

НАДСИНХРОННЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ КАСКАД С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЮ

И. ШМИДТ и Ю. Н. ДЕМЕНТЬЕВ

Кафедра Электромашин,
Вудапештского Технического Университета, Н-1521 Budapest

Summary

An oversynchronous asynchronous motor cascade controlled from the flux.

In contrast to the subsynchronous cascades, in this case a three-phase thyristor bridge is connected not only to the network of 50 Hz, but to the shiprings, too. The drive under the synchronous speed and braking above the synchronous speed can be realized with the rectifier operation, while drive above the synchronous speed can be realized with the inverter operation of this current converter commutated by the machine e.m.f. The firing of the motor-side current converter is to be carried out by the rotor frequency varying with the rotor speed.

To remove difficulties one is to apply the so-called self-control i.e. to use one of the rotor signals for firing the thyristors.

This paper describes one of the most advantageous ways of self-control, that with firing from the flux. Shown are the factual realization and the approximate calculation of steady-state. An account is given about the results of measurements. Determined are the commutational limits as well as the range in the vicinity of the synchronous speed where commutation by the machine e.m.f. cannot be carried out with safety. A different kind of commutation is mentioned, too, which is applicable with great safety just in the above range.

Наряду с широко применяемыми на большие мощности асинхронными вентильными (подсинхронными) каскадами (ПАВК) в последнее время всё большее внимание уделяется исследованию надсинхронных вентильных каскадов (НВК). В статье обсуждаются вопросы, связанные с исследованием НВК.

Принципы построения каскадных электроприводов

В электроприводе по схеме обычного асинхронно-вентильного каскада статор асинхронного двигателя с фазным ротором непосредственно, а ротор через простейший частотный преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока и естественной коммутацией, подключается к сети переменного тока с частотой 50 Гц. При этом роторным преобразователем (УРП) является неуправляемый диодный мост (рис.

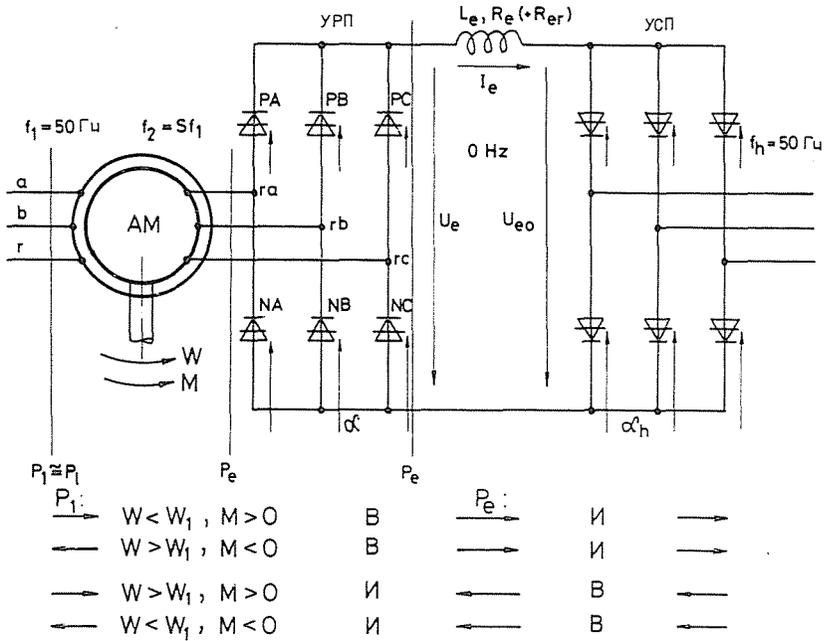


Рис. 1

1), поэтому энергия может передаваться только от ротора и через промежуточную цепь постоянного тока в сеть, то есть (т. е.) электропривод в этом случае может работать в двигательном режиме при подсинхронной скорости и в генераторном режиме при сверхсинхронной скорости.

В надсинхронном вентильном каскаде к ротору асинхронного двигателя присоединяется тиристорный трехфазный преобразователь, подобный сетевому преобразователю (УСП).

Так как управляемые преобразователи способны к двухсторонней передаче активной мощности, то теперь энергия к асинхронной машине (АМ) может подводиться и со стороны ротора, таким образом получается, так называемый, надсинхронный вентильный электропривод (один из вариантов машины двойного питания), в котором становятся возможными двигательный режим при сверхсинхронной скорости и генераторный (тормозной) режим при подсинхронной скорости.

На рис. 1 показано направление энергий, соответствующее различным режимам работы электропривода. Следует заметить, что тиристоры роторного преобразователя (УРП) имеют естественную коммутацию с помощью индуктированного напряжения двигателя.

Мощность P_e в промежуточной цепи постоянного тока, пренебрегая потерями в преобразователе УРП, можно рассчитать следующим образом:

$$P_e = (2/3)U_e I_e = P_l - P_m - P_{t2} = M(W_1 - W) - P_{t2} = SMW_1 - P_{t2} \quad (1)$$

где

- P_l — электромагнитная мощность асинхронной машины,
- P_m — механическая мощность, развиваемая на валу,
- P_{t2} — потери мощности в обмотке ротора,
- M, W_1, W, S — соответственно момент, синхронная скорость, скорость вращения ротора и скольжение. Коэффициент $2/3$ появляется из-за системы относительных единиц.

Как можно видеть надсинхронный вентильный каскад (НВК) в своей структуре построения подобен электроприводу с обращенным синхронным двигателем и зависимым инвертором (ВД) [4].

У этого электропривода (ВД) при пуске, а также при скорости вращения ниже определенного значения, не обеспечивается необходимое для естественной (машинной) коммутации тиристорных преобразователя УРП индуктированное напряжение.

