

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СРАВНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ СИНХРОННО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. КОНОНЕНКО, А. С. БАТУРИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Различные отрасли промышленности испытывают потребность в синхронных двигателях. Однако применение синхронных двигателей мощностью $0,6 \div 50$ кВт ограничивается тем обстоятельством, что отечественная промышленность синхронные двигатели указанного диапазона мощности практически не выпускает.

Институт энергетики Латвийской академии наук разработал опытную серию СО трехфазных бесконтактных синхронных двигателей (с когтеобразным ротором) мощностью $1,5 \div 7,5$ кВт на базе статорного железа асинхронных двигателей новой единой серии А02 [1]. Эти двигатели, наряду с положительными свойствами ($\cos \varphi = 1,0$), имеют по сравнению с асинхронными короткозамкнутыми двигателями серии А02 существенные недостатки. Основные из них:

1) более высокая стоимость, обусловленная большими габаритами (в тех же габаритах мощность меньше на две ступени шкалы мощности) и сложностью производства (применение стального литья, сложность обработки подшипниковых щитов и когтеобразных полюсов ротора и т. д.);

2) меньший коэффициент полезного действия (при $P_n = 4,0$ кВт в четырехполюсном исполнении $\eta^a = 0,86$; $\eta^c = 0,83$);

3) меньшая надежность, обусловленная более сложной конструкцией (наличие дополнительной обмотки, уложенной в пазы статора, обмотки возбуждения, выпрямителей, пусковой автоматики и т. д.);

4) неудовлетворительные пусковые характеристики, что допускает пуск синхронных двигателей лишь при работе вхолостую или при небольшой нагрузке, так как входной момент даже в двигателях с улучшенными пусковыми характеристиками составляет не более 0,25 от номинального (при 1500 об/мин).

Синхроно-реактивные двигатели (с.р.д.) благодаря отсутствию обмотки возбуждения на роторе, простоты и технологичности конструкции имеют определенные технико-экономические преимущества по сравнению с другими типами синхронных машин малой мощности. Однако в отечественной промышленности до настоящего времени с.р.д. получают применение лишь в маломощных приводах. Последнее объясняется тем, что в технической литературе распространено мнение, что с.р.д. имеют низкие энергетические показатели, а мощность трехфазного с.р.д. составляет примерно около 40% равного ему по габаритам трехфазного асинхронного двигателя. Это привело к тому, что в Совет-

ском Союзе до настоящего времени не разрабатывались новые типы с.р.д.

С 1963 г. в производство внедряются с.р.д. типа РС мощностью $0,65 \div 7,0$ кВт, спроектированные на базе асинхронных двигателей серии А02 [2]. Эти двигатели имеют обычную явнополюсную конструкцию ротора и, как результат, большие габариты и низкие энергетические показатели. Двигатели типа РС в тех же габаритах по сравнению с двигателями серии А02 имеют мощность меньше на три ступени шкалы мощности (приблизительно 40% мощности асинхронного двигателя), а $\cos \varphi_n = 0,30 \div 0,44$, $\eta_n = 0,63 \div 0,73$.

Как показали проводимые в Томском политехническом институте исследования, усовершенствуя конструкцию ротора в тех же габаритах, можно значительно повысить мощность с.р.д. [3]. Усовершенствованные конструкции ротора выполняются аналогично конструкции, предложенной проф. Е. М. Голдовским еще в 1928 году [4]. Для увеличения мощности и энергетических показателей с.р.д. в тех же габаритах необходимо при максимальном значении магнитной проводимости ротора по продольной оси значительно уменьшить магнитную проводимость по поперечной оси. Это осуществляется введением в конструкции ротора дополнительных немагнитных прослоек (зазоров) по пути следования поперечного магнитного потока.

Один из изготовленных и испытанных усовершенствованных с.р.д. типа СРО-41-4 имеет следующие данные: $P_n = 4,0$ кВт; $I_n = 10,3$ а; $U_n = 380$ в; $n_n = 1500$ об/мин; $\eta_n = 0,865$; $\cos \varphi_n = 0,684$; $M_m/M_n = 1,43$. Перегрев обмотки статора в номинальном режиме $52,5^\circ\text{C}$. Вес двигателя 55 кг. Рассматриваемый двигатель спроектирован на базе и в габаритах асинхронного двигателя А02-41-4, номинальная мощность которого 4,0 кВт, перегрев обмотки статора $58,0^\circ\text{C}$.

