

Е.А. Вареник, М.М. Федоров, В.Е. Михайлов

ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕПОДВИЖНОМ РОТОРЕ

Постановка проблемы. В различных режимах работы асинхронных двигателей (АД) имеют место паузы, когда ротор АД неподвижен. Тепловое состояние элементов конструкции двигателя в таких режимах в значительной мере определяется динамикой тепловых процессов. В зависимости от режима работы тепловые переходные процессы имеют определенные особенности.

В продолжительном режиме работы S1 температура элементов конструкции АД достигает установившегося значения и при отключении следует процесс охлаждения до температуры окружающей среды, который характеризуется кривыми охлаждения.

В кратковременном режиме S2 имеет место интенсивный нагрев до достижения предельно допустимой температуры в наиболее нагретом элементе конструкции АД. В момент отключения разность температуры между элементами конструкции двигателя больше, чем в режиме S1, что в значительной мере и определяет форму их кривых охлаждения.

Повторно-кратковременные режимы работы АД (S3, S4 и другие) характеризуются многообразием тепловых процессов, которые определяются различными их характеристиками (продолжительностью включения, продолжительностью цикла и пр.). В этих режимах наиболее важна динамика тепловых процессов при чередовании интервалов работы машины под нагрузкой при вращающемся роторе (происходит кратковременный нагрев), и интервалов пауз при неподвижном роторе (происходит кратковременное охлаждение). В этих случаях динамика тепловых процессов в значительной мере определяется начальными значениями температуры элементов конструкции АД в каждом цикле.

Интерес также представляет динамика тепловых процессов при неподвижном роторе АД с источниками тепла. Такие ситуации случаются в аварийных режимах (заклинивание ротора) и при проведении опытов короткого замыкания (КЗ).

Анализ публикаций. Тепловые переходные процессы в АД описываются системой уравнений на основе представления машины в виде отдельных узлов [1]. Это позволяет производить оценку теплового состояния различных элементов конструкции двигателя, используя переходные функции, которые могут быть получены из кривых нагрева и охлаждения [2]. В это же время нет обобщающей информации о динамике тепловых процессов при неподвижном роторе АД. Эти вопросы исследованы недос-

таточно и, в основном, по оценке кривых охлаждения обмоток в продолжительном режиме, что не дает объективную картину теплового состояния двигателя.

В этой связи рассмотрение методов анализа тепловых процессов в элементах конструкции АД при неподвижном роторе является актуальной задачей.

Цель статьи. Оценка динамики тепловых процессов различных элементов конструкции АД при неподвижном роторе. Получение аналитических выражений кривых охлаждения и, следовательно, переходных функций, использование которых позволяет проанализировать влияние различных факторов на особенности характеристик динамики тепловых процессов в элементах конструкции АД.

Результаты исследований. Важнейшим фактором, определяющим динамику теплового состояния электрической машины при неподвижном роторе, является выбор систем охлаждения и режим ее работы. В машинах с принудительным охлаждением форма кривых $\theta_{oxi}(t)$ зависит от массогабаритных показателей и режима работы систем охлаждения. В машинах с самовентиляцией, у которых при неподвижном роторе обдув отсутствует, форма кривых определяется массогабаритными показателями. Кроме того, важную роль играет начальное температурное поле машины $\theta_i(0)$. Эти факторы необходимо учитывать при решении уравнений теплового состояния.

Динамика тепловых переходных процессов в электрической машине во время пауз при неподвижном роторе описывается системой линейных дифференциальных уравнений, полученных с помощью динамической эквивалентной тепловой схемы замещения (ЭТС), которая основана на представлении электрической машины в виде схемы, состоящей из узлов и ветвей с тепловыми сопротивлениями и теплоемкостями [1]. В матричной форме эта система уравнений имеет вид:

$$\frac{d\theta}{dt} \cdot C + \lambda \cdot \theta = \theta, \quad (1)$$

где $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ – матрица-столбец (вектор) температуры узлов;

$C = (C_1, \dots, C_n)$ – диагональная матрица теплоемкостей размерностью $(n \times n)$;

$\lambda = (\lambda_{ij})$ – квадратная симметричная матрица взаимных и собственных тепловых проводимостей размерностью $(n \times n)$; n – число узлов ЭТС.

