

УДК 621.313.017

Б.П. КАЛИНИН, В.А. МАТУСЕВИЧ

Государственное предприятие «Харьковское агрегатно-конструкторское бюро»,
УкраинаТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Предложена эквивалентная тепловая схема вентильных электродвигателей, работающих при кратковременных и повторно-кратковременных режимах нагружения. Схема позволяет рассчитать изменения температур частей электродвигателя при различных динамических режимах. Приведены результаты расчетов и сравнение с экспериментом.

вентильный электродвигатель, тепловой расчет, нестационарные режимы, теплообмен, обмотка статора, ротор

Любая электрическая машина с момента её изготовления и до конца срока службы испытывает различные нестационарные тепловые воздействия, влияние которых на ресурс зависит от длительности и степени нагрева активных частей машины.

Величина ресурса электрических машин, которые эксплуатируются в режимах кратковременного и повторно-кратковременного нагружения, полностью определяется именно нестационарными процессами нагрева-охлаждения. Тем не менее очень часто при проектировании таких машин не учитывается динамика теплового состояния активных частей.

В приводах различных систем летательных аппаратов всё большее распространение получают вентильные электродвигатели с высококоэрцитивными магнитами, что обусловлено их более высокими по сравнению с другими типами электродвигателей энергомассовыми характеристиками, а также высокой надежностью [1]. Характерной особенностью конструкции вентильных электродвигателей является наличие коммутатора, устанавливаемого, как правило, на корпусе электродвигателя. Условия теплообмена различны для частей корпуса, расположенных под коммутатором и вне его.

Эквивалентная тепловая схема (ЭТС) закрытого вентильного электродвигателя, работающего в ре-

жиме нестационарного нагружения, приведена на рис. 1.

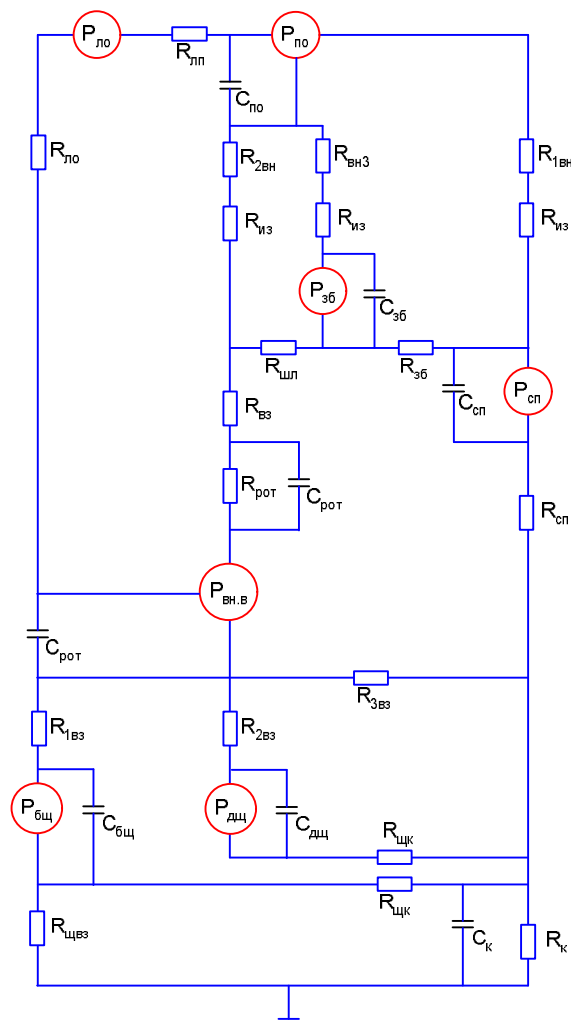


Рис. 1. Эквивалентная тепловая схема нестационарно нагруженного вентильного электродвигателя

В ЭТС включены следующие элементы:

1. Лобовая обмотка (на рис. 1 обозначена – ло).

Тепло $P_{\text{ло}}$, выделяющееся в лобовой обмотке, передаётся воздуху внутри электродвигателя, пазовой обмотке и идет на нагрев обмотки.

2. Пазовая обмотка (по). Тепло, выделяющееся в пазовой обмотке и пришедшее от лобовой обмотки, воспринимается сталью элементов статора и вызывает нагрев обмотки. Перенос теплоты осуществляется через внутренние термические сопротивления обмотки $R_{\text{вн,ф}}$, $R_{1\text{вн}}$, $R_{2\text{вн}}$, а также через термическое сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$.

3. Зубцы статора (зб). Теплота $P_{\text{зб}}$, выделяющаяся в зубцах, тепло от пазовой обмотки и тепло, которым зубцы статора через воздушный зазор обмениваются с ротором через термические сопротивления $R_{\text{кн}}$ и $R_{\text{вз}}$, передаётся спинке статора через термическое сопротивление $R_{\text{зб}}$.

4. Спинка статора (сп). В спинке статора выделяется теплота $P_{\text{сп}}$. Собственное тепло и тепло от пазовой обмотки и зубцов статора передается корпусу электродвигателя.

