Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.

УДК 621.34 : 621.876

АСИНХРОННЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ КАСКАД ДЛЯ ПРИВОДА РУДНИЧНОГО ПОДЪЕМА

Е. М. Проскуряков

Асинхронный привод для рудничных подъемных установок получил широкое распространение благодаря простоте системы и малым капитальным затратам. Однако регулировочные качества и экономические показатели его низки.

Применение асинхронного вентильного каскада для привода рудничного подъема может улучшить регулировочные качества привода.

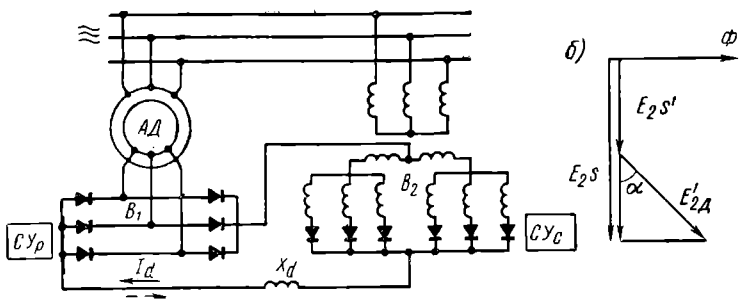


Рис. 1. Принципиальная схема асинхронного вентильного каскада (*а*) и векторная диаграмма вторичной цепи (*б*).

По приведенной на рис. 1, *а* принципиальной схеме в цепь ротора асинхронного двигателя включается вентильный преобразователь частоты, состоящий из выпрямителя и инвертора B_1 и B_2. Во вторичную цепь двигателя вводится добавочная э. д. с. $E'_{2д}$ (рис. 1, *б*). При постоянном моменте на валу двигателя должно выполняться равенство

$$E_2 s = E_2 s' + E'_{2д} \cos \alpha,$$

или

$$s = s' + \frac{E'_{2д} \cos \alpha}{E_2},$$

где s и s' — скольжение двигателя соответственно без добавочной э. д. с. и с введением $E'_{2д}$.

При холостом ходе двигателя, когда $s = 0$,

$$s = s' - s'_0,$$

где s_0' — скольжение двигателя при холостом ходе и введенной добавочной э. д. с.

$$s_0' = -\frac{E_{2д}' \cos \alpha}{E_2}.$$

Составляющая скольжения s' зависит от нагрузки двигателя, а s_0' — от величины добавочной э. д. с. Таким образом, изменяя величину добавочной э. д. с. при помощи системы сеточного управления момента зажигания вентилей сетевого трансформатора $СУ_с$ или роторных вентилей $СУ_р$, можно регулировать скорость двигателя. Изменение угла α приводит соответственно к изменению фазы тока и коэффициента мощности.

При работе роторных вентилей B_1 в выпрямительном режиме, а сетевых B_2 — в инверторном можно получить двигательный режим каскада при нижесинхронной скорости двигателя.

Для обеспечения тормозного момента необходимо изменить направление потока энергии, проходящего через двигатель. Это возможно при нижесинхронной скорости двигателя только при изменении направления тока ротора, для чего роторные вентили B_1 необходимо перевести в инверторный режим. Генераторный режим двигателя в схеме каскада при $n < n_c$ можно получить, следовательно, только при управляемых роторных вентилях. При больших пределах регулирования частота в роторной цепи изменяется в широких пределах, $f_р = 2 \div 50$ *гц*, и усложняет систему сеточного управления $СУ_р$.

Тормозной момент на валу двигателя можно получить также за счет изменения направления вращения поля статора, т. е. перевода двигателя в режим противовключения. При этом роторные вентили B_1 работают в выпрямительном режиме и могут быть неуправляемы, однако мощность инвертора возрастает примерно в два раза.

На основе схемы рис. 1 можно вывести механические характеристики каскада. Обозначим $E_{d\,и}$, $u_{d\,и}$ — противо-э. д. с. и противонапряжение инвертора; $R_р$, $X_р$ — приведенные к обмотке ротора активное и индуктивное сопротивления фазы асинхронного двигателя; I_d — выпрямленный ток; E_2 — э. д. с. фазы ротора.

Принимаем ток в роторе трапецеидальной формы, что вполне допустимо при $\frac{X_d}{X_р} \geqslant 3 \div 5$ [Каганов, 1956].

