

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПИ СТАТОРА

*Юхименко М.Ю., ст. преп.*

*Кременчугский государственный политехнический университет  
имени Михаила Остроградского*

*39600, г. Кременчуг, Полтавская обл., ул. Первомайская, 20*

*E-mail: saue1@polytech.poltava.ua*

**Введение.** В настоящее время большая часть регулируемых электроприводов переменного тока выполняется на базе наиболее массового, простого и надежного асинхронного двигателя.

Актуальными и приоритетными направлениями развития регулируемого асинхронного электропривода по-прежнему являются максимальное использование потенциальных возможностей асинхронного двигателя, обеспечение требований к качеству и диапазону регулирования, повышение энергетической эффективности использования асинхронного электропривода и улучшение его электромагнитной совместимости с питающей сетью. Повышение энергетической эффективности асинхронных электроприводов общепромышленных механизмов связано со снижением потерь в электроприводе при выполнении им заданных технологических операций по заданным тахограммам. Это электроприводы, работающие в пускотормозных режимах (краны, лифты, главные приводы слябингов и блюмингов, вспомогательные позиционные механизмы прокатных станков и т.д.) или длительных режимах с медленно изменяющейся нагрузкой (насосы, вентиляторы, компрессоры, транспортеры и т.д.).

В таких электроприводах за счет снижения потерь электропривода в установившихся и переходных режимах возможна значительная экономия электроэнергии. В кинематически связанных электроприводах (рольганги, многодвигательные приводы тележек и т.д.) равномерное деление нагрузок между двигателями позволяет также минимизировать потери в них.

**Анализ предыдущих исследований.** Использование специальных технических средств обеспечивает минимизацию потерь энергии в электроприводе. Так как значительная часть асинхронных электроприводов работает в условиях медленно изменяющейся нагрузки (электроприводы турбомеханизмов, конвейеров и т.д.), отклонение нагрузки электропривода от номинальной ухудшает энергетические показатели электропривода.

В настоящее время к таким средствам можно отнести устройства регулирования напряжения на двигателе в соответствии с уровнем его нагрузки.

Как правило, это либо специальные регуляторы напряжения на основе ТРН, включаемые между сетью и статором двигателя, либо преобразователи частоты, в которых предусмотрен так называемый режим энергосбережения.

В первом случае ТРН выполняет кроме функции энергосбережения не менее важные функции управления режимами пуска и торможения, иногда регулирует скорость или момент, осуществляет защиту, диагностику, т. е. повышает технический уровень привода в целом.

Во втором случае режим энергосбережения рассматривается как дополнительная опция преобразователя частоты и имеется лишь в некоторых выпускаемых типах преобразователей.

С учетом многофункциональности применения такие устройства оказываются экономически целесообразными для приводов с изменяющейся нагрузкой даже при их относительно высокой стоимости.

**Цель работы.** Определение путей повышения энергетической эффективности асинхронных электроприводов общепромышленных механизмов и оценка области целесообразного применения регулируемого по напряжению асинхронного электропривода.

**Материал и результаты исследований.** Электроприводы большинства общепромышленных механизмов часто имеют завышенную установленную мощность, превышающую необходимую в 2–3 раза.

Кроме того, электроприводы некоторых механизмов (прессов, кузнечного оборудования, станков, металлургических агрегатов и др.) по причинам технологического характера часть времени производственного цикла работают с недогрузкой.

Зависимости суммарных потерь и реактивной мощности приведены на рис. 1.

На этом же рисунке приведена кривая, которая характеризует зависимость полной мощности АД от его коэффициента загрузки с учетом полных потерь.

Указанные особенности позволяют снизить энергопотребление недогруженного АД при работе в зоне номинальной скорости [1, 2, 3, 5], обеспечив его работу за счет использования полупроводникового регулятора напряжения на регулировочной ( $U_1 < U_{1ном}$ ), а не на естественной ( $U_1 = U_{1ном}$ ) характеристике (где  $U_1$  – действующее значение 1-й гармоники напряжения, приложенного к двигателю;  $U_{1ном}$  – действующее значение номинального напряжения сети).

