

Вентили ВП, работающего в режиме зависимо-го инвертора, необходимо открывать с переменной частотой, зависящей от частоты вращения. На практике обычно используется так называемое внутреннее управление (самоуправление) [3, 4], т. е. вентили преобразователя открывают с частотой, изменяющейся пропорционально частоте вращения собственного вала машины, а коммутацию тока во всех режимах, за исключением пуска (ВД) и области синхронной скорости (НВК), осуществляют с помощью ЭДС вращения (индуцированного напряжения) СМ или АМ. Момент начала коммутации определяется сигналом, пропорциональным какому-либо сигналу электрической машины, а длительность коммутации – реактивными сопротивлениями машины.

В статье рассмотрен один из возможных способов управления ВП, позволяющий получить оптимальные, с точки зрения управления, регулировочные и механические характеристики электроприводов переменного тока и обеспечить приблизительно постоянное значение динамического запаса от границы опрокидывания ВП, работающего в инверторном режиме, во всем рабочем диапазоне изменения нагрузки.

Управление по потокоцеплению

Одним из самых простых и надежных способов при практической реализации внутреннего зависимого управления ВП в электроприводах переменного тока согласно рис. 1 является самоуправление по потокоцеплению [3, 4], заключающееся в том, что момент открывания вентилей синхронизирован с сигналом, пропорциональным потокоцеплению. Основными достоинствами этого способа управления является практическое постоянство амплитуды управляющего сигнала во всём рабочем диапазоне, кроме того, содержание высших гармоник в этом сигнале наименьшее, форма его близка к синусоиде, а годограф – к окружности.

Для потокоцеплений статорной цепи СМ в ВД и роторной цепи АМ в НВК действительны схемы замещения рис. 2 (за счет выбора коэффициента приведения, индуктивности рассеяния статора СМ и ротора АМ обращаются в нуль) [3–5].

На основе схем замещения рис. 2 для векторов потокоцепления можно записать:

$$\bar{\Psi}' = \bar{\Psi} - L' \bar{i} \quad \text{СМ в ВД};$$

$$\bar{\Psi}_r' = \bar{\Psi}_r - L_r' \bar{i}_r \quad \text{АМ в НВК}, \quad (1)$$

где \bar{i} , \bar{i}_r – обобщенные пространственные векторы токов статора СМ и ротора АМ; L' , L_r' – приведенные переходные индуктивности статора СМ и ротора АМ; $\bar{\Psi}$, $\bar{\Psi}'$, $\bar{\Psi}_r$, $\bar{\Psi}_r'$ – обобщенные пространственные вектора потокоцеплений статора СМ и ротора АМ.

Согласно схемам замещения рис. 2 и выражениям (1), управление вентилями ВП в рассматриваемых приводах переменного тока можно осуществлять по сигналу, пропорциональному любому заданному потокоцеплению:

$$\bar{\Psi}_3 = \bar{\Psi} - L_3 \bar{i} = \bar{\Psi}' - (L_3 - L') \bar{i} \quad \text{ВД},$$

$$\bar{\Psi}_3 = \bar{\Psi}_r - L_3 \bar{i}_r = \bar{\Psi}_r' - (L_3 - L_r') \bar{i}_r \quad \text{НВК}, \quad (2)$$

где L' , L_r' – приведенная переходная индуктивность статора СМ и ротора АМ; L_3 – индуктивность задания.

Таким образом, согласно (2), варьируя значениями индуктивности задания, можно установить любое желаемое потокоцепление управления. Например, если установить индуктивность задания $L_3 = L'$ и $L_3 = L_r'$, то управление открыванием вентилей ВП будет осуществляться по переходному потокоцеплению $\bar{\Psi}'$ статора СМ в ВД и переходному потокоцеплению $\bar{\Psi}_r'$ ротора АМ в НВК, если установить $L_3 = 0$, то управление открыванием вентилей ВП будет происходить по потокоцеплению $\bar{\Psi}$ статора СМ в ВД и потокоцеплению $\bar{\Psi}_r$ ротора АМ в НВК.