Необходимо также учитывать особенности работы трехфазной мостовой схемы, включенной в цепь ротора. В неуправляемой трехфазной мостовой схеме существуют три рабочие области [Бутаев, Эттингер, 1951] в зависимости от тока I_d и связанного с ним угла коммутации γ.

Первая рабочая область соответствует поочередному горению двух или трех вентилей. Период одновременного горения трех вентилей (угол коммутации γ), зависящий от тока нагрузки и определяемый как

$$\gamma = \arccos\left(1 - \frac{2X_р I_d}{\sqrt{6}\, E_2}\right), \qquad (1)$$

увеличивается с ростом нагрузки до $\gamma = 60°$

Вторая рабочая область соответствует появлению угла естественного запаздывания зажигания $\alpha_р$, так как при достижении $\gamma = 60°$ возрастающий ток коммутирует за счет перехода на большие коммутирующие напряжения. Угол γ в этом случае определяется выражением

$$\cos(\alpha_р + \gamma) = \cos \alpha_р - \frac{2X_р I_d}{\sqrt{6}\, E_2}. \qquad (2)$$

Угол $\alpha_р$ увеличивается до $\alpha_р \leqslant 30°$ при $X_d = \infty$ или $\alpha_р \leqslant 60°$ при $X_d = 0$.

Третья рабочая область при дальнейшем увеличении $\alpha_р$ соответствует двойной коммутации вентилей. За счет энергии, накопленной в X_d, ток проходит через два вентиля одной фазы, минуя обмотку двигателя. В третьей рабочей области нормальная работа электропривода невозможна.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя M выразим через электромагнитную мощность $P_{эм}$ двигателя

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1}, \tag{3}$$

где ω_1 — синхронная угловая скорость,

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Электромагнитную мощность двигателя в схеме каскада удобно выразить через мощность скольжения, передаваемую ротором двигателя в цепь постоянного тока

$$P_{эм} = \frac{E_{d\,р} I_d}{s}, \tag{4}$$

где s — скольжение двигателя.

Выпрямленная э. д. с. ротора $E_{d\,р}$ с учетом коммутации вентилей [Каганов, 1956]

$$E_{d\,р} = s\frac{E_{d\,р\,0}}{2}\left[\cos\alpha_р + \cos(\alpha_р + \gamma)\right] = sK_E E_2 \cos\left(\alpha_р + \frac{\gamma}{2}\right)\cos\frac{\gamma}{2}, \tag{5}$$

где $E_{d\,р\,0}$ — выпрямленная э. д. с. при $s = 1$, $I_d = 0$,

$$E_{d\,р\,0} = K_E E_2.$$

Для трехфазной мостовой схемы

$$K_E = \frac{\sqrt{6}\cdot 3}{\pi}.$$

В первой рабочей области ($\gamma \leqslant 60°$, $\alpha_р = 0$) э. д. с. $E_{d\,р}$, учитывая (1), имеет вид

$$E_{d\,р} = s\frac{E_{d\,р\,0}}{2}(1 + \cos\gamma) = sK_E E_2\left(1 - \frac{X_р I_d}{\sqrt{6}\,E_2}\right). \tag{5'}$$

Момент двигателя с учетом формул (3)—(5′) для первой рабочей области

$$M = \frac{K_E E_2 I_d}{\omega_1}\left(1 - \frac{X_р I_d}{\sqrt{6}\,E_2}\right), \tag{6}$$

для второй рабочей области

$$M = \frac{K_E E_2 I_d}{\omega_1}\cos\left(\alpha_р + \frac{\gamma}{2}\right)\cos\frac{\gamma}{2}. \tag{6'}$$

Чтобы выразить момент в зависимости от параметров двигателя, выпрямителя и инвертора, определим ток I_d из уравнения равновесия э. д. с. на стороне выпрямленного напряжения [Каганов, 1956]

$$sE_{d\,р\,0} = E_{d\,и\,0}\cos\beta_и + \Delta u_в + I_d\left[2R_р + sX_р\frac{3}{\pi} + R_{d\,э}\right], \tag{7}$$