Для учета перечисленных выше факторов в уравнении (1) введены следующие корректировки. Правая часть уравнения (вектор потерь мощности) равна нулю. Коэффициенты матрицы $\lambda = (\lambda_{ij})$ пересчитаны с учетом изменения условий теплоотдачи при отсутствии вентиляции. Отсутствие вектора потерь мощности при решении уравнений означает неизменность постоянных времени экспонент и, следовательно, форма кривых охлаждения будет определяться начальным распределением температуры

$\theta_i(0)$ в узлах электрической машины.

Решение системы уравнений теплового состояния (1) в матричной форме имеет вид:

$$\theta_{ox} = \theta(0) \cdot a \cdot \exp(-t/T_{ox}), \quad (2)$$

где $\theta(0)$ – вектор начальных условий (температуры элементов конструкции электрической машины); $a = (a_{ij})$ – матрица постоянных интегрирования (удельного веса экспонент), определяемая начальными условиями; $\exp(-t/T_{ox})$ – матрица-столбец экспонент; $T_{ox} = (T_1 \dots T_n)$ – матрица постоянных времени экспонент; n – количество элементов конструкции электрической машины, выделенных в качестве узлов ЭТС.

Рассмотрим особенности динамики теплового состояния при охлаждении на примере АД типа МТН 312-6. На рисунке 1 приведена его динамическая ЭТС при неподвижном роторе.

