

УДК 621.313

Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложен метод схемного моделирования машин постоянного тока, построена схемная модель машины. Исследованы нагрузочные режимы машины как в качестве двигателя, так и генератора. Оценена эффективность этих режимов с точки зрения потерь мощности, даны рекомендации по их оптимизации.

Электрические машины постоянного тока широко распространены в технике, особенно в электроприводах, где необходимо глубокое и плавное регулирование скорости. Происходящее в электрических машинах преобразование энергии (либо механической в электрическую (генератор), либо, наоборот, в случае двигателя) связано, как и всякое другое преобразование энергии, с некоторыми ее потерями. Анализ потерь энергии и минимизация их имеют большое значение. Эти потери переходят, в конечном счете, в тепловую энергию, вследствие чего происходит нагрев машины. Кроме того, снижается общий коэффициент полезного действия (КПД). Поэтому актуальной является задача анализа этих потерь и выбора таких режимов работы машин, при которых потери будут минимальны.

По этой причине прогнозированию потерь и КПД при расчете и проектировании электрических машин и систем электроприводов уделяется первостепенное внимание, например, [1-3]. К настоящему времени подробно изучены процессы электрических потерь мощности в обмотках машин и на щеточных контактах, магнитные потери мощности в роторах машин, механические потери на трение и вентиляцию [3]. Результаты этих исследований позволили выработать общую методику расчета электромеханических и электромагнитных потерь и КПД, применение которой позволяет оптимизировать режим работы систем машин для различных условий. При переходных процессах целесообразно вводить динамические потери мощности и динамический КПД [2], которые подсчитываются на основании мгновенной мощности потерь

$$W_{\text{Д}} = \int_0^T u_i(t) i_i(t) dt \quad \text{и} \quad \text{затраченной энергии источников}$$

$$W_H = \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n E_i i_i(t) + \sum_{i=1}^m J_i u_i(t) \right] dt, \quad \text{где } n, m - \text{количества источников}$$

энергии. Кроме того, при наличии механических вращающихся частей необходимо учитывать затраты энергии на изменение угловой скорости

$$\text{вращающихся масс: } W_M = \int_0^{\Omega} \sum_{i=1}^n J_i d\omega, \quad \text{где } J_i - \text{моменты инерции.}$$

Как следует из вышеприведенных выражений, оценка основных электроэнергетических показателей электрических машин сопряжена со значительным объемом расчетов, что серьезно затрудняет как выбор оптимальных параметров машин, так и оптимальных по потерям режимов их работы. Существующие программные средства расчета потерь в системах машин [1] не обеспечивают достаточной точности и достоверности оценки как потерь, так и КПД. Кроме того, они требуют большого количества квалифицированного труда для постановки задачи и организации ее решения. В специализированных пакетах прикладных программ типа MatLab нет специальных средств для вычисления потерь энергии и КПД, что требует дополнительных, значительных усилий для организации расчетов по этим электроэнергетическим показателям.

Целью настоящей статьи является построение метода расчета основных электроэнергетических показателей электрических машин, которые позволили бы быстро, надежно и точно оценивать потери энергии и КПД машин в различных режимах их работы, и на этом основании выбирать оптимальный режим по минимуму потерь и максимуму КПД. Как показывают последние исследования [4], в наибольшей степени к решению этой задачи подходит метод схемного моделирования. Идея метода основана на построении схемной модели исследуемого объекта, в нашем случае – электрической машины, и затем автоматизированного расчета этой модели с помощью существующего программного обеспечения. Схемная модель представляет собой электрическую цепь, составленную из линейных и нелинейных сопротивлений, проводимостей, емкостей, индуктивностей, а также из независимых и управляемых источников тока и напряжения. Электрические процессы в этой цепи полностью соответствуют электромеханическим и электромагнитным процессам в электрической машине, а точность их вычисления зависит только от точности записи уравнений машины и точности принятого метода их численного решения.

