

УДК 621.865.8

Перспективы использования регулируемого электропривода в нефтегазовой промышленности

англ. название статьи

Е.С. Шаньгин, д.т.н., проф.
shangin@ungm.ru
Тел. 8 (347) 241-56-87
/ООО "НПО "Уфанефтегазмаш",
г. Уфа, Башкортостан/

Рассматривается тенденция развития электроприводов, повышения их управляемости, уменьшения потерь электроэнергии в энергоемких процессах нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: управление скоростью вращения, перераспределение угловых скоростей между ротором и статором, совместное вращение ротора и статора, управляемый привод, диапазон изменения скорости.

Key words:

Введение

В последние годы во всех отраслях промышленности большое внимание уделяется внедрению энергосберегающих технологий, так как рациональное использование электроэнергии и ее сохранение непосредственно связаны с повышением эффективности производства. Можно выделить следующие общие тенденции, имеющие устойчивый характер [1]:

1. Постоянно расширяющееся применение регулируемых электроприводов в промышленном оборудовании, транспорте, авиакосмической технике, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отрасли с целью достижения новых качественных результатов в технологии.

2. Замена нерегулируемых электроприводов регулируемыми в энергоемком нефтяном оборудовании, таком как насосы, компрессоры,

вентиляторы и др., с целью энергосбережения.

С начала 80-х годов прошлого века наблюдается рост применения регулируемых электроприводов переменного тока (10-20 % в год). Экономия энергии при установке регулируемого электропривода взамен нерегулируемого составляет: для насосов – 25 %, для компрессоров – 40-50 %, для воздуходувок и вентиляторов – 30 %, для центрифуг – 50 % [3]. При замене в таких механизмах нерегулируемых электроприводов регулируемы капиталовложения окупаются за 6-24 месяца.

Современная приводная техника ориентирована преимущественно на один принцип управления угловой скоростью вращения асинхронного электродвигателя – частотное регулирование в различных модификациях:

- частотно-регулируемый асинхронный электропривод на основе тиристорного преобразователя частоты на запираемых тиристорах с автономным инвертором напряжения (или тока);
- частотно-регулируемый асинхронный электропривод на основе тиристорных преобразователей частот с естественной коммутацией;
- вентильный синхронный привод с электромагнитным возбуждением;
- синхронные и асинхронные электроприводы на базе непосредственного преобразования частоты (НПЧ).

Достаточно сложной проблемой в рамках разработки и производства современных управляемых электроприводов является выпуск продукции в соответствии с нормами стандартов ISO 9000, особенно в области элементной базы (силовая электроника), например запираемых тиристоров на напряжение выше 2500 В и ток более 1200 А, силовых МОП-приборов. Следует отметить невысокую конкурентоспособность на мировом рынке серийно производимых в нашей стране регулируемых электроприводов и

их компонентов. Стоимость отечественных приводов приближается к мировому уровню, а их потребительские свойства уступают зарубежным аналогам. Причины такого положения связаны с тем, что новые разработки в этой области определяются в основном опытом инофирм, уже использующих те или иные апробированные технические решения и технологии. Это определяет изначально заложенный элемент отставания создаваемых отечественных образцов от их зарубежных аналогов.

Для того чтобы определить направление развития разработки и промышленного выпуска конкурентоспособных типов управляемых электроприводов, необходимо обратиться к основным этапам развития методов управления приводами.

Методы управления электроприводами

Электрический привод был создан в XIX веке и прошел большой путь от первого электропривода катера, созданного в 1838 г. академиком Б.С. Якоби, до современного автоматизированного электропривода, приводящего в движение бесчисленное множество рабочих машин и механизмов в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, в бытовой технике и автоматически управляющего технологическими процессами. В течение полувека развивался электропривод постоянного тока, обладающий хорошей управляемостью, но невысокой надежностью, связанной с наличием коллектора. Поворотным моментом в развитии электропривода стал созданный в 1889 г. М.О. Доливо-Добровольским синхронный трехфазный электродвигатель переменного тока. Он обладал высокими эксплуатационными свойствами, простотой конструкции и надежностью. В настоящее время более 60 % всех используемых в мире электроприводов создано на базе асинхронного электродвигателя. Однако он пере-

стал удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к электроприводам автоматизированных технологических установок в части управления угловой скоростью вращения. Попытки решить этот вопрос привели к появлению в 1943 г. частотного управления асинхронным электродвигателем – разработки московских ученых под руководством чл.-корр. АН СССР Д.В. Завалишина. Это направление получило в дальнейшем широкое распространение и, по сути, в настоящее время является единственным применяемым на практике способом управления асинхронным двигателем.