У НВК подобная проблема возникает в окрестности синхронной скорости. Причина этому в общности создания магнитного потока (в обращенной синхронной машине, созданный магнитный поток неподвижен, в асинхронной-вращается с синхронной скоростью).

Допуская работу приводов только в первом квадранте, в таблице 1 представлены ориентировочные типовые мощности преобразователей вышеупомянутых электроприводов, а также электропривода постоянного тока, питаемого от трехфазного симметричного тиристорного моста и электропривода с непосредственным преобразователем частоты (ТПЧН).

Таблица 1

Электропривод	Электропривод				
	постоянного тока	ПАВК	НВК	ВД	ТПЧН
$P_{\text{тип. тир.}}/P_H$	2,20	УСП: 2,54	УСП: 1,27 УРП: 3,24 Обш: 4,51	УСП: 2,20 УРП: 6,48 Обш: 8,68	11,73
$P_{\text{тип. диод.}}/P_H$		УРП: 5,61			

В таблице $P_H = M_H W_H$ — необходимая номинальная, одновременно максимальная мощность.

Как видно из таблицы одним из достоинств надсинхронного вентильного каскада (НВК) является то, что для осуществления режима с $W_H \cong 2W_1$ (при двухполюсной машине можно достичь скорости вращения равной ~ 6000 об/мин.) требуется приблизительно половинная типовая мощность, чем для ВД. Следует заметить, что НВК и ВД могут работать в четырехквadrантах (4/4) без изменения схемы силовой цепи.

Методы управления преобразователями НВК

У сетевого преобразователя УСП, работающего от сети 50 Гц угол управления α_h устанавливается системой регулирования, например, используя принцип подчиненного регулирования, рис. 2 (внешнему контуру регулирования скорости подчинен внутренний контур регулирования тока).

Тиристоры роторного преобразователя УРП необходимо открывать с частотой, изменяющейся пропорционально частоте вращения ротора. Если мы будем открывать тиристоры с сигналом независимым от двигателя, например, от задающего генератора регулируемой частоты, то получим надсинхронный вентильный каскад с независимым (внешним) управлением, в котором скорость ротора оказывается

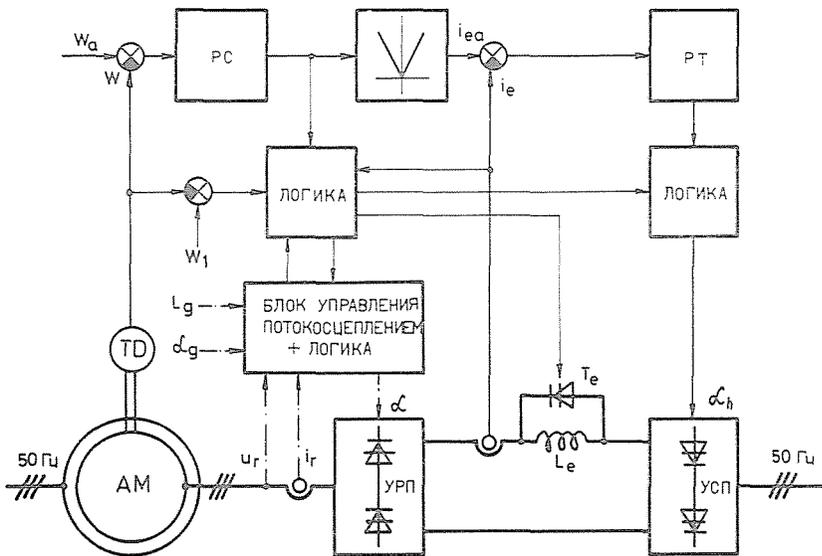


Рис. 2

независимой от нагрузки (как у синхронной машины) и пропорциональна принудительно задаваемым частотам f_1 и f_2 . Это делает электропривод склонным к неустойчивости.

Поэтому на практике обычно используется так называемое зависимое управление (самоуправление), т. е. тиристоры преобразователя УРП открывают в соответствии с каким-нибудь сигналом ротора, пропорциональным частоте вращения. Если, например, тиристоры открываем в тот момент, когда напряжение на них становится положительным, тогда тиристоры работают как диоды и в результате имеем ПАВК. Для НВК также как и для ВД [3] наиболее рациональным является самоуправление по какому-нибудь потокосцеплению ротора.

Управление по потокосцеплению

Для потокосцеплений обмотки и напряжений действительны схемы замещения, изображенные на рис. 3 в системе координат, связанной с ротором (индуктивность рассеяния статора принимаем равной нулю, индекс r относится к цепи ротора, L'_r - переходная индуктивность ротора).

Если посредством искусственной схемы, например, интегрированием $(\bar{u}_r - R_r \bar{i})$ получить потокосцепление ротора, тогда согласно выражения (2) можно получить и фиктивное потокосцепление управления, зависящее от L_g .

$$\bar{\psi}_{gr} = \bar{\psi}_r - L_g \bar{i}_r = \bar{\psi}'_r - (L_g - L'_r) \bar{i}_r \quad (2)$$

Например, если $L_g = 0$, то получаем управление по потокосцеплению ротора $\bar{\psi}_r$, при $L_g = L'_r$ по переходному потокосцеплению $\bar{\psi}'_r$. Методом управления по потокосцеплению, описанным в [3] определяют направление управляющего потока $\bar{\psi}_{gr}$ в момент открывания t_f . Как показано на рис. 4 в режиме подсинхронной скорости тиристор NC, а в режиме надсинхронной скорости NB открываются в момент времени t_f тогда, когда выполняются следующие условия:

$$W < W_1, \text{ NC: } \nless \bar{\psi}_{gr}(t_f) = \pi/2 + \alpha_g, \quad (3a)$$

$$W > W_1, \text{ NB: } \nless \bar{\psi}_{gr}(t_f) = -(\pi/2 + \alpha_g). \quad (3b)$$

Для упрощения аналитического исследования и расчетов примем следующие допущения:

1. Скорость вращения ротора постоянна ($w = W = \text{const.}$).
2. Активным сопротивлением статора пренебрегаем ($R = 0$).

