

ГЛАВА 3. НАГРЕВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АД

3.1. Расчет потерь асинхронного двигателя при несинусоидальном напряжении питания

Основными источниками тепла АД являются потери мощности P_i , сосредоточенные в соответствующих узлах эквивалентной тепловой схемы замещения ЭТС. Источниками тепла в статоре (рис.3.9) являются лобовая часть с потерями $P_L=P_1$, пазовая часть с потерями $P_{II}=P_2$ и магнитопровод статора с потерями $P_{CT}=P_3$. Электрические потери в них определяются по формулам: для лобовой части обмотки статора[4].

$$P_L = P_{\Sigma} L_L / (L_L + L_{II}). \quad (3.1)$$

где $P_{\Sigma} = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s$ - электрические потери в обмотке статора, I_s - ток статора, R_s - активное сопротивление статора, L_L - длина лобовой части обмотки; L_{II} - длина пазовой части; для пазовой части обмотки статора

$$P_{II} = P_{\Sigma} \cdot L_{II} / (L_L + L_{II}), \quad (3.2)$$

для магнитопровода статора, включающего ярмо и зубцы, источником тепла являются потери в стали и добавочные потери

$$P_{CT} = P_{CZ} + P_{CJ} + P_{C.Д} + P_{ДОБ}, \quad (3.3)$$

где P_{CZ} и P_{CJ} - основные потери в зубцах и ярме; $P_{C.Д}$ - добавочные потери в ярме статора, $P_{ДОБ}$ - добавочные потери определяемые согласно ГОСТ как $P_{ДОБ} = 0,005 P_I$, где P_I - активная мощность, потребляемая АД из сети. Отметим, что при расчете электрических и магнитных потерь следует учитывать потери от высших гармоник источника питания, так как частотные преобразователи имеют несинусоидальную форму напряжения[4].

Потери в стали, рассчитываются по выражению

$$P_{cm}(f) = 1.7 p_{1.50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} B_m^2 G \quad (3.4)$$

где $p_{1.50}$ -удельные потери данной марки стали при частоте $f=50$ Гц и индукции $B_m=1$ Т, B_m – амплитуда индукции соответствующего участка магнитной цепи (Т), f - частота изменения индукции (Гц), G – масса участка (кг).

Потери в роторе $P_r=P_5$ включают электрические потери в короткозамкнутой обмотке ротора - $P_{\Sigma 2} = 3I_r^2 R_r$, где I_r - ток и R_r - активное сопротивление ротора, и добавочные потери в зубцах- P_{czr} . [18][24].

Внутренние механические потери, состоящие из потерь на трение в подшипниках и вентиляционных потерь, пропорциональны квадрату частоты вращения ротора $P_{mex} = Kn_r^2$, где K - коэффициент пропорциональности. Полагая, что половина механических потерь идет на нагревание внутреннего воздуха (узел 4), а другая половина на нагревание корпуса (узел 6), включаем эти потери в узлы 4 и 6, т.е. $P_4=P_6=0,5P_{mex}$.

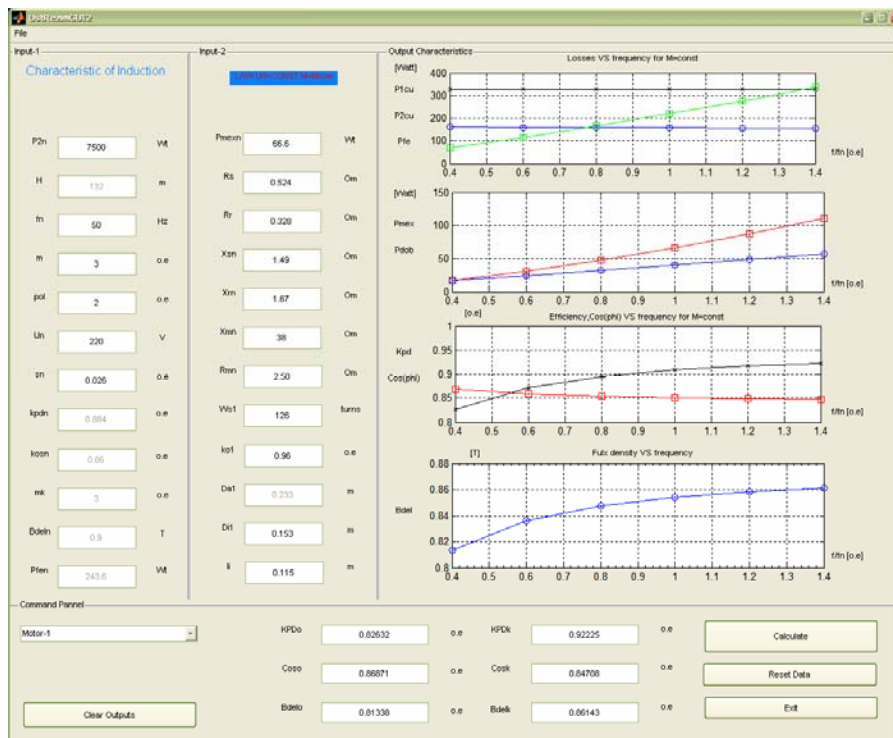


Рис 3.1. Виртуальная программа для расчетов характеристики АД
(зависимости потерь от частоты)

3.2.Тепловые режимы работы электрических машин.

Нагрев электрической машины является одним из факторов, определяющих ее рациональное использование. Чрезмерный нагрев обмотки статора электродвигателя вызывает преждевременное старение изоляции, пробой и выход его из строя.

Таким образом, вопросы расчета нагрева электродвигателя, в частности температуры статорных обмоток, становятся первостепенными при оценке возможности использования асинхронных двигателей (АД) в частотно-регулируемом электроприводе. Нагрев частотно - регулируемых электродвигателей происходит по более сложным законам, нежели двигателей, работающих при постоянных параметрах питания: напряжении и частоте. Это обусловлено следующими факторами[2]:

- потери в отдельных частях двигателя зависят не только от нагрузки на валу, но и от изменяющихся параметров питания;

- конвективные сопротивления обдуваемых поверхностей электродвигателя изменяются с изменением частоты вращения ротора, причем по различным законам;

- из-за изменения потерь, а также тепловых сопротивлений, передающих тепло от одного тела к другому, изменяется и влияние отдельных составляющих потерь на нагрев обмотки статора.

Кроме этого частотно- регулируемый двигатель может работать не в режиме S1 с неизменной нагрузкой, при которой достигаются установившиеся температуры активных частей машины, а в динамических режимах S2-S8, для которых характерны частые пуски, различные способы торможения и реверсы.

Поэтому важным является обоснование метода расчета тепловых режимов двигателя с учетом указанных выше особенностей его работы.

Установившиеся тепловые процессы асинхронных двигателей закрытого обдуваемого исполнения достаточно подробно рассмотрены в литературе. В то же время сложность точного математического описания тепловых процессов приводит к большому количеству методик на основе допущений различного уровня, которые дают несколько отличные друг от друга результаты [2].

Переходные тепловые процессы исследованы не в полной мере, поэтому разработка методики нестационарных тепловых процессов достаточно актуальна для двигателей, которые постоянно работают в переходных режимах. Так на практике нередко применяют метод средних за цикл потерь, состоящий в определении среднеквадратичных тока и момента, которые справедливы для ряда частных случаев. Однако потери в различных элементах асинхронного двигателя (АД) по-разному влияют на нагрев обмотки статора и при частотном управлении соотношение потерь, как отмечено выше, может значительно изменяться.

На практике режимы работы машин классифицированы в стандарте ГОСТ 183-74, устанавливающем восемь типов номинальных режимов S1... S8[2].