Таким образом, на сегодняшний день методы управления всеми видами электроприводов базируются на одном принципе – изменении количества подводимой к двигателю энергии. Для различных типов электродвигателей этот принцип реализуется по-разному. Электродвигатели постоянного тока управляются изменением тока в обмотке возбуждения (реостатное регулирование), изменением напряжения на якоре, коммутацией обмоток статора (параллельное или последовательное включение секций обмотки статора). Асинхронные двигатели переменного тока управляются изменением частоты синусоидального тока (в небольшом диапазоне) либо частотно-импульсным (ЧИМ) или широтно-импульсным (ШИМ) модулированием импульсного тока. Попытки управлять асинхронными двигателями путем изменения тока в обмотке статора показали неэффективность этого способа из-за снижения коэффициента мощности и к.п.д. двигателя. Переключение пар полюсов дает лишь ступенчатое изменение скорости вращения в небольшом диапазоне.

Основным недостатком управления путем изменения количества подводимой энергии является снижение эффективности использования двигателя на пониженных скоростях. Электродвигатель как прибор для преобразования электри-

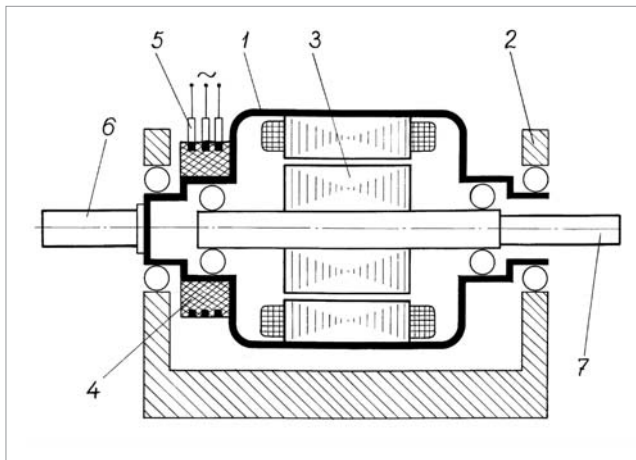


Рис. 1. Схема биротативного двигателя

ческой энергии в механическую использует только часть своих возможностей, загрузка двигателя при таком режиме работы снижается до 25-40 %, что не лучшим образом влияет на эффективность использования электроэнергии.

В соответствии с нормативной документацией [4] «электропривод – электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими управляющими и информационными системами, предназначенными для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса».

Это определение указывает на то, что привод состоит из трех основных частей: двигателя, передаточного механизма и системы управления. В современных автоматизированных приводах вся тяжесть регулирования скорости вращения ложится на двигатель. Передаточный механизм играет вспомогательную роль, он может или изменять момент привода с постоянным передаточным числом (редуктор), или ступенчато регулировать скорость вращения выходного вала (коробка передач).

Возникает противоречие между потребностями современных технологических систем в управляемом электроприводе, способном изменять частоту вращения в широком диапазоне при обеспечении полной загрузки на всех скоростях, и невозможностью удовлетворить эту потребность. Попытки создать двигатель, обладающий возможностью изменения скорости вращения при сохранении постоянной мощности, показал ненадежность выбранного пути, поскольку одновременное изменение частоты тока и величины напряжения имеет весьма небольшой диапазон, ограниченный физическим пределом увеличения напряжения из-за изоляционных свойств обмотки (уменьшая частоту и

одновременно увеличивая напряжение, можно достичь диапазона регулирования, не превышающего 3-5, в то время как требуемый диапазон регулирования – не меньше 10000).

Биротативный привод

Разрешить указанное противоречие может привод принципиально нового типа – привод двойного вращения (биротативный) [5]. Поставленная задача заключалась в разработке принципа управления приводом в максимально широком диапазоне скоростей при постоянной скорости вращения асинхронного электродвигателя. В основу такого привода положен принцип инвариантности относительной угловой скорости ротора и статора при изменении скорости выходного вала в широком диапазоне.