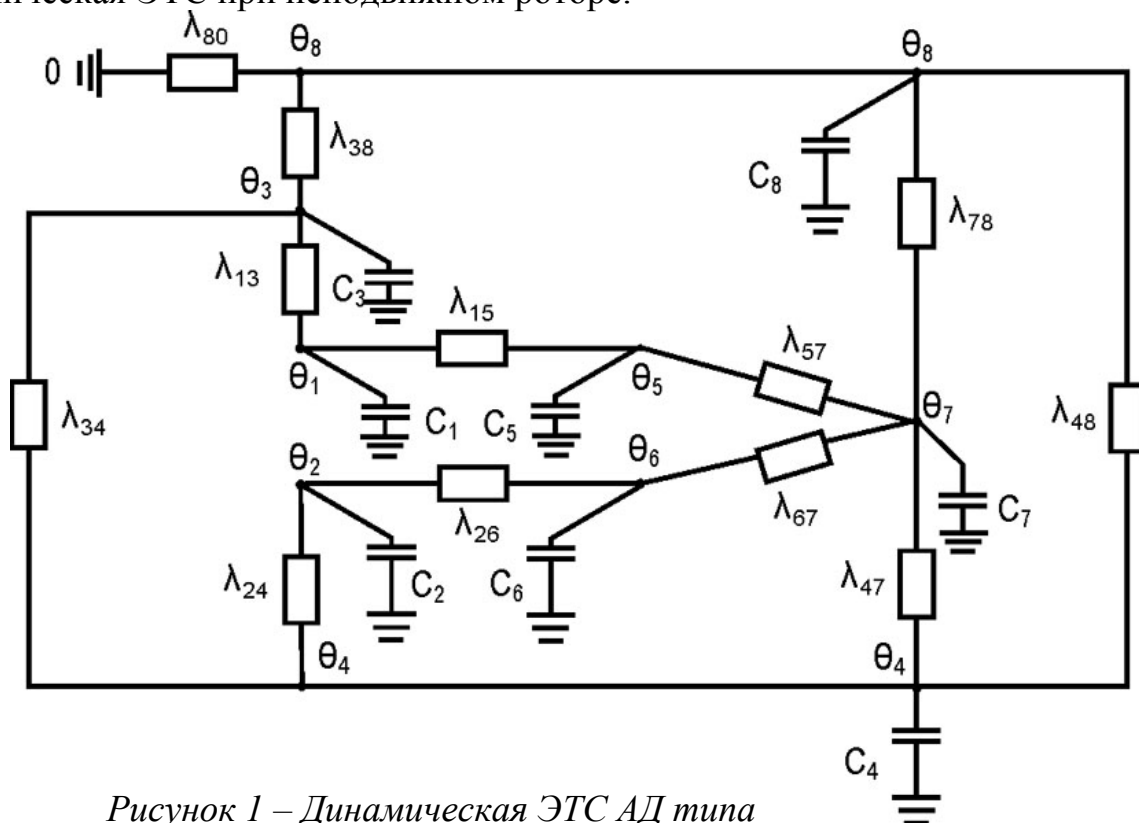


Рисунок 1 – Динамическая ЭТС АД типа МТН 312-6 при неподвижном роторе

В качестве узлов (тел) в ЭТС выбраны: 1 – пазовая часть обмотки статора; 2 – пазовая часть обмотки ротора; 3 – сердечник статора; 4 – сердечник ротора; 5 – лобовая часть обмотки статора; 6 – лобовая часть обмотки ротора; 7 – внутренний воздух; 8 – станина.

Поскольку рассматриваемый двигатель имеет самовентиляцию, то для его кривых охлаждения характерны все перечисленные выше особенности. Постоянные времена и коэффициенты удельного веса экспонент в уравнениях (2) для кривых охлаждения различных узлов АД, полученные в ре-

зультате решения уравнения теплового состояния (1), приведены в таблице 1. При этом вектор начальных условий принят равным принужденным составляющим (установившейся температуре) при номинальном режиме нагрева $\theta_{ox i}(0) = \theta_{н уст i}$. В расчетах для упрощения исключено уравнение для внутреннего воздуха вследствие его незначительного влияния на тепловые процессы.

Таблица 1

	Коэффициенты удельного веса экспонент кривых охлаждения узлов МТН 312-6 для постоянных времени T_j , мин, равных						
	0,29	0,32	1,3	1,4	4,1	38,8	174,3
$a_{ox 1j}$	0	0,03	0,017	0,069	0,161	0,069	0,654
$a_{ox 2j}$	0,017	0	-0,074	0,122	-0,032	0,11	0,857
$a_{ox 3j}$	0	0	0	-0,019	0,145	0,095	0,779
$a_{ox 4j}$	0	0	-0,056	0,064	-0,044	0,148	0,888
$a_{ox 5j}$	0	-0,022	0,062	0,084	0,125	-0,082	0,783
$a_{ox 6j}$	-0,015	0	0,07	-0,03	0,071	-0,494	1,378
$a_{ox 8j}$	0	0	0,037	-0,038	-0,318	0,026	1,293

Так же, как и при нагреве, в выражении (2) кривых охлаждения имеются экспоненты с большой ($T_{ox 7} = 174,3$ мин) и малыми постоянными времени. Большая постоянная времени примерно в три раза больше соответствующей постоянной времени при нагреве [2], следовательно, длительность переходного процесса при охлаждении возрастает в три раза.

На рисунке 2 приведены кривые охлаждения различных элементов конструкции АД, построенные по отношению к своим начальным значениям температуры, из которых следует, что форма кривых охлаждения в различных узлах АД отличается существенно. Так же, как и для кривых нагрева, наибольшее отличие имеет место на начальных этапах переходного процесса.

Следует обратить внимание на то, что наиболее нагретые элементы конструкции (лобовая и пазовая часть обмотки статора), имеющие относительно малую массу, на начальном этапе охлаждения имеют большую скорость снижения температуры, а менее нагретые элементы конструкции с большой массой (ротор, корпус) характеризуются замедленным процессом охлаждения на этом этапе. Это объясняется перераспределением температуры между различными элементами конструкции машины, причем градиент температуры направлен от более нагретых частей к менее нагретым. При этом температура некоторых элементов конструкции (ротор, корпус) на начальном этапе охлаждения снижается незначительно, а в некоторых случаях даже растет (кривая 8 на рисунке 2) на интервале времени в самом начале процесса.

