

УДК 621.313.333.001.5

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ РАСЧЁТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.С. Баклин, И.И. Пушкарёв*

Томский политехнический университет

*ОАО «ТЭМЗ», г. Томск

E-mail: bvs@tpu.ru

Предлагается алгоритм расчёта и поиска оптимального варианта расчёта высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с пазами статора и ротора прямоугольной формы. Алгоритм содержит минимальное количество варьируемых переменных: индукцию в воздушном зазоре, ширину стандартного прямоугольного провода, число эффективных проводников в пазу статора и ширину паза ротора, что позволяет существенно уменьшить количество вариантов расчёта и для поиска оптимального варианта, удовлетворяющего функции цели, использовать метод полного перебора.

Ключевые слова:

Алгоритм, оптимизационные расчёты, асинхронный двигатель, статор, ротор, варьируемые переменные, ограничения, функция цели, метод полного перебора.

Key words:

Algorithm, optimized calculations, induction motor, stator, rotor, varying variables, limitations, purpose function, method of complete excess.

Создание новых конкурентоспособных асинхронных двигателей предполагает наличие современной вычислительной техники и программного обеспечения, позволяющего автоматизировать расчёты и поиск оптимального варианта расчёта, удовлетворяющего функции цели. Создание такого программного обеспечения является актуальной задачей для многих предприятий электротехнической промышленности, связанных с производством асинхронных двигателей.

В программах расчёта и поиска оптимального варианта электрической машины исходные данные подразделяются на постоянные — неизменные в течение всего расчёта-поиска, переменные — изменяемые в течение всего расчёта-поиска и лимитеры (ограничения). Варианты, не удовлетворяющие хотя бы одному из лимитирующих показателей, исключаются из расчётов. Остальные варианты расчётов подвергаются оценке на степень оптимальности, т. е. соответствию функции цели.

Для задач проектирования асинхронных двигателей наиболее характерны [1–3] следующие критерии оптимальности:

1. Минимум приведенной стоимости машины, р/год.
2. Минимум массы G — критерий, часто используемый при разработке транспортных машин.
3. Максимум КПД или минимум потерь Σp .
4. Совокупный критерий, например, $G + \beta \Sigma p$, где β — коэффициент.

Лимитирующими показателями [1, 2] могут быть:

1. Массогабаритные по наружному диаметру корпуса, по объёму машины, по массе машины.
2. Эксплуатационно-технические по превышению температуры обмотки статора $\Delta \theta_{\text{м1}}$ над температурой окружающей среды, по кратностям начального пускового момента K_n и максимального момента K_m , по кратности пускового тока K_i , скорости нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе.

3. Конструктивно-технологические — по ширине зубцов статора и ротора, минимальным пазовым открытиям, высоте пазов ротора и толщине спинки статора, размерам проводников обмотки статора и т. д.

Например, из конструктивно-технологических ограничений должны быть: минимальная ширина зубцов статора и ротора $b_{\text{мин}} \geq 1 + 0,01 D_n$, мм; высота спинки статора $h_{n1} \geq 0,055 D_n$, где D_n — наружный диаметр сердечника статора. Полная высота паза ротора h_{n2} должна быть: при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов $h_{n2} \geq 0,05 D_n - 0,5(D_1 - d_{21}) - \delta$; при наличии аксиальных вентиляционных каналов $h_{n2} \geq 0,03 D_n - 0,5(D_1 - d_{21}) - \delta - d_{k2}$, где D_1 — диаметр расточки статора, мм, d_{21} — внутренний диаметр сердечника ротора под вал, мм, d_{k2} — диаметр аксиального канала, мм, δ — воздушный зазор, мм.

В проектировании электрических машин термин «синтез» означает процесс нахождения, по меньшей мере, одного варианта удовлетворяющего всем требованиям, предъявляемым к машине. Отличительные особенности основных методов проектирования представлены в [1, 3]. К ним относятся: синтез машины, подобной изготовленному образцу; синтез на основании уравнения Арнольда; синтез в направлении от электромагнитных нагрузок к размерам и т. д.