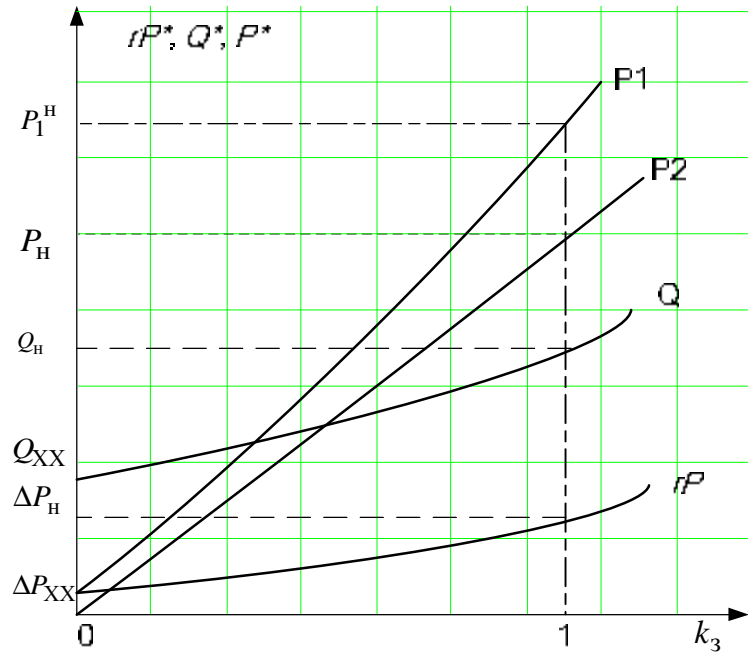


Рисунок 1 – Зависимости полных потерь и активной, и реактивной мощности от загрузки двигателя ( $U = U_H$ )

Этот режим проиллюстрирован на рис. 2, где показаны естественная (1) и регулировочная (2) характеристики АД при питании от преобразователя напряжения:

- $M_{ном}$  – номинальный момент двигателя;
- $M_c$  – момент статической нагрузки;
- $s_1, s_2$  – скольжение на естественной и регулировочной характеристиках при заданном  $M_c$ .

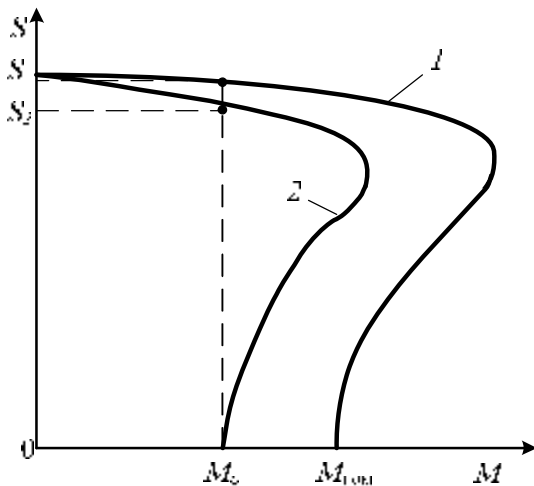


Рисунок 2 – Естественная (1) и регулировочная (2) характеристики АД при питании от регулятора напряжения

Изменение величины скольжения при различных значениях питающего напряжения статорных обмоток показаны на рис. 3.

При изменении напряжения статора величина переменных потерь изменяется, так как изменяется величина токов  $I_2'$  и  $I_1'$  в выражении для переменных потерь в АД:

$$\begin{aligned} \Delta P_{нг} &= \Delta P - \Delta P_{xx} = (\Delta P_1 - \Delta P_{1xx}) + \Delta P_d + \Delta P_2 = \\ &= 3(I_1'^2 - I_{1xx}^2)r_1 + \frac{I_1'^2}{I_{1H}^2} \Delta P_{дн} + 3I_2'^2 r_2' \approx k_3^2 \Delta P_{нг}. \end{aligned}$$

При неизменности  $k_3$ , ток  $I_2'$  изменяется под влиянием двух факторов: напряжения  $U_1$  и скольжения  $s$ .

При возрастании  $U_1$  скольжение незначительно уменьшается, так как двигатель переходит на более высокую механическую характеристику (рис. 3), и увеличивается сопротивление  $r_2' \frac{1-s}{s}$ .

Зависимость реактивной мощности двигателя от напряжения для различных  $k_3$  показана на рис. 4.