Момент открывания вентилей ВП зависит от положения вектора потокоцепления управления (задания) $\bar{\Psi}_3$, и коммутация вентилей ВП происходит при его определенных положениях в момент времени открывания t_k . Например, клапан НС в ВД (рис. 3, а), а тиристор НВ в НВК (рис. 3, б) открываются в момент времени t_k , если вектор потокоцепления управления (задания) $\bar{\Psi}_3$ достигнет положения, при котором его угол относительно координатной оси u будет равен углу управления (задания) α_3 .

Следующий очередной клапан РВ в ВД и РС в НВК открываются тогда, когда вектор потокоцепле-

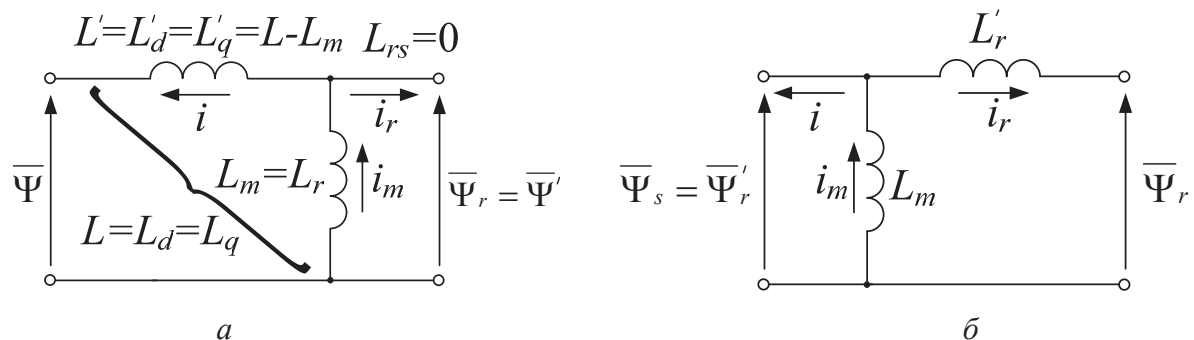


Рис. 2. Схемы замещения для потокоцеплений: а) СМ в ВД; б) АМ в НВК

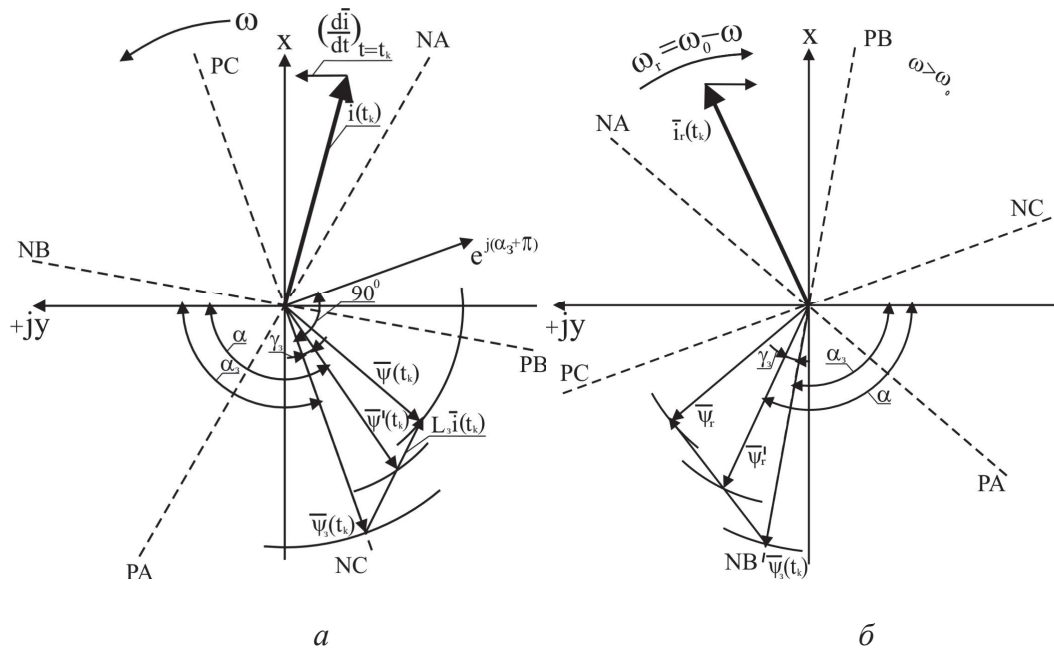


Рис. 3. Векторные диаграммы при управлении по потокоцеплению: а) ВД, б) НВК

пления управления (задания) $\bar{\Psi}_3$ повернется на 60° относительно своего положения в предыдущей коммутации (рис. 3, а, б).

