

УДК 692.66:62-83

Бойко А.А., к.т.н.

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЛИФТОВЫМИ ЛЕБЕДКАМИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

Традиционный электропривод пассажирского лифта с двухскоростным асинхронным двигателем и червячным глобоидным редуктором представляет собой пример неэффективного преобразования как электрической, так и механической энергии [1,2]. Одним из путей повешения эффективности традиционной лифтовой лебедки с двухскоростным асинхронным двигателем является замена релейно-контакторного управления тиристорными преобразователями напряжения (ТПН) [3]. Это обеспечивает не только улучшение динамических показателей, за счет приближения фактической диаграммы движения к требуемой оптимальной, но также, в ряде режимов, средствами ТПН, позволяет реализовывать возможность экономии энергии, потребляемой двигателем лебедки. Под возможностью экономии потребляемой энергии понимается функция продолжительной работы лифтовой электромеханической системы (ЭМС) с асинхронным двигателем (АД) при питании от тиристорного преобразователя напряжения на искусственных характеристиках в области номинального скольжения с потерями в двигателе меньшими, чем на рабочем участке естественной характеристики. Управляющим воздействием является выходное напряжение преобразователя, а работа АД происходит на оптимальной регулировочной механической характеристике [4]. Управление напряжением АД, при этом, осуществляется вниз от номинального. Оптимальная характеристика рассчитывается исходя из решения задачи по экстремальному управлению согласно критерию минимума потерь мощности.

При аналитическом описании процессов преобразования энергии учитывается ряд допущений: линейность магнитной цепи АД; линейность рабочего участка искусственной механической характеристики; учет первых гармонических составляющих токов и напряжений статора. Это позволяет вывести аналитическую зависимость закона управления, соответствующую оптимальной механической характеристике ЭМС. Учитываются четыре основные составляющие потерь АД []. Известно, что потери от нагрузки, существующие в АД при номинальных условиях работы, описываются двумя составляющими [5]

$$\Delta P_{нг н} = \Delta P_{1мн} + \Delta P_{2мн}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{1мн}$  – потери в меди статора от тока нагрузки при номинальном моменте нагрузки, Вт;  $\Delta P_{2мн}$  – потери в меди ротора от тока нагрузки при номинальном моменте нагрузки, Вт.

Суммарные потери мощности в двигателе на намагничивание при номинальном режиме работы

$$\Delta P_{0н} = \Delta P_{1м0н} + \Delta P_{сн}, \tag{2}$$

где  $\Delta P_{1м0н}$  – потери в меди статора от тока намагничивания, Вт;  $\Delta P_{сн}$  – потери в стали АД, Вт.

При регулировании координат ЭМС изменением напряжения преобразователя, потери от нагрузки и на намагничивание определяются [ ]

$$\begin{aligned} \Delta P_{нг} &= \frac{M_c}{M_n} \cdot \frac{s}{s_n} \cdot \Delta P_{нг}, \\ \Delta P_0 &= \frac{M_c}{M_e} \cdot \Delta P_{0н}, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $M_e$  – момент АД на естественной характеристике при скольжении, равном скольжению на искусственной характеристике при пониженном напряжении  $U_1 < U_{1н}$ .

При учете принятых допущений справедливо

$$\frac{M_c}{s} = \frac{M_n}{s_n}$$

соотношение  $\frac{M_c}{s} = \frac{M_n}{s_n}$  которое дает возможность выразить значение момента  $M_c$  через значение скольжения. Тогда потери определяются [5]

$$\Delta P = \Delta P_{нг} + \Delta P_0 = \frac{\Delta P_{нгн}}{M_n \cdot s_n} \cdot M_c \cdot s + \frac{\Delta P_{0н} \cdot s_n}{M_n} \cdot M_c \cdot \frac{1}{s}. \tag{4}$$

Очевидно, что существует некоторое скольжение  $s_{опт}$ , при котором суммарные потери в двигателе минимальны. Решение задачи по нахождению этого оптимального скольжения можно выполнить путем исследования на экстремум функции (4) и определения значения скольжения, при котором величина потерь мощности принимает свое экстремальное (минимальное) значение. Для аналитического решения необходимо частную производную по скольжению выражения  $\Delta P$  приравнять к нулю. Корни этого уравнения и характеризуют экстремумы исследуемой функции. Согласно условию минимума потерь мощности необходимо чтобы АД в первом (третьем) квадранте работал на искусственной регулировочной характеристики с оптимальным скольжением

$$s_{опт} = s_n \sqrt{\frac{\Delta P_{0н}}{\Delta P_{нгн}}}. \tag{5}$$

Условие минимума потерь мощности будет выполняться при работе в области рабочих моментов от нуля до некоторого граничного момента  $M_{гр}$ .