Таким образом, усовершенствуя конструкцию ротора в габаритах асинхронного двигателя закрытого обдуваемого исполнения, можно выполнить усовершенствованный с.р.д. той же номинальной мощности.

Для того, чтобы сделать выводы о целесообразности применения усовершенствованных с.р.д., необходимо провести технико-экономические сравнения этих двигателей с другими исполнениями синхронных двигателей.

В настоящей работе приводятся результаты технико-экономического анализа усовершенствованного с.р.д. (СРО-41-4) с обычным с.р.д. (РС-52-4) и бесконтактным синхронным двигателем (СО-51-4). Все двигатели имеют номинальную мощность 4,0 кВт и скорость вращения 1500 об/мин.

Определение экономической эффективности рассматриваемых двигателей производилось на основании расчета годовых приведенных затрат [5,6]. При этом учитывались как капитальные вложения, так и ежегодные эксплуатационные расходы.

Определение себестоимости двигателя СРО-41-4 производилось на основании следующих данных. В усовершенствованном с.р.д. СРО-41-4 использованы все материалы и детали, применяемые в двигателе А02-41-4, за исключением сердечника ротора. Технология изготовления ротора усовершенствованного с.р.д. та же, что и асинхронного короткозамкнутого двигателя. Сердечник ротора набирается из штампованных листов электротехнической стали и после запрессовки пазы пусковой обмотки и дополнительные зазоры заливаются алюминием под давлением. Ввиду более сложной конструкции и увеличенных расходов активных материалов себестоимость ротора усовершенствованного с.р.д. оказывается выше себестоимости ротора нормального асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В соответствии с вышеизложенным

себестоимость двигателя СРО-41-4 возросла по сравнению с себестоимостью двигателя А02-41-4. Это увеличение объясняется дополнительными затратами на изготовление сердечника ротора по статьям:

1) материалы — за счет увеличения расхода электротехнической стали на 0,84 руб. и алюминия на 0,29 руб.;

2) заработная плата — за счет увеличения объема механической обработки на 0,03 руб и увеличения трудоемкости штамповки на 0,08 руб.;

3) расходы по спецоснастке возросли в связи с необходимостью изготовления дополнительного штампа на 0,36 руб. С учетом косвенных расходов себестоимость возросла на 2,1 руб.

Учитывая, что с.р.д. РС-52-4 спроектирован на базе и в габаритах асинхронного двигателя А02-52-4, а также то обстоятельство, что технология и конструкция этих двигателей отличаются незначительно, принимаем их себестоимости одинаковыми.

Себестоимость двигателей А02-41-4 и А02-52-4 определялись по [7]. Себестоимость синхронного бесконтактного двигателя СО-51-4 заимствована из [8].

В табл. 1 приведены для сравнения технико-экономические показатели асинхронных (А02), усовершенствованных с.р.д. (СРО), обычных с.р.д. (РС) и синхронных двигателей (СО), имеющих одинаковую мощность.

Таблица 1

№ п. п.	Технико-экономические показатели	А02-41-4	СРО-41-4	РС-52-4	СО-51-4
1	Номинальная мощность (квт)	4,0	4,0	4,0	4,0
2	Скорость вращения (об/мин)	1450	1500	1500	1500
3	К. п. д. (%)	86,0	86,5	69,0	83,0
4	$\cos \varphi_n$	0,85	0,634	0,36	1,0
5	M_m/M_n	2,0	1,4	2,0	1,4
6	Вес, кг	56	55	95	90
7	Себестоимость [руб./шт.] . .	25,1	27,2	50,0	60,9

Экономический анализ сравниваемых двигателей производился по формуле приведенных затрат

$$З = C + E_n \cdot K, \quad (1)$$

где $З$ — годовые приведенные затраты, руб./год;

C — годовые эксплуатационные расходы;

E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности;

K — единовременные капитальные вложения.

Экономически выгодным является вариант, имеющий меньшее значение приведенных затрат.

При сравнении вариантов, имеющих различные значения $\cos \varphi$, двигатели приводятся к одинаковому $\cos \varphi$ параллельным включением конденсаторной батареи. В этом случае капитальные вложения и эксплуатационные расходы двигателя с более низким $\cos \varphi$ увеличиваются за

счет стоимости, амортизации и потерь электроэнергии конденсаторной батареи.