Выбор функции цели, лимитирующих показателей, метода проектирования определяется конкретной задачей проектирования, её спецификой. Задачей проектирования являются высоковольтные асинхронные двигатели с пазами статора и ротора прямоугольной формы. Обмотка статора в таких двигателях выполняется катушечной из провода прямоугольного сечения, что придает обмотке достаточно высокую механическую прочность, а двигателю — надежность в эксплуатации. Пазы на роторе закрытые, короткозамкнутая обмотка ротора сварная из меди. Двигатели специализированные, предназначены для привода вентиляторов

главного и местного проветривания, должны хорошо встраиваться в вентиляторную установку, удовлетворять ограничениям по наружному диаметру и длине сердечника статора.

При разработке алгоритма и создания программного обеспечения оптимизационных расчетов высоковольтных асинхронных двигателей нами использованы элементы метода проектирования «синтез в направлении от электромагнитных нагрузок к размерам». Данный метод [1] предполагает использование в качестве входных данных семи электромагнитных нагрузок. К ним относятся: магнитные индукции B_δ — в воздушном зазоре, B_{z1} и B_{z2} — в узких сечениях зубцов статора и ротора, B_{j1} и B_{j2} — в спинках статора и ротора; отношение линейной нагрузки A_1 к плотности тока J_1 , обозначенное символом $U=A_1/J_1$ и произведение линейной нагрузки на плотность тока $A_1 J_1$. Считается заданным также наружный диаметр сердечника статора.

Эти электромагнитные нагрузки [1] позволяют определить семь главных выходных величин: диаметр расточки статора D_1 , высоту спинки статора h_{j1} и ротора h_{j2} , минимальную ширину зубца статора b_{z1} и ротора b_{z2} , расчетное число витков w_1 фазы обмотки статора и расчетную длину $l_{\delta 1}$ сердечника статора. Предполагается, что остальные параметры, характеризующие структуру машины, либо зафиксированы, либо однозначно определяются главными выходными величинами.

При таком подходе к определению главных выходных величин, например, ширины зубца статора b_{z1} при заданной толщине пазовой изоляции в случае пазов статора прямоугольной формы не учитываются стандартные размеры прямоугольных проводов. Не учитывается, что при определении числа витков w_1 число эффективных проводников u_{n1} в пазу статора должно быть целым, а в большинстве случаев еще и четным числом. Полученный оптимальный вариант без учета этих факторов требует пересчета и после пересчета может оказаться далеко не оптимальным.

Суть, предлагаемого нами алгоритма программы расчета и поиска оптимального варианта высоковольтного асинхронного двигателя с пазами статора и ротора прямоугольной формы заключается в следующем.

В качестве входных постоянных данных принимаются предельные значения электромагнитных нагрузок: магнитные индукции в узком сечении зубца статора B_{z1max} и ротора B_{z2max} , в спинке статора B_{j1max} и ротора B_{j2max} ; линейная нагрузка A_{1max} ; произведение линейной нагрузки на плотность тока $A_1 J_{1max}$. Предельные значения электромагнитных нагрузок могут быть приняты на основании рекомендаций [2] из опыта проектирования машин подобного типа.

Линейная нагрузка A_{1max} и произведение линейной нагрузки на плотность тока $A_1 J_{1max}$ позволяют определить допустимую плотность тока в обмотке статора

$$J_{1max} = A_1 J_{1max} / A_{1max}$$

и допустимое отношение линейной нагрузки к плотности тока

$$U_{max} = A_{1max}^2 / A_1 J_{1max}$$

Допустимые значения плотности тока J_{1max} и отношения U_{max} используются в программе расчета поиска как лимитирующие показатели.

Алгоритмом программы предусмотрен ввод предварительных значений КПД η_k и коэффициента мощности $\cos \varphi_k$. В задачах проектирования, где критерием оптимальности является минимум потерь в двигателе, значения этих коэффициентов принимаются не ниже, чем у двигателей-аналогов. Значение КПД η_k используется как лимитирующий показатель. В программе предусмотрена также таблица стандартных размеров прямоугольных проводов, из которой проводится автоматизированный выбор толщины прямоугольного провода по заданной его ширине.

Расчетная длина сердечника статора $l_{\delta 1}$ принята фиксированной, а при необходимости может быть использована как независимая варьируемая переменная.