$$M_{гр} = M_n \sqrt{\frac{\Delta P_{0н}}{\Delta P_{нг н}}}. \quad (6)$$

Значение граничного момента соответствует пересечению регулировочной механической характеристики с естественной и не зависит от текущих моментов нагрузки и скорости. Представления о механических характеристиках, на которых работает АД, дает рис. 1 [6]

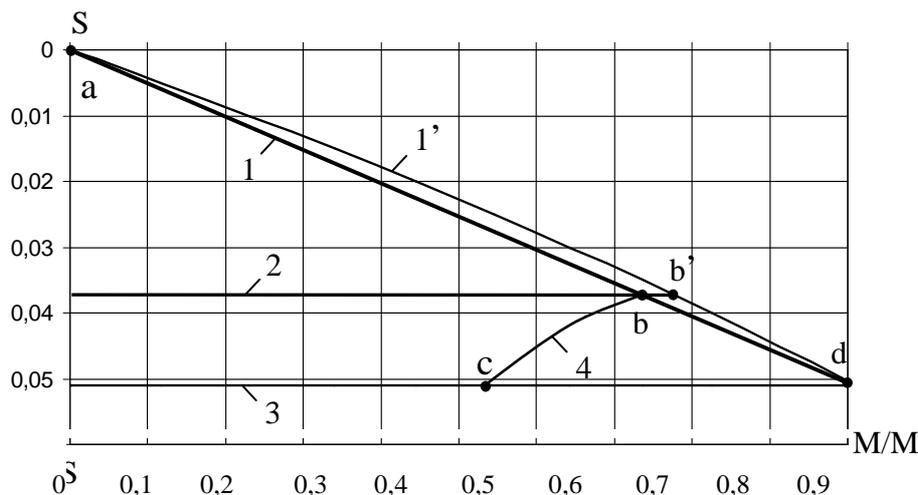


Рис.1. Механические характеристики асинхронного двигателя

Кривая 1 – это линейризованный участок естественной механической характеристики. Здесь же для сравнения приведен участок реальной естественной механической характеристики АД (характеристика 1'), что позволяет оценить влияние линейризации. Прямая 2 – регулировочная характеристика, соответствующая оптимальному по критерию минимума потерь закону управления. Характеристика 3 соответствует регулированию АД с номинальным скольжением. Все рабочие точки, лежащие на характеристике 2 соответствуют оптимальному режиму. С увеличением момента эта характеристика пересекается с естественной в точке b (b'), соответствующей граничному моменту  $M_{гр}$ . При дальнейшем увеличении момента нагрузки режим перестает быть оптимальным. Положение этой точки и ширина рабочего участка оптимальной регулировочной характеристики зависят от соотношения между потерями на намагничивание и от нагрузки в номинальном режиме. Как следует из (6), граничный момент, для каждого из асинхронных

двигателей определяется только собственными параметрами АД. В обоих случаях при увеличении или уменьшении скольжения, относительно характеристики 2, потери в двигателе увеличиваются. При уменьшении скольжения, увеличение потерь ограничивается естественной характеристикой. В нижней части, при увеличении скольжения, можно провести условную границу, где потери будут равны потерям на естественной характеристике. Эта граница соответствует линии 4 и названа «линией равных потерь» [ ]. Область, ограниченная участком а -b естественной характеристики, осью скольжений и линией равных потерь 4, является областью, в которой возможно формирование режимов с потерями в АД меньшими, чем на естественной характеристике. Эта область и используется при управлении оптимальном по критерию минимума потерь. Другие характеристики захватывают меньшую ширину этой области, а характеристика 3, кроме того, имеет участок с - d, находящийся вне указанной области. На этом участке двигатель работает не только не в оптимальном режиме, а с потерями мощности, превышающими потери на естественной характеристике [4,5].

