

Потери и КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения

И. А. Дикун[✉], А. Г. Лавров, И. А. Овчинников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] iapimenova@etu.ru

Аннотация. Анализ технической и учебно-методической литературы показал, что вопросы потерь и КПД машин постоянного тока и их анализ проводится применительно только к машинам параллельного и независимого возбуждения. Потери и КПД двигателей последовательного возбуждения не рассматриваются. Проведенный анализ составляющих полных потерь в двигателях последовательного возбуждения и их зависимости от нагрузки показал, что все потери можно разделить на три группы: потери, зависящие от квадрата коэффициента нагрузки; потери, значения которых обратно пропорциональны коэффициенту нагрузки, и потери, значения которых обратно пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки. Указанная зависимость потерь от нагрузки характерна только для рассматриваемого типа двигателей. Исследование зависимости КПД двигателей последовательного возбуждения от нагрузки позволило сформулировать условие, определяющее значение нагрузки, при которой КПД двигателей будет принимать максимальное значение. Полученное условие кардинально отличается от аналогичного, приведенного в общей теории электрических машин.

Ключевые слова: двигатели последовательного возбуждения, магнитные потери, механические потери, электрические потери, зависимость потерь от нагрузки, КПД двигателей

Для цитирования: Дикун И. А., Лавров А. Г., Овчинников И. А. Потери и КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 97–104. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-97-104.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Losses and Efficiency of Series-Excited DC Motors

I. A. Dikun[✉], A. G. Lavrov, I. A. Ovchinnikov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] iapimenova@etu.ru

Abstract. An analysis of technical and educational literature has shown that the issues of losses and efficiency of DC machines and their analysis are carried out in relation only to parallel and independent excitation machines. Losses and efficiency of series-excited motors are not considered. The analysis of the components of total losses in series excitation motors and their dependence on the load showed that all losses can be divided into three groups: losses depending on the square of the load factor, losses whose values are inversely proportional to the load factor and losses, the values of which are inversely proportional to the square load factor. The indicated dependence of losses on load is typical only for the type of engine under consideration. The study of the dependence of the efficiency of series-excited motors on the load made it possible to formulate a condition that determines the value of the load at which the efficiency of the motors will take its maximum value. The resulting condition is radically different from the similar one given in the general theory of electrical machines.

Keywords: series excitation motors, magnetic losses, mechanical losses, electrical losses, dependence of losses on load, motor efficiency

For citation: Dikun I. A., Lavrov A. G., Ovchinnikov I. A. Losses and Efficiency of Series-Excited DC Motors // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 97–104. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-97-104.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Несмотря на то, что в последние десятилетия в связи с широким распространением полупроводниковых преобразователей частоты существенно сузилась область применения коллекторных двигателей постоянного тока, они сохраняют свою ведущую роль в электроприводах высокого качества в авиации, автомобиле- и кораблестроении, на транспорте, в станкостроении и других областях техники.

Двигатели параллельного возбуждения, имея жесткие электромеханические характеристики, применяются в установках, в которых требуется постоянство скорости вращения и независимость ее от нагрузки. Это, в первую очередь, прокатные станы и металлообрабатывающие станки. Двигатели последовательного возбуждения, обладая возможностью широкого и плавного регулирования скорости вращения актуальны для электрической тяги в электротранспорте и в подъемно-транспортных установках.

Вопросы определения потерь, расчета КПД и нахождения условий, при которых он будет принимать максимальное значение, были и остаются актуальными для электромеханических преобразователей, в том числе и для двигателей постоянного тока.

При работе электрической машины часть потребляемой ею мощности теряется бесполезно и рассеивается в виде тепла. Эта часть потребляемой мощности называется потерями мощности или просто потерями. Полезная мощность машины P_2 , отдаваемая ею, всегда меньше потребляемой мощности P_1 , подводимой к машине, на значение потерь $\Delta P = P_1 - P_2$.

В машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, потери подразделяются на основные и добавочные. Основные потери возникают в результате происходящих в машине основных электромагнитных и механических процессов, а добавочные потери обусловлены различными вторичными явлениями, сопровождающими преобразование мощности в машине. Основные потери подразделяются на магнитные, электрические и механические.