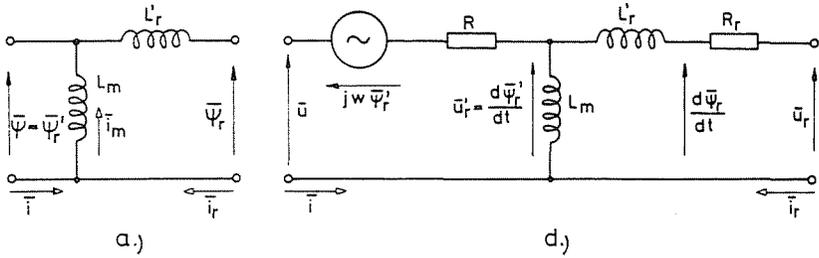


Рис. 3

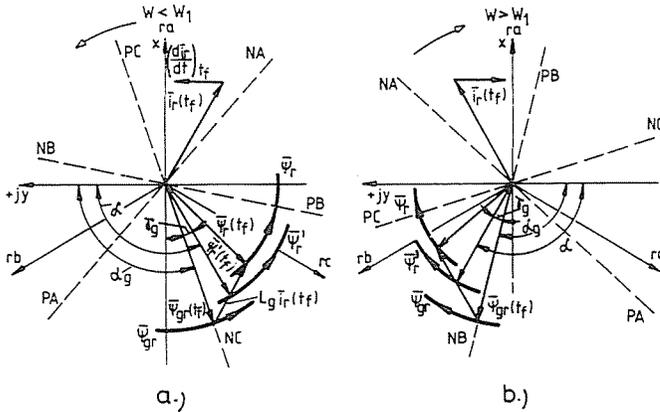


Рис. 4

3. Выпрямленный ток идеально сглажен, т. е. $i_e = I_e$.

4. Активным сопротивлением ротора пренебрегаем ($R_r = 0$). Из первых двух допущений, а также из-за принудительно существующих в статоре напряжения, в роторе имеется принудительно потокоцепление постоянной амплитуды

$$\bar{\psi}'_r = \bar{\Psi}'_r e^{j(W_1 - W)t}. \tag{4}$$

Вместе с тем это означает, что годограф вектора индуктированного напряжения в роторе $\bar{u}'_r = d\bar{\psi}'_r/dt$ представляет собой окружность, а кривая изменения индуктированного напряжения фазы-синусоиду, поэтому действительный угол открывания α определяется от места естественной коммутации этих напряжений.

Третье допущение определяет вектор тока в промежутках времени между коммутациями.

Для тиристора NB в момент открывания (рис. 4b), принимая во внимание вышепринятые допущения, можно записать

$$\begin{aligned} \bar{\psi}'_r(t_f) &= \Psi'_r e^{-j(\pi/2 + \alpha)}, \quad \bar{i}'_r(t_f) = (2/\sqrt{3})I_e e^{j(\pi/6)}, \\ \bar{\psi}_{gr}(t_f) &= \psi_{gr}(t_f) e^{-j(\pi/2 + \alpha_g)} = \bar{\psi}'_r(t_f) - (L_g - L'_r)\bar{i}'_r(t_f). \end{aligned} \quad (5)$$

Если при расчетах учесть активное сопротивление ротора, то из-за того, что коммутационная цепь в этом случае будет состоять из индуктивности и активного сопротивления ($L'_r - R_r$), функциональная зависимость постоянного тока I_e от α , δ , W получается довольно сложной [1, 4]. При условии же, что $R_r = 0$ коммутационная цепь состоит только из индуктивности L'_r и для расчета можно использовать классическую теорию расчета вентильных преобразователей. Среднее значение выпрямленного тока для углов коммутации $\delta \leq 60^\circ$

$$I_e = (\sqrt{3}/2) (\Psi'_r/L'_r) [\cos \alpha - \cos(\alpha + \delta)]. \quad (6)$$

где Ψ'_r/L'_r — ток идеального короткого замыкания роторной цепи I_{r2} .

Используя уравнение (5) и (6), получим выражение для расчета действительного угла открывания α

$$\alpha = \text{arctg} \frac{\sin \alpha_g + \ell(1 - \cos \delta) \cos(\alpha_g + \pi/6)}{\cos \alpha_g - \ell \sin \delta \cos(\alpha_g + \pi/6)} = \alpha_g + \gamma_g, \quad (7)$$

где $\ell = 1 - L_g/L'_r$ (для $W < W_1$ получается тот же результат).

Действительный угол открывания α может изменяться в зависимости от потокосцепления $\bar{\Psi}_g$ (индуктивности L_g) и его направления (угла α_g) в моменте открывания.

Из (7) следует, что при нагрузке (при возрастании δ) действительный угол открывания α отклоняется от угла открывания при холостом ходе $\alpha_{x,x} = \alpha(\delta = 0) = \alpha_g$ и это отклонение зависит от того по какому потокосцеплению производится управление. При возрастании нагрузки, если $L_g = L'_r$, то $\alpha = \alpha_g \cong \text{const.}$, т. е. остается приблизительно постоянным, при $L_g > L'_r$ угол α возрастает ($\gamma_g > 0$), а при $L_g < L'_r$ угол α уменьшается ($\gamma_g < 0$).

На рис. 5 представлены кривые $\alpha = f(\delta)$ для нескольких установочных значений ℓ и α_g при работе преобразователя УРП в инверторном режиме, граничная кривая опрокидывания инвертора $\alpha + \delta = 180^\circ$ и нагрузки $\delta = 60^\circ$, а также кривые $\alpha + \delta = 150^\circ - 160^\circ$, которые дают надежный режим работы в ходе переходных процессов (при быстром изменении тока).