Асинхронный двигатель устанавливается таким образом, чтобы обеспечить возможность вращения как ротора, так и статора (рис. 1).

Двигатель содержит статор 1, установленный на подшипниках на раме 2. Внутри статора 1 на подшипниках установлен ротор 3. На статоре 1 закреплен коллектор 4, на контактные кольца которого через скользящие щетки 5 подается электропитание. Выходной вал 6, соединенный со статором 1, и вал 7 ротора 3 могут быть соединены с нагрузкой.

Такой двигатель имеет свойства, отличающие его от традиционных конструкций двигателей (с неподвижным статором).

1. Двигатель обладает свойством алгебраического сложения угловых скоростей его вращающихся частей – ротора и статора:

$$\omega_{ст} + \omega_p = \omega_{ном}, \quad (1)$$

где $\omega_{ст}$ – угловая скорость статора; ω_p – угловая скорость ротора; $\omega_{ном}$ – номинальная скорость двигателя (относительная скорость ротора и статора). За положительные принимаются направления вращения ротора и статора в противоположные стороны. Из выражения (1) следует, что равенство сохраняется, если одна из вращающихся частей (ротор или статор) изменит направление вращения, т.е. обе части двигателя будут вращаться в одном направлении с угловыми скоростями, отличающимися по величине на $\omega_{ном}$. Это свойство биротативного двигателя позволяет регулировать скорость выходного вала в очень широких пределах (от 0 до скоростей, в несколько раз превышающих номинальную). При этом во всем диапазоне регулирования сохраняется равенство (1).

2. В свободном состоянии, когда ни ротор, ни статор не соединены с нагрузкой (силы трения в подшипниках и на контактных кольцах коллектора не учитываются как незначительные), угловые скорости вращения ротора и статора определяются их моментами инерции при сохранении равенства (1).

3. На конструктивных элементах привода, внешних по отношению к биротативному двигателю (напри-

мер на раме 2, рис. 1), отсутствует реактивный вращающий момент. Реактивный момент, создаваемый каждой из вращающихся частей (ротор создает реактивный момент на статоре, а статор – на роторе), используется для создания необходимого момента на выходном валу при заданных угловых скоростях.

4. При равенстве маховых моментов ротора и статора, вращающихся в противоположные стороны, кориолисовы силы, действующие на каждую из вращающихся частей, взаимно уравновешиваются. Это свойство может оказать существенное влияние на точность работы гироскопических систем путем уменьшения области прецессий и тем самым повысить устойчивость гироскопа.

5. Подбором вида и характеристик системы синхронизации в биротативном приводе может быть обеспечена необходимая нагрузочная механическая характеристика независимо от типа используемого двигателя. Это обеспечивается тем, что на двигателе поддерживается номинальное значение его мощности при всех значениях угловых скоростей выходного вала.

Указанные свойства приводов биротативного типа позволяют решать достаточно сложные технические задачи более простыми методами по сравнению с применяемыми в традиционных приводах, например обеспечить широкий диапазон изменения скорости без применения дорогостоящих систем силового электронного управления, сохранив при этом неизменный уровень мощности во всем диапазоне регулирования.

Для управления биротативным приводом разработан ряд методов, позволяющих обеспечить приводу требуемую нагрузочную характеристику. Эти методы можно объединить в три группы:

1) метод нагружения ротора при соединении статора с нагрузкой (управление торможением);

