

РАСЧЕТ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕТАЛЕЙ КОЛЛЕКТОРА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТАТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ

Климченкова Н.В.

Донбасская государственная машиностроительная академия

ket@digma.donetsk.ua

Scientific principles for analysis of unstable collector parameters have been worked out. Theoretical and experimental investigation have been carried out. Recommendations on improvement of technology of collector forming are presented.

Производство собственных мощных тяговых электродвигателей (ТЭД) для магистральных электровозов, на которые взяла курс Украина, вызывает повышение требований к достоверности и точности расчета параметров технологического процесса. В первую очередь это относится к технологии изготовления коллектора, конструкция которого собирается из большого количества разнородных по материалу деталей. Эксплуатационная надежность ТЭД в значительной мере определяется надежностью выпускаемых коллекторов, а отказы последних часто классифицируются как недостатки коммутации, но при более глубоком анализе оказываются недостатки технологии.

Вопросы совершенствования технологии статической формовки коллекторного кольца рассмотрены в [1]. Анализ неустановившихся параметров статической формовки собранного коллектора должен проводиться на стадии разработки конструкции, а рациональное проведение процесса формовки и управление им должно быть основано на результатах анализа [2,3].

Цикл статической формовки собранного коллектора включает ряд этапов: прогревание до заданной установленной температуры; выпекание изоляционных манжет при заданной температуре и давлении на поверхности манжет; подпрессовка для восстановления величины заданного давления; охлаждение до температуры воздуха в цехе; подпрессовка для восстановления давления. Последующие циклы формовки содержат перечисленные этапы. Продолжительность одного цикла от 13 до 20 часов в зависимости от типа ТЭД. При этом выпекают изоляционные манжеты, стабилизируют положение коллекторного кольца между частями составного корпуса и всех деталей конструкции в пределах ее объема. Циклы формовки повторяют до полной усадки манжет: об этом свидетельствует невозможность подтягивания болтов расчетным усилием при очередной подпрессовке.

Чтобы проанализировать ход изменения термомеханических параметров процесса (деформации деталей, температурное усилие, давление, механические напряжения), необходимо иметь данные по изменению температуры деталей конструкции на этапах прогревания и охлаждения, текущей усадки (пластической деформации) материала манжет на этапах их выпекания при постоянной температуре.

Так как коллекторное кольцо при сборке коллектора закрепляют между составными частями корпуса с помощью стяжных болтов и изолируют от этих частей манжетами, то разница в изменении линейного осевого размера коллекторных пластин и болтов (частей корпуса) определяет текущую величину термомеханических параметров на этапах прогревания и охлаждения собранного коллектора. Для их расчета надо знать текущее превышение температуры пластины и корпуса: $\Theta_1(t)$, $\Theta_2(t)$.

Математическое описание тепловых процессов, происходящих между коллекторным кольцом и корпусом через манжеты при статической формовке коллектора, получено для следующих условий или допущений: из коллектора выделен расчетный объем, приходящийся на половину коллекторного деления и многократно повторяющийся; выделение расчетного объема упростило математическую модель тепловых процессов, не снижая точности решения; температура деталей коллекторного кольца одинакова и изменяется только по времени; отсутствует теплопередача между соседними расчетными объемами конструкции при одинаковых условиях теплообмена с окружающим воздухом каждого из них; теплоемкость прокладки присоединена к теплоемкости пластины; температура составных частей корпуса одинакова и соответствует температуре болтов; теплоемкость манжет присоединена к теплоемкости корпуса.

В соответствии с изложенным уравнения баланса тепловых потоков для наружной поверхности коллекторного кольца и корпуса при превышении температуры горячего воздуха в печи $\Theta_в$ получают вид:

$$(\Theta_1 - \Theta_в) \cdot \alpha \cdot F_1 + C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{R_{12}} = 0; \quad (1)$$

$$(\Theta_2 - \Theta_в) \cdot \alpha \cdot F_2 + C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} + \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{R_{21}} = 0; \quad (2)$$

$$\Theta_1(t) = \Theta_2(t) = \Theta_{нач} = 0, \quad t = 0, \quad (3)$$

где α - коэффициент теплоотдачи наружной поверхности кольца и корпуса, Вт/м²-град; F_1, F_2 - площадь наружной поверхности кольца и корпуса, м²; C_1, C_2 - полная теплопроводность кольца и корпуса,