Годовые эксплуатационные расходы включают: амортизационные отчисления, стоимость потерь электроэнергии, расходы по уходу и ремонту и другие. Предполагаем, что в сравниваемых типах двигателей расходы по уходу и ремонту мало различаются по величине, поэтому в эксплуатационных расходах учитываются лишь амортизационные отчисления и стоимость потерь электроэнергии.

Потери электроэнергии в двигателях зависят от времени их работы в году t . Исходя из этого, целесообразно стоимость потерь электроэнергии выражать в функции времени. Это дает возможность при сравнении вариантов из условия равенства годовых приведенных затрат определить время работы t_p , при котором сравниваемые двигатели будут равноэкономичны.

Экономические сравнения двигателей СРО-41-4 и РС-52-4

Сравниваемые двигатели имеют разные коэффициенты мощности (табл. 1). Для того, чтобы варианты были сравнимы, необходимо $\cos \varphi^{pc}$ с. р. д. РС-52-4 увеличить до значения $\cos \varphi^{cp}$ усовершенствованного с. р. д. СРО-41-4 параллельным включением конденсаторной батареи. Необходимая мощность статических конденсаторов при условии работы двигателей в номинальном режиме и равенстве полезных мощностей сравниваемых двигателей определяется уравнением

$$Q_c = P_n^{pc} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_n^{pc}}{\gamma_n^{pc}} - \frac{\operatorname{tg} \varphi_n^{cp}}{\gamma_n^{cp}} \right) \text{ [квар]}. \quad (2)$$

где P_n^{pc} — номинальная полезная мощность двигателя РС;

γ_n^{pc} и γ_n^{cp} — номинальные значения к. п. д. двигателей РС и СРО.

В том случае, если сравниваемые двигатели работают в режиме, отличающемся от номинального, мощность статических конденсаторов определяется уравнением

$$Q'_c = P_n^{pc} \cdot k_\varphi \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_1^{pc}}{\gamma_1^{pc}} - \frac{\operatorname{tg} \varphi_1^{cp}}{\gamma_1^{cp}} \right) \text{ [квар]}. \quad (3)$$

где k_φ — коэффициент использования двигателей по мощности;

φ_1 и γ_1 — фазовые углы и к. п. д., соответствующие режиму работы двигателей.

а) При работе сравниваемых двигателей в номинальном режиме

Подставляя в уравнение (2) соответствующие данные табл. 1, определяем, что мощность статических конденсаторов равна

$$Q_c = 10,15 \text{ квар}. \quad (4)$$

Годовые приведенные затраты для двигателя СРО-41-4 в соответствии с уравнением (1) можно представить в виде

$$Z^{cp} = \frac{H_g}{100} \cdot K + \left(\frac{P_n^{cp}}{\gamma_n^{cp}} - P_n^{cp} \right) \cdot t \cdot s_\varphi + E_n \cdot K, \quad (5)$$

где H_g — годовая норма амортизационных отчислений для двигателей принимается равной 10,2 % [9];

$K = C_g \cdot \kappa_n \cdot \kappa_t$ — единовременные капитальные вложения (первоначальная стоимость двигателя);

C_g — себестоимость двигателя;

$k_n = 1,05$ — коэффициент, учитывающий прибыль предприятия-изготовителя;

$\kappa_t = 1,1$ — коэффициент, учитывающий затраты на монтаж и транспортировку;

$S_9 = 0,01$ руб./квт. ч — стоимость 1 квт. ч потерь энергии [6];

$E_n = 0,2$ — нормативный коэффициент экономической эффективности (соответствует сроку окупаемости 5 лет) [6];

Подставляя в уравнение (5) известные значения величин, найдем зависимость приведенных затрат в функции времени t

$$Z^{cp} = 9,48 + 0,0063 t. \quad (6)$$

Годовые приведенные затраты для двигателя РС-52-4 в соответствии с уравнением (1) можно представить в виде

$$Z^{pc} = \frac{H_g}{100} K + \frac{H_k}{100} C_k + \left(\frac{P_n^{pc}}{\eta_n^{pc}} - P_n^{pc} \right) t s_9 + 0,005 Q_c t s_9 + E_n (K + C_k), \quad (7)$$

где $C_k = Q_c s_k$ — стоимость батареи статических конденсаторов;

s_k — стоимость 1 квар. конденсаторов с учетом монтажа принимается при 380 в равной 8,5 руб./квар [10];

$H_k = 12,0 \%$ — годовая норма амортизации для статических конденсаторов [9];

$0,005$ квт/квар — удельные потери энергии в конденсаторах.