Проведенный анализ научно-технической и учебно-методической литературы, посвященной указанным вопросам, позволяет сделать следующие выводы:

1. Рассматривая вопросы потерь и КПД машин постоянного тока, проводят их анализ применительно только к машинам параллельного и независимого возбуждения.

2. Отмечается, что суммарные потери в двигателях можно выразить через коэффициент нагрузки $k_{\text{нг}} = I_2/I_{2\text{н}}$,

$$\Sigma p = p_0 + k_{\text{нг}} p_1 + k_{\text{нг}}^2 p_2, \quad (1)$$

где $I_2, I_{2\text{н}}$ – текущее и номинальное значения тока нагрузки или тока обмотки якоря соответственно; p_0 – постоянные потери, не зависящие от нагрузки; p_1, p_2 – потери, зависящие от коэффициента нагрузки в первой степени и от квадрата коэффициента нагрузки. К первым потерям относятся магнитные, механические потери и электрические потери в обмотках параллельного и независимого возбуждений; ко вторым – электрические потери в щеточно-коллекторном узле; к третьим – электрические потери цепи обмотки якоря.

Учитывая (1), КПД машин постоянного тока независимого и параллельного возбуждений можно записать в виде

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_{\Sigma}} = \frac{k_{\text{нг}} P_{2\text{н}}}{k_{\text{нг}} P_{2\text{н}} + p_0 + k_{\text{нг}} p_1 + k_{\text{нг}}^2 p_2},$$

где $P_{2\text{н}}$ – номинальная мощность на валу двигателя.

Для нахождения условия достижения КПД максимального значения определяется производная $\partial\eta/\partial k_{\text{нг}}$ и приравнивается нулю:

$$\frac{\partial\eta}{\partial k_{\text{нг}}} = \frac{(p_0 - k_{\text{нг}}^2 p_2) P_{2\text{н}}}{(k_{\text{нг}} P_{2\text{н}} + p_0 + k_{\text{нг}} p_1 + k_{\text{нг}}^2 p_2)^2} = 0.$$

Это уравнение справедливо, когда знаменатель обращается в бесконечность, т. е. при $k_{\text{нг}} = \infty$, что не имеет практического интереса или в слу-

чае, когда числитель будет равен нулю. Приравняв числитель нулю, получим

$$p_0 = k_{нг}^2 p_2.$$

Следовательно, КПД будет максимальным при такой нагрузке, при которой переменные потери, зависящие от квадрата нагрузки, будут равны постоянным потерям

$$P_{пост} = P_{пер},$$

где постоянные потери равны сумме магнитных и механических потерь, а переменные – сумме электрических и добавочных потерь:

$$P_{мг} + P_{мех} = P_{эл} + P_{д}.$$

Значение коэффициента нагрузки при максимальном КПД

$$k_{нг} = \sqrt{p_0/p_2}.$$

3. Не проводится анализ потерь и КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

4. Для двигателей последовательного возбуждения не справедливы указанная в п. 2 классификация потерь и сформулированное условие, при котором КПД двигателей принимает максимальное значение. Это обусловлено следующими особенностями указанных двигателей:

– в двигателях последовательного возбуждения отсутствуют постоянные потери, т. е. потери, не зависящие от нагрузки (тока обмотки якоря I_2), так как указанный ток – это еще и ток возбуждения двигателя $I_2 = I_1 = I$, и изменяется в широких пределах, что приводит в свою очередь к изменению основного магнитного потока и скорости вращения якоря;

– в двигателях последовательного возбуждения частота перемагничивания стали сердечника якоря и частота наводимых в сердечнике вихревых токов изменяются в широких пределах с изменением скорости вращения якоря;

– механические потери в двигателях последовательного возбуждения изменяются в широких пределах, поскольку двигатель имеет мягкую электромеханическую характеристику, а в ука-

занной в п. 2 классификации потерь данный их вид отнесен к постоянным потерям.