Отличие здесь состоит только в том, что стремление изготовителей двигателей уменьшить их массогабаритные показатели выражается для ряда типов АД в том, что минимум реактивной мощности имеет место при меньших напряжениях.

Например, при  $k_3 = 1$  кривые  $Q_{xx}$  и  $Q_{нг1}$  пересекаются при напряжении, меньшем номинального.

Это обстоятельство более выражено для АД малой мощности и не проявляется для двигателей мощностью больше 15 кВт.

Электромагнитные потери в двигателе рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{1M} + \Delta P_{2M} + \Delta P_{1с}. \quad (1)$$

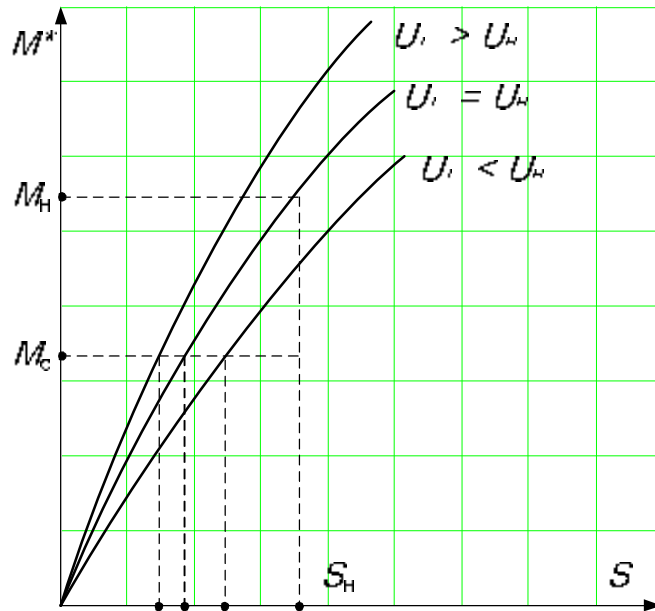


Рисунок 3 – Изменение скольжения  $s$  в зависимости от напряжения статора

Значения  $\Delta P_{1M}$ ,  $\Delta P_{2M}$  и  $\Delta P_{1C}$  при работе на регулировочной характеристике в системе «регулятор напряжения – АД» определяются следующим образом:

$$\Delta P_{1M} = \Delta P_{1M,ном} k_{п1}^2 [A + (1-A)M_*^2]; \quad (2)$$

$$\Delta P_{2M} = \Delta P_{2M,ном} k_{п1}^2 M_*^2;$$

$$\Delta P_{1C} = \Delta P_{1C,ном} [B + (1-B)M_*^2],$$

где  $\Delta P_{1M}$ ,  $\Delta P_{2M}$  – соответственно потери в меди статора, ротора;  $\Delta P_{1C}$  – потери в стали статора;  $\Delta P_{1M,ном}$  – номинальные потери в меди статора;

$\Delta P_{1M,ном} = 3I_{1ном}^2 R_1$  ( $I_{1ном}$  – номинальный ток статора);  $\Delta P_{2M,ном}$  – номинальные потери в меди ротора,  $\Delta P_{2M,ном} = 3I_{2ном}'^2 R_2' = M_{ном} w_0 s_{ном}$  ( $I_{2ном}'$  – приведенный номинальный ток ротора;  $M_{ном}$  – номинальный момент двигателя;  $s_{ном}$  – скольжение двигателя;  $\Delta P_{1C,ном}$  – номинальные потери в стали статора);  $M_{c*} = M / M_{ном}$  – относительное значение момента двигателя; А и В – конструктивные коэффициенты двигателя.

