными методами, применяемыми для вентильных преобразователей в приводах постоянного тока (например, используя принцип подчиненного регулирования, когда внешнему контуру регулирования скорости подчинен внутренний контур регулирования тока) [1, 3].

При управлении вентильми РП по сигналам, независимым от АМ (взятым, например, от задающего генератора регулируемой частоты), схема электропривода представляет собой надсинхронный вентильный каскад с независимым (внешним) управлением [4]. В нем угловая скорость вращения машины не зависит от нагрузки (как у синхронной машины) и пропорциональна принудительно задаваемым частотам сети f_1 и ротора f_2 (рис. 3, а).

При таком управлении АМ приобретает свойства и характеристики синхронной машины, что делает электропривод склонным к неустойчивости. Поэтому на практике обычно используется так называемое самоуправление РП [5, 6] (рис. 3, б).

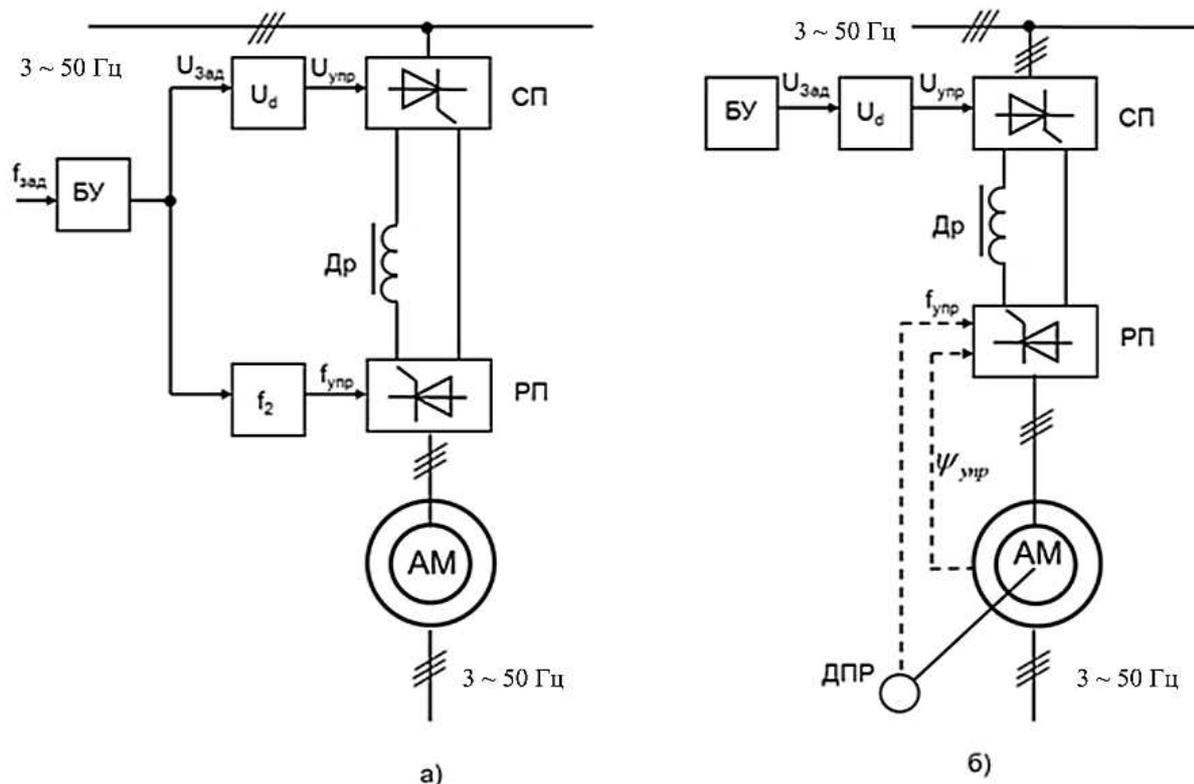


Рис. 3. Схемы надсинхронного вентильного каскада а) с независимым, б) зависимым управлением