В связи с тем, что приведенные потокоцепления $\bar{\Psi}'$ СМ в ВД и $\bar{\Psi}'_r$ АМ в НВК определяются индуктированными, практически синусоидальными напряжениями, поэтому действительный угол открывания вентилей α определяется от места их естественной коммутации.

Из рис. 3, а, б следует, что действительный угол открывания α определяет местоположение вектора переходного потокоцепления $\bar{\Psi}'$ СМ в ВД и переходного потокоцепления $\bar{\Psi}'_r$ АМ в НВК в момент открывания $t=t_k$.

Момент открывания вентиля NC в ВД (рис. 3, а) и вентиля NB в НВК (рис. 3, б) определяется следующим условием:

$$\bar{\Psi}'_3(t_k) \cdot e^{j\alpha_3} = 0, \quad (3)$$

где (\cdot) означает скалярное произведение.

Принимая во внимание условие (3), можно получить расчетную формулу для определения действительного угла открывания α :

$$\alpha = \arctg \frac{\sin \alpha_3 + l(1 - \cos \delta) \cos(\alpha_3 + \pi/6)}{\cos \alpha_3 - l \sin \delta \cos(\alpha_3 + \pi/6)} = \alpha_3 + \gamma_3, \quad (4)$$

где $l=1-L_3/L'$ – ВД; $l=1-L_3/L'_r$ – НВК; α_3 – угол задания вектора потокоцепления управления в момент открывания тиристора; γ_3 – угол между вектором потокоцепления управления $\bar{\Psi}_3$ и вектором переходного потокоцепления $\bar{\Psi}'$ статора СМ (рис. 3, а) или переходного потокоцепления ротора $\bar{\Psi}'_r$ АМ (рис. 3, б).

Из выражения (4) следует, что действительный угол открывания α зависит от параметров машины (индук-

тивности – СМ и L'_r – АМ), индуктивности задания L_3 и угла управления α , а также от нагрузки δ .

На рис. 4 представлены расчетные регулировочные характеристики управления $\alpha=f(\delta)$ для нескольких значений задания индуктивности L_3 и угла управления α при работе ВП в инверторном режиме.

Регулировочные характеристики рассчитаны при значениях переходной индуктивности статора $L'=0,15$ СМ и ротора $L'_r=0,2$ АМ. Здесь же приведены граничная характеристика опрокидывания ВП, работающего в инверторном режиме $\alpha+\delta=180^\circ$, и характеристика нагрузки $\delta=60^\circ$, а также характеристика $\alpha+\delta=180^\circ$, при которой обеспечивается надежный режим работы ВП рассматриваемых приводов переменного тока.

Из приведенных характеристик и выражения (4) следует, что действительный угол открывания α при изменении нагрузки отклоняется от угла открывания при идеальном холостом ходе $\alpha_0=\alpha(\delta=0)=\alpha_3$ и это отклонение зависит от того, по какому потокоцеплению производится управление. Например, если принять значение индуктивности задания $L_3=L'$ для СМ в ВД и $L_3=L'_r$ для АМ в НВК, то при возрастании нагрузки угол открывания α остается постоянным. Если принять значения индуктивности задания $L_3>0$, то из-за $\gamma_3>0$ угол α возрастает, а при $L_3<0$ из-за $\gamma_3<0$ угол α уменьшается.

Управление ВП по потокоцеплению и выбор оптимальных значений задания угла управления α_3 и индуктивности L_3 в рабочем диапазоне изменения нагрузки ($\delta \leq 30^\circ$) обеспечивает постоянство угла $\alpha+\delta$.