В качестве независимых переменных приняты: индукция в воздушном зазоре B_δ , стандартные размеры ширины прямоугольного провода b_m обмотки статора, число эффективных проводников u_{n1} в пазу статора, ширина паза b_{n2} ротора.

При фиксированной длине $l_{\delta 1}$ сердечника статора магнитные индукции в зубцах B_{z1max} и спинке B_{j1max} статора на первом этапе используются в программе для предварительного определения первоначального максимального числа эффективных проводников u_{n1} в пазу статора, а в дальнейших расчетах — как лимитирующие показатели.

Варьирование независимых переменных целесообразно начинать с их верхнего уровня. При принятых лимитирующих показателях это позволяет существенно уменьшить количество вариантов расчета.

Алгоритм варьирования переменными следующих. Задаются максимальное $B_{\delta max}$ и минимальное $B_{\delta min}$ значения индукции в воздушном зазоре. Изменение индукции в зазоре $B_{\delta(k)}$ от своего максимального до минимального значения проводится в цикле $k=1, \dots, n_k$ с шагом $\Delta B_\delta = (B_{\delta max} - B_{\delta min}) / n_k$.

Рассчитываются вспомогательные коэффициенты

$$C_{z1(k)} = 1 - \frac{B_{\delta(k)}}{B_{z1max} k_{c1}} \quad \text{и} \quad C_{j1(k)} = 1 + \frac{B_{\delta(k)}}{B_{j1max} p k_{c1}},$$

где k_{c1} — коэффициент заполнения сердечника статора железом; p — число пар полюсов двигателя.

Из таблицы стандартных размеров прямоугольных проводов, представленных в программе, в цикле $i=1, \dots, n_i$ задается ширина провода $b_{m(i)}$ от максимального до минимального значения и рассчитывается соответствующая ему ширина паза статора по формуле

$$b_{n1(i)} = (b_{m(i)} + \Delta_{bn} + \Delta_{pr} + \Delta_{st}) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где Δ_{bn} – двухсторонняя толщина пазовой изоляции с учетом разбухания и припуска на укладку обмотки; Δ_{pr} – двухсторонняя толщина изоляции провода; Δ_{st} – припуск на сборку сердечников статора и ротора. Минимальная ширина проводника $b_{m(i)}$ должна быть такой, чтобы ширина паза $b_{n1(i)}$, рассчитанная по формуле (1), из конструктивно-технологических ограничений была больше 7...8 мм [3].

Предварительно рассчитывается максимальное число эффективных проводников в пазу статора по формуле

$$u'_{n1(k,i)} = \frac{\pi a_1 k_u}{l_{\delta 1} q_1 Z_1} \frac{k_e C_{z1(k)}}{B_{\delta(k)} b_{n1(i)}}, \quad (2)$$

где a_1 – число параллельных ветвей; q_1 – число пазов на полюс и фазу обмотки статора; Z_1 – число пазов статора; k_e – коэффициент отношения ЭДС к номинальному фазному напряжению; k_u – коэффициент,

$$k_u = \frac{U_{\text{нф}}}{4,44 f_1 k_{w1}},$$

где $U_{\text{нф}}$ – фазное напряжение; k_{w1} – обмоточный коэффициент.

В зависимости от требований, предъявляемых к обмотке статора, число эффективных проводников $u'_{n1(k,i)}$, рассчитанное по формуле (2), программно округляются в меньшую сторону до $u_{n1(k,i)}$ целого числа или до целого четного числа.

Числа эффективных проводников в пазу статора изменяется в цикле $j=1, \dots, n_j$. При номере шага $j=1$ проводится присвоение $u_{n1(j,i)} = u_{n1(k,i)}$. При номерах шага $j>1$ число эффективных проводников уменьшается на величину Δu_n по формуле

$$u_{n1(j,i)} = u_{n1(j-1,i)} - \Delta u_n, \quad (3)$$

где Δu_n – шаг уменьшения числа проводников, причем принимается $\Delta u_n=1$ при нечетном и $\Delta u_n=2$ при четном числе эффективных проводников в пазу.