В этом случае вентили РП открываются по какому-либо сигналу АМ (напряжение, ток, потокосцепление), изменяющемуся с частотой скольжения ротора $f_2=f_1S$. Коммутация вентилях роторной группы РП осуществляется индуцированным напряжением U_r' обмоток ротора АМ

$$U_r' = \omega_2 \Psi_r',$$

где $\omega_2 = \omega_0 - \omega$ – угловая частота вращения магнитного поля ротора; Ψ_r' – переходное потокосцепление ротора. Причем, напряжение U_r' , индуцированное в АМ должно быть достаточным по величине для осуществления машинной коммутации тока вентилях РП. При работе НВК на скоростях близких к синхронной, при заданном моменте АМ и минимальной частоте f_2 в роторе, машинная коммутация тока вентилях РП невозможна из-за малой величины индуцированного напряжения U_r' . Машинная коммутация вентилях РП, работающего в инверторном режиме, в этом случае возможна при следующих значениях параметров АМ:

$$\operatorname{tg}|\mu| = |\omega_2 L_r' / R_r| \geq 1, \quad (2)$$

где $\operatorname{tg}|\mu|$ – обобщенный параметр для определения граничной частоты машинной коммутации.

Из (2) следует, что граничная частота машинной коммутации или граница между машинной (естественной) и любой искусственной коммутациями определяется по угловой частоте вращения магнитного поля ротора и зависит от параметров схемы замещения АМ:

$$\omega_{2гр.} = (R_r \cdot \operatorname{tg} \mu) / L_r', \quad (3)$$

где $\omega_{2гр.}$ – граничная угловая частота магнитного поля ротора.

Например, подставляя в выражение (3) приведенную индуктивность ротора L_r' в относительных единицах ($L_r' = 0,2$), сопротивление ротора R_r ($R_r = 0,02$), получим граничную угловую частоту $|\omega_{2гр.}| = (0,2/0,02) = 0,1$. В этом случае граничная частота машинной коммутации $f_{2гр.}$ при частоте питающей сети $f_1 = 50$ Гц будет равна $f_{2гр.} = |\omega_{2гр.}| f_1 = 0,1 \cdot 50 = 5$ Гц.

На основании проведенных исследований [4, 5] и анализа научно-технической литературы [6] установлено, что одним из наиболее благоприятных способов самоуправления углом открывания вентилях является управление по сигналу, пропорциональному потокосцеплению ротора.

Основными достоинствами этого способа управления является практическое постоянство амплитуды управляющего сигнала во всем рабочем диапазоне, кроме того, содержание высших гармоник в этом сигнале наименьшее, форма его близка к синусоиде, а годограф – к окружности.

Управление по потокосцеплению надсинхронным вентильным каскадом с машинной (естественной) коммутацией вентилях роторного преобразователя

Чтобы достичь наилучшего использования АМ и РП в электроприводе по схеме НВК во всем диапазоне работы необходимо обеспечить наибольший фазовый угол сдвига первой гармоники тока ротора \vec{I}_{r1} . Для этого НВК должен работать вблизи границы опрокидывания $\alpha + \delta = 180^\circ$ при работе РП в инверторном режиме и вблизи границы возмож-

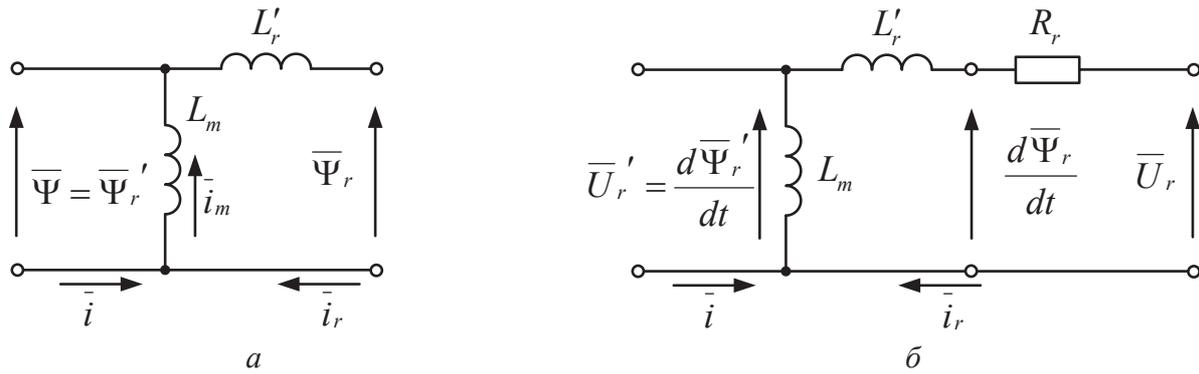


Рис. 4. Схемы замещения АМ для: а) потокоцеплений и б) напряжений

ного открывания $\alpha=0$ при работе РП в выпрямительном режиме. Тогда при заданных первых гармониках векторов потокоцепления $\bar{\psi}_{r1}$ и тока ротора \bar{I}_{r1} АМ возможно получить наибольшее среднее значение момента, развиваемого двигателем, наименьшие его колебания и минимальное влияние НВК на питающую сеть.