где $E_{d\,и\,0}$ — противо-э. д. с. инвертора при $I_d = 0$; $\beta_и$ — угол опережения зажигания вентилей инвертора; $\Delta u_в$ — падение напряжения в вентилях; $R_{d\,э}$ — эквивалентное сопротивление цепи постоянного тока, учитывающее падение напряжения на активных сопротивлениях и коммутацию вентилей инвертора; $R_р$, $X_р$ — приведенные к обмотке ротора сопротивления фазы двигателя

$$R_р = r_2 + r_1' s; \quad X_р = x_2 + x_1'.$$

При этом

$$I_d = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{E_{d\,р\,0}\left[s - \frac{E_{d\,и\,0}\cos\beta_и + \Delta u_в}{E_{d\,р\,0}}\right]}{X_р\left[\left(1 + \frac{2r_1'}{X_р}\cdot\frac{\pi}{3}\right)s + \frac{2r_2 + R_{d\,э}}{X_р}\cdot\frac{\pi}{3}\right]}. \tag{8}$$

Обозначим скольжение двигателя в схеме каскада при холостом ходе при $I_d = 0$.

$$\frac{E_{d\,и\,0}\cos\beta_и + \Delta u_в}{E_{d\,р\,0}} = s_0,$$

$$\left(1 + \frac{2r_1'}{X_р}\cdot\frac{\pi}{3}\right) = A, \quad \frac{2r_2 + R_{d\,э}}{X_р}\cdot\frac{\pi}{3} = B.$$

Тогда

$$I_d = \frac{\pi}{3}\cdot\frac{E_{d\,р\,0}}{X_р}\cdot\frac{s - s_0}{[As + B]}. \tag{9}$$

Подставляя выражение (9) в уравнение (5′), получим момент двигателя для первой рабочей области выпрямительной схемы

$$M = 4\frac{3}{\pi}\cdot\frac{3E_2^2}{2X_р\omega_1}\left[\frac{s - s_0}{sA + B} - \left(\frac{s - s_0}{sA + B}\right)^2\right] \tag{10}$$

С достаточной точностью можно принять, что максимальный момент асинхронного двигателя

$$M_м = \frac{3E_2^2}{2\left(r_1' + X_р\right)\omega_1} \cong \frac{3E_2^2}{2X_р\omega_1}\cdot\frac{3}{\pi}.$$

Электромагнитный момент двигателя при этом в относительных единицах имеет вид

$$\mu = \frac{M}{M_н} = 4K_м\left[\frac{s - s_0}{sA + B} - \left(\frac{s - s_0}{sA + B}\right)^2\right], \tag{11}$$

где $K_м$ — перегрузочная способность асинхронного двигателя,

$$K_м = \frac{M_м}{M_н}.$$

Для определения момента во второй рабочей области ($\gamma = 60°$; $\alpha_р > 0$) подставим из уравнения (2) в (6′) значение $\cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right)$, разложив его в ряд

$$\cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) = \sqrt{1 - \frac{2I_d^2X_р^2}{3E_2^2}} = 1 - \frac{I_d^2X_р^2}{3E_2^2} - \frac{I_d^2X_р^2}{12E_2^2}. \tag{12}$$

Ограничимся двумя членами ряда. Тогда относительная погрешность составит менее 1%. Имея в виду, что для второй рабочей области $\gamma = 60°$, момент двигателя с учетом (6′), (9), (12)

$$M = 2\sqrt{3}\,M_м\left[\frac{s - s_0}{As + B}\right]\left[1 - 2\left(\frac{s - s_0}{sA + B}\right)^2\right] \tag{13}$$

В относительных единицах

$$\mu = 2\sqrt{3}\, K_{\text{м}} \left[\frac{s - s_0}{sA + B}\right]\left[1 - 2\left(\frac{s - s_0}{sA + B}\right)^2\right] \qquad (14)$$

Приравнивая производную от момента (13) по скольжению к нулю, получим величину скольжения, соответствующую максимальному моменту двигателя в схеме каскада

$$s_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{6}\, s_0 + B}{\sqrt{6} - A}. \qquad (15)$$

