В первом приближении для оценки нагрева электрическую машину можно представить как однородное тело с источниками тепла (потерями), равномерно распределенными внутри его объема. При неизменных во времени потерях процесс нагревания поверхности машины в этом случае описывается уравнением теплового баланса [18]

$$\sum P\,dt = C d(\Delta\vartheta) + \alpha S \Delta\vartheta\,dt,$$

где $\sum P$ – сумма потерь в объеме машины, Вт; C – теплоемкость машины, $C = cm$, c – удельная теплоемкость материала машины, Дж/(кг · °С); m – масса машины, кг; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(м^2 · °С), определяющий мощность, рассеиваемую с 1 м^2 площади поверхности при превышении температуры поверхности над охлаждающей средой, равной 1 °С; S – поверхность охлаждения, м^2; $\Delta\vartheta$ – превышение температур поверхности машины над температурой охлаждающей среды, °С.

Из приведенного уравнения следует, что определенная доля потерь, выделяющихся в машине с момента ее включения, расходуется на нагрев самой машины, а остальные потери рассеиваются с поверхности в охлаждающую среду (соответственно первое и второе слагаемые правой части уравнения). По мере нагрева машины температура ее поверхности повышается, все большая часть тепла передается в окружающую среду и нагрев машины замедляется. При длительной ($t = \infty$) работе с неизменной нагрузкой

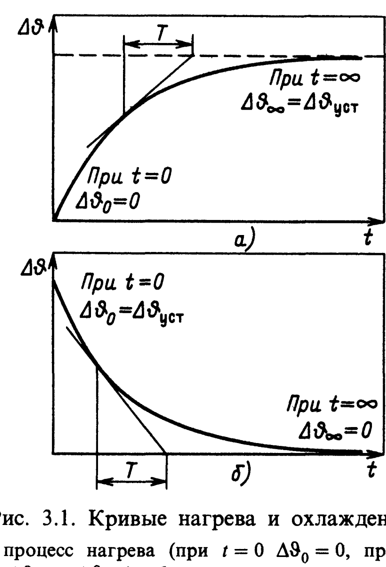

Рис. 3.1. Кривые нагрева и охлаждения:
а – процесс нагрева (при $t = 0$ $\Delta\vartheta_0 = 0$, при $t = \infty$ $\Delta\vartheta_\infty = \Delta\vartheta_{уст}$); *б* – процесс охлаждения (при $t = 0$ $\Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_{уст}$, при $t = \infty$ $\Delta\vartheta_\infty = 0$)

наступает тепловое равновесие, при котором уже все выделенные внутри машины потери рассеиваются в охлаждающую среду, а нагрев машины прекращается $[d(\Delta\vartheta) = 0]$. Такой режим называют установившимся тепловым режимом. Он характеризуется установившейся температурой машины $\Delta\vartheta_{уст} = \mathrm{const}$.

Общим решением уравнения теплового баланса является

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_\infty - \Delta\vartheta_0)\,(1 - e^{-t/T}),$$

где $\Delta\vartheta_0$ – начальное (при $t = 0$) превышение температуры поверхности машины над температурой охлаждающей среды, °С;
$\Delta\vartheta_\infty$ – конечное (при $t = \infty$) превышение температуры поверхности машины над температурой охлаждающей среды, °С; T – постоянная времени нагрева, с:

$$T = C/(\alpha S).$$

В частном случае нагрев машины из практически холодного состояния (при $t = 0$ $\Delta\vartheta_0 = 0$, при $t = \infty$ $\Delta\vartheta_\infty = \Delta\vartheta_{уст}$)

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{уст}(1 - e^{-t/T}).$$

Охлаждение отключенной от сети машины, достигшей установившейся температуры (при $t = 0$ $\Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_{уст}$ при $t = \infty$ $\Delta\vartheta_\infty = 0$),

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{уст}\,e^{-t/T}.$$

Эти выражения графически иллюстрируются кривыми нагрева и охлаждения машины, приведенными на рис. 3.1,*а* и *б*, на которых дана также графическая интерпретация постоянной времени нагрева *T*.

Точный расчет нагрева электрических машин требует решения трехмерного температурного поля, осложненного неравномерным распределением источников тепла в объеме машины, различными тепловыми характеристиками элементов машины, существенно зависящими от технологии изготовления машины и системы охлаждения [21].

Расчетные методы в большинстве случаев основаны на условном подразделении всего объема машины или его симметричной в тепловом отношении части на ряд зон, обладающих постоянными в пределах каждой зоны тепловыми характеристиками (коэффициентом теплопроводности материала, отсутствием или наличием источников тепла и т. п.). По границам каждой из зон определяются условия теплопередачи, устанавливаются возможные направления тепловых потоков и для каждого из выбранных направлений рассчитываются тепловые сопро-