Для напряжений и потокоцеплений роторной цепи АМ действительны схемы замещения рис. 4 (за счет выбора коэффициента приведения к роторной цепи индуктивность рассеяния статора обрывается в нуль) [6].

На основе схемы замещения рис. 4, а, для векторов потокоцепления можно записать:

$$\bar{\psi}'_r = \bar{\psi}_r - L'_r \bar{i}_r. \quad (4)$$

Потокоцепление ротора, согласно схеме замещения рис. 4, б, можно вычислить из следующего выражения:

$$\bar{\psi}_r = \int (\bar{U}_r - R_r \bar{i}_r) dt.$$

Тогда согласно выражению (4) любое заданное потокоцепление ротора (потокоцепление управления) можно получить по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_{3r} = \bar{\psi}'_r - L_3 \cdot \bar{i}_r = \bar{\psi}'_r - (L_3 - L'_r) \cdot \bar{i}_r, \quad (5)$$

где L'_r – переходная индуктивность ротора; L_3 – индуктивность задания.

Таким образом, варьируя значениями индуктивности задания, можно установить любое желаемое потокоцепление управления.

Например, если задать $L_3=0$, то коммутация вентиля РП будет осуществляться по потокоцеплению ротора $\bar{\psi}'_r$ или по переходному потокоцеплению ротора $\bar{\psi}'_r$, если $L_3=L'_r$. Момент открывания вентиля РП зависит от положения вектора потокоцепления управления $\bar{\psi}_{3r}$, и коммутация вентиля РП происходит при его определенных положениях в момент времени открывания t_k .

Управление по потокоцеплению ротора

Из вышесказанного, согласно выражению (5), следует, что если принять индуктивность задания $L_3=0$, то коммутацию вентиля РП возможно осуществить по вектору потокоцепления ротора $\bar{\psi}'_r$. На рис. 5 представлены основные векторы управ-

ления коммутацией вентиля роторного преобразователя НВК.

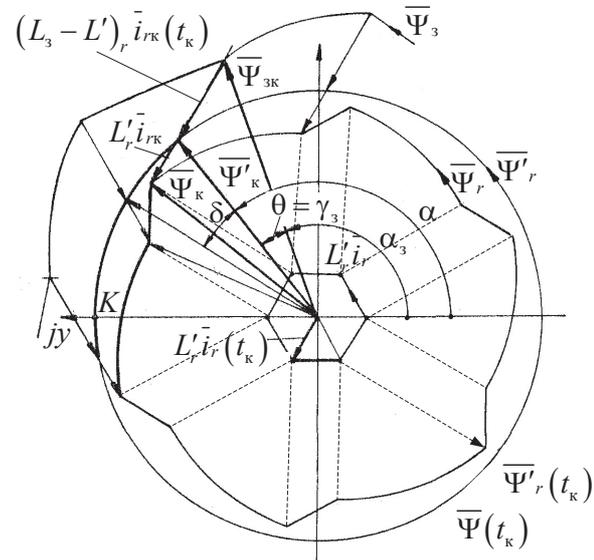


Рис. 5. Векторная диаграмма НВК, управляемого по потокоцеплению при $\omega < \omega_0$

Как следует из рис. 5, в режиме подсинхронной скорости вентиль NC открывается в момент времени коммутации t_k , если выполняются следующее условие:

$$\arg(\bar{\psi}_{3r}(t_k)) = \alpha_3 - \frac{\pi}{2},$$

В режиме надсинхронной скорости вентиль NB должен открываться в момент времени коммутации t_k , если

$$\arg(\bar{\psi}_{3r}(t_k)) = -\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_3\right).$$

Из рис. 5 можно видеть, что действительный угол открывания α можно рассчитать по выражению [5]:

$$\alpha = \arctg \frac{\sin \alpha_3 + (1 - L_3 / L'_r) \times \dots}{\cos \alpha_3 - (1 - L_3 / L'_r) \times \dots} \times (1 - \cos \delta) \cdot \cos(\alpha_3 + \pi / 6) \times \sin \delta \cdot \cos(\alpha_3 + \pi / 6) = \alpha_3 + \gamma_3, \quad (6)$$

где α_3 – угол задания вектора потокосцепления управления в момент открывания тиристора t_k , γ_3 – угол между векторами потокосцеплений управления $\bar{\psi}_3$ и ротора $\bar{\psi}_r$.