Для каждой ширины паза и соответствующего ей числу эффективных проводников в пазу уточняется вспомогательный коэффициент

$$C_{z1(j,i)} = u_{n1(j,i)} \frac{l_{\delta 1} q_1 Z_1}{\pi a_1 k_u} \frac{B_{\delta(k)} b_{n1(i)}}{k_e}.$$

Рассчитываются индукция в зубцах статора

$$B_{z1(j,i)} = \frac{B_{\delta(k)}}{(1 - C_{z1(j,i)}) k_{c1}},$$

диаметр расточки статора

$$D_{1(j,i)} = \frac{Z_1 b_{n1(i)}}{\pi C_{z1(j,i)}}$$

шаг по пазам

$$t_{z1(j,i)} = \pi D_{1(j,i)} / Z_1.$$

и минимальная ширина зубца статора

$$b_{z1(j,i)} = t_{z1(j,i)} - b_{n1(i)}$$

Если $B_{z1(j,i)} > B_{z1\text{max}}$ или $b_{z1(j,i)} < 0,001 + 0,01 D_n$ (конструктивно-технологические ограничения), то вариант расчета с числом проводников $u_{n1(j,i)}$ исключается, и проводится расчет с уменьшенным по формуле (3) числом проводников в пазу.

При выполнении условий $B_{z1(j,i)} \leq B_{z1\text{max}}$ и $b_{z1(j,i)} \geq 0,001 + 0,01 D_n$ рассчитываются предварительно полная высота прямоугольного паза статора

$$h'_{n1(j,i)} = 0,5 D_n - \left[\frac{0,5 Z_1}{\pi} \frac{C_{j1(k)}}{C_{z1(j,i)}} \right] b_{n1(i)},$$

и высота паза занятого обмоткой, мм

$$h'_{nm(j,i)} = h'_{n1(j,i)} 10^3 - \Delta h_n,$$

где Δh_n – высота паза статора не занятая обмоткой, включающая в себя толщину изоляции по высоте паза, толщину клина, высоту шлица, припуски на сборку сердечника и укладку обмотки статора, мм.

Предварительно определяется толщина эффективного проводника, мм

$$a'_{m1(j,i)} = \frac{h'_{nm(j,i)}}{u_{n1(j,i)}} - \Delta_{np}, \quad (4)$$

где Δ_{np} – толщина двухсторонней изоляции провода.

Минимальная толщина стандартного прямоугольного провода 0,8 мм [4]. Двухсторонняя толщина изоляции прямоугольного провода обмотки статора в высоковольтных асинхронных двигателях составляет порядка 0,45 мм. С уменьшением толщины провода возрастает влияние толщины изоляции провода на коэффициент заполнения паза медью, на плотность тока. Чем меньше коэффициент заполнения паза медью, тем меньше КПД двигателя, поэтому для обмоток статора высоковольтных асинхронных двигателей целесообразно ограничить минимальную толщину прямоугольного провода. С учетом стандартных размеров прямоугольных проводов в программе минимальная толщина провода принята 1,18 мм.

При толщине провода $a'_{m(j,i)} < 1,18$ мм вариант расчета с шириной паза $b_{n1(i)}$ исключается и осуществляется переход к расчетам с последующей шириной паза $b_{n1(i+1)}$.

Если $a'_{m(j,i)} \geq 1,18$ мм, то соответственно ширине провода $b_{m(i)}$ из таблицы стандартных размеров прямоугольных проводов программно выбирается стандартная толщина провода $a_{m(j,i)}$, ближайшая (в меньшую сторону) предварительно определенной по формуле (4) толщине $a'_{m(j,i)}$ провода.

Уточняются высота паза статора, м,

$$h_{n1(j,i)} = ((a_{m(j,i)} + \Delta_{np}) u_{n1(j,i)} + \Delta h_n) \cdot 10^{-3},$$

толщина спинки статора

$$h_{j1(j,i)} = 0,5(D_n - D_{1(j,i)} - 2h_{n1(j,i)}),$$

коэффициент

$$C_{j1(j,i)} = 1 + \frac{\pi C_{z1(j,i)} h_{j1(j,i)}}{0,5 Z_1 b_{n1(i)}}.$$

Рассчитывается индукция в спинке статора

$$B_{j1(j,i)} = \frac{B_{\delta(k)}}{pk_{c1}(C_{j1(j,i)} - 1)}.$$

Варианты с индукцией $B_{j1(j,i)} > B_{j1\max}$ и толщиной спинки статора $h_{j1(j,i)} < 0,055D_n$. Исключаются из расчётов.