Рассмотрим построение схемной модели машины постоянного тока в стационарном двигательном режиме, в основу которой положено уравнение якорной цепи

$$u_{щ} + r_a i_a + C\Phi\omega = U_a \quad (1)$$

и уравнение обмотки возбуждения $r_f i_f = U_f$, где $u_{щ}$ – падение напряжения под щетками; r_a, r_f, i_a, i_f – сопротивления и токи, соответственно, якоря и обмотки возбуждения; C – постоянная машины; Φ – магнитный поток; ω – угловая скорость; U_a, U_f – напряжения якоря и возбуждения. Момент, развиваемый двигателем, уравнивается моментом нагрузки и моментом трения

$$C\Phi i_a = M_n + M_T. \quad (2)$$

Для генераторного режима уравнения (1), (2) очевидным образом видоизменяются. В силу реакции якоря и насыщения магнитной цепи машины магнитный поток является нелинейной функцией двух переменных: тока якоря и тока возбуждения. Принимая аналитическую аппроксимацию кривой намагничивания холостого хода с помощью обратной тригонометрической функции $\Phi = a \arctg bF + cF$, получаем выражение для потока:

$$\Phi(F_f, F_a) = \frac{1}{F_a} \int_{F_f - 0,5F_a}^{F_f + 0,5F_a} (a \arctg bF + cF) dF.$$

Вычисляя интеграл, получаем окончательно

$$\Phi(F_f, F_a) = \frac{a}{F_a} \left(F_P \arctg bF_P - F_M \arctg bF_M + \frac{1}{2b} \ln \frac{\frac{1}{b^2} + F_M^2}{\frac{1}{b^2} + F_P^2} \right) + cF_f, \quad (3)$$

где $F_P = F_f + 0,5F_a$; $F_M = F_f - 0,5F_a$; $F_f = w_f i_f$; $F_a = k_a AS$; AS – линейная нагрузка якоря; k_a – обычно 0,3...0,4. Таким образом, уравнения (1)-(3) полностью описывают стационарный двигательный режим машины.

Потери мощности на трение в щетках оцениваются выражением [3]

$$Q_{щ} = \mu_{щ} p_{щ} SR\omega, \quad Bm, \quad (4)$$

где $p_{щ}$ – давление щетки на коллектор, зависящее от регулировки щеткодержателей и обычно принимаемое $2 \cdot 10^4 \frac{H}{M^2}$; S – площадь

щетоного контакта, которая оценивается по выражению $S = \frac{2I_N}{J}$, где I_N – номинальный ток якоря; J – принятая плотность тока под щетками; R – радиус коллектора; $\mu_{щ} = 0,2$. Таким образом, механические потери мощности под щетками пропорциональны угловой скорости, а момент трения – постоянная величина.

Вычисление потерь мощности на трение в подшипниках и на вентиляцию зависит от диаметра якоря. В машинах средней мощности с диаметром якоря меньше 500 мм и снабженных подшипниками качения рассматриваемые потери с достаточной степенью точности могут быть аппроксимированы зависимостью [3]

$$Q_{TB} = a\omega^2, Bm, \quad (5)$$

где коэффициент a зависит от диаметра якоря и при $D_a = 300$ мм может быть принят равным $a \approx 0,011 Bm \cdot c^2$.

Электрические потери мощности вычисляются по известным значениям токов в обмотках якоря и возбуждения и по сопротивлениям этих обмоток: $Q = \sum r_i I_i^2$; здесь же учитываются потери мощности в щеточном контакте $u_{щ} i_a$. Так как активное сопротивление обмоток зависит от температуры, а рабочая температура машины составляет $70 \dots 80^\circ C$, то сопротивления обмоток являются нелинейными элементами, зависящими от квадрата тока $r = r_{20}(1 + \alpha \Delta t^\circ I^2)$, что дает при $\Delta t = 55^\circ C$ выражение для сопротивления

$$r = r_{20}(1 + 0,215 I^2), \quad (6)$$

где r_{20} – сопротивление обмотки при $t^\circ = 20^\circ C$; α – температурный коэффициент (для меди $0,0039 \frac{1}{град}$); $\Delta t = 75^\circ - 20^\circ = 55^\circ$.

Дополнительные потери машины в проводниках на вихревые токи, вызванные укладкой якорной обмотки в пазах якоря, оцениваются выражением [3]

$$Q_\sigma = 3h^2 f^2 (10B_z - 16)^2 V \cdot 10^{-6} Bm, \quad (7)$$

где h – высота проводника, см; f – частота перемагничивания якоря, Гц; V – объем проводников в пазах; $f = \frac{p}{2\pi} \omega$, где p – число полюсов; B_z –

магнитная индукция в зубцах якоря, Тл: $B_z \approx 1,2 \frac{\Phi}{l_\sigma b_\sigma}$, где b_σ – расчетная полюсная дуга; l_σ – расчетная длина якоря. Таким образом, потери на вихревые токи в проводниках пропорциональны квадратам как угловой скорости, так и магнитного потока.

