

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федоров М. М.

При серийном производстве трудоемкость контрольных операций при испытании электрических машин составляет до 13% трудоемкости изготовления электродвигателей [1]. Средние нормы на проведения приемно-сдаточных испытаний одной электрической машины средней мощности составляет от 3 до 35 ч. для различных типов машин, а на проведение приемочных испытаний от 48 до 250 ч. Применение автоматизированных систем испытаний позволяет более качественно и быстрее провести контрольные измерения. Использование ЭВМ для управления процессом испытаний, а также для обработки результатов — значительно интенсифицирует производственный процесс при одновременном повышении качества испытаний. Однако возможности суждения о тепловом состоянии АД, работающих в различных режимах ограничены. В программе приемно-сдаточных испытаний испытания на нагревание не предусмотрены. Проведение испытаний на нагревание предусмотрено во время приемочных и периодических испытаний, а также во время тепловых испытаний в случае изменения конструкции, параметров или технологии. Объем и методы испытаний установлены в ГОСТ2500-81. Необходимо отметить, что суждения о тепловых нагрузках образцов электрической машины, по результатам испытаний, предусмотренных государственным стандартом ограничены. Как правило, это температуры обмоток (или других частей машины) в длительном режиме S1 при номинальной нагрузке. Предусматриваются испытания и в кратковременном режиме S2 (30 мин, 60 мин), а также в повторно-кратковременном режиме S3 (обычно при продолжительности цикла $t_{ц}=10$ мин и продолжительностью включения ПВ 40 %, либо 15% и 25%). По специальному требованию заказчика государственный стандарт предусматривает тепловые испытания и в более сложных режимах, однако, это требует наличия специальных стендов, позволяющих создавать различный характер нагрузочных диаграмм.

В предлагаемой работе поставлена задача решения этих проблем с помощью хорошо зарекомендовавших себя многотельных эквивалентных тепловых схем (ЭТС) замещения электрических машин, подробно проанализирован характер протекания тепловых переходных процессов в различных узлах асинхронного двигателя. Для этого разработан метод прямого решения системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику теплового состояния, что позволило максимально исключить численные методы и дало возможность

более эффективно оценить влияние различных факторов по количественным и качественным характеристикам переходных процессов. Результаты теоретических исследований позволили разработать динамические тепловые модели отдельных узлов. Динамика теплового состояния в выбранном узле электрической машины описывается системой из двух дифференциальных уравнений

$$C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 \cdot (\lambda_{11} + \lambda_{12}) - \theta_2 \cdot \lambda_{12} = P_1, \quad (1)$$

$$C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \theta_2 \cdot (\lambda_{22} + \lambda_{12}) - \theta_1 \cdot \lambda_{12} = P_2, \quad (2)$$

где: θ_1 – превышение температуры в выбранном узле над температурой окружающей среды; λ_{11} , λ_{22} , λ_{12} – теплопроводности; C_1 и C_2 – теплоемкости; P_1 и P_2 – соответственно потери мощности в выбранном узле и суммарные потери в остальных частях электрической модели.

Важным преимуществом таких моделей является тот факт, что ее пассивные параметры (λ_{11} , λ_{22} , λ_{12} , C_1 и C_2), характеризующие массогабаритные показатели, одинаковы для всех машин одного типоразмера. Их величина изменяется только при изменении режима охлаждения. Так для АД с самовентиляцией различают теплопроводности при вращающемся роторе и неподвижном. Исходные данные для расчета пассивных параметров получают из результатов обработки кривых нагрева и охлаждения выбранных узлов машин, а также величины потерь в узлах АД. Эти данные могут быть получены на этапе приемочных испытаний и занесены в каталог для каждого типоразмера двигателя, как своеобразный “тепловой паспорт” электрической машины. Активные параметры модели, характеризующие мощность источников тепловыделения, индивидуальные для каждого двигателя и могут быть определены по результатам приемо-сдаточных испытаний и легко пересчитаны для произвольного режима работы. Для получения подробных электромеханических и тепловых характеристик АД необходимо на этапе приемочных испытаний произвести следующие опыты: измерения сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания и испытания АД под нагрузкой. Опыт холостого хода проводится при номинальном напряжении и других, позволяющих рассчитать характеристику холостого хода $E(I_0)$. В табл. 1 указаны измеряемые величины при проведении опыта холостого хода. В опыте, под нагрузкой на валу ротора, должен быть установлен момент сопротивления M_c , при котором ток в обмотке статора равен номинальному. При проведении опыта необходимо снять кривые нагрева $\theta_n(t)$ и охлаждения $\theta_{ох}(t)$ для тех узлов АД, для которых необходимо рассчитать параметры динамических тепловых моделей, поэтому опыт начинают с практиче-

ски холодного состояния. В процессе снятия кривых нагрева, ток в обмотке статора поддерживается постоянным. При достижении установившихся температур, необходимо произвести измерения указанные в таблице 2.