Величина максимального момента при этом скольжении $M_{\text{м.к}} = 0{,}866\, M_{\text{м}}$, т. е. перегрузочная способность двигателя в схеме каскада снижается на 13,4%. Если ток I_d из уравнения (2) подставить в формулу (6′), то получим зависимость момента двигателя

$$M = M_{\text{м}} \sin(2\alpha_{\text{р}} + \gamma) \sin\gamma. \qquad (16)$$

Максимальный момент двигателя в схеме каскада достигается во второй рабочей области при $\alpha_{\text{р}} = 15°$. В конце первой рабочей области ($\gamma = 60°$, $\alpha_{\text{р}} = 0$) момент двигателя равен

$$M_{\gamma=60°} = M_{\text{м}} \cdot 0{,}75.$$

Скольжение, соответствующее этому моменту, согласно (10),

$$s_{\gamma=60°} = \frac{4s_0 + B}{4 - A}. \qquad (17)$$

Первая рабочая область ($\gamma \leqslant 60°$) соответствует, таким образом, моменту двигателя $M = (1{,}3 \div 1{,}5)\, M_{\text{в}}$.

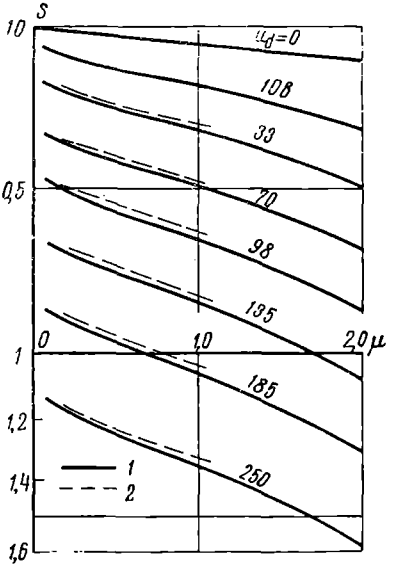


Рис. 2. Механические характеристики каскада ($0 \leqslant s \leqslant 1$) для двигательного и режима противовключения:

1 — по расчету; *2* — по эксперименту.

Выведенные выше зависимости и соотношения для моментов справедливы для двигательного режима при $0 < s \leqslant 1$. Эти же зависимости, очевидно, справедливы и для генераторного режима при $s > 1$ (режим противовключения). Механические характеристики для этих режимов работы, рассчитанные по (11) для двигателя МТ-21-6 мощностью 5 *квт* с $n = 940$ *об/мин* при различных значениях $u_d = E_{di} \cos\beta + \Delta u_{\text{в}}$, приведены на рис. 2. На график также нанесены опытные данные, снятые для этого двигателя при включении в роторную цепь вентилей типа ВК и инвертора, выполненного на тиратронах ТР1-40/15.

Для обеспечения режима противовключения при $s > 1$ необходимо иметь инвертор, противо-э. д. с. которого должна быть равна выпрямленной э. д. с. ротора при наибольшем скольжении ($s_{\text{м}} \approx 2$). Это достигается увеличением противо-э. д. с. инвертора или уменьшением выпрямленной э. д. с. ротора, для чего роторные вентили должны быть управляемы. Но при управляемых вентилях в роторе двигателя снижается перегрузочная способность. Ток двигателя при одном и том же моменте возрастает резко с увеличением угла регулирования α.

Зависимости

$$\frac{M}{M_м} = f(\gamma) \quad \text{и} \quad \frac{I_2^{(1)}}{\frac{E_2}{X_р}} \approx \frac{I_2^{(1)}}{I_п} = f(\gamma)$$

для различных значений α (рис. 3, *а*), вычисленные по уравнениям (16) и (5′), имеют вид

$$\frac{M}{M_м} = \sin(2\alpha + \gamma)\sin\gamma,$$

$$\frac{I_2^{(1)}}{\frac{E_2}{X_р}} \approx \frac{I_2^{(1)}}{I_п} = \frac{6}{2\pi} \cdot \frac{M}{M_м} \cdot \frac{1}{\cos\alpha + \cos(\alpha+\gamma)},$$