Исходя из сформулированных выводов, вопросы классификации потерь и анализ их зависимости от тока нагрузки, а также расчета КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения остаются открытыми, а разработка ответов – актуальной.

Особенностью двигателей последовательного возбуждения служит то, что ток возбуждения изменяется в зависимости от нагрузки. При этом изменяется значение магнитного потока. Изменение магнитного потока от тока возбуждения может быть задано стандартной (универсальной) характеристикой, табл. 1, где $I_{1н}$ – номинальный ток двигателя; I_1 – ток возбуждения двигателя; $\Phi_{\delta н}$, Φ_{δ} – номинальный магнитный и магнитный потоки двигателя; k_i , k_{Φ} – коэффициенты пропорциональности тока возбуждения и пропорциональности магнитного потока.

Рассмотрим составляющие потерь и КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения и определим их зависимости от нагрузки.

Магнитные потери. Для возможности вычисления магнитных потерь при частоте перемагничивания и частоте вихревых токов, отличных от 50 Гц, что характерно для двигателей последовательного возбуждения, имеющих мягкую электромеханическую характеристику, составляющие потерь необходимо рассматривать по отдельности, т. е. потери от гистерезиса и от вихревых токов [1]–[4]

$$P_{мгн} = \sum k_{di} p_{1/50} \left[\alpha \frac{f}{50} + \beta \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] B_i^2 G_i, \quad (2)$$

где k_{di} – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали зубцов или ярма сердечника якоря по технологическим причинам; $p_{1/50}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг; $f = \frac{pn_2}{60}$ – частота перемагничивания стали сердечника якоря, Гц; B_i – индукция в зубцах или

Табл. 1. Универсальная кривая намагничивания электрических машин постоянного тока

Tab. 1. Universal magnetization curve of DC electric machines

Коэффициенты пропорциональности	Значение коэффициентов в относительных единицах					
$k_i = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н} = k_{нг}$	0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.25
$k_{\Phi} = \Phi_{\delta}/\Phi_{\delta н}$	0.05	0.40	0.70	0.90	1.0	1.10

ярме сердечника, Тл; G_i – масса зубцов или ярма сердечника, кг; α и β – коэффициенты, учитывающие соотношение потерь от гистерезиса p_{Γ} и вихревых токов $p_{\text{в.т}}$; p – число пар полюсов магнитной системы и n_2 – скорость вращения якоря двигателя, об/мин.

Согласно [2] для холоднокатаных изотропных электротехнических сталей, которые применяются для изготовления сердечников якорей машин постоянного тока, $\alpha = 0.3$ и $\beta = 0.7$. Следовательно, если известны суммарные магнитные потери в номинальном режиме работы $p_{\text{МГ.н}}$ двигателя последовательного возбуждения, то их можно разделить на составляющие

$$p_{\text{МГ.н}} = p_{\Gamma.н} + p_{\text{в.т.н}} = 0.3p_{\text{МГ.н}} + 0.7p_{\text{МГ.н}},$$

где $p_{\Gamma.н}$ – потери от гистерезиса и вихревых токов $p_{\text{в.т.н}}$ в номинальном режиме.

Зависимость этих потерь от частоты определяется формулой

$$p_{\text{МГ}} = p_{\Gamma.н} \frac{f}{f_{\text{н}}} + p_{\text{в.т.н}} \left(\frac{f}{f_{\text{н}}} \right)^2, \quad (3)$$

где $f_{\text{н}}$ – номинальная частота переменного тока, Гц.

Согласно (2) магнитные потери изменяются пропорционально квадрату изменения индукции магнитного поля в сердечнике якоря (зубцах), а следовательно, и квадрату изменений магнитного потока. Кроме того, потери от гистерезиса пропорциональны:

- частоте перемагничивания стали сердечника якоря f , согласно (3);
- скорости вращения якоря:

$$n_2 = \frac{U_c - I_2 R_2}{c_e k_{\Phi} I_2} = \frac{U_c}{c_e k_{\Phi} I_2} - \frac{R_2}{c_e k_{\Phi}}, \quad (4)$$

где U_c – напряжение сети, к которой подключен двигатель, В; R_2 – активное сопротивление обмотки якоря, Ом; c_e – конструктивная постоянная двигателя; k_{Φ} – коэффициент пропорциональности между магнитным потоком в воздушном зазоре двигателя и током обмотки возбуждения.