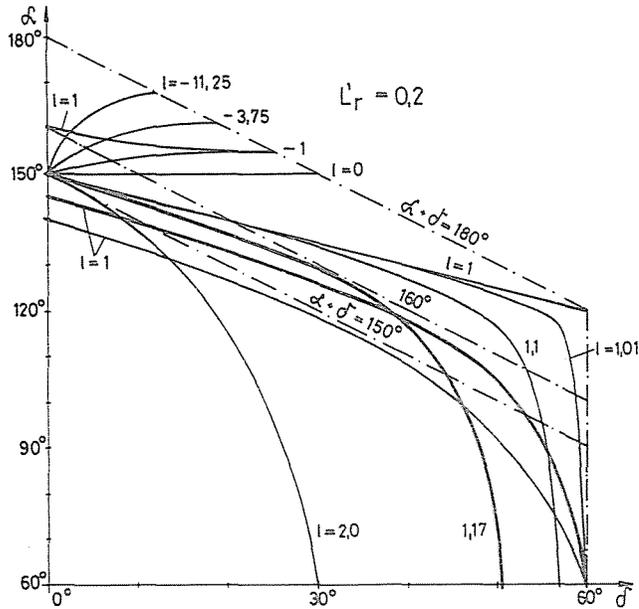


Рис. 5

Чем меньше переходная индуктивность машины L_r' , тем ближе можно приблизиться к границе опрокидывания инвертора и достичь большего угла $\alpha + \delta$ (при $L_r' = 0,2$ $\alpha + \delta = 150^\circ$, при $L_r' = 0,15$ $\alpha + \delta = 160^\circ$ — что дает соответствующий запас).

При работе преобразователя УРП в инверторном режиме угол открывания необходимо поддерживать наибольшим из возможных, так как при этом получается наиболее благоприятный фазовый угол (между током ротора \bar{i}_r и переходным потокосцеплением $\bar{\psi}_r'$), т. е., в этом случае заданное значение момента достигается с наименьшими значениями токов статора и ротора и соответственно с наибольшим к. п. д.

При оптимальном выборе параметров L_g и α_g в случае управления по потокосцеплению, угол $\alpha + \delta$ в рабочем режиме ($\delta \leq 30^\circ$) остается практически постоянным ($\alpha + \delta = 150^\circ - 160^\circ$), поскольку возрастание угла δ большей частью компенсируется возрастанием отрицательного угла γ_g .

Уравнение (7) при установочных значениях $\alpha_g = 150^\circ$ и $\ell = 1,0$ значительно упрощается

$$\alpha = 150^\circ + \delta/2, \text{ т. е., } \alpha + \delta = 150^\circ + \delta/2 (\gamma_g = -\delta/2).$$

Из рис. 5 следует, что установочные значения $\alpha_g = 150^\circ$, $\ell = 1,17$ и $\alpha_g = 145^\circ$, $\ell = 1,0$ являются наиболее целесообразными. Следует заметить, что при $\alpha_g = 150^\circ$, $\ell > 1,0$, а также при $\ell = 1,0$, $\alpha_g < 150^\circ$ принципиально невозможно достичь режима опрокидывания.

Точные исследования на устойчивость и практические измерения показали, что выбирая значение ℓ достаточно большим (L_g в этом случае имеет большие отрицательные значения) может наступить режим неустойчивой работы и таким образом, возможно, что на основе вышесказанного желаемые параметры L_g и α_g не допустимы. При $\ell = 1,0$ ($L_g = 0$) и $\alpha_g = 145^\circ$ система всегда устойчива, поэтому на практике выбираются обычно эти установочные значения.

Отдельно управлением преобразователя УРП в выпрямительном режиме мы не занимались, однако заметим, что для него диодный режим (минимально возможный угол открывания) дает наиболее подходящие установочные значения.

Механические характеристики

Приведем основные соотношения, по которым можно рассчитать механические характеристики НВК, управляемого по потокосцеплению.

Задаваясь значениями δ , по (7) определяем действительный угол открывания α , а затем по известным δ и α можно рассчитать и остальные величины.

Из известной формулы для среднего значения выпрямленного напряжения

$$U_e = S^*(3/\pi)(\sqrt{3}/2)\Psi'_r W_2 [\cos \alpha + \cos(\alpha + \delta)] \quad (8)$$

можно определить частоту вращения

$$W = W_1 - S^* \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \frac{U_e}{\Psi'_r [\cos \alpha + \cos(\alpha + \delta)]}, \quad (9)$$

где $W_2 = W_1 - W$, $S^* = \text{sign } W_2 = \text{sign } S$, $\Psi'_r W_2 = S U_{r0}$

U_{r0} — индуктированное напряжение посредством потокосцепления Ψ'_r в неподвижном роторе.

Из выражений (1,8) получим выражение для среднего значения момента ($R_r = 0$, $P_{i2} = 0$)

$$M = S^* \frac{3\Psi_r'^2}{4\pi L_r'} [\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \delta)], \quad (10)$$

где $(1/2)(\Psi_r'^2/L_r')$ — критический момент асинхронной машины.

На рис. 6 представлены механические характеристики $W(M)$, рассчитанные при постоянных значениях выпрямленного напряжения U_{e0} (концы характеристик представляют границу опрокидывания).

Постоянное напряжение на зажимах преобразователя УРП зависит от выпрямленного напряжения и тока

$$U_e = U_{e0} + I_e(R_e + R_{re}) \quad (11)$$

где $R_{re} = R_r[2 - \delta/(2\pi/3)]$ — среднее значение активного сопротивления роторной цепи, зависящее от состояния (коммутация, не коммутация) и трансформированное для упрощения в цепь постоянного тока.