Анализ расчетных характеристик, представленных на рис. 4, показывает, что к оптимальным, с точки зрения управления, характеристикам

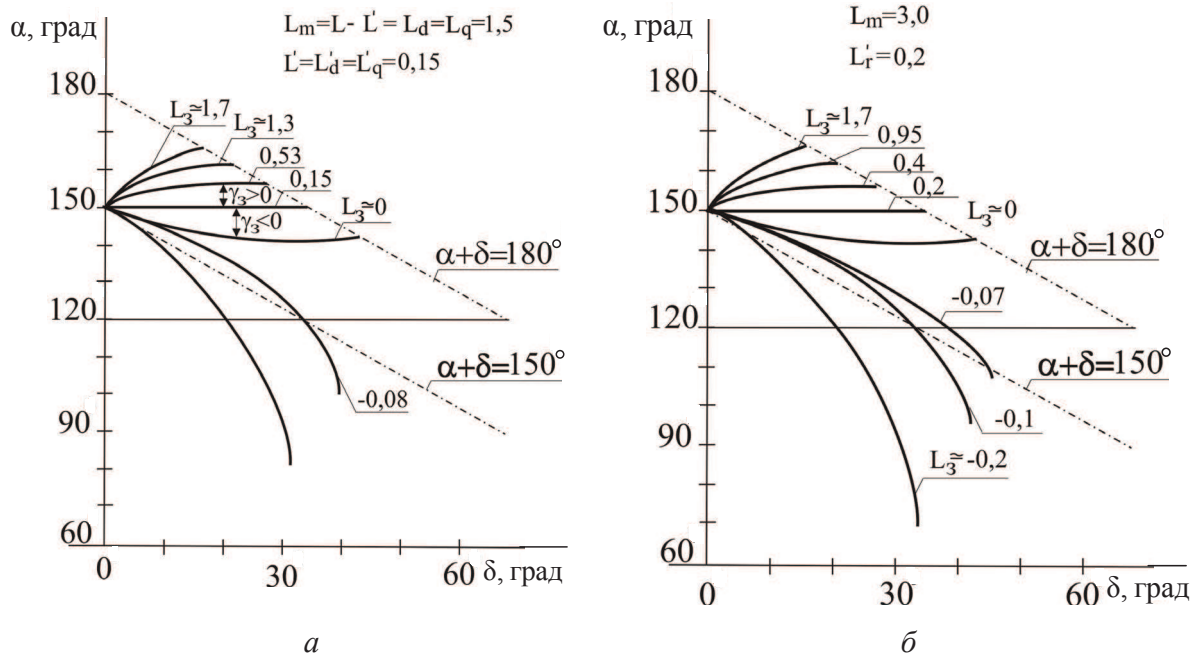


Рис. 4. Регулировочные характеристики: а) ВД, б) НВК

$\alpha + \delta = \text{const}$, например $\alpha + \delta = 150^\circ$ в установившемся режиме работы (при $\delta \approx 25^\circ$ и моменте нагрузки в относительных единицах до 1,5), можно отнести характеристики при небольших отрицательных значениях индуктивности задания ($L_3 = -0,08$ – ВД, $L_3 = -0,07$, $L_3 = -0,1$ – НВК). При этом обеспечивается приблизительно постоянное значение динамического запаса от границы опрокидывания ($\alpha + \delta = 180^\circ$) ВП, работающего в инверторном режиме, во всем рабочем диапазоне изменения нагрузки и надежный режим работы ВД и НВК. Чем меньше переходная индуктивность статора L' син-

хронной машины в ВД и ротора L'_r асинхронной машины в НВК, тем ближе можно подойти к граничной характеристике опрокидывания $\alpha + \delta = 180^\circ$ ВП, работающего в инверторном режиме, достичь большего угла $\alpha + \delta = \text{const}$ и обеспечить наилучшее использование ВП и электрических машин в машинно-вентильных приводах переменного тока.

Динамический запас по току, при котором обеспечивается надежная работа ВП при управлении по потокосцеплению во всем диапазоне изменения нагрузки, можно определить по следующему выражению:

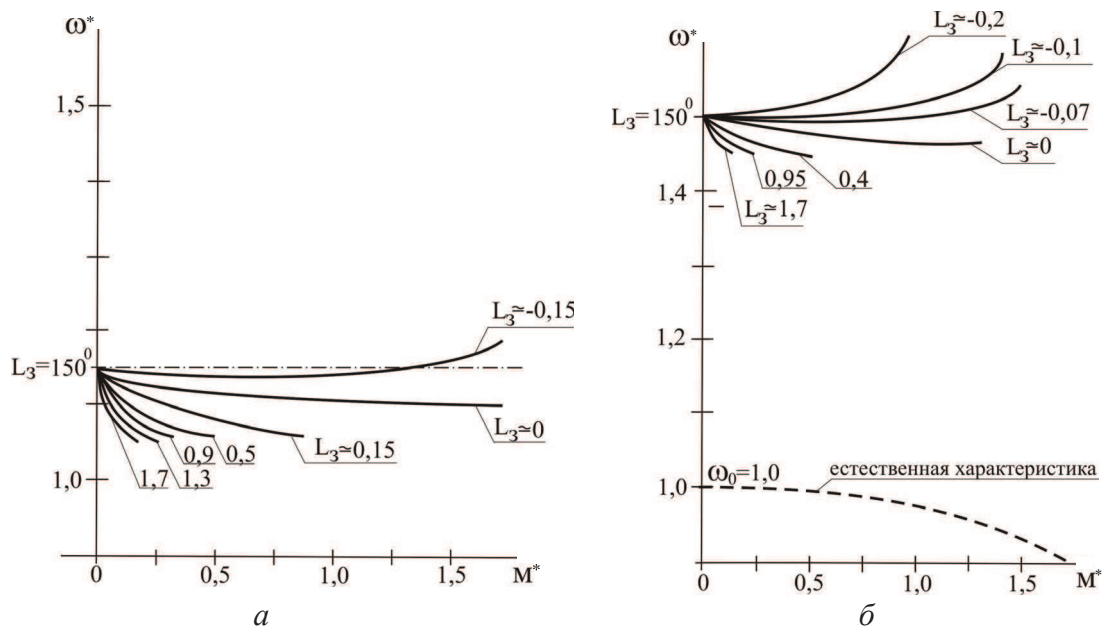


Рис. 5. Механические характеристики: а) ВД, б) НВК

$$\Delta I_d = I_{d\max} - I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{к.з}} [1 + \cos(\alpha + \delta)],$$

где $I_{\text{к.з}} = \frac{\Psi'}{L'}$ – ток короткого замыкания СМ;

$I_{\text{к.з}} = \frac{\Psi'_r}{L'_r}$ – ток короткого замыкания АМ.

На рис. 5, а, б представлены механические характеристики в относительных единицах $\omega^*(\text{М}^*)$ СМ в ВД и АМ в НВК при $\alpha_3=150^\circ$ и различных значениях L_3 .

Из представленных характеристик следует, что к оптимальным параметрам заданий угла управления и индуктивности можно отнести следующие диапазоны значений задания: $\alpha_3=150...160^\circ$, $L_3=-0,08...0$ для ВД; $\alpha_3=150...160^\circ$, $L_3=-0,1...0$ для НВК. Выбор других значений задания, например больших отрицательных значений индуктивности $L_3=-0,15$ для ВД и $L_3=-0,2$ для НВК, может привести к неустойчивой работе электроприводов в установившемся и динамическом режиме, что под-

тверждают исследования на реальном электроприводе и на модели

Выводы

1. Предлагаемый способ оптимального управления вентильным преобразователем в электроприводах переменного тока, вентильном двигателе и надсинхронном вентильном каскаде по потокоцеплению достаточно прост в реализации, обеспечивает надежную работу преобразователя и максимальное использование двигателя.
2. Выбор оптимальных параметров индуктивности задания и угла управления обеспечивает динамический запас от границы опрокидывания вентильного преобразователя, работающего в инверторном режиме, при котором возможна надежная коммутация клапанов и устойчивая работа вентильного двигателя и надсинхронного вентильного каскада в установившемся и динамическом режимах.

Работа выполнена в рамках Госзадания «Наука» № 7.2826.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Чиликин М.Г. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. – М.: Энергия, 1977. – 224 с.
2. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 174 с.
3. Dementyev Yu.N. Felvezetos szinkron feletti aszinkron motoros kaszkad hajtás statikus és dinamikus vizsgálata // Kandidatusi értekezés. – Budapest, 1984. – 177 с.
4. Дементьев Ю.Н., Расстригин А.А. Зависимое управление роторным преобразователем в надсинхронном вентильном каскаде // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 116–119.
5. Дементьев Ю.Н. Математическое описание статики и динамики электропривода переменного тока с вентильными преобразователями // Электричество. – 2009. – № 12. – С. 45–50.

Поступила 06.03.2013 г.