К электрическим потерям относятся также потери мощности на вихревые токи в коммутируемых секциях якорной обмотки. Эти потери учитываются увеличением сопротивления якорной обмотки в соответствии

с выражением $r_a' = r_a k_D$, где k_D – коэффициент Дюффинга [3], зависящий, как от угловой скорости, так и от высоты проводника. Для машин средней мощности с высотой проводника около 1 см этот коэффициент аппроксимируется выражением

$$k_D = 1 + a\omega^2, \quad a \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2. \quad (8)$$

Магнитные потери в машине возникают в якоре при его перемагничивании и состоят из потерь на гистерезис и на вихревые токи. Суммарные магнитные потери в сердечнике якоря при частоте перемагничивания f и магнитной индукции B приближенно определяются по выражению

$$Q_{\mu a} = \sigma_{\mu a} B^2 G_a, \text{ Bm}, \quad (9)$$

где G_a – вес сердечника якоря, кг; коэффициент $\sigma_{\mu a}$ зависит от частоты перемагничивания и от марки электротехнической стали. Суммарные магнитные потери в зубцах якоря вычисляются в соответствии с выражением (9) по среднему значению индукции в зубцах B_z и с коэффициентом $\sigma_{\mu z}$, т.е.

$$Q_{\mu z} = \sigma_{\mu z} B_z^2 G_z, \text{ Bm}, \quad (10)$$

где G_z – суммарный вес зубцов якоря. Типичные значения коэффициентов $\sigma_{\mu a}, \sigma_{\mu z}$ для стали Э4А вычисляются по выражениям: $\sigma_{\mu a} = \frac{f(f + 220)}{2300}$;

$\sigma_{\mu z} = \frac{f(f + 100)}{1700}$. Таким образом, суммарные магнитные потери в сердечнике и зубцах якоря пропорциональны квадрату магнитного потока, квадрату и первой степени угловой скорости.

В соответствии с основными уравнениями машины (1)-(3), трактуемыми на основании первого закона Кирхгофа, и с выражениями потерь (4)-(10) на рисунке 1 изображена полная схемная модель машины в стационарном двигательном режиме. На рисунке обозначены нелинейные проводимости: $g_1 = r_{oon}(1 + 0,215i_a^2)$ в соответствии с выражением (6), где r_{oon} – сопротивление дополнительных полюсов, g_3 пропорциональна квадрату разности $(\Phi - \Phi_0)^2$ в соответствии с выражением (7); линейные проводимости: $g_2 = a$ в соответствии с выражением (5), $g_4 = 1$; управляемые источники тока: $J_1 = r_{a20}(1 + 0,215i_a^2)k_D$ в соответствии с выражениями (6), (8), $J_2 = u_{\text{щ}} = a \cdot \arctg bi_a$ (аппроксимация вольтамперной характеристики щеточного контакта), $J_3 = C\Phi\omega$, J_6 пропорционален квадрату потока и первой степени угловой скорости в соответствии с выражениями (9), (10),

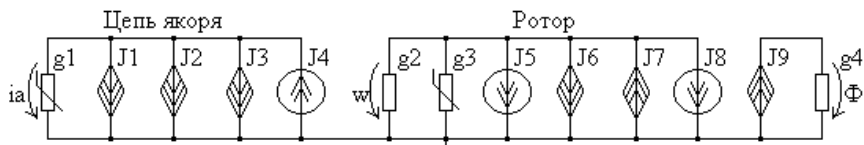


Рисунок 1 – Схемная модель машины постоянного тока в стационарном двигательном режиме

$J_7 = C i_a \Phi$, J_8 – магнитный поток в соответствии с выражением (3); независимые источники тока: $J_4 = U_a$, $J_5 = \mu_{ц} p_{ц} S R$ по выражению (4), $J_4 = M_n$.