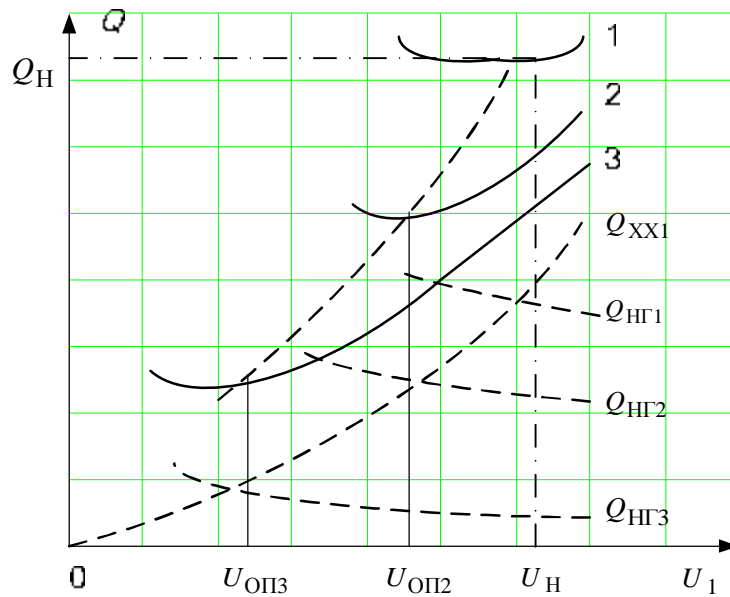


Рисунок 4 – Зависимость реактивной мощности от напряжения  $U_1$  при различных значениях  $k_3$

При работе АД на естественной характеристике [3] выражения для определения составляющих потерь приобретают следующий вид:

$$\Delta P_{1M} = [A + (1 - A)M_{c*}^2] \Delta P_{1M,ном.}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{2M} = M_{c*}^2 \Delta P_{2M,ном.};$$

$$\Delta P_{1c} = [B + (1 - B)M_{c*}^2] \Delta P_{1c,ном.}.$$

Как следует из (3), при работе АД на естественной характеристике при изменении  $s$  от 0 до  $s = s_{ном.}$  потери зависят только от статического момента. При работе на регулировочной характеристике ( $U_1 < U_{1ном.}$ ),  $\Delta P_{эм} = f(M_{c*}, s)$  как следует из (2), что позволяет определить значение  $s_{опт.}$ , являющееся минимумом функции  $\Delta P_{эм} = f(M_{c*}, s)$ .

Хотя в выражения для составляющих  $\Delta P_{эм}$  (2) входят коэффициенты  $k_{п1}$  и  $k_{п2}$ , связанные нелинейной зависимостью с  $s$  и  $M_{c*}$ , диапазон их изменения для структуры преобразователя, состоящей из ключевых элементов с полной управляемостью, включенных в каждую из фаз обмоток статора двигателя, незначителен [2], что позволяет при определении  $s_{опт.}$  принять их постоянными и равными друг другу ( $k_{п1} = k_{п2} = k_{п}$ ).

Тогда:

$$s_{опт.} = s_{ном.} \sqrt{\frac{Ak_{п}^2 \Delta P_{1M,ном.} + B \Delta P_{1c,ном.}}{(1 - A)k_{п}^2 \Delta P_{1M,ном.} + k_{п}^2 \Delta P_{2M,ном.} + (1 - B) \Delta P_{1c,ном.}}} \quad (4)$$

Расчеты показывают, что изменение  $k_{п}^2$  в диапазоне 1... 1,2 не оказывает существенного влияния на значение  $s_{опт.}$ .

Как следует из формулы (4), значение  $s_{опт.}$  не зависит от  $M_{c*}$ , что позволяет задавать и поддерживать соответствующую  $s_{опт.}$  скорость при изменяющемся моменте нагрузки.

Из этого следует, что оптимизация энергопотребления наиболее просто может быть реализована при наличии в системе датчика скорости и создании с использованием силовой структуры «полупроводниковый преобразователь – АД» системы автоматического регулирования скорости. Схема САР скорости системы полупроводниковый преобразователь – АД показана на рис. 5.

В этом случае заданная скорость  $w_3 = w_0(1 - s_{опт.})$ , т.е. электропривод будет работать в процессе регулирования скорости при  $s_{опт.}$ , значение которого не будет изменяться, если в системе управления используется двукратно интегрирующая САР скорости.

Для различных типов асинхронных двигателей  $s_{опт.} = (0,5...0,9)s_{ном.}$  и определяется в основном коэффициентом А, т.е. значением тока холостого хода, поэтому значения  $s_{опт.}$ , приближающиеся к  $s_{ном.}$ , имеют, как правило, двигатели краново-металлургических серий, отличающиеся повышенным воздушным зазором и током  $I_0$ .