Таблица 1

№	Измеряемые величины	При U_H	При U
1.	Напряжение, В	U_H	U
2.	Мощность, потребляемая из сети, Вт	P_{OH}	P_O
3.	Ток холостого хода, А	I_{OH}	I_O
4.	Частота сети, Гц	f_l	f_l
5.	Частота вращения, об/мин	n_{OH}	n_O
6.	Скольжение, %	s_{OH}	s_O
7.	Температура обмотки статора, °С	θ_{1OH}	θ_{1O}

Таблица 2

№	Измеряемые величины	Ном. режим	Произв. режим
1.	Фазное напряжение, В	$U_{фH}$	$U_{ф}$
2.	Мощность потребляемая из сети, Вт	P_{1H}	P_1
3.	Ток статора, А	I_{1H}	I_1
4.	Частота сети, Гц	f_l	f_l
5.	Частота вращения, об/мин	n_H	n
6.	Скольжение, %	s_H	s
7.	Температура обмотки статора, °С	$\theta_{1 \text{ уст } H}$	$\theta_{1 \text{ уст}}$
8.	Момент сопротивления на валу	$M_{сH}$	M_c

После проведения измерений, двигатель останавливают и снимают кривые охлаждения для тех же узлов. Опыт короткого замыкания, проводится с целью определения пускового тока и учета скин-эффекта по изменению сопротивления обмотки ротора короткозамкнутого двигателя. Указанные выше величины, могут быть измерены с помощью обычных измерительных стендов. В этом случае их необходимо ввести в компьютер. Более предпочтительным в этом случае является автоматизированные установки, например, комплексно-механизированные станции типа СКП [2], когда измеряемые величины автоматически поступают в компьютер. В связи важную роль играет алгоритм последующей обработки результатов испытаний. Для расчета электромеханических характеристик АД по результатам опытов определяются потери и параметры Т – образной схемы замещения.

Исходя из предположения линейности механической характеристики $M(s)$ в интервале $0 \div s_n$ определяется момент холостого хода $M_{он}$ при номинальном напряжении.

$$M_{он} = M_{сн} \cdot s_{он} / (s_n - s_{он}). \quad (3)$$

Его величина равна электромагнитному моменту АД при холостом ходе и остается практически постоянной $M_{он} = M_0$ при изменении напряжения сети. Тогда электромагнитная мощность $P_{эм0}$ при холостом ходе равна

$$P_{эм0} = M_0 \cdot \omega_1, \quad (4)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1 / \rho$ – угловая частота вращения поля статора.

Механические потери $p_{мех}$

$$p_{мех} = M_0 \cdot \omega_0, \quad (5)$$

где $\omega_0 = 2\pi n_0$ – угловая частота вращения ротора при холостом ходу.

Потери в стали $p_{ст}$

$$p_{ст} = P_0 - 3(I_0)^2 R_1 - P_{эм0}. \quad (6)$$

где $R_1 = R_{10} (1 + \alpha\theta_1)$ – сопротивление обмотки статора при температуре в момент измерений.

Принимая во внимание, что угол сдвига по фазе между напряжением $U_{1ф}$ и э.д.с. E_0 при холостом ходе незначителен, определяем полное Z_1 и индуктивное X_1 сопротивление обмотки статора

$$Z_1 = R_1 / \cos \varphi_0; \quad (7)$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}. \quad (8)$$

Тогда э.д.с. E_0 при холостом ходе

$$E_0 = U_{1ф} - I_0 \cdot Z_1. \quad (9)$$

По результатам опыта холостого хода строятся зависимости $E(I_0)$ и $p_{ст}(E)$ в относительных единицах, при этом за базовые необходимо считать $E_{он}$, $I_{он}$ и $p_{стн}$, рассчитанные при номинальном напряжении. Полученные характеристики можно считать едиными (обобщенными) для всех двигателей одного типоразмера. Дальнейшие расчеты ведутся с использованием результатов опыта под нагрузкой. Целесообразно применить метод комплексных амплитуд.

Комплекс э.д.с. \underline{E} , согласно Т – образной схемы замещения, равен

$$\underline{E} = \underline{U}_{1\phi} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1. \quad (10)$$

где: $\underline{U}_{1\phi} = U_{1\phi}$, $\underline{I}_1 = I_1 \exp \varphi_1$, $\underline{Z}_1 = R_1 + j X_1$, $\cos \varphi_1 = P_1 / 3 U_{1\phi} I_1$.