Напряжения на проводимостях g_1 , g_2 , g_4 численно равны, соответственно, току якоря, угловой скорости и магнитному потоку. Мощность на проводимости g_1 соответствует потерям мощности в сопротивлении дополнительных полюсов; на источнике J_1 – потерям мощности в обмотке якоря; на источнике J_2 – потерям мощности в щеточном контакте; на проводимости g_3 – потерям мощности на вихревые токи проводника якоря. С учетом потерь на возбуждение все эти потери составляют суммарные электрические потери $Q_{эл}$. Магнитные потери $Q_{маг}$ имитируются потерями мощности на источнике тока J_6 , а механические потери $Q_{мех}$ – потерями мощности на проводимости g_2 и на источнике J_5 . Источник J_3 представляет противовзд двигателя, а источник J_7 – вращающий момент. Построенная схемная модель позволяет оперативно анализировать потери мощности и КПД машины в различных режимах работы и выбирать наиболее оптимальные из них. КПД в

случае двигателя вычисляется по формуле $\eta = 1 - \frac{Q_{\Sigma}}{P_1}$, где

$Q_{\Sigma} = Q_{эл} + Q_{маг} + Q_{мех}$ – общие потери энергии, $P_1 = U_a (i_a + i_f)$ – подведенная мощность. Для генератора $\eta = 1 - \frac{Q_{\Sigma}}{P_2 + Q_{\Sigma}}$, где P_2 – мощность, отдаваемая

генератором в нагрузку.

В качестве первого примера рассмотрим стационарный режим двигателя постоянного тока ДП62 мощностью 46 кВт, с напряжением 220 В, током 233 А, номинальной угловой скоростью 62,8 1/с, сопротивлением обмотки якоря 0,0212 Ом, сопротивлением дополнительных полюсов 0,012 Ом, сопротивлением обмотки возбуждения 44,4 Ом (все сопротивления приведены для температуры +20°C). На рисунке 2 изображены рабочие характеристики двигателя по схеме с независимым возбуждением, рассчитанные по схемной модели. Представлены зависимости тока якоря, потока, скорости, КПД, магнитных, электрических и общих потерь от момента нагрузки в относительных единицах. За базовые величины приняты номинальные значения тока, напряжения, скорости, мощности и момента. Из рисунка следует, что магнитный поток вследствие размагничивания при полуторократном моменте нагрузки заметно снижается, а электрические потери растут квадратично с моментом. Механические потери из-за постоянства скорости остаются постоянными и составляют около 0,4% (на рисунке не показаны). В общие потери

мощности включены и постоянные потери в обмотке возбуждения. Графики потерь $Q_{\text{маг}}$, $Q_{\text{эл}}$, $Q_{\text{общ}}$ для наглядности изображены увеличенными в 10 раз. КПД с ростом нагрузки быстро растет и достигает максимума (88%) при моменте 0,95 о.е. Эти данные находятся в хорошем соответствии с имеющимися в литературе [2,3]. С дальнейшим ростом нагрузки КПД снижается из-за квадратичного роста электрических потерь. Ток в якоре растет линейно до момента 1,8 о.е., далее из-за снижения потока его рост увеличивается. Наблюдается незначительный рост скорости при больших моментах нагрузки из-за снижения магнитного потока.

Рассмотрим потери энергии и КПД двигателя постоянного тока при распространенном способе регулирования скорости вращения увеличением сопротивления в цепи якоря. Естественно, что КПД при этом снижается, а потери растут. Оценим потери энергии при плавном увеличении дополнительного сопротивления, когда скорость уменьшается от номинальной до 0,05 о.е. Схемная модель отличается от изображенной на