Из (6) следует, что действительный угол открывания α зависит от переходной индуктивности L_r' , индуктивности задания L_3 , угла управления α_3 , а также от нагрузки δ . Кроме того, из выражения (6) видно, что при увеличении нагрузки действительный угол открывания α отклоняется от своего значения при идеальном холостом ходе $\alpha_0 = \alpha(\delta=0) = \alpha_3$ и это отклонение зависит от того, по какому потокосцеплению производится управление.

Например, если принять $L_3 > L_r'$, то при возрастании нагрузки угол α возрастает ($\gamma_3 > 0$), а при $L_3 < L_r'$ угол α уменьшается ($\gamma_3 < 0$). В последнем случае выбором установочных значений задания угла управления α_3 и индуктивности L_3 в рабочем диапазоне нагрузки ($\delta \leq 30^\circ$) обеспечивается постоянство суммарного угла ($\alpha + \delta = \text{const}$). Это объясняется тем, что при самоуправлении РП в НВК по потокосцеплению согласно выражению (6), возрастание угла нагрузки δ большей частью компенсируется возрастанием отрицательного угла γ_3 ($\alpha + \delta = \alpha_3 + \gamma_3 + \delta = \alpha_3 = \text{const}$).

На рис. 6 представлены расчетные характеристики управления $\alpha = f(\delta)$ для нескольких значений заданной индуктивности L_3 и заданного угла управления α_3 при работе РП в инверторном режиме. Характеристики рассчитаны при значении переходной индуктивности $L_r' = 0,2$. Кроме того, здесь же приведены граничная характеристика опрокидывания РП в режиме инвертора $\alpha + \delta = 180^\circ$, характеристика нагрузки $\delta = 60^\circ$, а также характеристики $\alpha + \delta = 150^\circ$ и $\alpha + \delta = 160^\circ$, при которых обеспечивается надежный режим работы РП и в целом НВК.

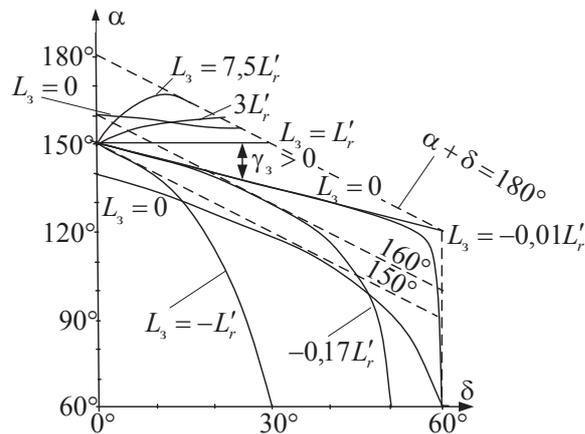


Рис. 6. Расчетные характеристики управления НВК при различных значениях задания L_3

Как видно из рис. 6, расчетные характеристики со значениями задания $\alpha_3 = 150^\circ$, $L_3 = -0,17$, $L_3 = -0,1$ или $L_3 = 0$ являются наиболее целесообразными в качестве установочных значений. В этом случае обеспечивается практически постоянное значение динамического запаса от границы опрокидывания ($\alpha + \delta = 180^\circ$) РП, работающего в инверторном ре-

жиме во всем рабочем диапазоне изменения нагрузки, и надежный режим работы НВК [4, 5].