Продолжительный режим S1. Продолжительный конвекцией наиболее часто встречающийся на режим (ПР) (при номинальной нагрузке) машины в течение времени, за которое практически достигается установившаяся температура, является основным режимом. Такой режим рассчитывается как стационарный, а его начальная нестационарная часть не рассматривается

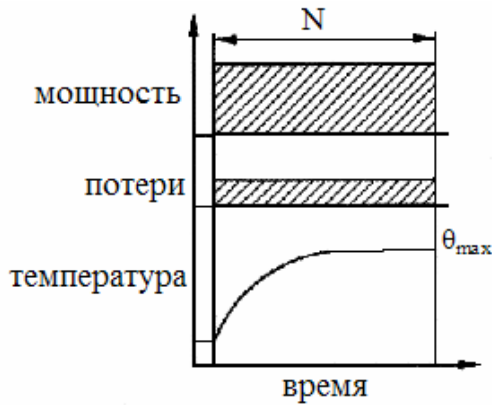


Рис.(3.2) Режим S1.

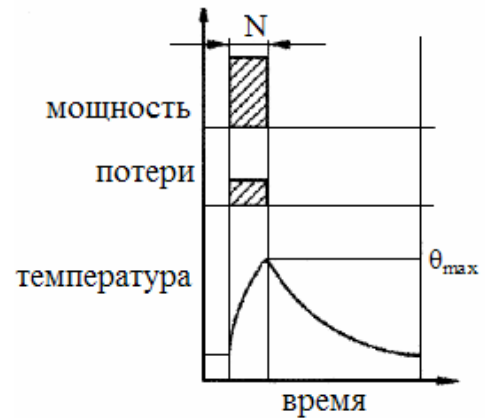


Рис.(3.3) Режим S2.

Кратковременный режим S2 - характеризуется работой машины при нагрузке, продолжающейся менее чем необходимо для достижения температурами отдельных частей ЭМ, своих установившихся значений при постоянной температуре окружающей среды.

Времени последующего отключения достаточно для охлаждения всех элементов ЭМ до первоначальной температуры. ГОСТ 183-74 устанавливает длительность периода номинальной нагрузки: 10, 30, 60 и 90 мин[2].

Повторно-кратковременный режим S3- последовательность идентичных циклов работы, каждый из которых включает время работы N при неизменной нагрузке, за которое машина не нагревается до установившейся температуры, и время паузы R , за которое машина не охлаждается до температуры окружающей среды[2].

Времена работы N , паузы R и цикла $t_{\text{ц}}$ находятся в следующих соотношениях:

$$N + R = t_{\text{ц}} \quad (3.5)$$

Для относительной продолжительности включения (**ПВ%**) установлены стандартные значения: 15, 25, 40, 60%. Время цикла $t_{\text{ц}} = 10 \text{ мин}$, если не

указано другое значение

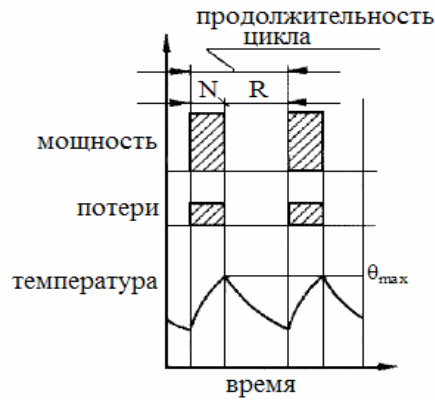


Рис.(3.4) Режим S3.

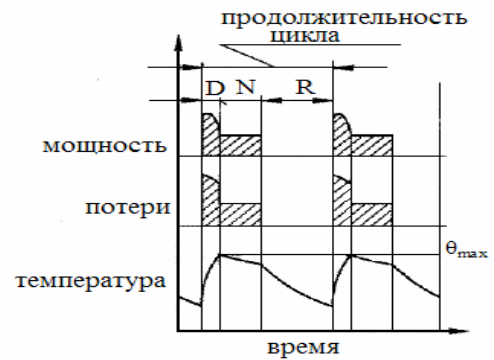


Рис.(3.5) Режим S4.

Повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками S4 - последовательность идентичных режимов работы, каждый из которых включает время пуска D , время работы при постоянной нагрузке N , за которое двигатель не нагревается до установившейся температуры, и время стоянки K , за которое двигатель не охлаждается до температуры окружающей среды.

Допустимое число пусков в час Z двигателя, имеющего динамический момент инерции $J_M, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, работающего в режиме S4 со статической нагрузкой на валу, определяемой мощностью $P_2, \text{ кВт}$, и динамической нагрузкой, определяемой динамическим моментом инерции приводной машины $J_{EXT}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, ориентировочно можно определить по формулам [2]

$$Z = Z_0 \cdot \frac{K_M \cdot K_F}{F_j}; \quad K_M = 1 - \frac{m_{ст.ср}}{m_{дср}}; \quad K_F = 1 - \left(\frac{P_2}{P_{2H}} \right)^2 \cdot \frac{(1-K_0) \cdot \frac{P_2}{100}}{(1-K_0) \cdot \frac{P_2}{100} + (1 - \frac{P_2}{100}) \cdot \theta_0};$$

$$F_j = \frac{J_M + J_{EXT}}{J_M}; \quad m_{дср} = \frac{m_D + 2 \cdot m_N + m_M + 1}{6}; \quad (3.6)$$

где Z_0 - допустимое число пусков в час двигателя без статической и динамической нагрузки на валу;

$m_{ст.ср}$ - относительное значение среднего за время разгона статического момента на валу двигателя;

$m_{дср}$ - относительное значение среднего за время разгона момента

вращения двигателя.

Время разгона двигателя D , до номинальной скорости вращения n_1 определяется по формуле:

$$D = 0.109 \cdot \left(\frac{n_1}{100} \right) \frac{I_M + I_{EXT}}{P_{ЭД}} \cdot \frac{1}{\eta_{ЭД,ср} - \eta_{ГТ,ср}} ; \quad (3.7)$$

Повторно-кратковременный режим с частыми пусками и электрическим торможением S5 - режим, включающий в себя те же элементы, что и S4 с дополнительным периодом F быстрого электрического торможения.

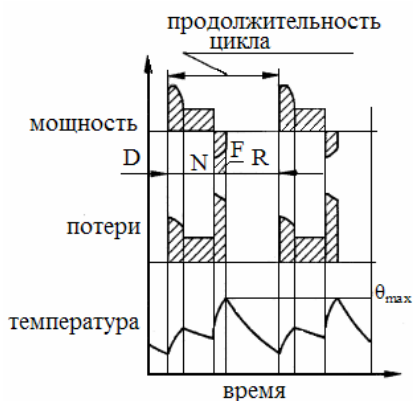


Рис.(3.6) Режим S5.

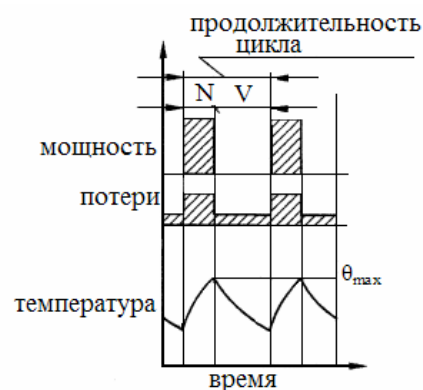


Рис.(3.7) Режим S6.

Перебегающий режим S6- последовательность идентичных циклов, каждый из которых включает время работы N с постоянной нагрузкой и время работы на холостом ходу V , причём длительность этих периодов такова, что температура двигателя не достигает установившегося значения[2].