Подставляя в уравнение (7) известные значения величин, найдем зависимость приведенных затрат в функции времени t

$$Z^{pc} = 45,1 + 0,0185 t. \quad (8)$$

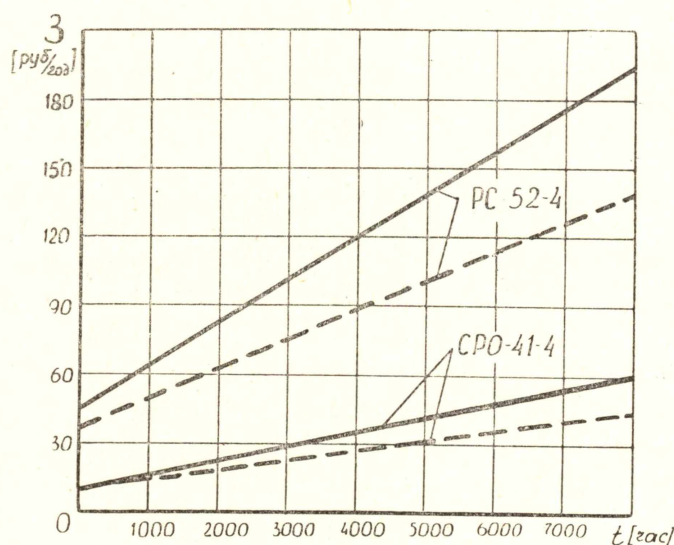


Рис. 1. Сравнение годовых расчетных затрат двигателей СРО-41-4 и РС-52-4 в зависимости от числа часов работы в году. Сплошные линии соответствуют работе сравниваемых двигателей в номинальном режиме; пунктирные — с коэффициентом использования по мощности $\kappa_9 = 0,7$.

На основании уравнений (6) и (8) на рис. 1 представлены зависимости изменения годовых расчетных затрат двигателей СРО-41-4 и

РС-52-4 в функции времени. Из приведенных зависимостей следует, что двигатели СРО-41-4 при любом времени работы в году являются более экономичными по сравнению с двигателями РС-52-4. При числе часов работы двигателя в год, равном $t = 2000$ час., годовая экономия оказывается равной

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}^{\text{pc}} - \mathcal{Z}^{\text{cp}} = 60,0 \text{ руб/год.} \quad (9)$$

б) При работе сравниваемых двигателей с коэффициентом использования $\kappa_{\text{э}} = 0,7$

Для экономических сравнений необходимо знать действительные η и $\cos\varphi$ двигателей, соответствующие заданному режиму работы. Предполагаем, что η и $\cos\varphi$ по сравнению с номинальным режимом изменяются незначительно и принимаем их равными номинальным значениям. Тогда в соответствии с уравнением (3) мощность статических конденсаторов равна

$$Q'_c = Q_c \cdot \kappa_{\text{э}} = 7,1 \text{ квар.} \quad (10)$$

При определении годовых приведенных затрат в этом случае можно пользоваться уравнениями (5) и (7) учитывая, что величина потерь энергии в двигателях уменьшается пропорционально $\kappa_{\text{э}}$. Тогда

$$\begin{aligned} \mathcal{Z}_1^{\text{cp}} &= 9,48 + 0,00441 t, \\ \mathcal{Z}_1^{\text{pc}} &= 36,8 + 0,0129 t. \end{aligned} \quad (11)$$

Зависимости изменения приведенных затрат сравниваемых двигателей в функции времени представлены на рис. 1.

Из анализа уравнений (11) следует, что при коэффициенте использования $\kappa_{\text{э}} = 0,7$ двигатели СРО-41-4 при любом времени работы в году являются более экономичными по сравнению с двигателями РС-52-4. При $t = 2000$ час. годовая экономия равна

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{Z}_1^{\text{pc}} - \mathcal{Z}_1^{\text{cp}} = 44,3 \text{ руб/год.} \quad (12)$$

На основании проведенных сравнений можно сделать вывод, что обычные с.р.д. целесообразнее заменить усовершенствованными, так как это дает большой экономический эффект.