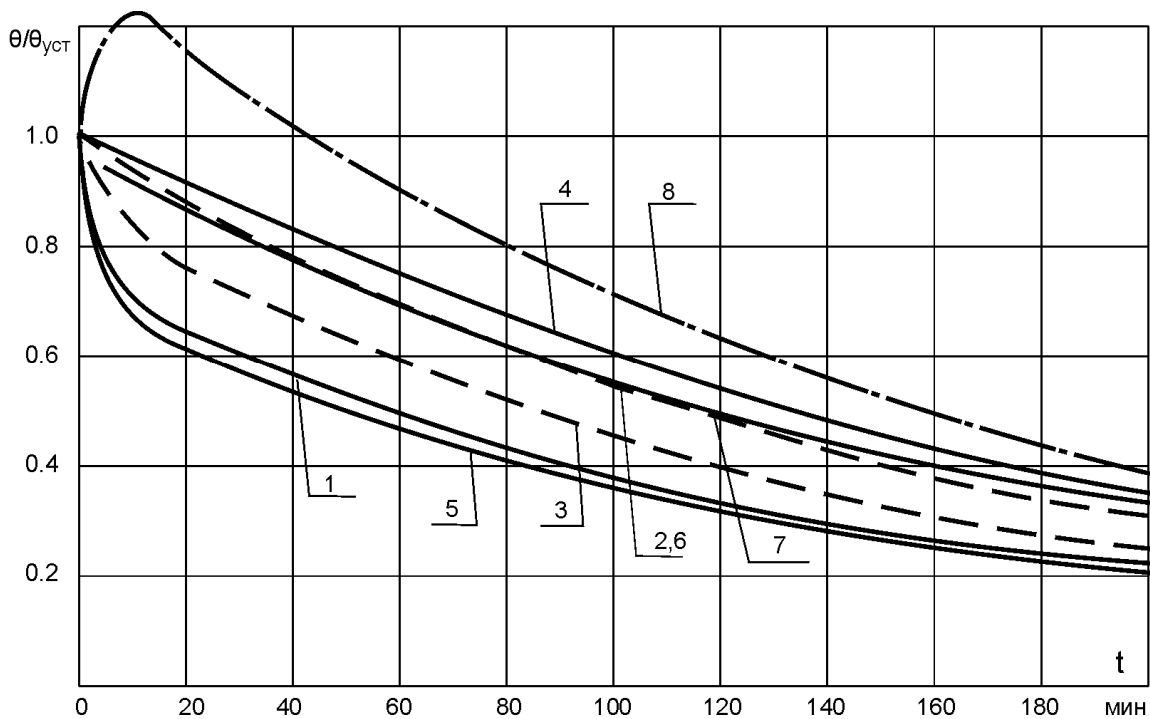


Рисунок 2 – Кривые охлаждения элементов конструкции (узлов ЭТС) для МТН 312-6 в относительных единицах

Это объясняется тем, что коэффициенты удельного веса экспонент с небольшими постоянными времени, характеризующие динамику теплового процесса на начальном этапе, для обмотки статора имеют относительно большие значения, а для ротора и корпуса – малые или даже отрицательные значения.

Скорость изменения температуры узлов ЭТС зависит от скорости изменения экспоненциальных составляющих, скорость изменения которых, в свою очередь, определяется отношением $a_{ij} / T_{ox j}$ (чем больше удельный вес экспоненты и чем меньше ее постоянная времени, тем больше скорость ее изменения).

В таблице 2 показано влияние различных экспоненциальных составляющих на скорость изменения температуры при $t = 0$. Здесь также приведены значения этой скорости в относительных $\sum a_{ij} / T_{ox j}$ и абсолютных $\theta_{уст i} \cdot \sum a_{ij} / T_{ox j}$ единицах в различных узлах ЭТС.

Анализ показывает, что скорость изменения температуры в обмотке статора (узлы 1, 5) значительно превышает скорость изменения температуры в других узлах ЭТС. А для узла 8 (корпус машины) эта скорость имеет отрицательный знак, что означает повышение температуры на начальном этапе. Для кратковременного режима работы S2 эта тенденция еще в большей мере проявляется в виде повышения температуры на начальном этапе охлаждения и других элементов конструкции (сердечника и обмотки ротора).