Номинальный режим S6 характеризуется относительной продолжительностью нагрузки (ПН), выражаемой в процентах и равной отношению длительности рабочего периода к продолжительности всего цикла. ГОСТ 183-74 устанавливает

$$ПН = \frac{N}{N+V} \cdot 100\% - 15,25,40,60\% \quad (3.8)$$

Периодический перемежающийся режим с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением S7 - последовательность идентичных циклов каждый из которых включает достаточно длительное время пуска D , время работы N с постоянной нагрузкой и быстрое электрическое торможение. Так как режим не содержит пауз, то для него $ПВ = 1$ [2].

Если электрическое торможение осуществляется реверсированием, то следует иметь в виду, что один реверс в тепловом отношении эквивалентен трём пускам

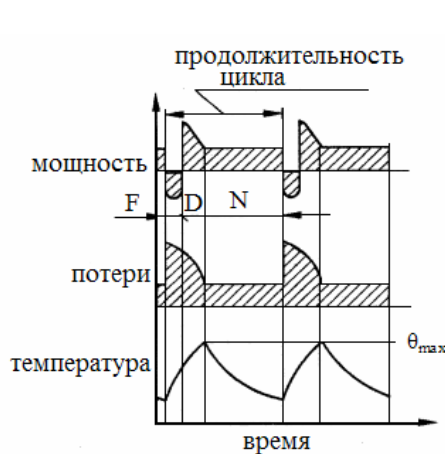


Рис.(3.8) Режим S7.

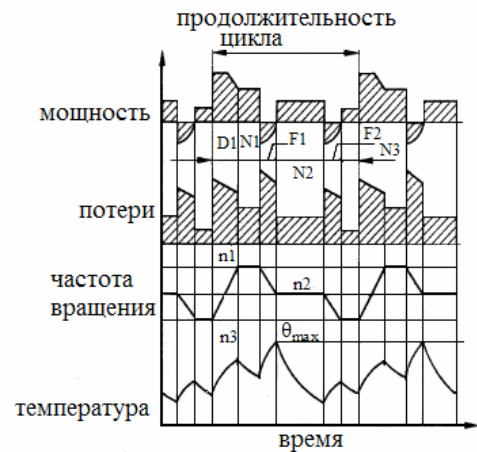


Рис.(3.9) Режим S8.

Периодический перемежающийся изменяющийся частотой вращения режим с периодически S8 - это последовательность идентичных циклов, каждый из которых включает время разгона D , работу $N1$ с неизменной нагрузкой и частотой вращения, электрическое торможение, работу $N2$ при другой частоте вращения и нагрузке, электрическое торможение и т.д. Этот режим реализуется в многоскоростных двигателях с переключением числа пар полюсов.

Установившийся тепловой режим соответствует режиму работы S1, нестационарный-S1-S8 [12].

3.3. Тепловой расчет при установившемся режиме по методу ЭТС.

Сложные условия теплоотвода в закрытых машинах по сравнению с защищенными и открытыми, необходимость достижения высоких технико-экономических показателей машин массовых и специальных серий послужили серьёзным стимулом для развития исследований тепловых процессов и разработки методов теплового расчёта закрытых АД. Результатом этого явилось создание различных методик, наиболее совершенные из которых основаны на использовании тепловых схем (ТС). Важная особенность закрытых машин - тепловое взаимодействие всех их частей. В таких условиях очень эффективным средством расчёта служит тепловая схема, составленная, для всей машины.

Картина распределения внутренних источников теплоты, температур и основных тепловых связей в короткозамкнутом асинхронном двигателе со степенью защиты 1Р44 и способом охлаждения 1С0141 без внутренней аксиальной циркуляции воздуха представлена на рис.(3.9)[4].

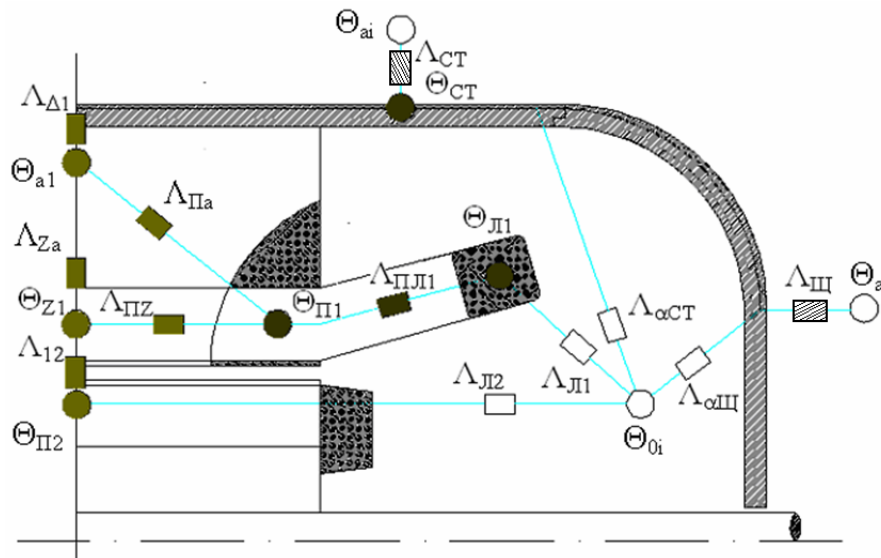


Рис.(3.10). Представление асинхронного двигателя эквивалентными в тепловом отношении элементами.

● - узлы с сосредоточенными источниками тепла

○ - узлы без тепловыделений

■ - теплоотдача теплопроводностью

□ - теплоотдача конвекцией

▤ - теплоотдача конвекцией и излучений

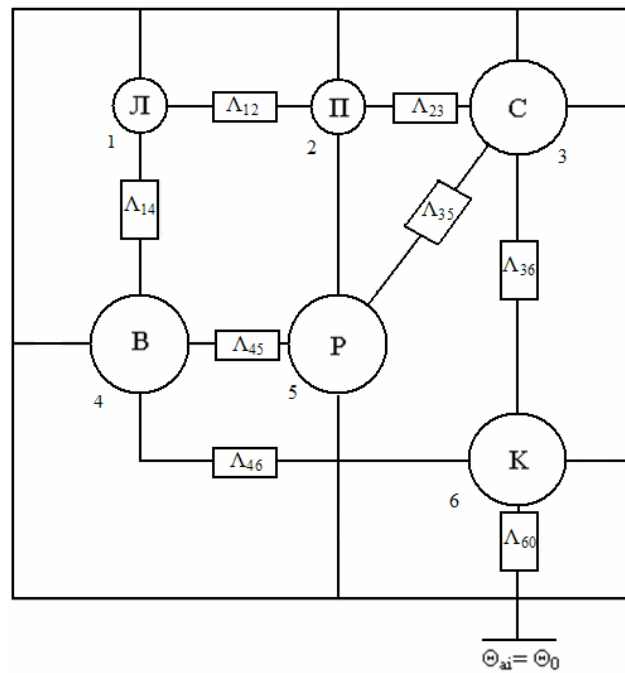


Рис.(3.11). Тепловая схема для расчета стационарных режимов

Примем следующие допущения[4]:

1. в поперечном сечении машины отсутствует перемещение теплоты, что позволяет рассматривать двумерную задачу в продольном сечении машины;
2. обмотка статора заменяется эквивалентным стержнем, температура которого в поперечном сечении равна средней температуре отдельных проводников;
3. коэффициенты теплопроводности материалов и воздуха постоянны и равны средним значениям для диапазона рабочих температур;
4. теплопередачей через вал пренебрегаем;
5. сердечники статора и ротора проводят теплоту только в радиальном

направлении;

6. пренебрегаем тепловым сопротивлением между станиной и щитами двигателя.

Перечисленные допущения дают незначительную погрешность и возможны для практических расчётов.