2) метод соединения ротора и статора системой синхронизации

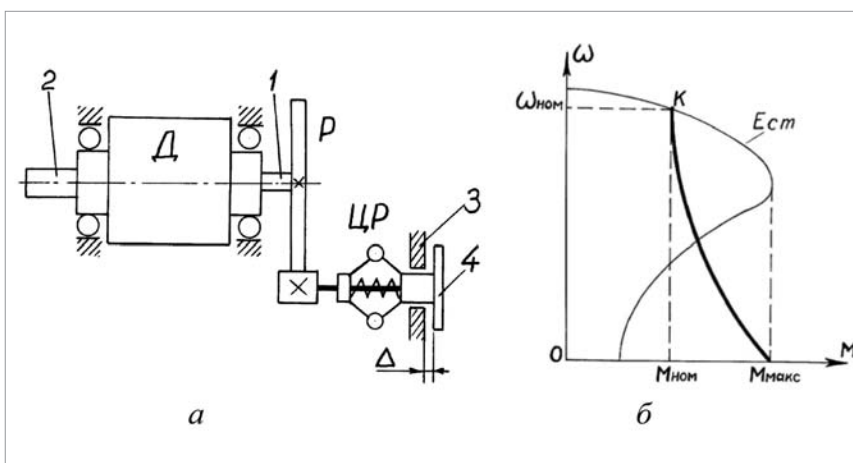


Рис. 2. Регулирование скорости биротативного двигателя торможением ротора

(перераспределение угловых скоростей между ротором и статором с общей нагрузкой);

3) биротативный каскад (перераспределение магнитного поля статора между двумя роторами).

Схема тормозного регулирования механической характеристики биротативного двигателя показана на рис. 2. На рис. 2, б представлены механическая естественная характеристика асинхронного двигателя и полученная путем нагружения ротора тормозным устройством характеристика привода.

При включении электропитания ротор двигателя Д, находящийся в ненагруженном состоянии, начинает вращаться и через вал 1 и редуктор Р вращение передается на центробежный регулятор ЦР. При достижении ротором двигателя расчетной скорости центробежный регулятор ЦР прижимает тормозной диск 4 к поверхности 3, создавая тем самым необходимый тормозной момент при расчетной скорости вращения ротора. Изменением первоначальной величины расстояния Δ между тормозным диском 4 и поверхностью 3 можно в достаточно широких пределах регулировать скорость на выходном валу 2 двигателя Д. При этих изменениях скорости нагрузочный момент может оставаться неизменным и равным M_H (точка на естественной характеристике двигателя Д,

рис. 2, б). Рассматривая механическую характеристику привода (см. рис. 2, б), нетрудно видеть, что пусковой момент привода превышает номинальный момент двигателя Д. Это стало возможным вследствие того, что ротор двигателя разгоняется до рабочей скорости практически без нагрузки, а после достижения критической скорости естественной характеристики перегрузочная способность двигателя позволяет кратковременно вдвое увеличить момент на выходном валу 2.

Так как максимальный момент привода необходим лишь при пуске инерционной рабочей машины, а остальное время двигатель работает в недогруженном режиме, упомянутые свойства биротативного привода позволяют снизить установленную номинальную мощность двигателя на 40÷60 % и получить оптимальную загрузку двигателя в течение всего рабочего времени.

Регулирование скорости с использованием вариатора

Кинематическая схема и механические характеристики привода представлены на рис. 3.

Биротативный двигатель Д через редукторы P_1 и P_2 соединяется с фрикционным вариатором, содержащим диски 1 и 2 и замыкающий ролик 3 (рис. 3, а). Перемещая ролик на расстояние L, можно изменить передаточное отношение ва-

риатора и тем самым получить необходимую скорость вращения выходного вала:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\text{в.в.}} &= \omega_p / 2 (i_p + i_a + i_c) \\ \omega_{\text{в.в.}} &= \omega_n - \omega_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\omega_{\text{в.в.}}$ – скорость выходного вала; ω_p – скорость ротора; ω_n – номинальная скорость двигателя; i_p – передаточное отношение редуктора, соединяющего ротор с вариатором; i_a – передаточное отношение вариатора; i_c – передаточное отношение редуктора, соединяющего вариатор со статором.

Из механической характеристики привода (рис. 3, а) видно, что вращающий момент на выходном валу значительно превышает момент двигателя, причем его величина обратно пропорциональна скорости вращения выходного вала, т.е. получен привод с постоянной мощностью на выходном валу.

Каскадное регулирование биротативного привода позволяет полезно реализовать энергию скольжения при регулировании скорости в отличие от ранее рассмотренных схем, где она рассеивалась в тормозных устройствах (в разомкнутых приводах) или требовала применения механической передачи между ротором и статором (в замкнутых схемах).

На рис. 4 представлена схема компаундного асинхронного каскада и его механическая характеристика.