Выбор установочных значений задания угла $\alpha_3 \leq 150^\circ$ и индуктивности $L_3 \leq 0$ теоретически исключает возможность достижения НВК границы опрокидывания, что доказывает, например, характеристика, представленная на рис. 6, со значениями задания $\alpha_3 = 150^\circ$ и $L_3 = -0,01L_r'$. В этом случае НВК всегда работает в устойчивом режиме, и действительный угол открывания вентилей РП можно определить по следующей упрощенной формуле

$$\alpha = 150^\circ - \delta/2, \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), изменяя угол нагрузки δ в интервале $0 \dots 30^\circ$, можно обеспечить оптимальный суммарный угол $\alpha + \delta = 150^\circ \dots 160^\circ$ во всем рабочем диапазоне изменения нагрузки. На практике наиболее просто осуществить управление коммутацией вентилей РП при постоянстве суммарного угла и его оптимальных значениях $\alpha + \delta = 150^\circ \dots 160^\circ$ выбором потокосцепления вектора задания $\bar{\psi}_3$ равным вектору потокосцепления ротора $\bar{\psi}_r$, т. е. $\bar{\psi}_3 = \bar{\psi}_r$.

Управление по переходному потокосцеплению ротора

Выбор установочным значением индуктивности задания L_3 переходную индуктивность ротора L_r' , т. е. $L_3 = L_r'$ дает возможность управлять коммутацией вентилей РП в НВК по вектору переходного потокосцепления $\bar{\psi}'_r$, т. е. в этом случае вектор индуктивности задания должен быть равен вектору переходного потокосцепления, т. е. $\bar{\psi}_3 = \bar{\psi}'_r$.

В [2, 4, 5] показано, что при равенстве нулю активного сопротивления ротора ($R_r = 0$) величина среднего выпрямленного тока РП в НВК для углов нагрузки ($\delta \leq 60^\circ$) в первом режиме работы РП определится по следующему выражению:

$$I_d = (\sqrt{3}/2) \cdot (\Psi'_r / L_r') \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \delta)], \quad (8)$$

где $\Psi'_r / L_r' = I_{K3}$ – ток идеального короткого замыкания роторной цепи.

Из выражения (8) и рис. 7 следует, что взаимосвязь выпрямленного тока I_d и переходного потокосцепления Ψ'_r открывает возможность управления коммутацией вентилей РП с постоянством суммарного угла $\alpha + \beta = \text{const}$.

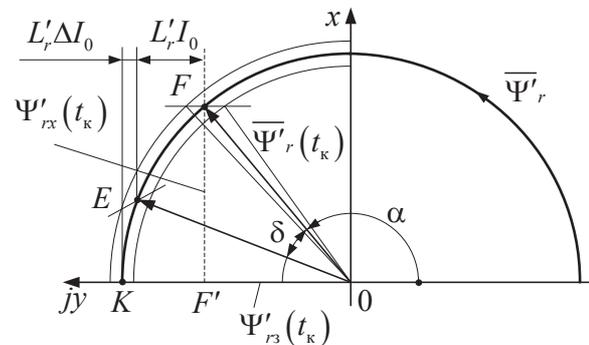


Рис. 7. Годограф вектора переходного потокосцепления при управлении НВК

Если при $\omega < \omega_0$ клапан NC открывать в момент времени, когда составляющая вектора потокосцепления по оси y Ψ'_{ry} постоянной амплитуды и синусоидальной формы достигнет значения $\bar{\Psi}'_{ry}(t_k) = \Psi'_r - L_r'(I_0 + \Delta I_0)$, где $I_0 = (2/\sqrt{3})I_d$, то динамический запас по току $\Delta I_d = I_{dmax} - I_d$, где $-$ максимальный выпрямленный ток, относящийся к характеристике опрокидывания $\alpha + \delta = 180^\circ$, и суммарный угол $\alpha + \delta$ остаются постоянными.

Однако равенство составляющей переходного потокосцепления по оси y его амплитудному значению в момент времени коммутации $\bar{\Psi}'_{ry} = \Psi'_{ry}(t_k)$ вблизи точки K границы опрокидывания $\alpha + \delta = const$ с небольшой точностью определяет момент открывания соответствующего клапана. Поэтому целесообразнее осуществлять открывание клапана в момент времени, когда составляющая вектора потокосцепления по оси x будет равна его амплитудному значению $\bar{\Psi}'_{rx} = \Psi'_{rx}(t_k)$. Согласно рис. 7 амплитудное значение составляющей переходного потокосцепления по оси x в момент времени коммутации можно определить из прямоугольного треугольника OFF' :

$$\Psi'_{rx}(t_k) = \sqrt{2\Psi'_r L_r'(I_0 + \Delta I_0) - [L_r'(I_0 + \Delta I_0)]^2}. \quad (9)$$