Согласно (4), потери от гистерезиса также обратно пропорциональны току нагрузки I_2 .

Аналогичная цепочка рассуждений позволяет сделать вывод, что потери от вихревых токов пропорциональны квадрату частоты и, следовательно, обратно пропорциональны квадрату тока нагрузки.

В результате магнитные потери в двигателях последовательного возбуждения при любой нагрузке определяются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} p_{\text{МГ}} &= p_{\Gamma} + p_{\text{в.т}} = \\ &= k_{\Phi}^2 0.3 p_{\text{МГ.н}} \frac{1}{k_{\text{НГ}}} + k_{\Phi}^2 0.7 p_{\text{МГ.н}} \frac{1}{k_{\text{НГ}}^2} = \\ &= \left(\frac{k_{\Phi}}{k_{\text{НГ}}} \right)^2 p_{\text{МГ.н}} (0.3 k_{\text{НГ}} + 0.7). \end{aligned} \quad (5)$$

Механические потери $p_{\text{мех}}$ в машинах постоянного тока складываются из потерь от трения щеток о коллектор, трения в подшипниках и на вентиляцию [5]. Потери в подшипниках и на трение щеток о коллектор пропорциональны скорости вращения якоря двигателя. Потери на вентиляцию пропорциональны кубу скорости вращения якоря. При проектировании электрических машин каждая составляющая механических потерь рассчитывается отдельно. Приближенно можно считать, что суммарные механические потери пропорциональны квадрату частоты вращения [5] или обратно пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки

$$p_{\text{мех}} = p_{\text{мех.н}} \left(\frac{n_2}{n_{2\text{н}}} \right)^2 = \frac{p_{\text{мех.н}}}{k_{\text{НГ}}^2}, \quad (6)$$

где $n_{2\text{н}}$ – номинальная скорость вращения якоря; $p_{\text{мех.н}}$ – механические потери в двигателе последовательного возбуждения при номинальной нагрузке.

Электрические потери $p_{\text{эл}}$ в машине постоянного тока обусловлены прохождением тока по обмоткам возбуждения и якоря. Их значение зависит от квадрата значения проходящего тока, а также от активных сопротивлений обмотки якоря R_2 и обмотки возбуждения R_1

$$p_{\text{эл}} = I_{2\text{н}}^2 (R_2 + R_1).$$

Электрические потери также существуют и в контакте между щеткой и коллектором, при проводимом анализе данными потерями пренебрегаем ввиду их малости.

Кроме перечисленных потерь в машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь – добавочных. Эти потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнивательных соединениях, в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, и др. Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету

величину. Поэтому, согласно ГОСТу, значение добавочных потерь p_d принимают равным 0.5–1 % от подводимой мощности для двигателей.

Зависимость суммы электрических и добавочных потерь от нагрузки можно представить формулой

$$p_{\Sigma} + p_d = (p_{\Sigma,н} + p_{d,н}) k_{нг}^2, \quad (7)$$

где $p_{\Sigma,н}$, $p_{d,н}$ – электрические и добавочные потери в номинальном режиме соответственно.

В результате суммарные (полные) потери в двигателе последовательного возбуждения

$$p_{\Sigma} = p_{\Sigma} + p_d + p_r + p_{в.т} + p_{мех}.$$

Выразим все составляющие потерь (5)–(7) в двигателе последовательного возбуждения через коэффициент нагрузки:

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} &= p_{\Sigma,н} k_{нг}^2 + p_{d,н} k_{нг}^2 + p_{r,н} \frac{1}{k_{нг}} + \\ &+ p_{в.т,н} \frac{1}{k_{нг}^2} + p_{мех,н} \frac{1}{k_{нг}^2} = p_{\Sigma,н} k_{нг}^2 + p_{d,н} k_{нг}^2 + \\ &+ 0.3 p_{мг,н} \frac{1}{k_{нг}} + 0.7 p_{мг,н} \frac{1}{k_{нг}^2} + p_{мех,н} \frac{1}{k_{нг}^2} = \\ &= (p_{\Sigma,н} + p_{d,н}) k_{нг}^2 + 0.3 p_{мг,н} \frac{1}{k_{нг}} + \\ &+ (0.7 p_{мг,н} + p_{мех,н}) \frac{1}{k_{нг}^2} = (p_{\Sigma,н} + p_{d,н}) k_{нг}^2 + \\ &+ p_{r,н} \frac{1}{k_{нг}} + (p_{в.т,н} + p_{мех,н}) \frac{1}{k_{нг}^2} = \\ &= p_1 k_{нг}^2 + p_2 \frac{1}{k_{нг}} + p_3 \frac{1}{k_{нг}^2}, \quad (8) \end{aligned}$$

где p_3 – сумма потерь от вихревых токов и механических потерь.

Следовательно, все потери можно разделить на три группы:

1) зависящие от квадрата коэффициента нагрузки – это сумма электрических и добавочных потерь;

2) потери, значения которых обратно пропорциональны коэффициенту нагрузки, – это потери от гистерезиса;

3) потери, значения которых обратно пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки – это сумма потерь от вихревых токов и механические потери.

Необходимо отметить, что в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения отсутствуют постоянные потери, т. е. потери, не

зависящие от нагрузки, что не характерно, как для электрических машин постоянного, так и переменного тока.

С учетом полученных выражений (8) формулу, определяющую КПД двигателя последовательного возбуждения, можно записать в виде

$$\eta = \frac{P_1 - p_{\Sigma}}{P_1} = \frac{k_{нг} P_{1н} - p_1 k_{нг}^2 - \frac{p_2}{k_{нг}} - \frac{p_3}{k_{нг}^2}}{k_{нг} P_{1н}}.$$

Найдем значение коэффициента нагрузки, при котором КПД будет максимальным. Для этого определим производную

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial k_{нг}} &= \left[\left(P_{1н} - 2k_{нг} p_1 + \frac{p_2}{k_{нг}^2} + \frac{2p_3}{k_{нг}^3} \right) k_{нг} P_{1н} - \right. \\ &\left. - P_{1н} \left(k_{нг} P_{1н} - p_1 k_{нг}^2 - \frac{p_2}{k_{нг}} - \frac{p_3}{k_{нг}^2} \right) \right] / k_{нг}^2 P_{1н}^2 = \\ &= \left(P_{1н}^2 k_{нг} - 2k_{нг}^2 p_1 P_{1н} + \frac{p_2}{k_{нг}} P_{1н} + \frac{2p_3}{k_{нг}^2} P_{1н} - P_{1н}^2 k_{нг} + \right. \\ &\left. + k_{нг}^2 p_1 P_{1н} + \frac{p_2}{k_{нг}} P_{1н} + \frac{p_3}{k_{нг}^2} P_{1н} \right) / k_{нг}^2 P_{1н}^2 = \\ &= \frac{-k_{нг}^2 p_1 P_{1н} + 2 \frac{p_2}{k_{нг}} P_{1н} + \frac{3p_3 P_{1н}}{k_{нг}^2}}{k_{нг}^2 P_{1н}^2} = \\ &= \frac{-k_{нг}^2 p_1 + 2 \frac{p_2}{k_{нг}} + \frac{3p_3}{k_{нг}^2}}{k_{нг}^2 P_{1н}} = \frac{-p_1 + \frac{2p_2}{k_{нг}^3} + \frac{3p_3}{k_{нг}^4}}{P_{1н}}. \end{aligned}$$

Приравняем нулю числитель этой производной:

$$-p_1 + \frac{2p_2}{k_{нг}^3} + \frac{3p_3}{k_{нг}^4} = 0;$$

$$-k_{нг}^4 p_1 + 2p_2 k_{нг} + 3p_3 = 0; \quad (9)$$

$$p_1 k_{нг}^4 - 2p_2 k_{нг} - 3p_3 = 0.$$

Решение уравнения (9) определяет значение коэффициента нагрузки, при котором КПД двигателя последовательного возбуждения принимает максимальное значение.