Рассчитываются сечение эффективного проводника, м²,

$$q_{m(j,i)} = (a_{m(j,i)} b_{m(i)}) 10^{-6},$$

сечение меди в пазу статора

$$q_{m(j,i)} = q_{m(j,i)} u_{n1(j,i)}$$

и коэффициент заполнения паза статора медью

$$k_{3m(j,i)} = \frac{q_{m(j,i)}}{b_{n(i)} h_{n1(j,i)}}.$$

Рассчитывается отношение линейной нагрузки к плотности тока

$$U_{AJ(j,i)} = 0,5 k_{3m(j,i)} C_{z1(j,i)} \left[D_n - \frac{Z_1 C_{j1(j,i)}}{\pi C_{z1(j,i)}} b_{n1(i)} \right].$$

Лимитирующим показателем допустимых значений отношения линейной нагрузки к плотности тока является $U_{\max} = A_{1\max}^2 / AJ_{\max}$. Вариант $U_{AJ(j,i)} > U_{\max}$ из дальнейших расчётов исключается.

Исключается также вариант, в котором плотность тока в обмотке статора превышает допустимую плотность тока $J_{1\max}$. С этой целью рассчитывается линейная нагрузка

$$A_{1(j,i)} = \frac{\pi p P_e}{2,22 f_1 k_{w1} l_{\delta 1} B_{\delta(k)}} \left(\frac{C_{z1(j,i)}}{Z_1 b_{n1(i)}} \right)^2. \quad (5)$$

В формуле (5) расчетная мощность двигателя

$$P_e = \frac{k_e P_n 10^3}{\eta_x \cos \varphi_x},$$

где P_n – номинальная мощность двигателя, кВт.

Определяется ожидаемая плотность тока в обмотке статора

$$J_{1(j,i)} = \frac{A_{1(j,i)} I_{z1(j,i)}}{q_{m(j,i)}}.$$

Вариант, в котором плотность тока в обмотке статора $J_{1(j,i)} > J_{1\max}$ или линейная нагрузка $A_{1(j,i)} > A_{1\max}$ исключается из расчетов.

Независимые переменные – индукция в воздушном зазоре B_{δ} , стандартные размеры ширины b_m прямоугольного провода обмотки статора, число эффективных проводников u_{n1} в пазу статора полностью определяют внутренний диаметр расточки, пазовую геометрию и обмоточные данные статора.

Для определения размеров и пазовой геометрии ротора рассчитывается наружный диаметр сердечника ротора

$$D_{2(j,i)} = D_{1(j,i)} - 2\delta \cdot 10^{-3}.$$

С учётом конструктивно-технологических ограничений рассчитывается допустимая высота паза ротора, м,

$$h_{n2(j,i)} = 0,03 D_n - 0,5(D_{1(j,i)} - d_2) - (\delta + d_{k2}) 10^{-3},$$

где d_2 – внутренний диаметр сердечника ротора под вал, м.

Для определения пазовой геометрии ротора в качестве независимой переменной в цикле $i_2 = 1, \dots, n_2$ задается ширина прямоугольного паза ротора $b_{n2(i_2)}$, м.

В первом приближении индукция в узком сечении зубца ротора принимается $B_{z2(i_2)} = B_{z2\max}$. Рассчитывается коэффициент

$$C_{z2(i_2)} = \frac{B_{\delta(k)}}{B_{z2(i_2)} k_{c2}} \frac{l_{\delta 1}}{l_2} \quad (6)$$

и полная высота паза ротора

$$h_{n2(i_2)} = 0,5 D_{2(j,i)} - \frac{Z_2}{2\pi} \left(b_{n2(i_2)} + \frac{C_{z2(i_2)}}{C_{z1(j,i)}} b_{n1(i)} \right), \quad (7)$$

где l_2 – длина сердечника ротора.

Если $h_{n2(i_2)} > h_{n2(j,i)}$ (предельной высоты паза ротора), то индукция $B_{z2(i_2)}$ в зубце ротора уменьшается на величину $\Delta B_{z2} = 0,01$ Тл, и проводится пересчет по формулам (6), (7) до выполнения условия $h_{n2(i_2)} \leq h_{n2(j,i)}$.