Из анализа картины теплопередачи двигателя на рис.(3.9) может быть составлена упрощённая тепловая схема замещения на рис.(3.10) Схема состоит из семи тел: зубцов статора со средней температурой θ_{z1} ; спинки статора со средней температурой θ_{a1} ; оболочки, включающей станину и подшипниковые щиты, со средней температурой θ_{om} ; пазовой части обмотки статора со средней температурой θ_{m1} ; лобовой части обмотки статора со средней температурой θ_{l1} ротора со средней температурой θ_{r2} ; внутреннего воздуха со средней температурой θ_{at} .

Тела ТСЗ связаны между собой соответствующими тепловыми проводимостями. Источниками теплоты, сосредоточенными в соответствующих узлах, являются: основные и добавочные потери в зубцах статора

$$\sum P_{z1} = P_{czz} + P_{czzob}; \quad (3.9)$$

потери в ярме статора P_{aas} ; потери в меди пазовой части обмотки статора

$$P_{m1n} = P_{m1} l_1 / (l_1 + l_{r1}); \quad (3.10)$$

потери в меди лобовой части обмотки статора

$$P_{m1l} = P_{m1} l_1 / (l_1 + l_{r1}); \quad (3.11)$$

потери в роторе, включающие электрические потери в короткозамкнутой беличьей клетке P_{r2} и добавочные потери в зубцах P_{czzr} ; внутренние механические потери, состоящие из потерь на трение в подшипниках и потерь на трение ротора о воздух $\sum P_M = P_{мех} + P_{нод}$ (сосредоточим их в оболочке)[4].

Тела связаны между собой соответствующими тепловыми проводимостями

на рис.(3.10). Для такой схемы может быть составлена система из семи уравнений

$$\begin{aligned}
 (A_{za} + A_{nz} + A_{12})\theta_{z1} - A_{za}\theta_{a1} - A_{nz}\theta_{n1} - A_{12}\theta_{n2} &= \Sigma P_{z1} \\
 (A_{za} + A_{na} + A_{d1})\theta_{a1} - A_{za}\theta_{z1} - A_{na}\theta_{n1} - A_{d1}\theta_{ct} &= P_{aaz} \\
 (A_{d1} + A_{ct} + A_{ш} + A_{a\sigma t} + A_{aш})\theta_{ct} - A_{d1}\theta_{a1} - (A_{a\sigma t} + A_{aш})\theta_{oi} - \\
 (A_{ct} + A_{ш})\theta_{oi} &= \Sigma P_M \\
 (A_{nz} + A_{na} + A_{nn1})\theta_{n1} - A_{nz}\theta_{z1} - A_{na}\theta_{a1} - A_{nn1}\theta_{n1} &= P_{M1n} \\
 (A_{nn1} + A_{n1})\theta_{n1} - A_{nn1}\theta_{n1} - A_{n1}\theta_{oi} &= P_{M1n} \\
 (A_{12} + A_{n2})\theta_{n2} - A_{12}\theta_{z1} - A_{n2}\theta_{oi} &= (P_{M2} + P_{czR}) \\
 (A_{a\sigma t} + A_{aш} + A_{n1} + A_{n2})\theta_{oi} - A_{n1}\theta_{n1} - A_{n2}\theta_{n2} - (A_{a\sigma t} + A_{aш})\theta_{ct} &= 0 \\
 \theta_{oi} &= 40^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

В практических расчётах система уравнений (3.9) представляется в матричной форме[2]:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{16} & A_{17} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{26} & A_{27} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{61} & A_{62} & \dots & A_{66} & A_{67} \\ A_{71} & A_{72} & \dots & A_{76} & A_{77} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_6 \\ P_7 \end{bmatrix} = 0 \tag{3.13}$$

Или в матричных символах

$$A \cdot \bar{\theta} - P = 0 \tag{3.14}$$

где A - квадратная симметричная матрица взаимных и собственных проводимостей схемы размерностью (7x7), причём определитель матрицы не равен 0; P - вектор приведённых источников теплоты (потерь) размерности (7x1); $\bar{\theta}$ - вектор неизвестных температур размерности (7x1).

Решение уравнения (3.10) имеет вид

$$\bar{\theta} = -A^{-1} \cdot P \tag{3.15}$$

где A^{-1} - обратная матрица проводимостей. Расчёты по (3.11) выполняются на ЭВМ.

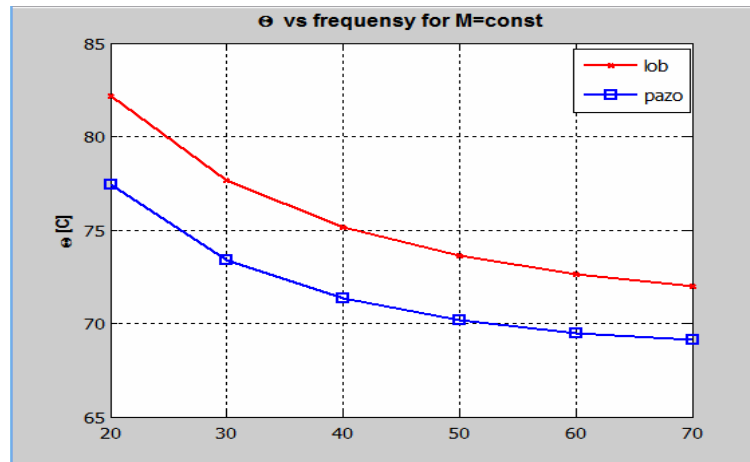


Рис 3.12 Статические тепловые характеристики обмоток статора АД при различных частотах

Используя уравнения (3.7) были просчитаны зависимости установившихся температур от частоты питания АД мощностью 2.2 кВт. Данные расчета нагрева показывают, что с уменьшением частоты нагрев обмоток статора АД увеличивается. Это необходимо учитывать при проектировании частотно-регулируемого АД[4].

3.4. Нестационарный нагрев частотно-регулируемого асинхронного двигателя.

Нестационарные тепловые процессы в электрических машинах широко распространены в практике их эксплуатации. Ими сопровождаются режимы пуска двигателей и включения генераторов, отключения, торможения, изменения нагрузки и частоты вращения машин. Особенно важное значение процессы нестационарного нагрева имеют при перегрузках по току и напряжению, при частых и затяжных пусках двигателей, а также при их работе в заторможенном состоянии, в режимах короткого замыкания генераторов, при выпадении из синхронизма и т.п[13].

Особенностью нестационарных тепловых режимов, или тепловых

переходных процессов, в электрических машинах является их инерционность, проявляющаяся в значительном отставании изменений температуры от электромеханических переходных процессов и других факторов, послуживших причиной изменения температурного поля. Благодаря этому машины могут выдерживать в течении некоторого времени воздействие перегрузок, токов короткого замыкания и других ненормальных условий.

Учёт тепловой инерционности в расчётах нестационарного нагрева является обязательным условием достоверности результатов[13]. Тепловой расчёт электрических машин при нестационарных режимах нужен в следующих случаях:

- если по условиям эксплуатации машина всё время находится в состоянии переходного теплового процесса;
- если нужно учесть данные теплового расчёта при выборе характеристик аварийной защиты от перегрузок, коротких замыканий и т.д. или для выявления особо напряжённых по нагреву мест в конструкции машины.

Исследование теплового состояния электродвигателя, работающего в одном из номинальных режимов S2, S4 проводится по методу ЭТС. Тепловая схема замещения для нестационарного режима на рис.(3.13) получается из схемы стационарного режима на рис.(3.10) путём добавления в каждый узел соответствующей теплоёмкости [9].