Техническая реализация минимизации энергопотребления в установившемся режиме возможна только в замкнутых системах. Причем использовать обратную связь по скольжению (скорости) нецелесообразно, так как работа системы происходит в области близкой к номинальному скольжению. Это предъявляет жесткие требования к точности измеряемой величины и не всегда оправданно. Сигналами обратной связи, в данном случае, является угол нагрузки φ или технически угол запаздывания окончания токов в одной из фаз статора АД - δ. По аналогии с оптимальным скольжением для каждого АД существует δ<sub>опт</sub>, при работе, с которым потери мощности будут минимальными. Он определяется

$$\delta_{\text{опт}} = \arctg \frac{Q_{1н}}{P_1},$$

$$P_1 = \omega_0 M_{гр} + \Delta P_{м1н} \frac{\Delta P_{0н}}{\Delta P_{н гн}} + \Delta P_{0н}, \tag{7}$$

где Q<sub>1н</sub>, - номинальная реактивная мощность АД; P<sub>1</sub> - активная мощность, потребляемая АД из сети, на естественной характеристике при нагрузке M<sub>с</sub>=M<sub>гр</sub>; ω<sub>0</sub> – скорость идеального холостого хода АД; ΔP<sub>м1н</sub> – потери в меди статора от тока нагрузки при номинальной нагрузке.

Для настройки регуляторов системы управления возможно воспользоваться упрощенной расчетной структурной схемой, эквивалентной контуру регулирования угла δ АД приведенной в [4,6].

Элементы структурной схемы описываются передаточными функциями:

$H_{oc}(p) = K_{oc}$  - передаточная функция канала обратной связи,  
 $H_{рд}(p)$  - передаточная функция регулятора угла  $\delta$ ,  
 $H_{тп}(p) = \frac{K_{тп}}{T_{п}p + 1}$  - передаточная функция ТПН с системой импульсно-фазового управления,

где  $K_{тп}$  - коэффициент передачи ТПН.

Коэффициент передачи ТПН определяется через отношение максимальных значений величин на выходе и входе устройства

$$K_{тп} = \frac{U_{1 \max}}{U_{у \max}}, \quad (8)$$

где  $U_{1 \max}$  - максимальное напряжение первой гармоники выходного напряжения преобразователя, В.

Упрощенная эквивалентная передаточная функция электромагнитной части АД

$$H_{ад1}(p) = \frac{K_{м}}{T_{ад}p + 1} \quad (9)$$

где  $K_{м}$  - коэффициент передачи по моменту АД;  $T_{ад}$  - эквивалентная электромагнитная постоянная времени АД в номинальном режиме, с.

Постоянная времени определяется на основании выражения

$$T_{ад} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (10)$$

где  $\omega_0$  - синхронная скорость АД, 1/с.

Для случая работы АД на естественной механической характеристике с номинальным моментом нагрузки при линеаризации «в большом», коэффициент передачи по моменту определяется

$$K_{м} = \frac{M_n}{U_{1 \max}}, \quad (11)$$

где  $U_{1 \max}$  - максимальное значение напряжения первой гармоники ТПН, В.

Передаточная функция электромеханической части асинхронного двигателя, с учетом перехода к углу  $\delta$ , имеет вид [8]

$$H_{ад2} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot K_{\delta}, \quad (12)$$

где  $J_{\Sigma}$  - суммарный момент инерции АД и подъемного механизма, кг·м<sup>2</sup>;  $K_{\delta}$  - коэффициент передачи по углу  $\delta$ , определяется из аналитических условий соответствия, приведенных в табл. 1.

Таблица 1 - Условия определения коэффициента передачи  $K_{\delta}$

$\omega = \omega_0$	$\Delta\omega = 0$	$\delta \approx 90$ эл. град.
$\omega = \omega_n$	$\Delta\omega = \Delta\omega_n$	$\delta = \varphi_n$

Выражение для расчета угла  $\delta$  при линеаризации рабочего участка механической характеристики ЭМС

$$\delta = 90 - K_{\delta} \cdot \Delta\omega, \tag{13}$$

откуда

$$K_{\delta} = \frac{90 - \delta_n}{\Delta\omega_n}. \tag{14}$$

Расчетную структурную схему возможно упростить, определив эквивалентную передаточную функцию, описывающую ТПН и электрическую часть АД

$$H_{\delta 1}(p) = H_{\text{тп}}(p) \cdot H_{\text{ад}}(p), \tag{15}$$

$$H_{\delta 1}(p) = \frac{K_{\text{тп}}}{T_{\text{п}}p + 1} \cdot \frac{K_{\text{м}}}{T_{\text{ад}}p + 1} = \frac{K_{\text{тп}} \cdot K_{\text{м}}}{T_{\text{п}}T_{\text{ад}}p^2 + T_{\text{п}}p + T_{\text{ад}}p + 1}, \tag{16}$$