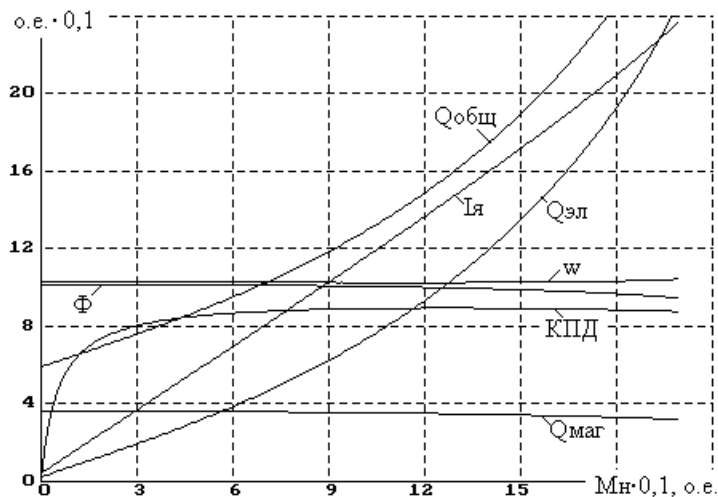


Рисунок 2 – Рабочие характеристики двигателя с независимым возбуждением

рисунке 1 тем, что параллельно нелинейной проводимости g_1 нужно подсоединить еще одну проводимость, численно равную дополнительному сопротивлению в цепи якоря. Эта проводимость изменяется от нуля, что соответствует работе на естественной характеристике, до 12, что соответствует уменьшению скорости до 0,05 о.е. Для оценки влияния характера нагрузки нагрузочный момент представлен в виде $M_n = k\omega^x$: при $x=0$ – постоянная нагрузка; $x=1$ – пропорциональная скорости; $x=2$ – пропорциональная квадрату скорости и т.д. Для имитации этой нагрузки вместо по-

стоянного источника тока J_8 на рисунке 1 подсоединяется нелинейный источник $J = k\omega^x$, где можно положить $k=1$, что составляет $M_n=1$ при $\omega=1$ в относительных единицах.

На рисунке 3 изображено семейство графиков зависимостей общих потерь в относительных единицах и КПД от скорости при различных значениях показателя x от 0 до 2,5 через 0,5. Значению $x=2,5$ соответствуют кривые общих потерь и КПД, помеченные цифрой 1. Каждая следующая кривая соответствует значению x , увеличенному на 0,5. Как следует из рисунка, при всех значениях x , кроме $x=0$, существует скорость, при которой общие потери будут максимальными. Точка максимума графиков общих потерь зависит от скорости и от показателя x . Она смещается в сторону меньшей скорости при уменьшении x , причем значение максимума увеличивается от 0,23 о.е. при $x=2,5$ и $\omega=0,8$ до 1,15 о.е. при $x=0$. КПД практически линейно падает с уменьшением скорости и слабо увеличивается при уменьшении x , например, при половинной скорости КПД увеличивается от 0,35 до 0,45 при уменьшении x от 2,5 до 0. Магнитный поток в процессе регулирования скорости остается

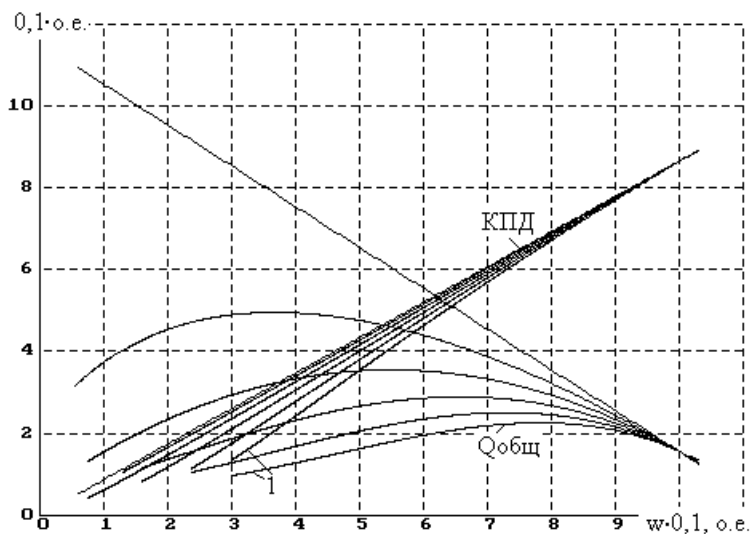


Рисунок 3 — Общие потери мощности и КПД двигателя

практически неизменным, наблюдается лишь его незначительный рост (до 5%) вследствие уменьшения влияния реакции якоря с падением тока в якорной цепи. Таким образом, подобное регулирование скорости не является экономичным и целесообразно лишь при неглубоком регулировании до 0,5 от номинальной при КПД до 0,4. Чем больше показатель x , тем

меньше потери, т.е. это регулирование оказывается более эффективным при сильной зависимости момента нагрузки от скорости. Особенно заметно снижение общих потерь происходит при изменении x от 0 до 2.

Оценим теперь рабочие характеристики машины в режиме генератора параллельного возбуждения, когда якорь вращается с неизменной скоростью $\omega = 1$. Схемная модель генератора отличается от изображенной на рисунке 1 тем, что в ней отсутствует часть, связанная с ротором, а проводимость, численно равная сопротивлению обмотки возбуждения $r_f = r_{f20}(1 + 0,215k^2 i_f^2)$ при $k = 47$, подсоединяется последовательно к проводимости, имитирующей сопротивление нагрузки генератора (которое подсоединяется вместо источника тока J_4).