Таблица 2

	Скорость изменения температуры в узлах МТН 312-6 при охлаждении (коэффициент нагрузки $\beta=1$)						
	1	2	3	4	5	6	8
$-a_{ox\ i1}/T_{ox\ 1}$	0	0,0586	0	0	0	-0,052	0
$-a_{ox\ i2}/T_{ox\ 2}$	0,0937	0	0	0	-0,0687	0	0
$-a_{ox\ i3}/T_{ox\ 3}$	0,0131	-0,0569	0	-0,0431	0,0477	0,0537	0,0283
$-a_{ox\ i4}/T_{ox\ 4}$	0,0493	0,0871	-0,0136	0,0457	0,0603	-0,0216	-0,0271
$-a_{ox\ i5}/T_{ox\ 5}$	0,0393	-0,0078	0,0354	-0,0107	0,0305	0,0222	-0,0776
$-a_{ox\ i6}/T_{ox\ 6}$	0,0018	0,0028	0,0024	0,0038	-0,0029	-0,012	0,0007
$-a_{ox\ i8}/T_{ox\ 8}$	0,0036	0,0049	0,0045	0,0051	0,0079	0,0022	0,008
$-\sum -a_{ox\ ij}/T_{ox\ j}$	0,2008	0,0887	0,0287	0,0008	0,0756	-0,0075	-0,0682
$-\theta_{ycm\ i} \cdot \sum a_{ox\ ij}/T_{ox\ j}$	19,7	8,5	2,24	0,1	8,93	-0,73	-3,13

Существенное влияние на формы кривых охлаждения оказывает начальное распределение температуры в узлах электрической машины. Так при различных коэффициентах нагрузки в момент времени, когда температура пазовой (или лобовой) части обмотки статора АД достигает предельно допустимую, в остальных узлах температура будет значительно ниже при больших коэффициентах нагрузки. Поэтому, несмотря на тот факт, что постоянные времени экспонент в режиме охлаждения неизменны, форма кривых охлаждения существенно изменяется [2].

На рисунке 3 в качестве примера приведены кривые охлаждения обмотки статора МТН312-6 в относительных единицах при различных начальных распределениях температуры, полученных при нагреве с различными коэффициентами нагрузки β . Из рисунка 3 следует, что более интенсивное охлаждение имеет место при кривых, имеющих большую скорость нарастания температуры при нагреве (т.е. при $\beta = 2$). Общая продолжительность переходного процесса при этом изменяется незначительно, так как значения больших постоянных времени неизменны и их удельный вес наибольший. Изменение формы кривых на начальных этапах происходит из-за изменений коэффициентов удельного веса экспонент с малыми постоянными времени. Сами малые постоянные времени экспонент изменились незначительно, но влияние их коэффициентов удельного веса на форму кривых переходного процесса на начальных этапах процесса охлаждения более значительно, чем при нагреве.