Для численного подтверждения теоретически полученных результатов, разработана программа [6], позволяющая рассчитать составляющие общих потерь и КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

С помощью указанной программы рассчитаны потери и КПД двигателей последовательного воз-

Табл. 2. Каталогные данные двигателей последовательного возбуждения
Tab. 2. Catalog data of series-excited motors

Номер двигателя	U_n , В	$P_{2н}$, кВт	$n_{2н}$, об/мин	η_n , %	R_2 , Ом	R_1 , Ом
1	220	6.0	3000	82.5	0.359	0.0073
2	220	6.0	1500	82.0	0.470	0.0072
3	220	6.0	1000	83.5	0.491	0.0094
4	220	1.5	1500	78.5	2.450	0.160
5	220	19	1500	84.5	0.160	0.005

Табл. 3. Результаты расчета потерь и КПД двигателей последовательного возбуждения
Tab. 3. Results of calculation of losses and efficiency of series-excited motors

Номер двигателя	Параметр	$k_{нг}$											
		0.5	0.7	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
1	$p_{эл} + p_{д'}$, кВт	0.12	0.23	0.3	0.34	0.38	0.43	0.47	0.57	0.68	0.81	0.93	1.06
	$p_{мех}$, кВт	1.92	0.98	0.75	0.66	0.59	0.53	0.48	0.4	0.33	0.28	0.24	0.15
	$p_{мг}$, кВт	0.53	0.44	0.4	0.38	0.36	0.34	0.32	0.3	0.27	0.26	0.25	0.25
	p_{Σ} , кВт	2.57	1.65	1.45	1.39	1.34	1.3	1.27	1.27	1.29	1.34	1.43	1.52
	η , %	29.3	67.6	75.1	77.0	79.6	81.2	82.5	84.1	85.2	85.8	86.0	86.0
2	$p_{эл} + p_{д'}$, кВт	0.15	0.29	0.38	0.43	0.49	0.54	0.6	0.73	0.87	1.02	1.18	1.35
	$p_{мех}$, кВт	1.43	0.73	0.56	0.5	0.44	0.4	0.36	0.3	0.25	0.21	0.18	0.16
	$p_{мг}$, кВт	0.6	0.49	0.45	0.43	0.4	0.38	0.36	0.34	0.31	0.29	0.28	0.28
	p_{Σ} , кВт	2.18	1.52	1.39	1.36	1.33	1.32	1.32	1.36	1.42	1.52	1.65	1.79
	η , %	40.4	70.4	76.3	78.2	79.8	81	82	83.1	83.8	84	83.9	83.7
3	$p_{эл} + p_{д'}$, кВт	0.15	0.3	0.39	0.44	0.49	0.55	0.61	0.73	0.87	1.02	1.19	1.36
	$p_{мех}$, кВт	0.93	0.47	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.19	0.16	0.14	0.12	0.1
	$p_{мг}$, кВт	0.58	0.48	0.43	0.42	0.39	0.37	0.35	0.33	0.3	0.28	0.2	0.27
	p_{Σ} , кВт	1.66	1.25	1.18	1.17	1.17	1.17	1.19	1.25	1.33	1.38	1.58	1.73
	η , %	53.8	75.2	79.4	80.8	81.9	82.8	83.5	84.2	84.5	84.6	84.3	83.9
4	$p_{эл} + p_{д'}$, кВт	0.5	0.11	0.14	0.16	0.17	0.19	0.22	0.25	0.31	0.37	0.42	0.43
	$p_{мех}$, кВт	0.39	0.20	0.15	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
	$p_{мг}$, кВт	0.16	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
	p_{Σ} , кВт	0.61	0.44	0.41	0.41	0.40	0.41	0.41	0.43	0.46	0.50	0.55	0.6
	η , %	36.6	67.2	73.1	74.9	76.4	77.6	78.5	79.5	79.84	79.81	79.4	78.9
5	$p_{эл} + p_{д'}$, кВт	0.49	0.95	1.25	1.41	1.58	1.76	1.95	2.36	2.81	3.29	3.82	4.38
	$p_{мех}$, кВт	3.07	1.57	1.2	1.06	0.95	0.85	0.77	0.64	0.53	0.45	0.39	0.34
	$p_{мг}$, кВт	1.28	1.06	0.96	0.92	0.87	0.81	0.77	0.72	0.66	0.62	0.61	0.59
	p_{Σ} , кВт	4.84	3.58	3.4	3.33	3.39	3.42	3.49	3.71	4.0	4.37	4.82	5.32
	η , %	56.9	77.3	81.1	82.3	83.2	84.0	84.5	85.0	85.2	85.1	84.7	84.2