Вт·с/град; $\delta_1, \delta_2, \delta$ - радиальный размер пластины, корпуса, манжеты, м; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda$ - коэффициент теплопроводности материала пластины, корпуса, манжеты. Вт/м·град; $R_{12}=R_{21}=\delta_1/\lambda_1 F_3 + \delta_2/\lambda_2 F_4 + \delta/\lambda F_5$ - сопротивление движению теплового потока через трехслойную стенку (пластина, манжета, корпус), град/Вт. F_3, F_4, F_5 - расчетная площадь сечения пластины, корпуса и манжеты, нормального к направлению движения теплового потока, м².

В уравнениях (1,2): первый член выражает тепловой поток, поступающий от горячего воздуха к наружной поверхности кольца и корпуса; второй член - тепловой поток, расходуемый на повышение температуры кольца и корпуса; третий член - тепловой поток, распространяющийся от одной наружной поверхности к другой через трехслойную стенку.

Для решения системы уравнений (1-3) из (1) выразим $d\Theta_1/dt$:

$$\frac{d\Theta_1}{dt} = K_1 + K_{12} \cdot \Theta_2 - K_{11} \cdot \Theta_1, \quad (4)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{\alpha \cdot F_1}{C_1} \cdot \Theta_6; \quad K_{12} = \frac{1}{C_1 R_{12}}; \quad K_{11} = \frac{\alpha \cdot F_1}{C_1} + \frac{1}{C_1 R_{12}}.$$

Из (2) выразим $d\Theta_2/dt$:

$$\frac{d\Theta_2}{dt} = K_2 + K_{21} \cdot \Theta_1 - K_{22} \cdot \Theta_2, \quad (5)$$

$$\text{где } K_2 = \frac{\alpha \cdot F_2}{C_2} \cdot \Theta_6; \quad K_{21} = \frac{1}{C_2 R_{12}}; \quad K_{22} = \frac{\alpha \cdot F_2}{C_2} + \frac{1}{C_2 R_{12}}.$$

Из (4) выразим Θ_2 , а затем получим $d\Theta_2/dt$:

$$\Theta_2 = -\frac{K_1}{K_{12}} + \frac{K_{11}}{K_{12}} \cdot \Theta_1 + \frac{1}{K_{12}} \cdot \frac{d\Theta_1}{dt}; \quad (6)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dt} = \frac{K_{11}}{K_{12}} \cdot \frac{d\Theta_1}{dt} + \frac{1}{K_{12}} \cdot \frac{d^2\Theta_1}{dt^2}. \quad (7)$$

Подставляем (6) и (7) в (5) и получаем неоднородное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2\Theta_1}{dt^2} \cdot a_3 + \frac{d\Theta_1}{dt} \cdot a_2 + \Theta_1 \cdot a_1 = a_0, \quad (8)$$

$$\text{где } a_3 = \frac{1}{K_{12}}; \quad a_2 = \frac{K_{11} + K_{22}}{K_{12}}; \quad a_1 = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{12}} - K_{21}; \quad a_0 = K_2 + \frac{K_1K_{22}}{K_{12}}.$$

Решение уравнения (8) ищем в виде суммы общего решения $\Theta_{1об}(t)$ соответствующего ему однородного уравнения

$$\frac{d^2\Theta_1}{dt^2} \cdot a_3 + \frac{d\Theta_1}{dt} \cdot a_2 + \Theta_1 \cdot a_1 = 0 \quad (9)$$

и частного решения $\Theta_{1ч}(t)$ неоднородного. Уравнению (9) соответствует следующее характеристическое уравнение:

$$k^2 \cdot a_3 + k \cdot a_2 + a_1 = 0, \quad (10)$$

Корни k_1 и k_2 уравнения (10) находим так:

$$k_{1,2} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2a_3}, \quad (11)$$