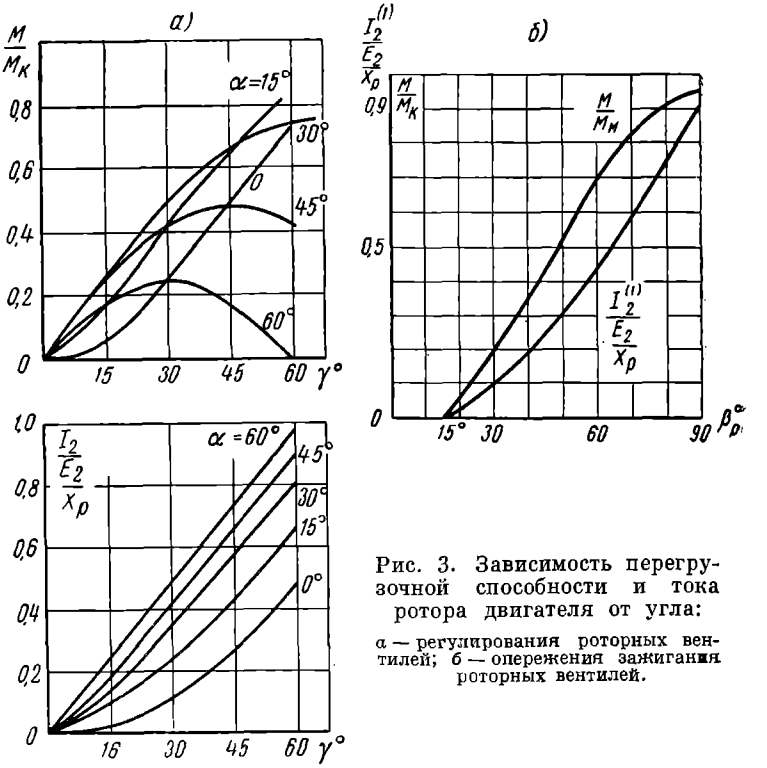


Рис. 3. Зависимость перегрузочной способности и тока ротора двигателя от угла:

а — регулирования роторных вентилей; *б* — опережения зажигания роторных вентилей.

где $I_2^{(1)}$ — первая гармоническая тока ротора,

$$I_2^{(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d;$$

$I_п$ — пусковой ток двигателя.

При генераторном режиме ($0 < s \leqslant 1$) вентили роторной группы должны работать в инверторном режиме, а вентили сетевой группы — в выпрямительном. При этом

$$E_{d\,р} = \frac{sE_{d\,р\,0}}{2}\left[\cos\beta_р + \cos(\beta_р - \gamma)\right] = sK_E E_2\left[\cos\beta_р + \frac{X_р I_d}{\sqrt{6}\,E_2}\right]. \qquad (18)$$

Величина выпрямленного тока I_d определяется из уравнения равновесия

$$sE_{d\,р\,0}\cos\beta_р = E_{d\,с\,0}\cos\alpha_с - \Delta u_в - I_d\left(2R_р + sX_р\frac{3}{\pi} + R_{d\,э}\right), \qquad (19)$$

где α_c — угол регулирования сетевой группы вентилей, $E_{d\,c\,0}$ — выпрямленная э. д. с. сетевых вентилей при $I_d = 0$.

Момент двигателя в генераторном режиме с учетом уравнений (3), (4), (18) и (19)

$$M = 4M_м \cos^2 \beta_р \left[\frac{s_0 - s}{sA + B} + \left(\frac{s_0 - s}{sA + B}\right)^2\right], \qquad (20)$$

где $\beta_р$ — угол опережения.

В относительных единицах

$$\mu = 4K_м \cos^2 \beta_р \left[\frac{s_0 - s}{sA + B} + \left(\frac{s_0 - s}{sA + B}\right)^2\right], \qquad (20')$$

где

$$s_0 = \frac{E_{d\,р\,0} \cos \alpha_c - \Delta u_в}{E_{d\,р\,0} \cos \beta_р}.$$

Зависимость момента (20) в генераторном режиме не имеет экстремальных точек.

Для определения максимального момента двигателя в генераторном режиме определим ток I_d [Каганов, 1965].

$$\cos(\beta_р - \gamma) = \cos \beta_р + \frac{2I_d X_р}{\sqrt{6}\, E_2},$$

$$-I_d = \frac{\sqrt{6}\, E_2}{2X_р} [\cos \beta_р - \cos(\beta_р - \gamma)]. \qquad (21)$$

Подставив выражения (18) и (21) в (3), имеем

$$M = M_м \sin(2\beta_р - \gamma_р) \sin \gamma_р. \qquad (22)$$

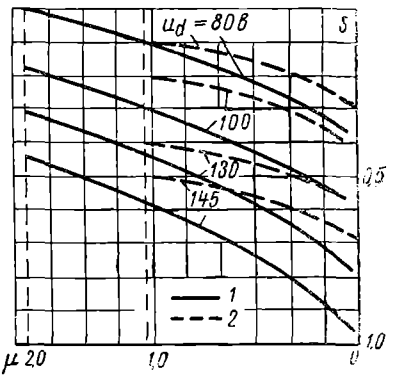


Рис. 4. Механические характеристики каскада для генераторного ($0 < s < 1$) режима.