5. Корпус электродвигателя (к). Термическое сопротивление корпуса $R_{\text{к}}$ состоит из параллельно включенных сопротивления корпуса вне коммутатора и сопротивления корпуса под коммутатором.

6. Ротор (рот). В термическое сопротивление ротора включены термические сопротивления магнитов, бандажа и втулки, а также сопротивления теплоотдачи внутреннему воздуху от роторных лопаток и поверхностей каналов ротора.

7. Подшипниковые щиты (щ). Потери в подшипниках $P_{\text{щ}}$ и тепло, полученное от внутреннего воздуха, передаются корпусу и наружному воздуху.

8. Воздух внутри электродвигателя (вн. в). Внутренний воздух переносит внутренние вентиляционные потери $P_{\text{вн.в}}$ и тепло от лобовых частей об-

мотки и ротора подшипниковым щитам и корпусу электродвигателя.

Тепловая инерционность элементов ЭТС определяется их теплоёмкостью C_i .

Термические сопротивления ЭТС закрытого орб-рентного вентильного электродвигателя определялись по известным методикам [2, 3, 4].

При принятых для метода эквивалентных тепловых схем допущениях тепловой баланс i -го элемента ЭТС описывается следующим уравнением:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^k \frac{T_i - T_j}{R_{i,j}(T_i, T_j)} + P_i(T_i), \quad (1)$$

где T_i , C_i – средняя температура и теплоёмкость i -го элемента ЭТС;

k – количество элементов электрической машины, участвующих в теплообмене с i -ым элементом;

T_j – средняя температура j -го элемента ЭТС, обменивающегося теплом с i -ым элементом;

$R_{i,j}(T_i, T_j)$ – тепловое сопротивление;

$P_i(T_i)$ – мощность тепловыделений (потери) в i -ом элементе.

При выводе уравнений баланса тепла (1) было учтено:

- зависимость потерь в стали статора от изменяющейся во времени частоты вращения ротора;
- зависимость удельного электрического сопротивления обмотки от температуры
- термические сопротивления контактов «корпус электродвигателя – статор», «бандаж – магниты» и «магниты – втулка». зависимость величины натяга в стыках элементов электродвигателя от средних температур сопрягаемых элементов.

Определив из (1) производные по времени от средних температур, получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарное тепловое состояние электродвигателя. В матричном виде эта система может быть записана следующим образом:

$$\frac{d}{dt}T = A * T + B, \quad (2)$$

где T – вектор средних температур элементов;

A – матрица коэффициентов, элементы которой определяются соответствующими термическими сопротивлениями и теплоемкостями частей электродвигателя;

B – вектор свободных членов.

Для решения системы уравнений (2) может быть использован, например, метод Рунге-Кутты 4-го порядка. В результате решения получим изменение температур элементов электродвигателя при различных переходных процессах.

Были проведены расчеты электродвигателя мощностью 12 кВт, используемого в качестве привода насосной станции летательного аппарата. На рис. 2 приведен типовой цикл изменения потребляемого тока, а на рис. 3 – изменение температур лобовой и пазовой частей обмотки электродвигателя.

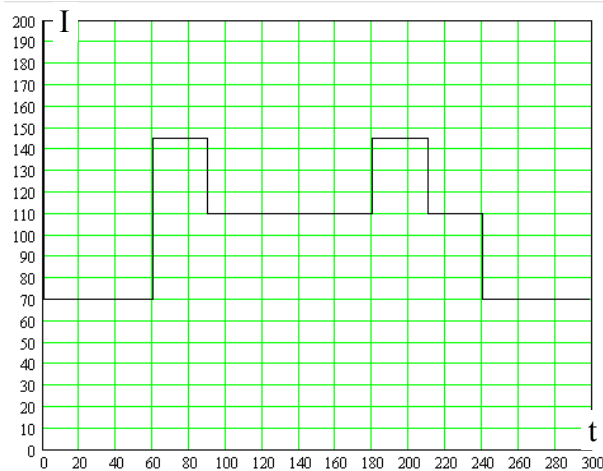


Рис. 2. Типовой цикл изменения потребляемого электродвигателем тока

Оценка адекватности математической модели производилась сравнением результатов расчетов и экспериментов (рис. 4).

Сравнение производилось по измеренным в эксперименте температурам поверхности изоляции лобовой обмотки. Отличие результатов расчетов и экспериментов не превысило 10%, что свидетельствует о приемлемой точности математической моде-

ли. Однако, наблюдается определенная закономерность в расхождении расчетов с экспериментом: при сравнительно малых нагрузках (потребляемый электродвигателем ток $I = 40$ А) скорость роста температур в эксперименте выше, чем в расчете (рис. 4, а); при высоких нагрузках ($I = 80$ А), напротив, скорость роста расчетных температур выше скорости роста температур, полученных в эксперименте (рис. 4, б).