На рис. 6 представлены также механические характеристики для различных L_g . Из них следует, что при ℓ достаточно большом может наступить режим неустойчивой работы.

Чем ближе скорость вращения к синхронной, тем расчеты без учета активного сопротивления ротора R_r дают большую погрешность. Для подтверждения этого на рис. 6 с учетом R_r представлены границы гашения (в инверторном режиме опрокидывания) для различных α . При $R_r = 0$ момент опрокидывания, относящийся к α не зависит от скорости вращения (10), а кривые перпендикулярны оси моментов. Таким образом очевидно, что пренебрежением активного сопротивления ротора при заданных параметрах можно пользоваться при расчетах только для $|W_2| \geq 0,2$ ($f_2 \geq 10$ Гц). Кривая при $\alpha = 105^\circ$ является характеристикой максимально достигаемого момента в инверторном режиме (И).

На рис. 6 представлены естественная характеристика асинхронной машины ($\Psi'_r = 1,0$) и согласно [1] рассчитанная характеристика максимальных моментов в выпрямительном режиме. Из них следует, что при достаточно больших частотах ротора при работе роторного преобразователя УРП в выпрямительном и инверторном режимах можно достичь одинаковый максимальный момент M_{\max} . Однако, если в выпрямительном режиме (В) можно работать на этой граничной характеристике, то в инверторном режиме никакими установками (L_g и α_g) достичь M_{\max} невозможно. Из величин моментов можно видеть, что у НВК (как у регулируемого привода) в случае $|W_2| > 0,1-0,15$ нет необходимости в достижении этой абсолютной границы. Кроме того также видно, что при малой частоте ротора ($f_2 \leq 5-7,5$ Гц) машинная коммутация, особенно в инверторном режиме уже не обеспечивает соответствующий момент.

Причина этому в том, что по мере приближения к синхронной скорости в роторе уменьшается индуктированное напряжение $U'_r = W_2 \Psi'_r$, которое уже может коммутировать намного меньшие токи в коммутирующей цепи $L'_r - R_r$. Из-за этого надежным и соответствующей

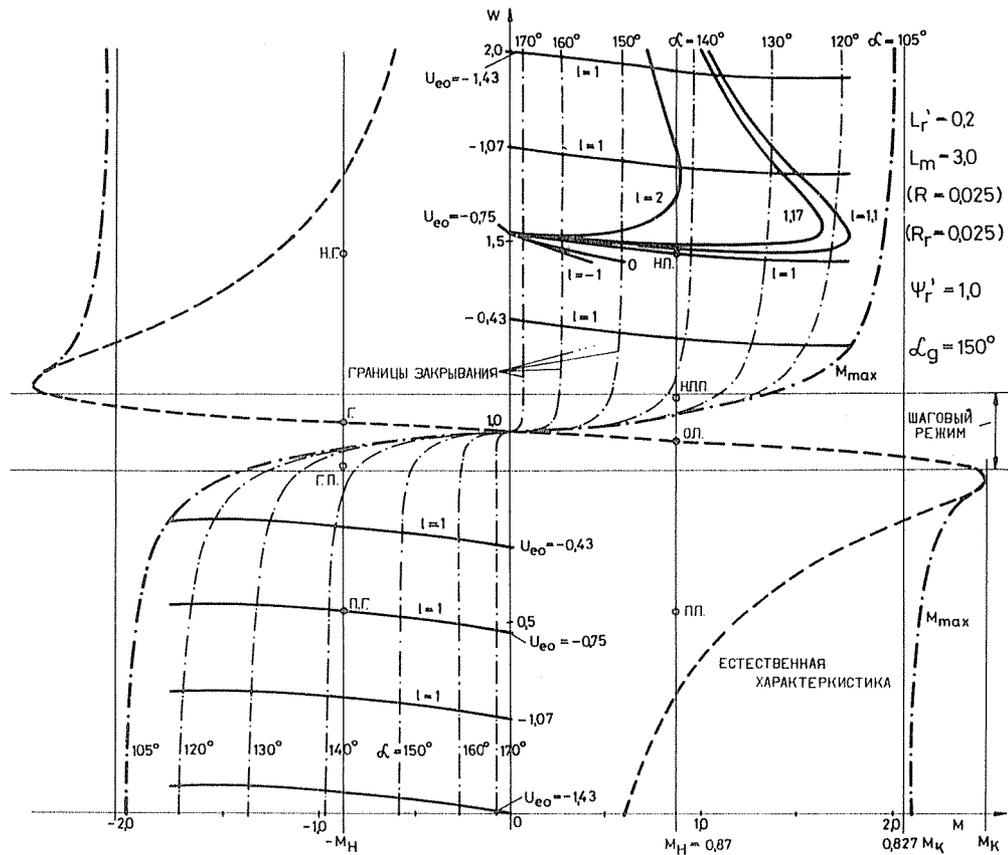


Рис. 6

нагрузочной способностью диапазоном, в котором обеспечивается машинная коммутация является область $W \leq 0,9 W_1$; $W \geq 1,1 W_1$.

Работоспособность НВК в диапазоне синхронной скорости обеспечивается, так называемым, шаговым режимом.

Режим прерывания тока (шаговый режим)

В диапазоне $0,9 W_1 \leq W \leq 1,1 W_1$ максимальная частота в роторе равна 5 Гц. Так как между двумя коммутациями в УРП по крайней мере 10 коммутаций происходит в УСП, поэтому используя преобразователь УСП можно обеспечить успешную коммутацию тиристоров УРП.