буждения различных мощностей и скоростей вращения, каталожные данные которых приведены в табл. 2, где U_n – напряжение на зажимах двигателя.

Результаты расчета потерь и КПД двигателей в зависимости от коэффициента нагрузки приведены в табл. 3.

Для наглядности полученных вычислительных результатов, представленных в табл. 3, построен график зависимости потерь и КПД от коэффициента нагрузки для двигателей № 1 (см. рисунок).

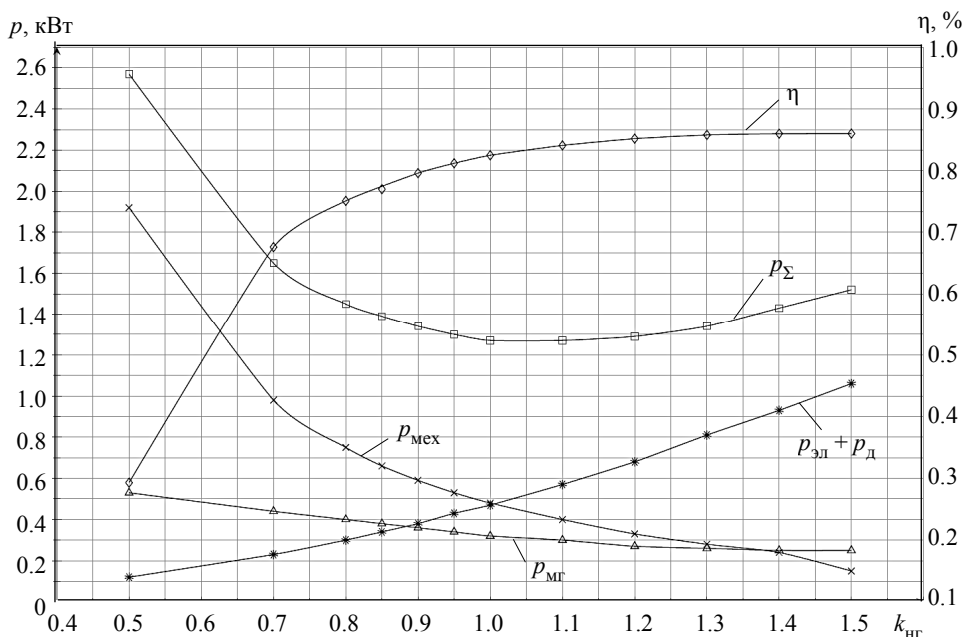
Графики зависимости потерь и КПД для остальных двигателей, расчетные данные которых представлены в табл. 3, имеют аналогичный вид.

Представленный материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Рассматривая вопросы потерь и КПД машин постоянного тока, проводят их анализ только применительно к машинам параллельного и независимого возбуждения.

2. Не проводится анализ потерь и КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, для которых не справедлива традиционная для электрических машин классификация потерь в зависимости от нагрузки.