Экономические сравнения двигателей СРО-41-4 и СО-51-4

Так как сравниваемые двигатели имеют различные коэффициенты мощности, то при анализе $\cos\varphi^{\text{cp}}$ с.р.д. СРО-41-4 необходимо увеличить до значения $\cos\varphi$ синхронного двигателя СО-51-4.

а) При работе сравниваемых двигателей в номинальном режиме

Необходимая мощность статических конденсаторов в этом случае определяется уравнением

$$Q_c = \frac{P_{\text{н}}^{\text{cp}}}{\eta_{\text{н}}^{\text{cp}}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{н}}^{\text{cp}} = 4,92 \text{ квар.} \quad (13)$$

Годовые приведенные затраты для двигателя СРО-41-4 в соответствии с уравнением (1) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{Z}^{\text{cp}} &= \frac{H_{\text{г}}}{100} K + \frac{H_{\text{к}}}{100} C_{\text{к}} + \left(\frac{P_{\text{н}}^{\text{cp}}}{\eta_{\text{н}}^{\text{cp}}} - P_{\text{н}}^{\text{cp}} \right) s_{\text{э}} t + \\ &+ 0,005 Q_c s_{\text{э}} t + E_{\text{н}} (K + C_{\text{к}}). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя в уравнение (14) определенные выше значения величин, зависимость приведенных затрат записываем в виде

$$Z^{cp} = 22,9 + 0,00655 t. \quad (15)$$

Годовые приведенные затраты для двигателя СО-51-4 определяются уравнением

$$Z^c = \frac{H_g}{100} K + \left(\frac{P_n^c}{\eta_n^c} - P_n^c \right) s_{\eta} t + E_n \cdot K, \quad (16)$$

или

$$Z^c = 21,2 + 0,0082 t. \quad (17)$$

Решая совместно уравнения (15) и (17), определяем, что при $t_p = 1030$ час. сравниваемые двигатели равноэкономичны. Зависимости годовых приведенных затрат в соответствии с уравнениями (15), (17) представлены на рис. 2. Из приведенных данных следует, что при

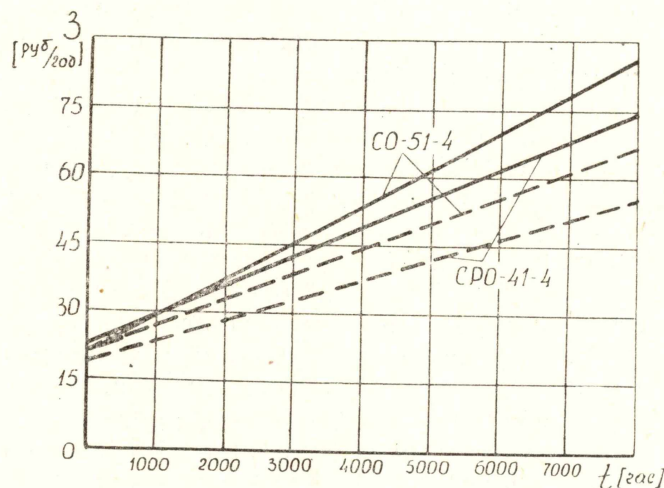


Рис. 2. Сравнение годовых затрат двигателей СРО-41-4 и СО-51-4 в зависимости от числа часов работы в году. Сплошные линии соответствуют работе сравниваемых двигателей в номинальном режиме; пунктирные — с коэффициентом использования по мощности $k_{\eta} = 0,7$.

числе часов работы в году $t > 1030$ усовершенствованные с. р. д. являются более экономичными по сравнению с двигателями СО-51-4. При $t = 2000$ час. годовая экономия равна $\Delta = Z^c - Z^{cp} = 1,6$ руб/год.

б) При работе сравниваемых двигателей с коэффициентом использования $k_{\eta} = 0,7$

Предполагаем, что η и $\cos \varphi$ по сравнению с номинальным режимом изменяются незначительно и принимаем их равными номинальным значениям. Мощность статических конденсаторов в этом случае определяется уравнением (13) с учетом коэффициента использования двигателей по мощности

$$Q'_c = Q_c \cdot k_{\eta} = 3,44 \text{ квар.} \quad (18)$$

При определении годовых приведенных затрат руководствуемся уравнениями (14) и (16) учитывая, что величина потерь энергии в двигателях уменьшается пропорционально k_{η} .