Это достигается тем, что управляя по потокосцеплению $\bar{\psi}_g = \bar{\psi}'_r$ переводим преобразователь УСП (через 60°) в предельный инверторный режим, тем самым прерывая ток ротора машины (рис. 7). После истечения времени необходимого для восстановления запирающих свойств тиристоров преобразователь УСП снова переводим в выпрямительный режим, открывая следующую по порядку пару тиристоров преобразователя УРП и так далее. Для уменьшения времени изменения тока ротора сглаживающий дроссель шунтируется тиристором T_e (рис. 3).

Коммутация, происходящая с помощью УСП является искусственной коммутацией. Поэтому угол β между первой гармоникой тока ротора $\bar{I}_{r,1}$ и переходным потокосцеплением $\bar{\Psi}'_r$ может быть равен 90° , таким образом при этом достигается максимальное значение среднего вращающего момента M_{\max} и наименьшие его колебания.

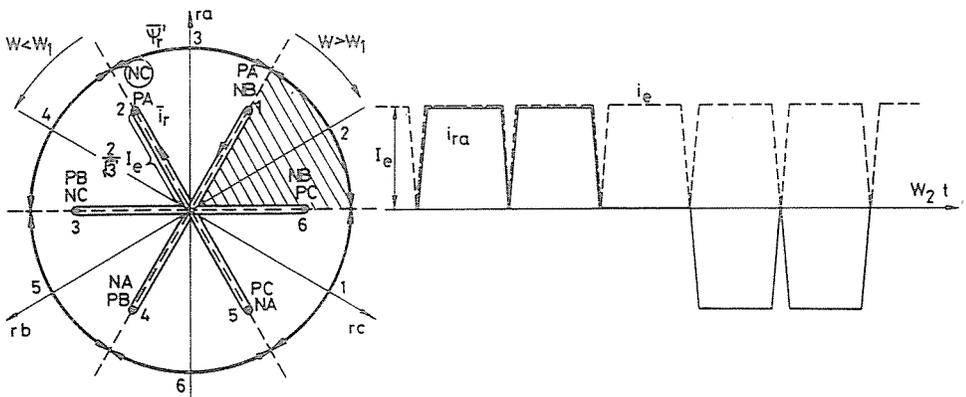


Рис. 7

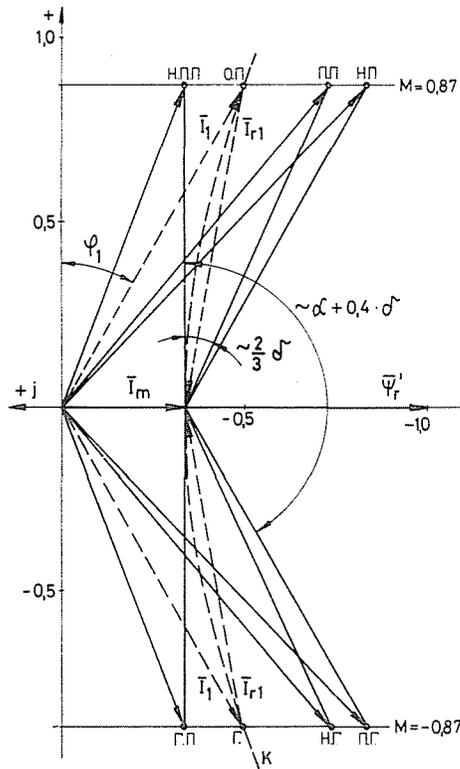


Рис. 8

Основная гармоника тока ротора в синхронно вращающейся системе координат, предполагая мгновенную коммутацию тиристоров и $\beta = \pm 90^\circ$

$$\bar{I}_{r1} = M^* (2/\sqrt{3}) (3/\pi) I_e, \tag{12}$$

где $M^* = \text{sign } M$, а момент

$$M = \Psi_r I_{r1} \tag{13}$$

Векторная диаграмма обычной асинхронной машины представлена на рис. 8. На ней наряду с характерными рабочими точками в шаговом режиме (Н. П. П., Г. П.), представлены рабочие точки НВК при машинной коммутации (Π. П., Н. П., Н. Г., П. Г.).

Первая гармоника тока ротора для $w < w_1$, полученная по зависимостям [4] ($R_r = 0$)

$$\bar{I}_{r1} = \frac{3}{2\pi} j \frac{\Psi'_r}{L'_r} [\delta - \sin \delta e^{-j(2\alpha + \delta)}] = I_{r1x} + jI_{r1y} \quad (14)$$

а при $W > W_1$ изменяется знак перед действительной частью тока ротора.

Сравнивая рабочие точки при моментах $\pm M_H$ (рис. 6) из рис. 8 следует, что АМ работает в прерывистом (шаговом) режиме с лучшим, а в режиме естественной (машинной) коммутации с худшим фазовым углом, чем в случае короткозамкнутого ротора (О. П., Г.).

Это означает, что в НВК, а также в ПАВК для асинхронной машины с внешней вентиляцией нельзя допустить длительную работу с номинальным моментом. Из-за худшего фазового угла между первыми гармониками токов статора и ротора (\bar{I}_1 и \bar{I}_{r1}), а также несинусоидальности токов \bar{i}_1 и \bar{i}_r максимально допустимые моменты должны быть снижены в инверторном режиме приблизительно на 15%, в выпрямительном на 10%.

Экспериментальные исследования

В лаборатории кафедры электрических машин Будапештского Технического Университета был практически изготовлен надсинхронный вентильный каскад с асинхронной машиной с фазовым ротором и числом пар полюсов равным четырем. Построенный НВК** методом управления по потокосцеплению и цепям регулирования в основном подобен двухквadrантному (2/4) вентильному приводу на базе обращенной синхронной машины и зависимого инвертора (ВД) [3, 4].