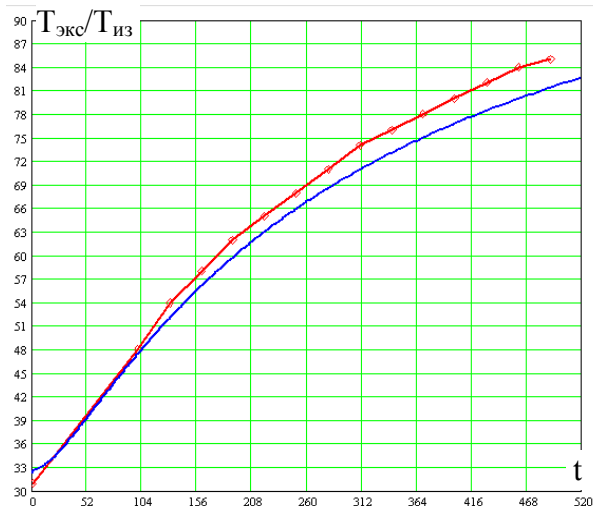


Рис. 3. Изменение температур лобовой и пазовой обмоток при отработке циклограммы

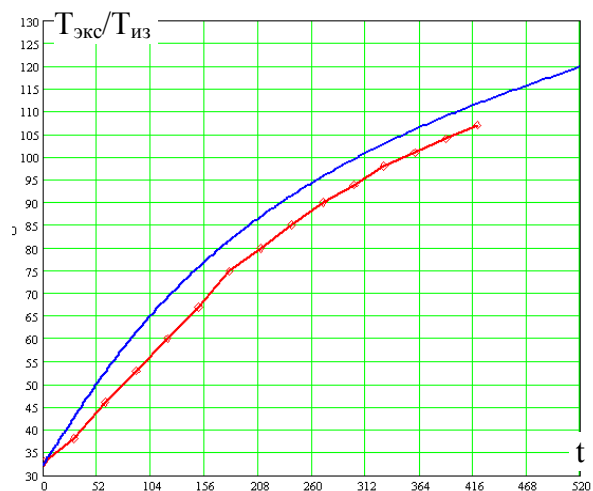
Полученные расхождения объясняются, очевидно, изменением в процессе нагрева элементов электродвигателя тепловых сопротивлений, главным образом, теплоотдачи к внутреннему и наружному воздуху. Для повышения точности математической модели необходим учет зависимости теплоотдачи от температур воздуха и теплоотдающих поверхностей, а также учет зависимости теплофизических характеристик материалов частей электродвигателя от температуры.

В принятой математической модели была учтена зависимость электрического сопротивления обмотки от температуры. Для оценки целесообразности принятого усложнения модели были проведены сравнительные расчеты, результаты которых приведены, в частности, на рис. 5. Расчет без учета изменения сопротивления обмотки и определения его по задаваемой средней температуре дает заниженные зна-

чения максимальных температур обмотки. При правильно выбранной средней температуре, по которой рассчитывается электрическое сопротивление, максимальная разница температур обмоток в проведенных по различным моделям расчетах не превысила 15 °С. Однако, как известно, такое занижение температур может существенно сказаться на сроке службы электродвигателя.



а



б

Рис. 4. Сравнение результатов расчета и эксперимента: а – потребляемый ток $I = 40$ А; б – потребляемый ток $I = 80$ А

Таким образом, разработана методика теплового расчета вентильных электродвигателей, работающих при кратковременных и повторно-кратковременных режимах нагружения. Методика позволяет рассчитать изменения при нестационарном

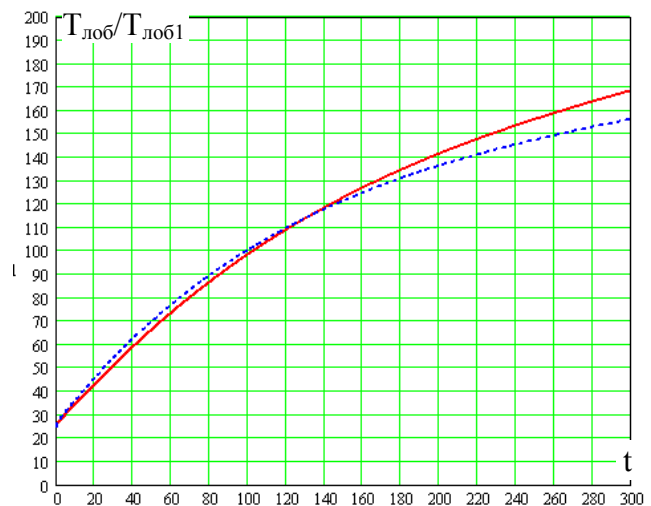


Рис. 5. Изменение температур лобовой обмотки: $T_{\text{лоб}}$ – расчет с учетом зависимости электрического сопротивления от температуры; $T_{\text{лоб1}}$ – расчет при постоянном электрическом сопротивлении

нагружении как средних температур обмоток, так и температур других частей электродвигателя.

Литература

1. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
2. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
3. Борисенко А.И., Счастливый Г.Г., Яковлев А.И. Исследование теплоотдачи в электрических машинах средней мощности // Электротехника. – 1965. – № 10. – С. 3 – 7.
4. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.

Поступила в редакцию 1.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Финкельштейн, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.