Так как  $T_{\text{п}} \cdot T_{\text{ад}}$  – произведение малых постоянных времени, допускается, что  $T_{\text{п}} \cdot T_{\text{ад}} p^2 \approx 0$ , тогда эквивалентная передаточная функция имеет вид

$$H_{\delta 1}(p) = \frac{K_{\text{тп}} \cdot K_{\text{м}}}{T_{\delta} p + 1}, \tag{17}$$

где  $T_{\delta} = T_{\text{п}} + T_{\text{ад}}$  - эквивалентная постоянная времени, с.

Каждый из регуляторов углов  $\delta$  представляет собой ПИ-регулятор, который описывается передаточной функцией

$$H_{p\delta}(p) = \frac{1}{K_{\text{м}} \cdot K_{\text{тп}}} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot T_{\delta} \cdot K_{\delta}} + \frac{1}{K_{\text{м}} \cdot K_{\text{тп}}} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{4 \cdot T_{\delta} p \cdot K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot T_{\delta} \cdot K_{\delta}} = K_{\text{п}} + \frac{K_{\text{и}}}{p}, \tag{18}$$

где  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{и}}$  – коэффициенты при пропорциональной и интегральной составляющих, соответственно.

Исследование показателей работы лифтовой ЭМС с ТПН и двухскоростным двигателем АСС 92-6/24 в режиме минимизации потерь мощности проводилось методом математического моделирования [9, 10]. Разработанная программа, с учетом предварительного расчета условий уменьшения потерь и элементов параметров системы управления, позволила качественно и

количественно оценить показатели работы ЭМС на естественной характеристике, и после оптимизации во всем диапазоне рабочих моментов нагрузки определяемых подъемным механизмом.

Работа в режиме минимизации потерь ЭМС начинается по окончанию переходного процесса пуска двигателя при движении кабины на подъем (спуск), при работе ЭМС в установившемся режиме. Логика действия состоит в том, что при уменьшении нагрузки на валу АД (увеличения  $\delta$ ) действие обратной связи приводит к уменьшению выходного напряжения ТПН. Вследствие этого удается поддерживать угол  $\delta$  равным  $\delta_{\text{опт}}$ . В области моментов  $M_{\text{гр}} < M < M_{\text{н}}$  угол  $\delta < \delta_{\text{опт}}$ , что обуславливает отсутствие действия каналов обратной связи и работу АД на естественной механической характеристике.

В табл. 2 приведены характерные расчетные значения граничного момента нагрузки  $M_{\text{гр}}$  и оптимальных углов  $\delta$  для применяемого двигателя. В табл. 3 и на рис. 2 приведены численные значения относительных потерь, которые позволяет качественно и количественно оценить области возможной экономии электрической энергии. Результаты показывают, что предложенный режим обеспечивает значительное уменьшение электрических потерь в АД в диапазоне рабочих моментов  $0 \leq M \leq M_{\text{гр}}$ . Расчетная методика предполагает, что оптимальные характеристики представляют собой прямые, проходящие через точки  $M_{\text{гр}}$  и начала координат [5]. Однако, учет нелинейностей АД и механизма подъема позволяет наблюдать некоторое искажение формы оптимальных характеристик. Наилучшие показатели по улучшению энергетических показателей наблюдаются в режиме близкому к холостому ходу (уравновешение кабины с грузом и противовеса) и при малых моментах нагрузки (недогрузки кабины). Это выражается в уменьшении суммарных электрических потерь, за счет уменьшения потерь мощности в АД на намагничивание благодаря уменьшению напряжения на статоре.

Таблица 2 - Характерные параметры АД АСС 92-6/24

$P_1$ , кВт	$M_{\text{гр}}/M_{\text{н}}$ , о.е.	$\delta_{\text{опт}}$ , град.
7,1	0,104	42,2

Таблица 3 - Результаты минимизации потерь электрической мощности электродвигателя АСС 92-6/24

$\Delta P/\Delta P_{\text{н}}$					
0		0,2 $M_{\text{н}}$		0,4 $M_{\text{н}}$	
0,583*	0,23**	0,601	0,312	0,635	0,460
0,6 $M_{\text{н}}$		0,8 $M_{\text{н}}$		1,0 $M_{\text{н}}$	
0,706	0,631	0,824	0,778	1,0	0,991

\* относительные потери на естественной характеристике;

\*\* относительные потери на оптимальной характеристике.