Для того, чтобы регулируемый НВК работал надежно в области надсинхронной и подсинхронной скорости, в двигательном и тормозных режимах вместо сигнала скорости ротора W в качестве задающего и контролируемого сигналов была выбрана скорость ротора W_2 относительно поля.

Управляя преобразователем УРП по потокосцеплению порядок открывания тиристорov в подсинхронном и надсинхронном режимах получается различным. Необходимо также обеспечить изменение и повторных импульсов, сдвинутых относительно основных на 60° .

Так как внутри области шагового режима можно где-угодно изменить порядок следования повторных импульсов, поэтому нет

** Под нашим руководством основную часть работы в разработке и изготовлении НВК выполнил инженер Кукорица Янош.

необходимости в точном контроле перехода синхронной скорости ($W = W_1$).

Построенный двухквadrантный (2/4) надсинхронный вентильный каскад надежно работал во всех рабочих областях (направление вращения АМ любое и может быть изменено порядком чередования фаз статора).

Продолжительный режим работы в области синхронной скорости возможен при $f_2 \geq 1$ Гц, так как из-за ошибок (погрешности интеграторов, неточность установки значения R_r , погрешности датчиков тока и напряжения) нельзя сформировать потокосцепление $\bar{\psi}_g$ к управлению

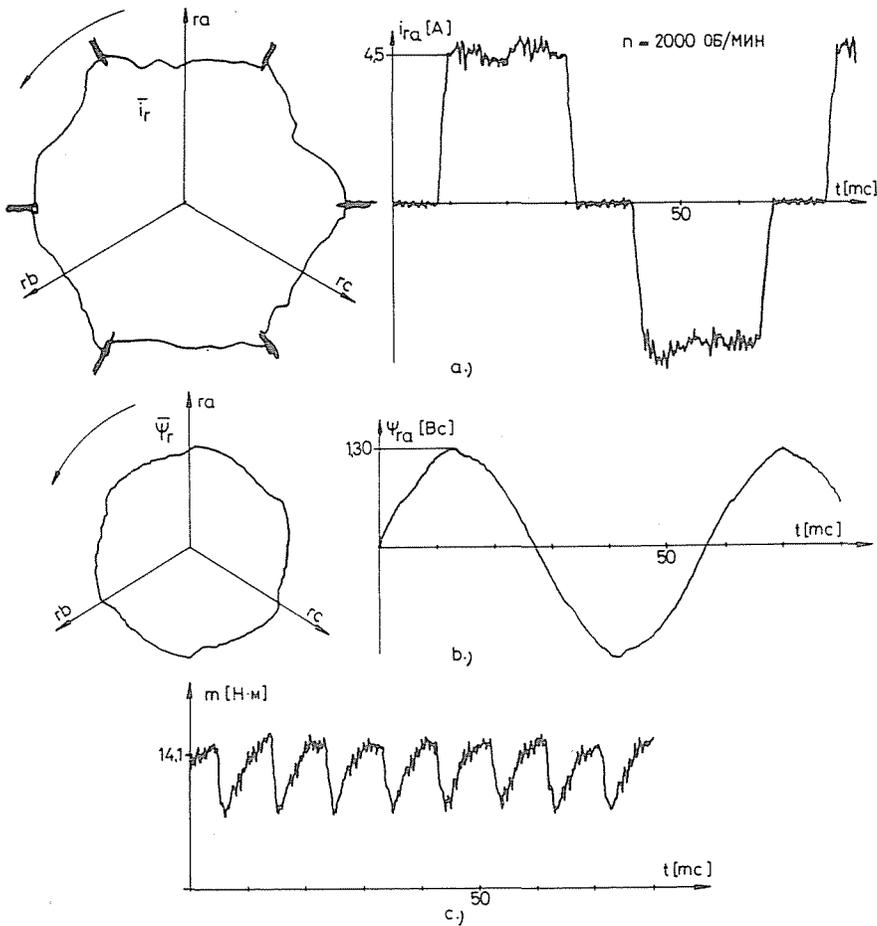


Рис. 9

открыванием тиристоров, однако не очень медленный переход через синхронную скорость надежно обеспечивается в обоих направлениях.

В настоящее время работаем над способом получения надежного сигнала управления роторным преобразователем УРП, пропорционального переходному потокосцеплению ротора взятого со стороны статора, для избежания вышеупомянутых проблем в области синхронной скорости.

На рис. 9—11 представлены экспериментальные характеристики надсинхронного вентильного каскада. На рис. 9 и 10 представлены экспериментальные кривые основных величин соответственно при машинной коммутации в сверхсинхронном режиме и в шаговом режиме