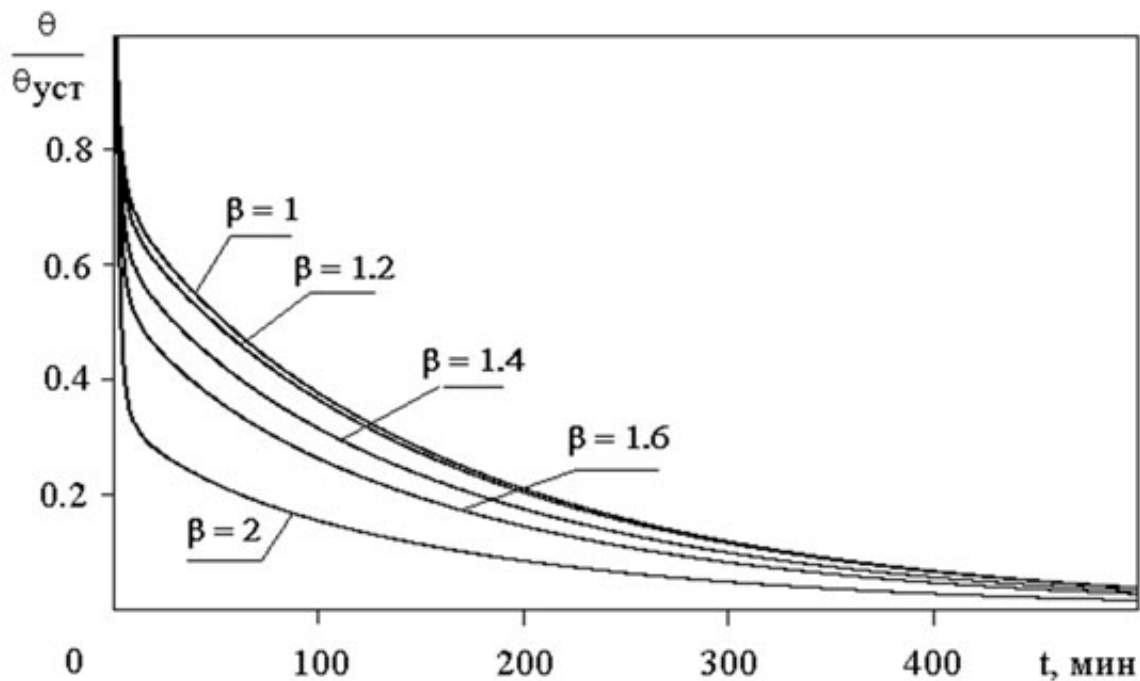


Рисунок 3 – Кривые охлаждения обмотки статора МТН 312-6 в относительных единицах для различных коэффициентов нагрузки при нагреве

Так же, как и в случае нагрева, кривые охлаждения могут быть описаны выражением с двумя экспоненциальными составляющими

$$\theta_{oxi}(t) = \theta_{устi} \cdot (a_{ox1i} \cdot \exp(-t/T_{ox1i}) + a_{ox2i} \cdot \exp(-t/T_{ox2i})). \quad (3)$$

Бóльшая постоянная времени T_{ox1i} и ее коэффициент удельного веса в выражении аппроксимированной кривой приняты равными соответствующей бóльшей постоянной времени и ее коэффициенту удельного веса, а малая постоянная времени T_{ox2i} и ее коэффициент удельного веса рассчитаны из условия неизменной скорости изменения температуры на начальных этапах переходного процесса [2].

В таблице 3 приведены эквивалентные малые постоянные времени и их коэффициенты удельного веса для различных элементов конструкции МТН 312-6.

Таблица 3

Номер тела	1	2	3	4	5	6	8
a_{ox2i}	0,346	0,143	0,221	0,112	0,237	-0,375	-0,293
T_{ox2i}	1,75	1,71	7,02	26	2,82	3,88	3,9

Аппроксимация кривых охлаждения двумя экспонентами возможна для любого элемента конструкции машины. При этом необходимо обратить внимание на то, что в (3) имеем $a_{ox1i} + a_{ox2i} = 1$ и для кривых охлаждения элементов конструкции машины с монотонно убывающей температурой эти коэффициенты положительны. Для кривых охлаждения элемен-

тов конструкции, у которых на начальном этапе имеет место возрастание температуры, коэффициент экспоненты с малой постоянной времени a_{ox2i} становится отрицательным (при этом $a_{ox1i} > I$).

Экспериментальные исследования подтверждают основные положения, полученные в результате расчетов тепловых процессов с помощью математической модели на основе ЭТС. На рисунке 4 приведены экспериментальные кривые нагрева и охлаждения обмотки статора МТН 312-6 в режиме КЗ с неподвижным ротором при номинальном токе и при двойном номинальном токе. Из результатов следует, что при номинальном токе режим КЗ при неподвижном роторе не опасен для изоляции обмоток, так как предельно допустимая температура в обмотке устанавливается только через 55 мин. При токе, равном $2 \cdot I_H$, интервал уменьшается до 3 мин. Этот факт важен для проведения опытов КЗ. Необходимо отметить, что опыт КЗ проводился и при токе статора, равном $3 \cdot I_H$. Допустимого предельного значения температура в обмотке статора при этом достигла через 1 мин.

Максимальная скорость изменения температуры $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{\max}$ кривых нагрева и охлаждения в опытах КЗ при $I_{КЗ} = I_H$ и $I_{КЗ} = 2 \cdot I_H$ в режиме нагрева составляла соответственно 0,197 и 0,798 град/с. При $I_{КЗ} = 3 \cdot I_H$ скорость нарастания температуры равнялась 2 град/с. Полученные результаты близки к расчетным и подтверждают прямую зависимость $\frac{d\theta(0)}{dt}$ от потерь, которые возрастали в квадратичной зависимости от β .