3. Проведенный анализ составляющих полных потерь в двигателях последовательного воз-



Зависимости потерь и КПД от коэффициента нагрузки для двигателей № 1
 Dependence of losses and efficiency on the load factor for engines no. 1

буждения и их зависимости от нагрузки, показал, что все потери можно разделить на три группы:

1) зависящие от квадрата коэффициента нагрузки – это сумма электрических и добавочных потерь;

2) значения которых обратно пропорциональны коэффициенту нагрузки – это потери от гистерезиса;

3) значения которых обратно пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки – это сумма потерь от вихревых токов и механические потери.

Необходимо отметить, что в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения

отсутствуют постоянные потери, что не характерно для электрических машин как постоянного, так и переменного тока.

4. Анализ зависимости КПД двигателей постоянного тока последовательного возбуждения позволил сделать заключение, что нахождение коэффициента нагрузки, при которой КПД принимает максимальное значение, сводится к решению уравнения четвертой степени, это – особенность только указанного типа двигателей и не характерно для остальных типов электрических машин постоянного и переменного тока.

Список литературы

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
2. Дружинин В. В. Магнитные свойства электро-технической стали. 2-е изд. М.: Энергия, 1974. 238 с.
3. Плотников С. М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 54–58.
4. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, А. Н. Шишков, К. М. Виноградов, А. Н. Горюжанкин, А. Е. Бычков // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2010. № 14(190). С. 47–51.
5. Афанасов А. М. Выбор методов определения механических потерь тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока // Наука и прогресс транспорта. Вестн. Днепропетровского нац. ун-та железнодорожного транспорта. 2010. № 32. С. 151–154.
6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021681525 РФ. Расчетные исследования рабочих характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения / А. Г. Лавров, И. А. Овчинников, Е. А. Турлин. Заявл. 15.12.2021; опублик. 23.12.2021.

Информация об авторах

Дикун Ирина Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
 E-mail: iapimenova@etu.ru

Лавров Анатолий Георгиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: angelavr@mail.ru

Овчинников Илья Алексеевич – магистрант гр. 9404 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: edu.ilia.a@gmail.com

References

1. Vasjutinskij S. B. Voprosy teorii i rascheta transformatorov. L.: Jenergija, 1970. 432 s. (In Russ.).
2. Druzhinin V. V. Magnitnye svojstva jelektrrotehni-cheskoj stali. 2-e izd. M.: Jenergija, 1974. 238 s. (In Russ.).
3. Plotnikov S. M. Opredelenie poter' na vihrevye toki i na gisterezis v magnitoprovodah jelektricheskikh mashin // Izmeritel'naja tehnika. 2020. № 11. S. 54–58. (In Russ.).
4. Poteri v reguliruemyh jelektrprivodah pri raznyh zakonah upravlenija / Ju. S. Usynin, M. A. Grigor'ev, A. N. Shishkov, K. M. Vinogradov, A. N. Gorozhankin, A. E. Bychkov // Vest. JuUrGU. Ser. Jenergetika. 2010. № 14(190). S. 47–51. (In Russ.).
5. Afanasov A. M. Vybor metodov opredelenija mehanicheskikh poter' tjagovyh jelektrdvigatelej postojan-nogo i pul'sirujushhego toka // Nauka i progress trans-porta. Vestn. Dnepropetrovskogo nac. un-ta zheleznodo-rozhnogo transporta. 2010. № 32. S. 151–154. (In Russ.).
6. Svid. o gos. registracii programmy dlja JeVM № 2021681525 RF. Raschetnye issledovanija rabochih harakteristik dvigatelja postojannogo toka posledova-tel'nogo vozbuзhdenija / A. G. Lavrov, I. A. Ovchinnikov, E. A. Turlin. Zajavl. 15.12.2021; opubl. 23.12.2021. (In Russ.).

Information about the authors

Irina A. Dikun – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: iapimenova@etu.ru

Anatoly G. Lavrov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automa-tion of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: angelavr@mail.ru

Ilia A. Ovchinnikov – master's student of gr. 9404 of the Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: edu.ilia.a@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.03.2024; принята к публикации после рецензирования 27.01.2025; опу-бликована онлайн 28.03.2025.

Submitted 19.03.2024; accepted 27.01.2025; published online 28.03.2025.