Определяются высота стержня, м,

$$h_{c2(i_2)} = h_{n2(i_2)} - (h_{sh} + \Delta_{sr2}) 10^{-3},$$

его ширина

$$b_{c2(i_2)} = b_{n2(i_2)} - \Delta_{sr2} 10^{-3}$$

и сечение

$$q_{c2(i_2)} = h_{c2(i_2)} b_{c2(i_2)},$$

где h_{sh} – высота шлица в случае полузакрытых или высота ферромагнитного мостика в случае закрытых пазов ротора; Δ_{sr2} – припуск на сборку сердечника и сварной короткозамкнутой обмотки ротора.

Дальнейшие расчёты параметров, магнитной цепи, рабочих и пусковых характеристик, тепловой расчет двигателя проводятся по известным методикам [2, 4]. В ходе расчётов проверяются эксплуатационно-технические лимитирующие показатели: кратности пускового и максимального моментов, кратность пускового тока, превышение температуры нагрева обмотки статора, КПД двигателя, значение которого должно быть не меньше чем η_x . Варианты, не удовлетворяющие лимитирующим показателям, из расчётов исключаются.

КПД является общей оценкой двигателя наиболее близкой к экономическому критерию и в частности к энергоэффективности двигателя. Повышение КПД асинхронных двигателей для привода вентилятора при ограниченных размерах наружного диаметра и длины сердечника статора может достигаться снижением переменных потерь за счёт более напряженных магнитных нагрузок в железе магнитопровода. Но это может сопровождаться не обоснованным увеличением массы меди обмотки статора и снижением коэффициента мощности двигателя.

Критерием оптимальности выбран обобщенный параметр, включающий в себя КПД двигателя η_x , значение которого должно быть не ниже КПД

двигателя-аналога при минимальной массе меди обмотки статора проектируемого двигателя. Так как КПД двигателя η_x используется в качестве лимитирующего показателя, то оптимальным считается вариант расчёта с минимальной массой меди обмотки статора.

В программе вариант расчёта, полностью удовлетворяющий лимитирующим показателям, запоминается. Если в полученном варианте КПД двигателя больше значения η_x , а плотность тока в обмотке статора меньше допустимой плотности тока J_{imax} , то из таблицы стандартных размеров провода берётся толщина провода $a_{m(j,i)}$ на ступень ниже, чем в предыдущем варианте. Проводится расчёт с уменьшенной толщиной провода. Если вариант с уменьшенной толщиной провода удовлетворяет лимитирующим показателям, то из двух вариантов расчёта предыдущего и последующего запоминается вариант с минимальной массой обмотки статора. Уменьшение толщины провода проводится до тех пор, пока КПД двигателя больше значения η_x , а плотность тока в обмотке статора меньше допустимой плотности J_{imax} .

В поисках оптимального варианта расчёта, удовлетворяющего функции цели — обеспечение КПД проектируемого двигателя не ниже КПД двигателя-

аналога при минимальной массе меди обмотки статора, используется метод полного перебора [1, 3].

Выводы

1. Разработан алгоритм расчёта и поиска оптимального варианта расчёта высоковольтного асинхронного двигателя для привода вентилятора.
2. Выбраны варьируемые переменные, которые позволяют найти оптимальный вариант расчёта двигателя с учётом целого числа эффективных проводников в пазу статора и стандартных размеров обмоточного провода.
3. Выбранный критерий оптимальности — КПД двигателя — не меньше, чем КПД двигателя-аналога при минимальной массе меди обмотки статора, позволяет спроектировать двигатель более энергоэффективным по сравнению с двигателем-аналогом, что повышает конкурентоспособность вентиляторной установки.
4. Принятые эксплуатационно-технические и конструктивно-технологические лимитирующие показатели, малое число независимых переменных и их варьирование, начиная с верхнего уровня, позволяют существенно уменьшить количество вариантов расчёта и использовать для поиска оптимального варианта метод полного перебора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчёт, элементы проектирования. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 368 с.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П. и др. Проектирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 2005. — 767 с.
3. Бочаров В.И., Захаров В.И., Коломейцев Л.Ф. и др. Тяговые двигатели электровозов. — Новочеркасск: Агентство Наutilus, 1998. — 672 с.
4. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.

Поступила 08.11.2010 г.