Используя зависимости $E(I_0)$ и $p_{ст}(E)$ по величине E , определим I_0 и $p_{ст}$ при нагрузке АД, а затем рассчитаем параметры намагничивающего контура (R_0 и X_0) T-образной схемы замещения.

$$R_0 = p_{ст} / 3 (I_0)^2, \quad Z_0 = E / I_0, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j X_0. \quad (11)$$

Комплексы токов \underline{I}_0 и \underline{I}_2' соответственно равны

$$\underline{I}_0 = \underline{E} / \underline{Z}_0, \quad \underline{I}_2' = \underline{I}_1 - \underline{I}_0. \quad (12)$$

Комплексное приведенное сопротивление вторичного контура Z_{2s}' , а также R_2' и X_2' определяются из выражения

$$Z_{2s}' = R_2' / s + j X_2' = \underline{E} / \underline{I}_2'. \quad (13)$$

Потери в обмотке статора $p_{м1}$ равны

$$p_{м1} = 3 (I_1)^2 R_1. \quad (14)$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ и момент M

$$P_{эм} = P_1 - p_{м1} - p_{ст}; \quad (15)$$

$$M = P_{эм} / \omega_1. \quad (16)$$

Потери в обмотке ротора $p_{м2}$

$$p_{м2} = P_{эм} s. \quad (17)$$

Полезная мощность на валу

$$P_2 = M_c \omega. \quad (18)$$

Добавочные потери $p_{доб}$

$$p_{доб} = P_{эм} - P_2 - p_{м2} - p_{мех}. \quad (19)$$

Используя результаты обработки кривых нагрева и охлаждения определяют пассивные параметры динамических типовых моделей узлов, с помощью которых рассчитывают температурное состояние АД в различных режимах работы.

При расчете механической характеристики $M(s)$ можно воспользоваться параметрами Т – образной схемы замещения, однако для короткозамкнутых АД, особенно двухклеточных и глубокопазных, необходимо иметь зависимость $R_2'(s)$. В общем случае эта зависимость может быть определена формулой

$$R_2'(s) = R'_{20} \exp(\delta \sqrt{s}), \quad (20)$$

где R'_{20} – сопротивление обмотки ротора при $s = 0$; δ – коэффициент учитывающий вытеснение тока ротора в функции s .

Используя величины сопротивлений обмотки ротора в номинальном режиме $R'_{2н}$ (при $s = s_n$) и пусковом $R'_{2п}$ ($s = 1$), получаемого из результатов опыта короткого замыкания, а также принимая во внимание (20), формулы для определения δ и R'_{20} имеют вид

$$\delta = (\exp(R'_{2п} / R'_{2н})) / (1 - \sqrt{s_n}); \quad (21)$$

$$R'_{20} = R'_{2п} \exp \delta. \quad (22)$$

Характеристика холостого хода $E(I_0)$ и зависимость $r_{ст}(E)$ в относительных единицах, пассивные параметры тепловых моделей (λ_{11} , λ_{22} , λ_{12} , C_1 и C_2) различных узлов АД, а также δ , определяются массогабаритными показателями и едины для всех двигателей одного типоразмера. Их использование дает возможность судить об электромеханических и тепловых характеристиках в различных режимах работы каждого АД по результатам опытов, предусмотренных программой приемо-сдаточных испытаний. Алгоритм расчета может быть следующий.

1. Определяются параметры Т – образной схемы замещения.

Из опыта измерения сопротивления обмоток при постоянном токе определяется по величине R_1 . По формулам (7), (8), (9) определяют соответственно Z_1 , X_1 и $E_{он}$. Используя зависимости $E(I_0)$ и $r_{ст}(E)$ по формулам (11) определяют параметры намагничивающего контура. По величинам $R'_{2п}$ и δ с помощью (22) определяют R'_{20} , получив, таким образом, составляющие зависимости $R_2'(s)$.

2. Рассчитывают механическую $M(s)$ и другие характеристики (токи I_1 , I_0 , I_2 , электромагнитную мощность $P_{эм}$, мощность на валу P_2 , все виды потерь и др.) в функции скольжения s . При этом необходимо зафиксировать максимальный электромагнитный момент M_{max} и скольжение s_{max} , момент холостого хода (по величине s_0). Номинальный электромагнитный момент M_n (при токе $I_1 = I_{1н}$).

Для расчета указанных характеристик используются приведенные выше формулы, параметры Т-образной схемы, а также зависимость $R'_2(s)$.

3. Рассчитывают тепловые характеристики для заданного режима работы. Расчетные формулы получают из решения уравнений теплового состояния (1) и (2) для выбранных узлов АД. Активные параметры тепловых моделей (потери мощности), рассчитанные в предыдущем пункте, формируются в соответствии с нагрузочной диаграммой АД, а пассивные параметры хранятся в памяти ЭВМ.

Предлагаемая система автоматизированных испытаний и прогнозирования теплового состояния асинхронных двигателей позволяет дополнительно решить следующие задачи:

1. Расширить объем информации о тепловых нагрузках во всех режимах работы предусмотренных государственным стандартом (S1÷S8), по результатам приемочных, периодических и типовых испытаний.

2. Обеспечить возможность суждения о тепловых нагрузках каждой выпускаемой электрической машины по результатам приемо-сдаточных испытаний, снабдив ее тепловым паспортом, позволяющим судить о тепловом состоянии при любом характере нагрузки.

3. Прогнозировать тепловое состояние АД при изменении характера нагрузок.

Список литературы

1. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. М., ВШ., 1990.
2. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. М. ВШ., 1988.