Возвратить энергию скольжения на вал главного (биротативного) двигателя можно только с помощью дополнительного двигателя, вращающего генераторный ротор в направлении вращения магнитного поля статора со скоростью, равной синхронной скорости магнитного поля. Второй ротор неподвижен. При осевом перемещении блока роторов магнитное поле статора, начиная взаимодействовать с неподвижным ротором, приводит к возникновению вращающего момента на статоре.

Результирующий момент каскада

$$M_{\text{каскад}} = M_{\text{БД}} + M_{\text{ДД}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{БД}}$ – момент биротативного двигателя; $M_{\text{ДД}}$ – момент дополнительного двигателя.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется формулой

$$M = C_m \Phi I_2 \cos \varphi_2, \quad (4)$$

где $C_m = \rho m_2 k_{\text{об2}} \sqrt{2}$ – постоянная; φ_2 – угол сдвига между током статора и э.д.с.; I_2 – намагничивающий ток статора.

Магнитный поток

$$\Phi = a_i \tau l_i B_\delta, \quad (5)$$

где l_i – продольная расчетная (активная) длина воздушного зазора между ротором и статором; B_δ – индукция в воздушном зазоре (при номинальном режиме она изменяется от 0,6 до 1,1 Тл, причем большие значения соответствуют машинам большей мощности); a_i – коэффициент полюсного перекрытия (обычно $a_i = 0,6 \div 0,8$, причем меньшие значения соответствуют

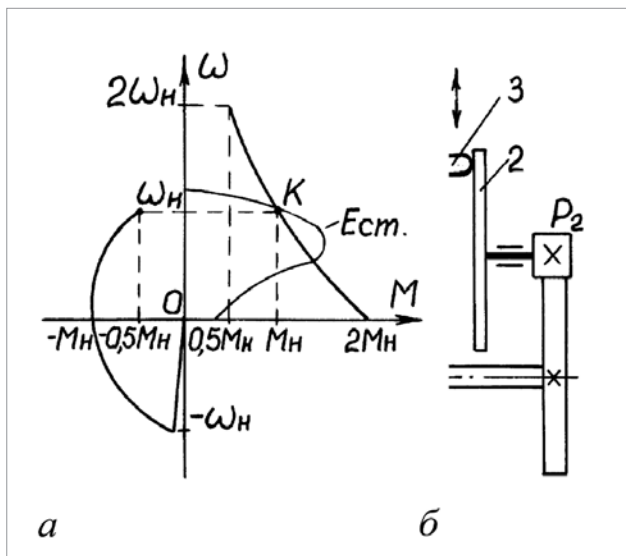


Рис. 3. Биротативный электропривод с вариатором

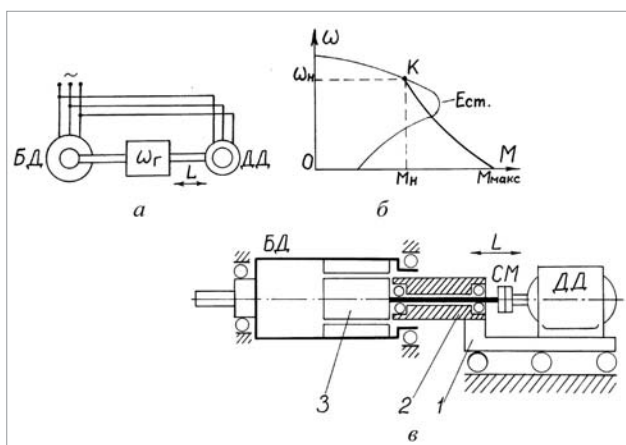


Рис. 4. Структура (а), характеристика (б) и схема (в) асинхронного компаундного каскада

машинам меньшей мощности); τ – полюсное деление обмотки; $\tau = z / (2p)$, где $2p$ – число полюсов; z – общее число пазов ротора и статора; δ – величина воздушного зазора между ротором и статором.

Подставив (5) в (4), получим

$$M = C_m a_i \tau l_i B_\delta I_2 \cos \varphi. \quad (6)$$

Упростив (6), запишем:

$$M = \pm \beta I_i, \quad (7)$$

где $\beta = C_m a_i \tau B_\delta I_2 \cos \varphi$.