На рис. 8 представлены характеристики, полученные по результатам одного из конкретных расчетов по вышеприведенной формуле (9). Можно видеть, что особенно в рабочем режиме для суммарных углов $\alpha + \delta = 150^\circ \dots 160^\circ$ любому значению выпрямленного тока I_d соответствует амплитудное значение составляющей потокосцепления по оси x $\bar{\Psi}'_{rx}(t_k)$ т. е. пара значений $I_d - \bar{\Psi}'_{rx}(t_k)$ однозначно определяет суммарный угол $\alpha + \delta$. Кроме того, характеристики $\bar{\Psi}'_{rx}(t_k) = f(I_d)$ показывают, что при суммарных углах $\alpha + \delta = 150^\circ$ и $\alpha + \delta = 160^\circ$ характеристики, изображенные прямыми тонкими линиями, достаточно хорошо совпадают с характеристиками, рассчитанными по нижеследующему выражению:

$$\Psi'_{rx}(t_k) = \Psi_0 + L_0 I_d.$$

К сожалению, как видно из рис. 8, при малых значениях выпрямленного тока суммарный угол $\alpha + \delta$ не поддерживается постоянным.

Однако следует заметить, что при управлении коммутацией клапанов по переходному потокосцеплению ротора малое изменение амплитудного

значения переходного потокосцепления Ψ'_r корректируется самой системой зависимого управления, что можно видеть на рис. 7, где представлен вектор переходного потокосцепления в момент времени коммутации $\psi'_r(t_k)$ при возможных его 5 % отклонениях. Как видно из рис. 7 отклонение точки начала коммутации (F) очередного клапана при изменении переходного потокосцепления приводит к изменению момента начала коммутации соответственно в большую или меньшую сторону. При меньшем значении переходного потокосцепления коммутация очередного клапана происходит раньше, а при большем значении $-$ позже. Причем, перемещение точки закрытия клапана (E) происходит также соответственно в большую или меньшую сторону, обеспечивая постоянство суммарного угла $\alpha + \delta$.

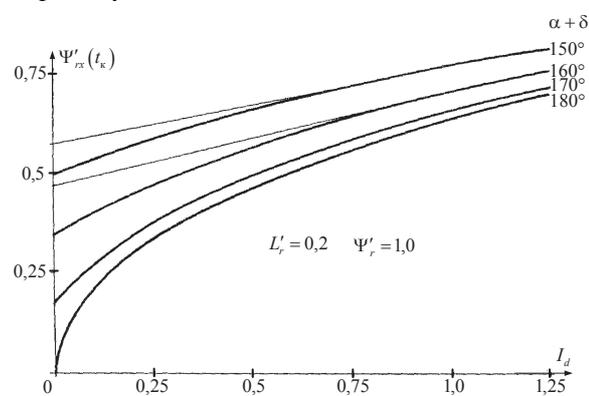


Рис. 8. Зависимость переходного потокосцепления от выпрямленного тока при различных значениях суммарного угла управления

Таким образом, на основании вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Предлагаемые способы управления коммутацией клапанов РП в регулируемом электроприводе по схеме надсинхронного клапанного каскада достаточно просты для практической реализации и обеспечивают надежную работу электропривода во всех режимах.
2. Принципы управления коммутацией клапанов, изложенные в данной статье, могут быть применены в электроприводе с синхронным двигателем, питаемым от клапанного преобразователя частоты с инвертором тока и управляемым по положению ротора $-$ клапанный двигатель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Csorgits F. Die Kennlinien der untersynchroner Stromrichter-kaskade // Period. Politechn. El. Eng. – 1970. – № 14. – С. 212–218.
2. Чижено И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1974. – 430 с.
3. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Клапанные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 174 с.
4. Demytyev Yu.N. Felvezetos szinkron feletti aszinkron motoros kaskad hajtas statikus es dinamikus vizsgalata: Kandidatusi ertekezés. – Budapest, 1984. – 177 с.

5. Schmidt I., Demytyev J.N., Hajevszki F. Szabalyozott szinkron feletti kaskad hajtas // Elektrotechnika. – 1985. – № 9–10. – С. 394–400.
6. Деметьев Ю.Н., Расстригин А.А. Зависимое управление роторным преобразователем в надсинхронном клапанном каскаде // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 116–119.

Поступила 24.09.2012 г.