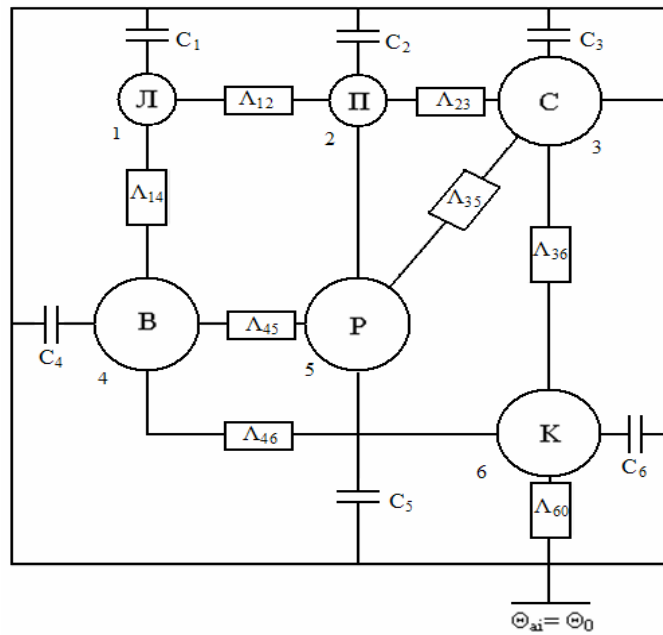


Рис.(3.13). Тепловая схема для расчета нестационарных режимов

С- статор;

Р- ротор;

Л- лобовая часть обмотки статора;

П- пазовая часть обмотки статора;

В- воздух внутри машины;

К- корпус АД;

Для анализа теплового состояния в любом из перечисленных выше режимов по приведённой ТСЗ (рис.3.13) может быть составлена система из семи дифференциальных уравнений путём дополнения системы уравнений (3.1) членами вида [9]

$$C_i \frac{d\theta_i}{dt} \quad (3.16)$$

Получим систему (3.14):

$$C_{s1} \frac{d\theta_{s1}}{dt} = -(A_{ss} + A_{ns} + A_{12})\theta_{s1} + A_{sa}\theta_{a1} + A_{ms}\theta_{m1} + A_{12}\theta_{m2} + \sum P_{s1}$$

$$C_{a1} \frac{d\theta_{a1}}{dt} = -(A_{sa} + A_{ma} + A_{a1})\theta_{a1} + A_{sa}\theta_{s1} + A_{ma}\theta_{m1} + A_{a1}\theta_{ct} + P_{asa}$$

$$\begin{aligned}
 (C_{CT} + C_{III}) \frac{d\Theta_{CT}}{dt} &= -(\Lambda_{41} + \Lambda_{CT} + \Lambda_{III} + \Lambda_{aCT} + \Lambda_{aIII})\Theta_{CT} + \Lambda_{41}\Theta_{a1} + \\
 &+ (\Lambda_{aCT} + \Lambda_{aIII})\Theta_{OI} + (\Lambda_{CT} + \Lambda_{III})\Theta_{a1} + \Sigma P_M \\
 C_{M1} \frac{d\Theta_{M1}}{dt} &= -(\Lambda_{M2} + \Lambda_{M3} + \Lambda_{M11})\Theta_{M1} + \Lambda_{M2}\Theta_{Z1} + \Lambda_{M3}\Theta_{a1} + \Lambda_{M11}\Theta_{M1} + P_{M1L} \\
 C_{M1} \frac{d\Theta_{M1}}{dt} &= -(\Lambda_{M11} + \Lambda_{M1})\Theta_{M1} + \Lambda_{M11}\Theta_{M1} + \Lambda_{M1}\Theta_{OI} + P_{M1L} \\
 (C_{M2} + C_{M2}) \frac{d\Theta_{M2}}{dt} &= -(\Lambda_{12} + \Lambda_{M2})\Theta_{M2} + \Lambda_{12}\Theta_{Z1} + \Lambda_{M2}\Theta_{OI} + (P_{M2} + P_{CZR}) \\
 C_{OI} \frac{d\Theta_{OI}}{dt} &= -(\Lambda_{aCT} + \Lambda_{aIII} + \Lambda_{M1} + \Lambda_{M2})\Theta_{OI} + \Lambda_{M1}\Theta_{M1} + \Lambda_{M2}\Theta_{M2} + (\Lambda_{aCT} + \\
 &+ \Lambda_{aIII})\Theta_{CT} \\
 \Theta_{OI} &= 40^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Решая приведённую систему любым из известных способов, находят средние значения температур элементов в любой из моментов времени t . Решение при $\frac{d\Theta_n}{dt} = 0$ даёт установившиеся температуры тел ТСЗ. [2].

Система дифференциальных уравнений, составленная для тепловой схемы (рис.3.13), имеет вид [9]

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} &= -\Lambda_{11}\Theta_1 + \Lambda_{12}\Theta_2 + \Lambda_{13}\Theta_3 + \Lambda_{14}\Theta_4 + \Lambda_{15}\Theta_5 + \Lambda_{16}\Theta_6 + P_1; \\
 C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} &= \Lambda_{21}\Theta_1 - \Lambda_{22}\Theta_2 + \Lambda_{23}\Theta_3 + \Lambda_{24}\Theta_4 + \Lambda_{25}\Theta_5 + \Lambda_{26}\Theta_6 + P_2; \\
 C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} &= \Lambda_{31}\Theta_1 + \Lambda_{32}\Theta_2 - \Lambda_{33}\Theta_3 + \Lambda_{34}\Theta_4 + \Lambda_{35}\Theta_5 + \Lambda_{36}\Theta_6 + P_3; \\
 C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} &= \Lambda_{11}\Theta_1 + \Lambda_{12}\Theta_2 + \Lambda_{13}\Theta_3 - \Lambda_{14}\Theta_4 + \Lambda_{15}\Theta_5 + \Lambda_{16}\Theta_6 + P_4; \\
 C_5 \frac{d\Theta_5}{dt} &= -\Lambda_{51}\Theta_1 + \Lambda_{52}\Theta_2 + \Lambda_{53}\Theta_3 + \Lambda_{54}\Theta_4 - \Lambda_{55}\Theta_5 + \Lambda_{56}\Theta_6 + P_5; \\
 C_6 \frac{d\Theta_6}{dt} &= \Lambda_{61}\Theta_1 + \Lambda_{62}\Theta_2 + \Lambda_{63}\Theta_3 + \Lambda_{64}\Theta_4 + \Lambda_{65}\Theta_5 - \Lambda_{66}\Theta_6 + P_6.
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

или в матричных символах

$$C \frac{d\Theta}{dt} + \Lambda \Theta = P \tag{3.19}$$

где Λ – симметричная матрица взаимных и собственных проводимостей размерностью (6×6) , причем определитель матрицы не равен 0; P – вектор-

столбец приведенных источников теплоты размерностью (6×1) ; Θ – вектор-столбец неизвестных температур размерностью (6×1) , C - диагональная матрица теплоемкостей.

Система уравнений для установившегося режима может быть получена из системы (3.15), если положить в ней. $d\Theta/dt = 0$. Тогда значения установившихся температур находятся из матричного выражения.

$$\Theta = -\Lambda^{-1}P \quad (3.20)$$

где Λ^{-1} – обращенная матрица проводимостей. Для оценки влияния на температуру обмотки статора (лобовой и пазовой частей) других тел с источниками теплоты, представим превышение температуры лобовой части обмотки, как наиболее нагретого элемента, в виде

$$\Theta = b_{11}P_1 + b_{12}P_2 + b_{13}P_3 + b_{14} \cdot P_4 + b_{15}P_5 + b_{16}P_6; \quad (3.21)$$

где, b_{1i} - элементы первой строки обратной матрицы. Это выражение можно записать в следующем виде

$$\Theta = R_{\Theta L} (P_1 + k_{12}P_2 + k_{13}P_3 + k_{14}P_4 + k_{15}P_5 + k_{16}P_6); \quad (3.22)$$

Здесь $R_{\Theta L} = b_{11}$ - эквивалентное тепловое сопротивление лобовой части обмотки, $\kappa_{1i} = b_{1i}/b_{11}$ - коэффициенты потерь, учитывающие долю потерь соответствующего тела, идущую на нагревание лобовой части обмотки. Аналогично (3.23) записываются превышения температур и для других тел[13].