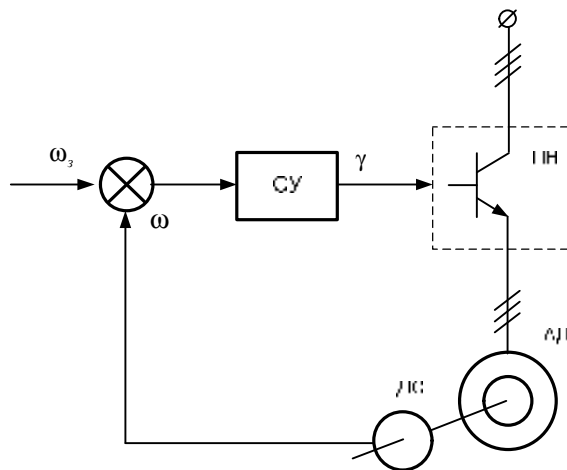


Рисунок 5 – Схема САР скорости системы полупроводниковый преобразователь – АД; ДС – датчик скорости; СУ – система управления;  $\gamma = var$  – скважность импульсов управления ключами при ШИМ;  $\omega_3$  – заданная скорость АД,  $\omega$  – фактическая скорость АД

Двигатель может работать с оптимальным скольжением, если  $M_{c*} < s_{опт.}/s_{ном.}$ . В этом случае несколько снижается скорость по сравнению с работой на естественной характеристике, уменьшаются потери в меди и стали статора и возрастают потери в меди ротора, однако их перераспределение таково, что электромагнитные потери при  $s_{опт.}$  меньше, чем при  $s_1$ .

Различие в потерях  $\Delta P_{эм}$  тем больше, чем меньше  $M_{c*}$  по сравнению с отношением  $s_{опт.}/s_{ном.}$  и больше  $A = (I_0/I_{1ном.})$ , поэтому наибольшее снижение потерь при работе в зоне максимальной скорости может быть обеспечено у двигателей краново-металлургических серий, имеющих большее значение момента  $M_{c*}$ , при котором может быть достигнуто снижение энергопотребления, и увеличенное значение А по сравнению с двигателями единых серий. Так, при работе в установившемся режиме с  $M_{c*} = 0,05$  значение  $\Delta P_{эм}$  для двигателей краново-металлургических серий может быть снижено в 5 – 8 раз, а для двигателей единой серии – в 3 – 6 раз.

Электромагнитный КПД двигателя

$$h_{эм} = \frac{P_{мех}}{P_{мех} + \Delta P_{эм}}, \quad (5)$$

где  $P_{мех} = M_c w_y$  – механическая мощность на валу АД;  $w_y$  – установившаяся скорость, соответствующая работе со скольжением  $s_1, s_{опт.}, s_{ном.}$ .

Для подтверждения этих выводов в табл. 1. приведены отдельные составляющие потерь, электромагнитные потери и  $h_{эм}$  двигателей разных типов при максимальной установившейся скорости с различными значениями  $w_y$  и соответствующими этой скорости скольжениями  $s_y$ .

**Таблица 1 – Зависимость потерь и КПД АД от установившихся режимов от скольжения**

Тип и характеристики двигателя		Sy	Параметр									
			$\Delta P_{1м}$	$\Delta P_{2м}$	$\Delta P_{1с}$	$\Delta P_{2с}$	$h_{эм}$	$\Delta P_{1м}$	$\Delta P_{2м}$	$\Delta P_{1с}$	$\Delta P_{2с}$	$h_{эм}$
			$M_{с*} = 0,5 M_{ном}$					$M_{с*} = 0,05 M_{ном}$				
МТКФ012-6:	$P_{ном} = 2,2$ кВт;	$s_1$	376	75	128	579	0,669	313	7	128	448	0,217
	$s_{ном} = 0,12$ ;	$s_{опт}$	294	134	73	501	0,690	39	17	7	63	0,64
	$s_{опт} = 0,105$	$s_{ном}$	290	154	65	509	0,680	38	20	6	64	0,630
4А100L6У3:	$P_{ном} = 2,2$ кВт;	$s_1$	129	30	75	234	0,828	74	3	74	151	0,433
	$s_{ном} = 0,05$ ;	$s_{опт}$	128	42	59	229	0,830	17	5	6	28	0,800
	$s_{опт} = 0,032$	$s_{ном}$	152	61	39	252	0,813	19	7	4	30	0,750