Снижение потерь на намагничивание приводит к уменьшению реактивной мощности, потребляемой АД, а, следовательно, к увеличению коэффициента мощности. Наибольший эффект режим минимизации потерь дает в тех случаях, когда энергетические показатели электрических двигателей, в силу их специфики оказываются невысокими. Утверждения о том, что режим минимизации потерь возможен только в области моментов нагрузки  $0 \leq M \leq (0,3 \dots 0,5) M_n$  верны и относятся к АД нормального исполнения, причем с «хорошей» энергетикой [4,5]. Вместе с тем, для некоторых АД значения граничных моментов  $M_{гр}$  находятся в диапазоне  $0,6 \dots 1,5 M_n$ . Это относится, прежде всего, к двигателям с низкими значениями коэффициентов полезного действия и коэффициентов мощности: многополюсным, с повышенным скольжением, пусковым моментом, увеличенным воздушным зазором и т.д. Это подтверждается результатами исследования на примере лифтовой ЭМС с исследуемым двигателем АСС 92-6/24.

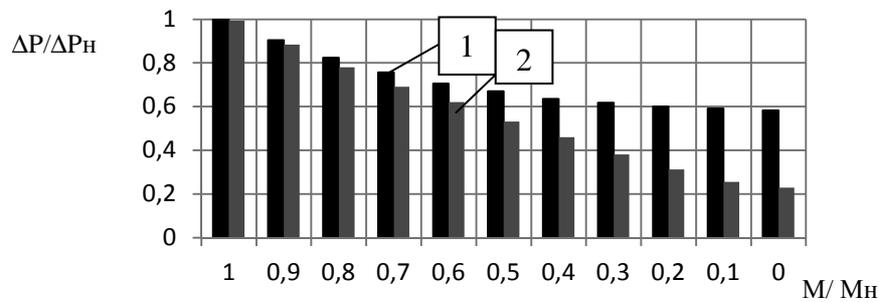


Рис. 3. Гистограммы потерь мощности в АД АСС 92-6/24;  
1 - на естественной механической характеристике;  
2 - на регулировочной характеристике

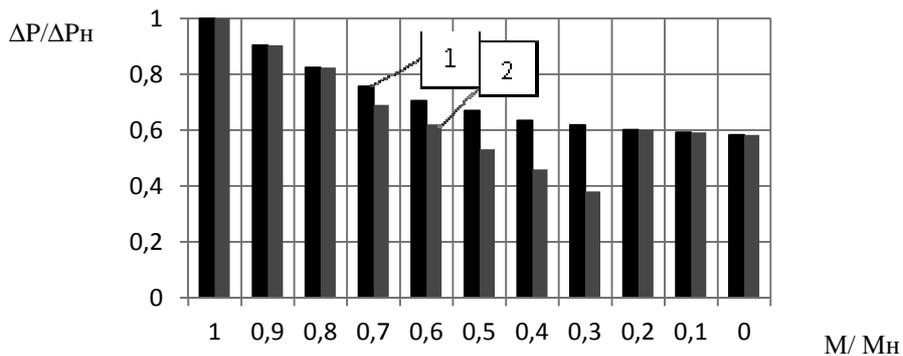


Рис. 4. Гистограммы потерь мощности в АД АСС 92-6/24 с учетом ограничений работы 1 - на естественной механической характеристике; 2 - на регулировочной характеристике

При моментах нагрузки  $M < 0,1M_n$  вступают в силу естественные ограничения преобразователя, что не дает возможность ограничить потери. В диапазоне рабочих моментов  $0,71M_n < M < 0,2M_n$  режим минимизации функционально ограничивается, так как действие обратной связи приводит к критическому уменьшению перегрузочной способности ЭМС, что может привести к аварийному режиму (рис. 4). Увеличение коэффициентов мощности подтверждается графиками зависимостей, приведенными на рис. 4.