Решение системы дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами равно сумме какого - либо ее частного решения (установившегося значения перегрева - $\Theta_{уст}$) и общего решения соответствующей однородной системы. Тогда выражения кривой нагрева $\Theta_i = f(t)$ для i -го узла АД, полученного в результате решения системы (1), имеет вид:

$$\Theta_i = \Theta_{уст} \left(1 + \sum_{j=1}^6 \left(a_{ij} e^{-\frac{t}{T_j}} \right) \right) \quad (3.23)$$

где T_j - постоянные времени j-ой экспоненты при нагреве, a_{ij} - коэффициенты удельного веса экспонент. Для элементов обмотки индекс i принимает значения для лобовой части $i=1$, для пазовой $i=2$. Из выражения (3.24) следует, что зависимость превышения температуры от времени для i-го узла содержит шесть экспонент.

Средне превышение нагрева обмотки статора будет

$$\Theta(t) = \frac{\Theta_1(t)L_{\pi} + \Theta_2(t)L_{\pi}}{L_{\pi} + L_{\pi}} \quad (3.24)$$

Для исследования нестационарных тепловых процессов в регулируемых асинхронных двигателях была разработана программа, позволяющая определять превышения температур в основных элементах ЭТС. Структурная схема программы представлена на рис.(3.14).

По разработанному алгоритму было проведено расчетное исследование тепловых процессов в асинхронном двигателе 4A200L4Y3. Номинальные данные двигателя: $P_{2н}=45$ кВт, $U_n=220/380$ В, $f_n=50$ Гц, $\eta_n=0,92$, $\cos(\varphi)_n=0,91$, $s_n=0,0155$, $I_n=8,14$. Результаты расчета представлены ниже.

На рис.(3.15) приведены зависимости электрических потерь в обмотках статора $P_{\Sigma 1}$ и ротора $P_{\Sigma 2}$, магнитных потерь в сердечнике статора, механических $P_{мех}$ и добавочных $P_{доб}$ от относительной частоты источника питания $f^*=f/f_n$ при постоянном моменте на валу [38], т.е. $M_c=const$.



Рис.(3.14) Блок- схема программы теплового расчета АД.

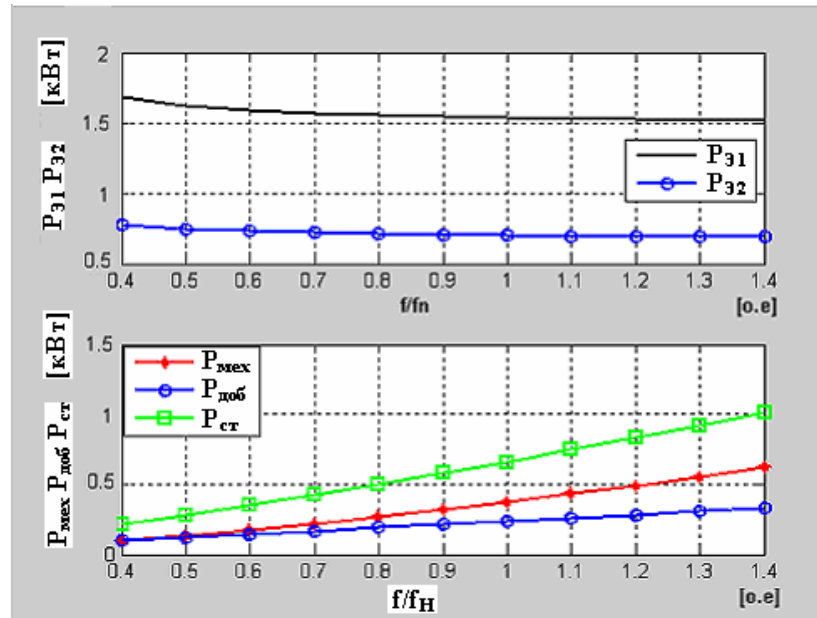


Рис.(3.15) Зависимости потерь АД от частоты.

Анализ приведенных кривых показывает, что основные и добавочные потери изменяются при изменении частоты. В табл.(3.2) приведены коэффициенты мощности потерь А.Д и эквивалентное тепловое сопротивление лобовой части для частот 20 и 50Гц. Из результатов таблицы (3.2) следует, что тепловое сопротивление лобовой части не зависит от частоты питания. Коэффициенты потерь мощности также не зависят от частоты за исключением коэффициента, учитывающего влияние потерь ротора на нагрев обмотки статора, который несколько возрастает, что связано с ухудшением охлаждения ротора.

Таблица(3.2)

Частота	f=50 Гц						$R_{\Theta л}=0,0364$ град/Вт
Номер узла	1	2	3	4	5	6	
Температура нагрева $\Theta_{л}=$ 80,95 °C	1	0,647	0,35	0,382	0,352	0,0303	

Частота	f=20 Гц						R _{Θл} =0,046 град/Вт
Температура нагрева Θ _л = 99,3 °С	1	0,65	0,312	0,373	0,38	0,0448	

Значения постоянных времени экспонент T_j и их коэффициенты κ_{ij}

(для $i=1$) даны в табл.(3.3)

Таблица(3.3)

Частота	f=50 Гц					
Номер элемента	1	2	3	4	5	6
Постоянная времени нагрева, мин	0,118	0,297	1,029	5,52	33,16	14,06
Коэффицие нт при экспоненте	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$-1,10 \cdot 10^{-3}$	$-2,68 \cdot 10^{-2}$	1,12	-0,099
Частота	f=20 Гц					
Постоянная времени нагрева, мин.	0,212	0,312	1,68	5,69	42,29	22,86
Коэффицие нт при экспоненте	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$-1,31 \cdot 10^{-3}$	$-1,58 \cdot 10^{-2}$	1,59	-0,137

Из анализа результатов таблицы (3.3) следует, что постоянные времени нагрева и коэффициенты при экспонентах изменяются при уменьшении частоты от 50 до 20 Гц. Постоянные времени показывают, что в начальной стадии нагрева значительное влияние на процесс оказывают экспоненты с малыми постоянными времени, а в конце процесса с большими. Кривые нагрева лобовой части обмотки для двух частот 20 и 50 Гц в зависимости от времени приведены на рис.(3.16).

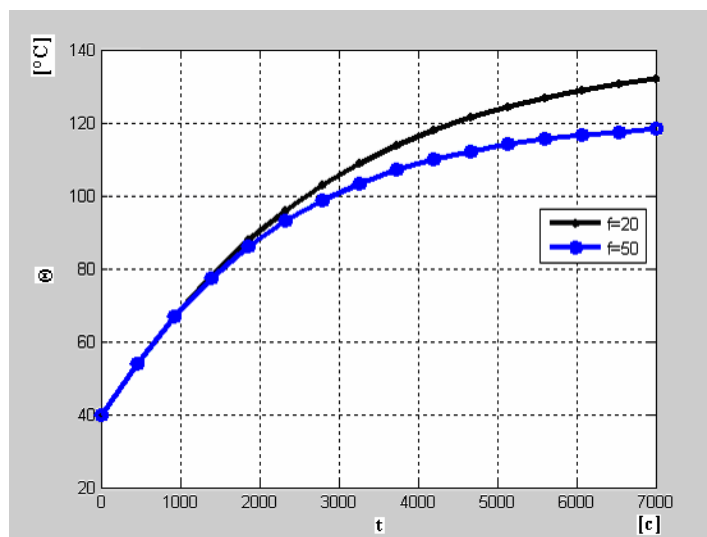


Рис.(3.16) Кривые нагрева лобовой части обмотки при частоте 20 и 50 Гц

С помощью программы были просчитаны режимы при низких частотах вращения, когда эффективность охлаждения внутренних и наружных поверхностей снижается. В результате расчета определена граничная частота питания. Для данного двигателя она составляет 10,5 Гц. Температура нагрева при этой частоте не превышает допустимую для данного класса изоляции, так как $\Theta_{\text{д}} = 155,47^{\circ}\text{C}$. Таким образом, разработанная тепловая модель нестационарного нагрева, дает достаточно подробную информацию о тепловых процессах в асинхронном двигателе, и может быть использована, как для оценки нагрева обмотки статора в различных режимах работы, так и для

проектирования тепловой защиты АД.