Помимо рассмотрения случаев, когда  $s_y = s_1$  и  $s_y = s_{опт}$ , определены потери и для случая, когда двигатель работает на регулировочных характеристиках при  $s_y = s_{ном}$ . Значения потерь  $\Delta P_{1м}$  и  $\Delta P_{2м}$ , приведенные в табл. 1, вычислены для  $s_{опт}$  и  $s_{ном}$  с учетом коэффициентов  $k_{п1}$  и  $k_{п2}$ , зависящих при заданной скорости от отношения моментов двигателя на естественной и регулировочной характеристиках [6]. Как видно из табл. 1, для двигателей краново-металлургических серий, когда  $s_{опт} = s_{ном}$ , значения потерь и КПД при  $s_{опт}$  и  $s_{ном}$  довольно близки, что позволяет в ряде случаев осуществлять режимы с минимизацией потерь в машине, задавая и поддерживая в САР скорости  $\omega_3 = \omega_{ном}(s_y = s_{ном})$ .

Количество сэкономленной электроэнергии в рассматриваемом случае зависит от типа АД, его мощности, времени работы на скорости  $\omega_y$  и момента статической нагрузки. Так, если асинхронный двигатель МТКФ012-6, имеющий  $P_{ном} = 2,2$  кВт, обеспечивает, работая в повторно-кратковременном режиме, 60 включений в час при работе на установившейся скорости  $\omega_y$  в течение  $t_y = 30$  с и работает в течение года 8000 ч ( $T = 8000$  ч), то при работе на регулировочной характеристике со скольжением  $s_2 = s_{ном}$  удастся сэкономить за год 280 кВт·ч электроэнергии при  $M_c = 0,5 M_{ном}$ ; 880 кВт·ч при  $M_c = 0,25 M_{ном}$ ; 1530 кВт·ч при  $M_c = 0,05 M_{ном}$  по сравнению с работой АД на естественной характеристике при  $s_1$ . Снижение потерь может быть также обеспечено при работе нерегулируемого привода в продолжительном режиме при управлении механизмами непрерывного действия, например, вентиляторами, когда АД выбран со значительным запасом по мощности (коэффициент загрузки не превышает (0,3 ... 0,4)). В этом случае работа при пониженном напряжении ( $U_1 < U_{1ном}$ ) может быть реализована в течение всего времени работы.

**Выводы.** Следует отметить, что экономия электроэнергии при применении системы «Полупроводниковый регулятор напряжения – АД» не столь значительна, чтобы обеспечить быструю окупаемость преобразователя, включенного в статорные цепи АД.

Целесообразность использования регулятора напряжения в большинстве случаев определяется технологическими требованиями производственных механизмов (транспортеров, насосов, вентиляторов, лифтов, конвейеров и др.), требующих плавного пуска и ограничения ударных моментов, ускорений и рывков, возникающих при прямом подключении асинхронных двигателей к питающей сети. Поэтому полупроводниковые преобразователи напряжения, используемые с целью обеспечения необходимых параметров технологического процесса, позволяют одновременно решать задачу снижения энергопотребления практически без дополнительных затрат.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Браславский И.Я., Зубрицкий О.Б., Ольков А.Е. Энергетика регулировочных режимов асинхронного электропривода при потенциальном моменте нагрузки // Изв. вузов. Электромеханика, 1975. – № 1. – С. 82 – 85.
- Браславский И.Я., Зубрицкий О.Б., Куцин В.В. К определению мощности тиристорных асинхронных электроприводов при параметрическом управлении // Электротехника, 1974. – № 10. – С. 23 – 26.
- Браславский И.Я., Зюзев А.М., Трусов Н.П. Сравнительный анализ способов регулирования подачи центробежных насосов // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, 1983. – Вып. 2 (112). – С. 8 – 10.
- Ильинский Н.Ф., Сарбатов Р.С., Безяев В.Г. Научно-технические аспекты проблемы повышения эффективности использования энергии в массовом электроприводе // Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 11 – 18.
- Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

Стаття надійшла 08.04.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.