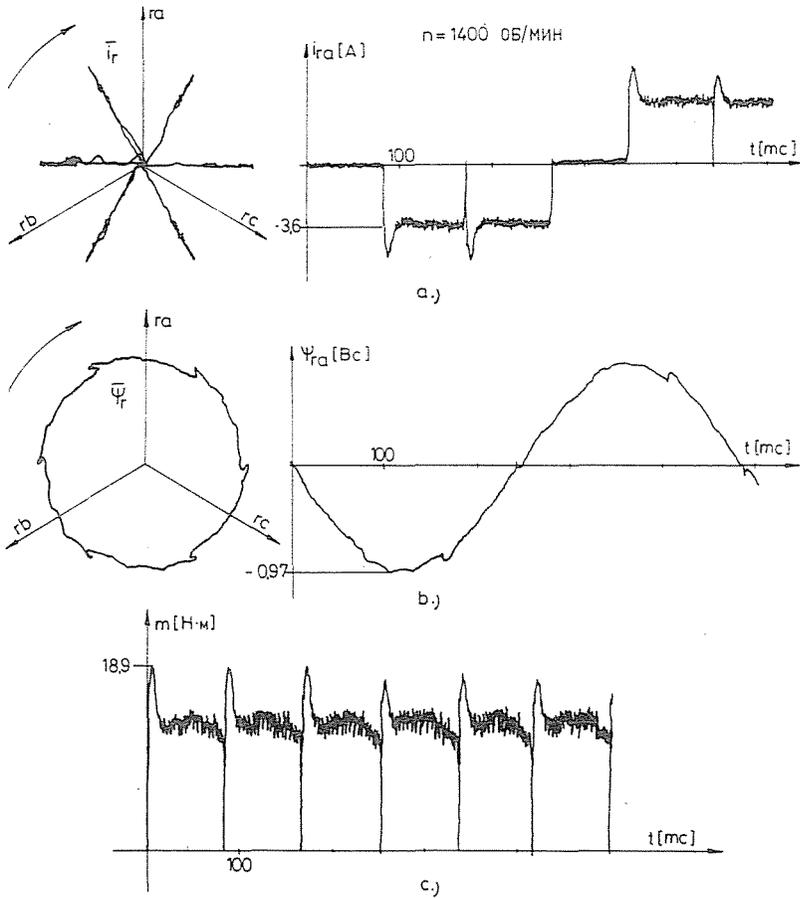


Рис. 10

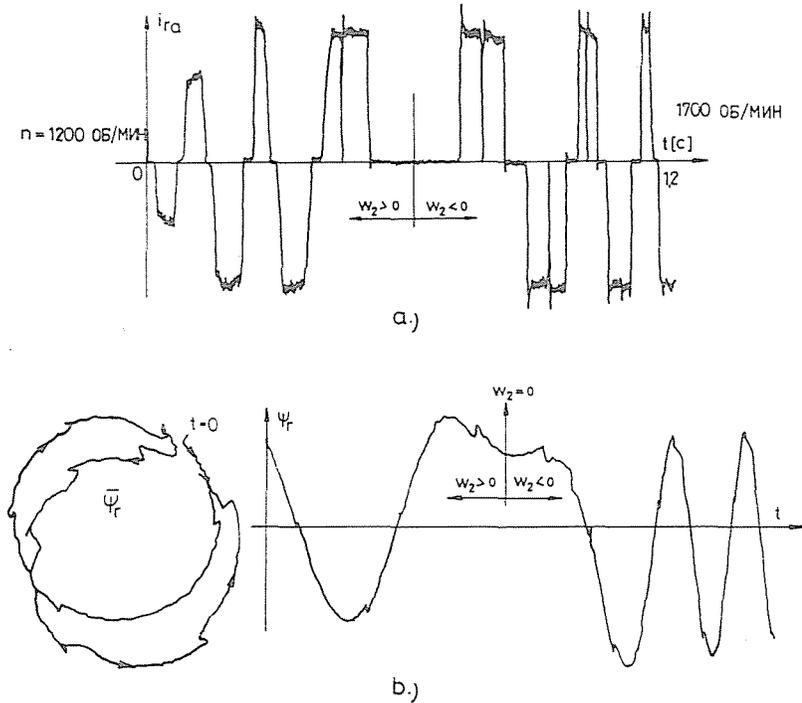


Рис. 11

при подсинхронной скорости, а на рис. 11 показаны кривые при переходе синхронной скорости.

В заключении заметим, что цепи регулирования и управления, разработанные к двухквadrантному (2/4) надсинхронному вентильному каскаду практически без изменения могут быть использованы к четырехквadrантному (4/4) ВД.

Резюме

В случае подсинхронного каскада к контактным кольцам ротора асинхронного двигателя присоединяется трехфазный диодный мост, а к трехфазной сети 50 Герц управляемый тиристорный мост. При сверхсинхронном каскаде оба трехфазных преобразователя (моста) тиристорные, управляемые.

При работе преобразователя (моста), присоединенного к обмотке ротора асинхронного двигателя, в выпрямительном режиме достигаются следующие области работы: двигательный режим при скорости ниже синхронной и генераторный (тормозной) режим при скорости выше синхронной. Соответственно при работе моста в инверторном

режиме: двигательный режим при скорости выше синхронной и генераторный (тормозной) режим при скорости ниже синхронной.

Тиристоры преобразователя, присоединенного к обмотке ротора асинхронной машины, необходимо открывать (зажигать) с переменной частотой, зависящей от скорости ротора. Это не будет проблемой, если используется так называемое самоуправление, т. е. тиристоры преобразователя открываются каким-то сигналом ротора (ток, потокосцепление, напряжение). Данная статья знакомит с одним из самых благоприятных самоуправлений углом открывания тиристоров, потокосцеплением. Показывается конкретная схема асинхронного каскада, приближенный расчет установившегося режима и результаты измерений. Определяются границы углов коммутации области, относящейся к окрестности синхронной скорости, в которой невозможно надежно обеспечить коммутацию тиристоров, но для которой можно использовать иные методы коммутации.

Литература

1. CSÖRGITS, F.: Die Kennlinien der untersynchroner Stromrichter-kaskade. Period. Politechn. El. Eng. 14, 399 (1970).
2. ZEMAN, K.: Nadsynchronní polovodičová kaskáda. Elektrotechnický obzor, 336 (1976).
3. RUZSÁNYI T., SCHMIDT I.: Fluxusról vezérelt áramirányítós szinkronmotor. Elektrotechnika, 162 (1978).
4. SCHMIDT I.: Áramirányítós szinkronmotor állandósult és tranziens állapotának vizsgálata. Disszertáció, 1978, 152 с.
5. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л.: Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 198 (1979).
6. FARKAS A., NAGY L.: A kettős táplálású áramirányítós csúszógyűrűs aszinkron gép állandósult üzemi viszonyai. Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola VI. Tudományos Ülésszak, с. 68--70.

Dr. István SCHMIDT }
Ю. Н. ДЕМЕНТЬЕВ } 1521 Budapest