Для учета влияния высших гармоник напряжения на нагрев АД были просчитаны температуры лобовой части обмотки для различного соотношения гармонических составляющих напряжения. Температурные кривые для первой гармоники напряжения (100%) и при 15% от 1-ый для 5, 7, 11, 13 и 15 гармоник показаны на рис 3.17.

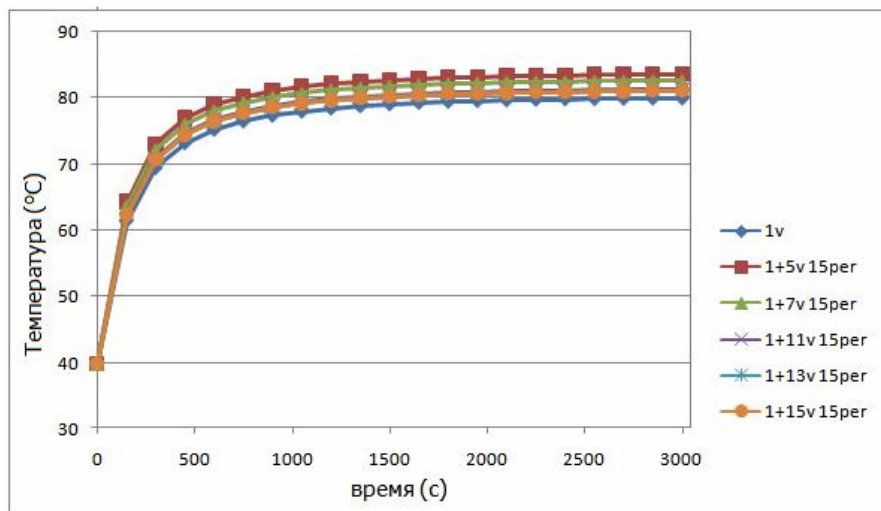


Рис 3.17 Зависимости температуры от времени при учете высших гармоник (гармоника составляет 15%)

Анализ кривых рис 3.17 показывает, что наибольшее влияние на нагрев обмотки статора оказывает 5-тая гармоника напряжения.

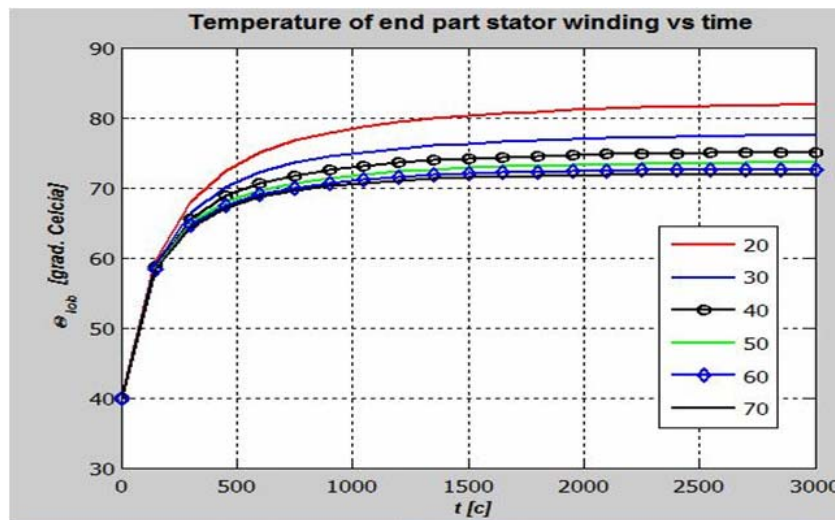


Рис 3.18 Зависимости температуры от времени при различных частотах

3.5 Определение допустимой мощности регулируемого асинхронного двигателя для заданного диапазона регулирования.

В связи с созданием за последние годы полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ) стало возможным широкое применение асинхронных двигателей в качестве регулируемых двигателей.

Поскольку асинхронные двигатели, предназначенные для работы от ППЧ, в настоящее время электротехнической промышленностью не выпускаются, целесообразно выяснить возможность использования в частотно-регулируемом приводе электродвигателей обычных общепромышленных серий и на этой основе определить расчетную мощность и диапазон регулирования[2].

Для этой цели были проведены теоретические расчеты, в процессе которых определялось влияние несинусоидальной формы кривой напряжения источника питания и ухудшения охлаждения двигателя при регулировании скорости вращения на снижение полезной мощности (момента) двигателя и на его энергетические показатели.

Несинусоидальный источник питания обеспечивал изменение напряжения при регулировании частоты по закону $U/f=\text{const}$. Форма кривой выходного напряжения имела ступенчатый характер. Коэффициент искажения синусоидальной кривой напряжения составляет около 30%.

Основная особенность работы асинхронного двигателя от ППЧ состоит в том, что несинусоидальная форма кривой напряжения являемся источником дополнительных потерь в двигателе от высших гармоник. Потери от высших гармоник вызывают, как отмечалось выше, дополнительный нагрев обмоток статора, недопустимый в длительном режиме работы электродвигателя и приводящий к снижению момента на валу двигателя. Другим фактором, влияющим на величину момента, допустимого в длительном режиме работы, является охлаждение двигателя при регулировании скорости вращения вниз от номинальной.

Расчеты были проведены для двигателей с высотой оси вращения $H=90, 132$, с числом полюсов $2p=4$ при регулировании скорости вращения в диапазоне $f_{\text{max}}/f_{\text{min}}=10:1$. Характеристики двигателей рассчитывались для заданного диапазона частот при несинусоидальном и синусоидальном питании.

Из проведенных расчетов следует, что суммарные потери в стали при питании двигателей от ППЧ увеличиваются на 13-20% по сравнению с потерями в стали двигателя при синусоидальном питании. При этом потребляемая мощность холостого хода возрастает в среднем на 25%.

Влияние несинусоидальной кривой напряжения на энергетические показатели также рассматривалось для этих двигателей, при этом полезная мощность определялась исходя из допустимого превышения температуры

обмотки статора дл заданного класса изоляции.

На рис.1 приведены зависимости полезной мощности и момента на валу двигателя с $N=132$ от частоты в диапазоне регулирования $f=5-50$ Гц при синусоидальном питании и при питании от ППЧ.

Из сопоставления кривых видно, что при регулировании частоты вращения в диапазоне 2:1 (50-25 Гц) полезная мощность (или момент на валу двигателя – кривые 3 и 4) снижается на 17-20%. Это снижение обусловлено только потерями, вызванными несинусоидальной кривой напряжения. В диапазоне регулирования 2:1 ухудшение вентиляции двигателя не вызывает дополнительного нагрева обмотки статора, и, как видно из рис. 1, двигатель может работать в продолжительном режиме при сниженном на 17-20% от номинального постоянном моменте[2].