На рисунке 4 изображены основные энергетические характеристики в относительных единицах генератора с параллельным возбуждением при изменении сопротивления нагрузки от 15 о.е. до 0,05 о.е. Для наглядности все потери и ток возбуждения изображены увеличенными в 10 раз. Из рисунка следует, что КПД достигает максимального значения 0,89 при токе нагрузки 0,9 о.е. При уменьшении сопротивления нагрузки от значения 0,66 о.е. машина начинает заметно размагничиваться, и при токе 1,55 о.е.,

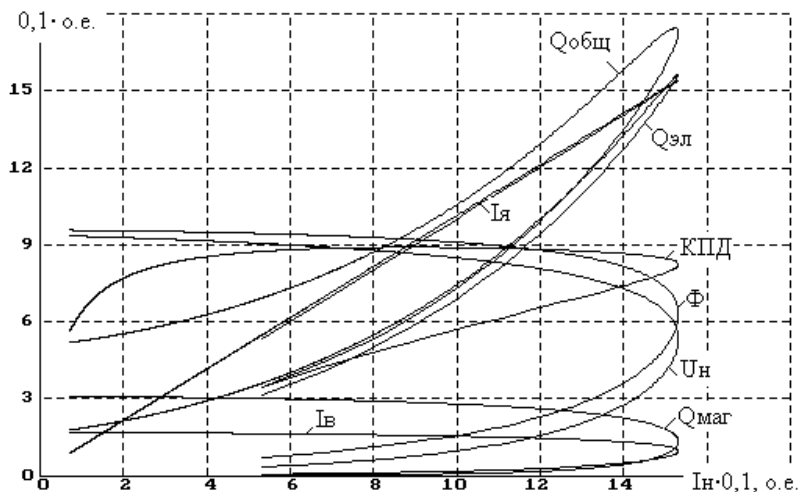


Рисунок 4 – Энергетические характеристики генератора с параллельным возбуждением

что соответствует сопротивлению нагрузки 0,32 о.е., происходит опрокидывание режима, которое завершается током короткого замыкания 0,25 о.е. Характерно, что до точки опрокидывания КПД падает медленно, его критическое значение составляет 0,8. Общие потери в точке опрокидывания со-

ставляют 0,18 о.е., причем на долю электрических потерь приходится 0,16 о.е. На рабочей и нисходящей части характеристики электрические потери близки, а различие в общих потерях объясняется уменьшением потерь в обмотке возбуждения и магнитных потерь при размагничивании машины после опрокидывания режима.

Таким образом, предложенный метод схемного моделирования и построенная схемная модель машины постоянного тока с учетом механических, магнитных и электрических потерь мощности достаточно адекватно отражают основные электромеханические и электромагнитные процессы в машине и пригодны для выбора и оптимизации режимов работы машины как в качестве двигателя, так и в качестве генератора. Подтверждены, в частности, условия наиболее экономичной работы машины при загрузке, несколько меньшей номинальной (0,9 ... 0,95) и эффективность неглубокого регулирования скорости двигателя при большой зависимости момента сопротивления от скорости.

Весьма перспективным развитием этого направления в дальнейшем является совершенствование схемной модели машины для более точного учета как электрических, так и магнитных потерь. Кроме этого, схемное моделирование может применяться для оценки эффективности режимов систем машин и динамических характеристик машин при переходных процессах, в частности, при импульсном управлении как со стороны напряжения якоря, так и со стороны напряжения обмотки возбуждения.

Автор выражает искреннюю признательность кап. перв. ранга, канд. техн. наук Алексееву В.Г. за интерес к работе и полезные обсуждения.

Библиографический список

1. Гольдберг О.О. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.О. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко. — М.: Высш. шк., 2001. — 512 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П.Копылов. — М.: Высш. шк., 2001. — 327 с.
3. Толвинский В.А. Электрические машины постоянного тока / В.А. Толвинский. — М.;Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 468 с.
4. Канов Л.Н. Схемное моделирование нелинейных электрических цепей переменного тока / Л.Н.Канов // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 41. — С. 151–155.

Поступила в редакцию 25.02.2004 г.