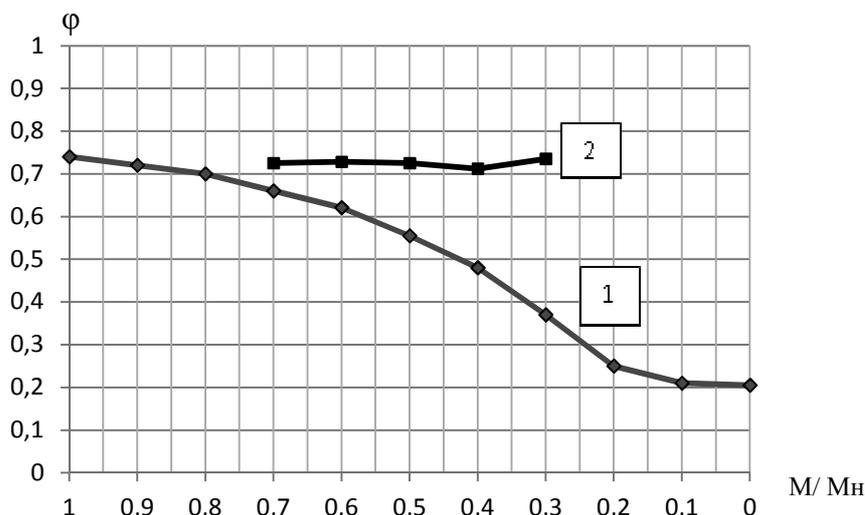


Рис 6. Графики зависимостей коэффициента мощности от нагрузки АД АСС 92-6/24 на: 1 – естественной характеристике; 2 – регулировочной характеристике

### ВЫВОДЫ:

Применение тиристорных преобразователей напряжения в лифтовых электромеханических системах позволяет, в ряде режимов работы, определяемых текущей загрузкой кабины, продолжительную работу асинхронного двигателя лебедки на искусственных характеристиках в области номинального скольжения с потерями меньшими, чем на рабочем участке естественной характеристики. При этом, асинхронный двигатель существенно избавляется от свойственного ему недостатка – уменьшения коэффициента мощности при уменьшении нагрузки, а лифтовая лебедка, в целом, повышает свою энергоэффективность. Наилучшие показатели по улучшению энергетических показателей наблюдаются в режиме близкому к холостому ходу (уравновешение кабины с грузом и противовеса) и при малых моментах нагрузки (недогрузки кабины). На примере исследуемой лифтовой лебедки с асинхронным двухскоростным

двигателем АСС 92-6/24, в диапазоне моментов нагрузки АД  $0,71M_n < M < 0,2 M_n$ , применение ТПН обеспечивает уменьшение потребляемой мощности на 48 – 11% и поддержание коэффициента мощности двигателя близким к номинальному значению - 0,74.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андриющенко О.А., Бойко А.О., Бабийчук О.Б. Анализ энергетической эффективности электроприводов пассажирских лифтов // Вісник НТУ «ХПІ». Випуск 28. “Проблеми АЕП. Теорія і практика”, 2010. – С. 503 – 504.
2. Хельмих Йорг. Энергетический КПД лифтов // Лифтинформ. 2010. № 3. — С.52-56.
3. Лифты. Учебник для вузов / под общей ред. Д. П. Волкова. - М.: изд-во АСВ, 1999. - 480 с.
4. Андриющенко О.А., Бойко А.А. Электропривод ТПН-АД с системой автоматической оптимизации энергетики // Електромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. - 2001. - Вип. 56. - С. 22-25.
5. Андриющенко О.А., Бойко А.А., Бабийчук О.Б. Особенности режимов минимизации потерь в асинхронных двигателях // Електромашинобуд. та електрообладн. - 2004. - Вип. 62. - С. 24-28.
6. Андриющенко О.А., Бойко А.А. Электропривод ТПН-АД с системой автоматической оптимизации энергетики // Електромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. - 2001. - Вип. 56. - С. 22-25.
7. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 768 с.
8. Андриющенко О.А., Липатов Г.С., Семячкин А.Н. Асинхронный электропривод скоростного пассажирского лифта. // Електромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1986. - Вып. 40. - С. 34.
9. Бойко А.О., Бересан А.А. Моделирование системы ТПН-АД // Математическое моделирование. Днепродзержинск: ДГТУ, 2010. – С. 39-42
10. Андриющенко О.А., Бойко А.О., Акчешаш Н.В. Особливості математичного моделювання двохшвидкісного асинхронного електропривода пасажирського ліфту // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2013. – Вип. 2 (41). - С 164 – 168.