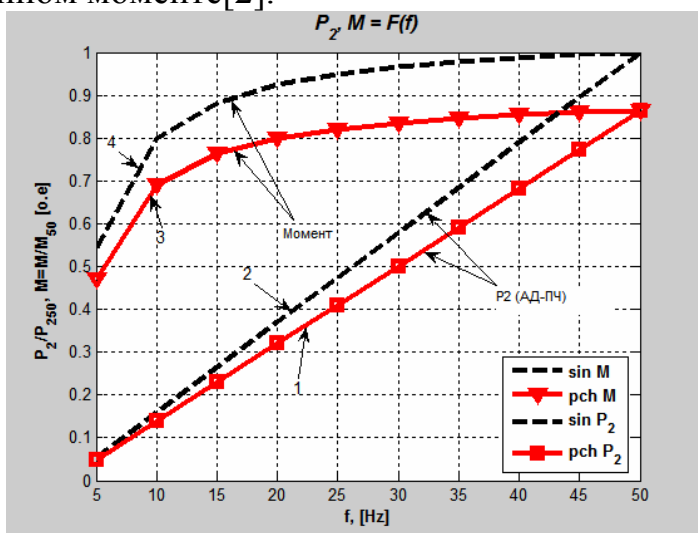


Рис.3.19. Зависимость полезной мощности (1,2) и момента (3,4) на валу двигателя с $N=132$ от частоты в диапазоне регулирования $f=5-50$ Гц при питании от разных источников: (—) от ППЧ, (-----) от синусоидального источника.

При регулировании в диапазоне изменения частоты 10:1 снижение полезной мощности (момента) на валу двигателя составляет по сравнению с номинальной мощностью- 30-40%. На частоте питания $f=50$ Гц двигателя были просчитаны энергетические характеристики как при питании от ППЧ, так и от синусоидального источника. При питании от ППЧ в асинхронных двигателях одновременно со снижением мощности на валу снижаются и энергетические показатели: на частоте питающего напряжения 50Гц к.п.д. снижается на 2-4%, а коэффициент мощности – на 1-2%.

Обработка результатов расчета позволило установить аналитические формулы, показывающие зависимость допустимой мощности на валу двигателя от диапазона регулирования и числа пар полюсов электродвигателя. Эта зависимости имеют следующий вид:

для $p=1$

$$P_{2\text{доп}} = 0,845 \cdot (f_{\min} - 1,75) / (f_{\max} - 1,75) \cdot P_2; \quad (3.25)$$

для $p=2$

$$P_{2\text{доп}} = 0,86 \cdot (f_{\min} - 2,47) / (f_{\max} - 2,47) \cdot P_2; \quad (3.26);$$

для $p=3$

$$P_{2\text{доп}} = 0,872 \cdot (f_{\min} - 3,03) / (f_{\max} - 3,03) \cdot P_2. \quad (3.27).$$

Здесь f_{\min} и f_{\max} — минимальная и максимальная частоты вращения двигателя, P_2 — мощность нерегулируемого двигателя на частоте f_{\max} , p — число пар полюсов двигателя. Первый коэффициент в формулах (3.25-3.27) характеризует уменьшение полезной мощности электродвигателя, вызванное несинусоидальностью кривой напряжения источника питания, второй коэффициент характеризует снижение допустимой мощности двигателя в зависимости от диапазона регулирования скорости вращения (f_{\min} и f_{\max}).

Допустимый момент, используя полученные зависимости, можно определить как

$$M_{\text{доп}} = P_{2\text{доп}} / \omega_{\min}(1-s), \quad (3.28)$$

где $\omega_{\min} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\min} / p$ — минимальная частота вращения, $s \approx 0.03$ скольжение двигателя при работе на минимальной частоте.

Если $f_{\max} = 50 \text{ Гц}$, то формулы (3.25-3.27) упрощаются и могут быть записаны в виде:

для $p=1$

$$P_{2\text{д}} = 0,0174 \cdot (f_{\min} - 1,75) \cdot P_2; \quad (3.29)$$

для $p=2$

$$P_{2\text{д}} = 0,0181 \cdot (f_{\min} - 2,47) \cdot P_2; \quad (3.30);$$

для $p=3$

$$P_{2\text{д}} = 0,0186 \cdot (f_{\min} - 3,03) \cdot P_2. \quad (3.31).$$

Эти выражения позволяют решить и обратную задачу: определить расчетную мощность, на который следует проектировать асинхронный двигатель, развивающий заданный момент на минимальной частоте.

Расчетная мощность асинхронного двигателя при регулировании напряжения и частоты согласно закону $U/f = \text{const}$ равна:

для $p=1$

$$P_2 = 57,47 \cdot M \cdot \omega_{\min}(1-s) / (f_{\min} - 1,75); \quad (3.32)$$

для $p=2$

$$P_2 = 55,24 \cdot M \cdot \omega_{\min}(1-s) / (f_{\min} - 2,47); \quad (3.33);$$

для $p=3$

$$P_2 = 53,76 \cdot M \cdot \omega_{\min}(1-s) / (f_{\min} - 3,03). \quad (3.34).$$

Здесь M — заданный момент асинхронного двигателя на минимальной частоте — f_{\min} . Далее используется методика выбора основных размеров двигателя, приведенная в [Копылов] л121

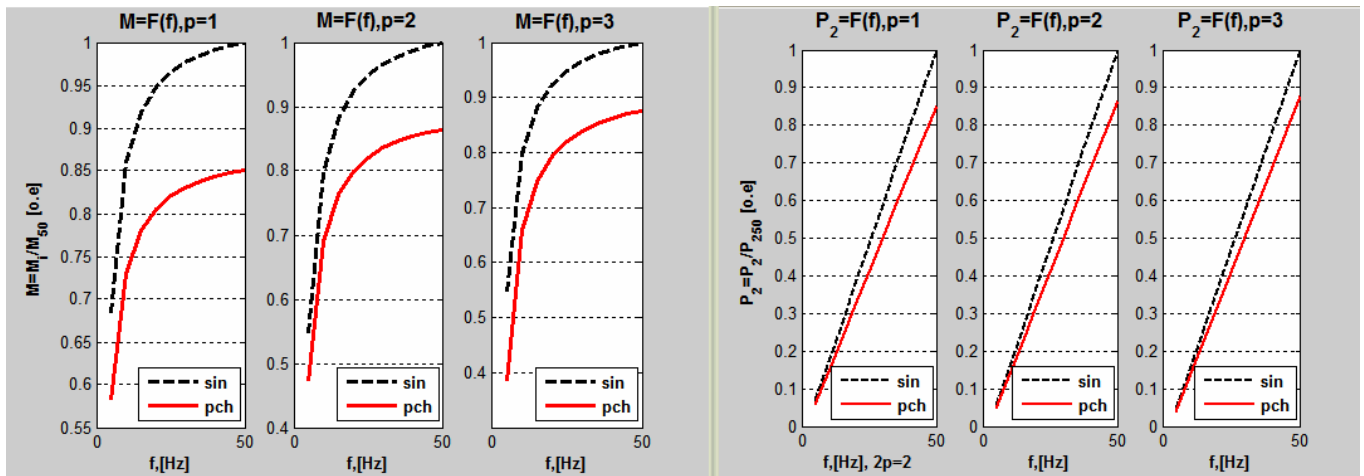


Рис. 3.20. Зависимости сравнения характеристики АД при питании от синусоидального напряжения и при питании от ПЧ.

Выводы по главе 3.

1. Разработана методика расчета температуры нагрева асинхронного двигателя для статических и динамических режимов работы АД
2. Приведенные расчеты показывают, что при уменьшении частоты температура АД возрастает.
3. В результате увеличивается нагрев АД и срок службы изоляции обмотки статора уменьшается.
4. зависимости превышения температуры от частоты питания при постоянном моменте позволяют определить диапазон регулирования АД
5. Комплекс программ для расчета стационарных и нестационарных тепловых процессов в АД, позволяющих получить с помощью простых тепловых моделей электродвигателей параметры и характеристики теплового процесса с достаточной точностью.