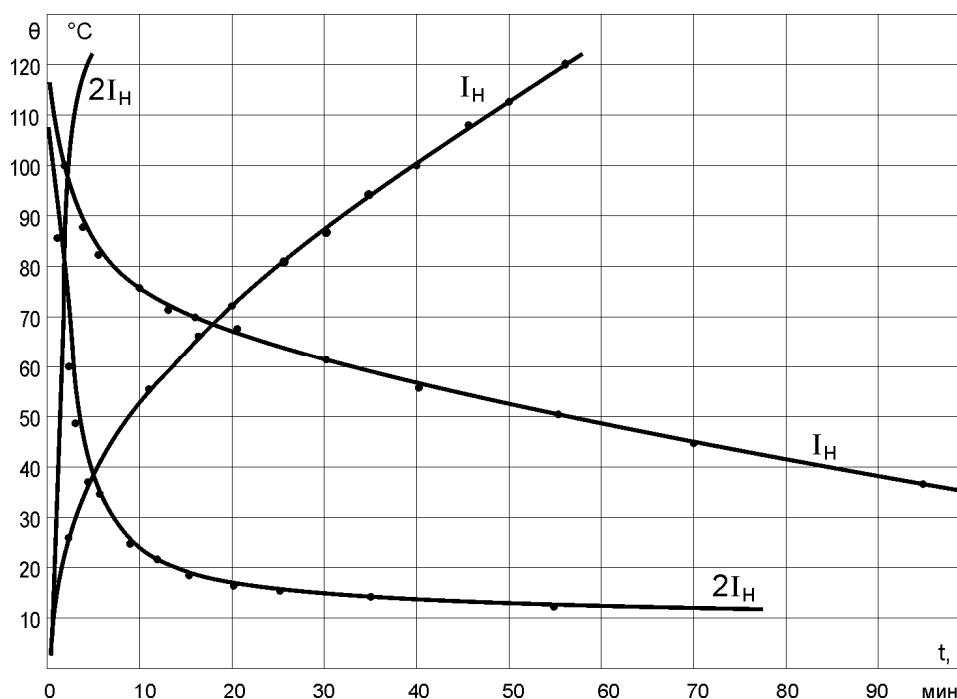


Рисунок 4 – Кривые нагрева и охлаждения МТН 312-6 при неподвижном роторе

Выводы:

1. Характер тепловых переходных процессов в режиме охлаждения имеет свои специфические особенности. На начальных этапах идет процесс выравнивания температурного поля АД. Более нагретые части двигателя (пазовые и лобовые части обмотки статора) интенсивно охлаждаются. В других узлах АД темп уменьшения температуры ниже, а в сердечнике ротора и корпусе температура вначале возрастает. В дальнейшем, по окончании действия экспонент с малыми постоянными времени, устанавливается постоянная разность температуры и скорость охлаждения выравнивается.

2. Кривые охлаждения также имеют интегральный характер и, построенные в относительных единицах, практически совпадают у различных машин одного типоразмера. С их помощью можно получить характеристики динамики тепловых процессов в режиме охлаждения для различных элементов конструкции электрических машин. Количественные показатели тепловых переходных процессов зависят от постоянных времени экспонент и их коэффициентов удельного веса. Скорость изменения температуры на начальных этапах переходных процессов является основным фактором, определяющим различие форм кривых охлаждения в узлах электрических машин.

3. Форма кривых охлаждения в узлах электрических машин изменяется в функции коэффициента нагрузки β , при этом его изменение оказывает влияние только на значение коэффициентов удельного веса экспонент, которые существенно зависят от начального распределения температуры узлов.

4. Кривые охлаждения в узлах электрических машин могут быть аппроксимированы выражением с двумя экспоненциальными составляющими. При этом экспонента с большой постоянной времени определяет общую продолжительность переходного процесса, а экспонента с малой постоянной времени – скорость изменения температуры на начальных этапах.

Список литературы

1. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Расчетные модели нестационарных тепловых процессов в обмотках электрических машин // Электротехника. – 1975.- № 12. - С. 35 - 38.
2. Вареник Е.А., Федоров М.М., Михайлов В.Е. Особенности процессов нагревания элементов конструкции асинхронных двигателей // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. –Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008.-С.89-95.