1 — $\beta_р = 60°$; *2* — $\beta_р = 45°$.

Предельное значение момента двигателя в генераторном режиме ограничивается условиями обеспечения инверторного режима роторных вентилей, при котором должно быть $\beta_р \geqslant \gamma + \delta$, ($\delta$ — угол деионизации вентилей).

Как видно из выражений (20) и (20′), увеличение угла опережения $\beta_р$ приводит к уменьшению момента при данном скольжении и одновременно позволяет увеличить угол коммутации γ (I_d), что приводит к возрастанию момента.

Зависимость $\frac{M}{M_м} = f(\beta_р)$, вычисленная по (22),

$$\frac{\frac{I_2^{(1)}}{E_2}}{\frac{}{X_р}} \approx \frac{I_2^{(1)}}{I_п} = f(\beta_р),$$

и зависимость $\frac{I_2^{(1)}}{I_{2п}} = f_1(\beta_р)$, вычисленная как

$$\frac{I_2^{(1)}}{I_{2п}} = \frac{6}{2\pi} \cdot \frac{M}{M_м} \cdot \frac{1}{\cos(\beta_р - \gamma) + \cos \beta},$$

приведена на рис. 3, *б* (при $\delta = 15°$). Как видно из графика, увеличение угла $\beta_р$ вызывает резкое возрастание тока ротора. С другой стороны, при малых $\beta_р$ перегрузочная способность двигателя в генераторном режиме ($0 < s < 1$) сильно падает. При $\beta_р = 45°$, $\frac{M}{M_м} = 0{,}433$; при

$\beta_р$ 60°, $\frac{M}{M_м} = 0{,}682$. Увеличение $\beta_р > 60°$ недопустимо по току двигателя. На рис. 4 приведены механические характеристики, рассчитанные для двигателя МТ-21-6, работающего в генераторном режиме при различных значениях $u_d = E_{d\,c\,0} \cos \alpha_c - \Delta u_в$.

Выводы

1. Механические характеристики асинхронного вентильного каскада в двигательном режиме ($0 < s \leqslant 1$) и режиме противовключения по своим регулировочным свойствам удовлетворяют требованиям, предъявляемым к приводу рудничного подъема. Привод по схеме асинхронного вентильного каскада обеспечивает плавное регулирование скорости от 0 до максимальной в двигательном и тормозном режимах при достаточно жестких механических характеристиках.

2. При нормальных нагрузках двигателя ($M \leqslant 0{,}75\ M_н$) мостовая схема роторных вентилей работает в первой рабочей области, и момент двигателя вычисляется по выражениям (10), (11), при больших нагрузках — по формулам (13) и (14).

3. Перегрузочная способность двигателя ($0 < s < 1$) в двигательном режиме и режиме противовключения снижается на 13,4%, в генераторном режиме примерно в два раза. Момент двигателя в схеме каскада снижается также за счет появления моментов от высших гармонических тока ротора. Такое снижение в нормальных режимах не превышает 6—8% [Завалишин, Фролов, 1951].

4. Основным тормозным режимом двигателя в схеме каскада следует считать режим противовключения, обеспечивающий достаточную перегрузочную способность двигателя. При этом роторные вентили могут быть неуправляемы, что значительно упрощает управление каскадом по сравнению с генераторным режимом при нижесинхронной скорости.

ЛИТЕРАТУРА

Бутаев Ф. И., Эттингер Е. Л. Вентильный электропривод. Госэнергоиздат, 1951.

Завалишин Д. А., Фролов Б. В. Каскадная схема асинхронного двигателя с ионным преобразователем для широкой регулировки скорости. В сб. Электросила, № 9, 1951.

Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи. Ч. III. Госэнергоиздат, 1956.