Формула (7) позволяет произвести анализ важнейших свойств асинхронного компаундного каскада, а именно установить связь между длиной активной зоны взаимодействия поля статора и ротора и момента. Из (5) нетрудно видеть, что электромагнитный момент зависит от величины l_i . Здесь знак «+» относится к двигательному режиму, знак «-» – к генераторному.

Из конструктивных особенностей (см. рис. 2, в) каскада видно, что активная длина магнитного зазора, равная длине магнитного сердечника статора $l_{\text{см}}$,

определяет зону взаимодействия между статором и двумя роторами, один из которых взаимодействует со статором в режиме генератора (при скольжении S от 0 до -1), второй – в режиме двигателя (при S от 0 до +1).

При таком взаимодействии момент на статоре двигателя БД является суммой взаимодействия двух роторов и статора:

$$M_{ст} = M_{\partial в} - (-M_{ген}) = M_{\partial в} + M_{ген} = \beta(I_{\partial в} + I_{ген}). \quad (8)$$

Следовательно, каскад допускает возрастание момента нагрузки на его валу обратно пропорционально скорости. При этом очевидно, что мощность, развиваемая каскадом, остается постоянной, поэтому электромеханические компаундные асинхронные каскады относятся к приводам **постоянной мощности**. Сравнительные характеристики приводов различных типов приведены в **таблице**.

Выводы

1. Несмотря на значительные успехи в совершенствовании процессов электронного управления частотно-управляемых приводов на основе асинхронных двигателей, современные требования энерго- и ресурсосбережения не могут быть удовлетворены путем

дальнейшего развития этого направления. Как система управления частотное регулирование удовлетворяет довольно узкий диапазон требований, предъявляемых к современным электроприводам, а именно позволяет управлять скоростью вращения. Это направление исчерпало ресурс развития, совершенствуются только средства силового управления.

2. Для оснащения современных технологических систем экономичным электроприводом, управляемым по скорости в широком диапазоне с постоянной мощностью на выходном валу, новый принцип управления (биротативный) можно считать перспективным в связи с экономичностью, простотой конструкции, невысокой стоимостью, обусловленной отсутствием силовой электроники, и надежностью.

3. Биротативный привод обладает универсальностью, позволяющей использовать его в различных технологических системах (транспорт, металлообрабатывающее производство, нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность и т.п.). Привод этого типа легко встраивается в автоматизированные системы управления различного уровня, включая программное управление с помощью ЭВМ.

Сравнительная характеристика электроприводов

№ п/п	Тип привода, основные параметры	Диапазон регулирования скорости $\omega_{max}/\omega_{min}$	Вид регулирования	КПД / $\cos \varphi$	Масса привода с пускорегулирующей аппаратурой (при P=10 кВт)	Коэффициент скольжения, %	Относительная стоимость (P=10 кВт)
1	Асинхронный электродвигатель, не регулируемый по скорости	–	–	0,65/0,38	120	5+10	1,0
2	Асинхронный многоскоростной со ступенчатым переключением скорости	2	С пост. моментом на выходном валу	0,68/0,42	135	2+4	1,8
3	Частотно-регулируемый с ЧИМ и ШИМ модуляцией	10000	С пост. моментом на выходном валу	0,47/–	320	–	27,0
4	Биротативный, разомкнутый, с регулированием торможением	30000	С пост. моментом на выходном валу	0,81/0,83	160	2	3,5
5	Биротативный, замкнутый, с регулированием вариатором	30000	С пост. мощностью на выходном валу	0,88/0,90	175	2	5,2

Литература

1. Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Тенденция развития электроприводов, систем автоматизации промышленных установок и технологических комплексов // Электротехника. – 1996. – № 7. – С. 4-8.
 2. Состояние и перспективы развития регулируемых приводов / М.Г. Юньков, Д.Б. Изосимов, В.В. Москаленко и др. // Электротехника. – 1994. – № 7. – С. 2-6.

3. Дацковский Л.Х., Бирюков А.В., Вайтруб О.Ш. и др. Современный электропривод: состояние, проблемы, тенденции // Электротехника. – 1994. – № 7. – С. 6-11.
 4. ГОСТ 50369-92. Электроприводы. Термины и определения.
 5. Шаньгин Е.С. Теория биротативного электропривода. – Уфа: УТИС, 1998. – 284 с.