Тогда

$$\begin{aligned} Z_1^{\text{ср}} &= 18,7 + 0,00458 t, \\ Z_1^{\text{с}} &= 21,2 + 0,00574 t. \end{aligned} \quad (19)$$

Из уравнений (19) следует, что при коэффициенте использования $\kappa_{\text{э}} = 0,7$ двигатели СРО-41-4 при любом времени работы в году являются более экономичными по сравнению с двигателями СО-51-4. При $t = 2000$ час. годовая экономия равна $\mathcal{E}_1 = Z_1 - Z_1^{\text{ср}} = 4,8$ руб/год. Зависимости изменения годовых приведенных затрат в соответствии с уравнениями (19) представлены на рис. 2.

Проведенные экономические сравнения позволяют сделать вывод о целесообразности применения усовершенствованных с.р.д. вместо синхронных типа СО в том случае, когда число часов работы двигателей не менее 1030 час.

Выше в денежном выражении проведены лишь экономические сравнения рассматриваемых двигателей. Экономические сравнения являются лишь одним из элементов технико-экономического анализа. Для выбора наилучшего решения необходимо сопоставить не только экономические, но и технические показатели: надежность, удобство эксплуатации, технические характеристики и т. п.

Усовершенствованные с.р.д. технологичны в производстве, надежны и просты в эксплуатации так же, как асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. При практически одинаковой стоимости с асинхронными двигателями они обладают механическими характеристиками синхронных двигателей, то есть их скорость вращения не зависит от нагрузки и напряжения, а определяется частотой питающей сети. Пуск и пусковые характеристики с.р.д. аналогичны асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Все это говорит о том, что усовершенствованные с.р.д. могут успешно конкурировать с другими типами синхронных машин в приводах малой и средней мощности (примерно до 30 кВт), где требуется синхронная скорость вращения, не зависящая от нагрузки и напряжения, или где необходимо, чтобы несколько двигателей вращались с одинаковыми скоростями, независимо от нагрузки каждого двигателя.

Выводы

Проведенный в работе технико-экономический анализ показал, что усовершенствованные с.р.д. являются наиболее экономичными по сравнению с обычными с.р.д. При определенных условиях они могут успешно конкурировать с бесконтактными синхронными двигателями типа СО. Все это говорит о целесообразности разработки серии и внедрения в производство усовершенствованных с.р.д.

В том случае, если усовершенствованные с.р.д. будут иметь весовые и энергетические показатели, близкие к асинхронным двигателям, они найдут широкое применение в различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Куцевалов. Бесконтактные электродвигатели малой и средней мощности. Электричество, № 11, 1963.
2. Электродвигатели синхронные реактивные типа РС. Технические условия, ВНИИЭМ, 1963.
3. Е. В. Кононенко, Б. П. Гарганеев, А. Л. Кислицын. Некоторые вопросы теории и проектирования трехфазных синхронно-реактивных двигателей. Межвузовский сборник трудов, вып. 3. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Новосибирск, 1963.

4. Е. М. Голдовский. Реактивные двигатели для звукового кино. Кинофотоиздат, М., 1935.

5. Методика определения экономической эффективности внедрения новой техники, механизации и автоматизации производственных процессов в промышленности. АН СССР, М., 1962.

6. Г. И. Дудко. Основные положения методики определения экономической эффективности новых конструкций электрических машин и аппаратов. Сб. «Вопросы экономики и организации производства на предприятиях электротехнической промышленности». ЦИНТИЭЛЕКТРОПРОМ, М., 1963.

7. И. Н. Чарахчян. Асинхронные трехфазные двигатели общепромышленного применения. ВНИИЭМ, М., 1963.

8. Ю. Ф. Вайварс. Некоторые экономические сравнения бесконтактных синхронных и асинхронных двигателей. Труды института энергетики Латв. АН ССР, вып. XVI, «Бесконтактные эл. машины III», Рига, 1963.

9. П. Р. Филиппов. Новые нормы амортизации. Экономиздат, М., 1963.

10. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. ГЭИ, 1963.