Решение уравнения (9) принимает вид:

$$\Theta_{1об}(t) = C_1 \cdot e^{k_1 t} + C_2 \cdot e^{k_2 t}. \quad (12)$$

Частное решение уравнения (8) ищем в виде:

$$\Theta_{1ч}(t) = t^2 \cdot \beta_2 + t \cdot \beta_1 + \beta_0. \quad (13)$$

При прогревании собранного коллектора задают конечную установившуюся температуру коллекторного кольца $\Theta_{1у}$ и корпуса $\Theta_{2у}$, которая равна температуре горячего воздуха в электропечи: $\Theta_{1у} = \Theta_{2у} = \Theta_6 = \text{const}$. Исходя из этого условия, следует считать $a_0 = \text{const}$ в уравнении (8). Чтобы найти коэффициенты $\beta_2, \beta_1, \beta_0$ уравнения (13), находим первую и вторую производные от $\Theta_{1ч}$ по времени t :

$$\frac{d\Theta_{1ч}}{dt} = 2t \cdot \beta_2 + \beta_1; \quad \frac{d^2\Theta_{1ч}}{dt^2} = 2\beta_2. \quad (14)$$

Подставляем (13) и (14) в (8), приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях времени в левой и правой частях полученного при этом выражения и находим искомые коэффициенты:

$$\beta_2 = 0, \quad \beta_1 = 0, \quad \beta = \frac{a_0}{a_1}. \quad (15)$$

С учетом (15) выражение (13) получаем вид:

$$\Theta_{1ч}(t) = \beta_0 = \frac{a_0}{a_1}. \quad (16)$$

В соответствие с ранее сказанным решение уравнения (8) принимает вид:

$$\Theta_1(t) = \Theta_{1об}(t) + \Theta_{1ч}(t) = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + \frac{a_0}{a_1}. \quad (17)$$

Постоянные интегрирования (C_1, C_2), вошедшие в уравнения (12,17), находим из этих же уравнений при помощи начальных и конечных условий процесса нагревания коллектора:

$$\Theta_1(0) = \Theta_{1нач}, \quad \Theta_{1у} = \frac{a_0}{a_1} = \Theta_{\epsilon}, \quad C_1 = -\Theta_{1у}, \quad C_2 = \Theta_{1нач}.$$

После подстановки найденных постоянных интегрирования выражение (17) для определения неустановившегося превышения температуры коллекторного кольца в собранном коллекторе при проведении его статической формовки получает вид:

$$\Theta_1(t) = \Theta_{1нач} \cdot e^{k_2 t} + (1 - e^{k_1 t}) \cdot \Theta_{1у}. \quad (18)$$

При расчетах нагревания коллектора принимаем: $\Theta_{1нач} = 0, \Theta_{1у} = \Theta_{\epsilon}$. При расчетах охлаждения коллектора: $\Theta_{1нач} = \Theta_{\epsilon}, \Theta_{1у} = 0$.

Аналогичным путем получаем выражение для определения неустановившегося превышения температуры корпуса $\Theta_2(t)$ собранного коллектора. Из (5) выражаем Θ_1 , а затем $d\Theta_1/dt$:

$$\Theta_1 = -\frac{K_2}{K_{21}} + \frac{K_{22}}{K_{21}} \cdot \Theta_2 + \frac{1}{K_{21}} \cdot \frac{d\Theta_2}{dt}, \quad (19)$$

$$\frac{d\Theta_1}{dt} = \frac{K_{22}}{K_{21}} \cdot \frac{d\Theta_2}{dt} + \frac{1}{K_{21}} \cdot \frac{d^2 \Theta_2}{dt^2}. \quad (20)$$

Подставляем (19) и (20) в (4), получаем неоднородное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \Theta_2}{dt^2} \cdot a_3 + \frac{d\Theta_2}{dt} \cdot a_2 + \Theta_2 \cdot a_1 = a_0, \quad (21)$$

$$\text{где } a_3 = \frac{1}{K_{21}}, \quad a_2 = \frac{K_{22} + K_{11}}{K_{21}}, \quad a_1 = \frac{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12}}{K_{12}}, \quad a_0 = K_1 + \frac{K_2 \cdot K_{11}}{K_{21}}.$$

Решение этого уравнения ищем в виде суммы общего решения $\Theta_{2об}(t)$ соответствующего ему однородного уравнения

$$\frac{d^2 \Theta_2}{dt^2} \cdot a_3 + \frac{d\Theta_2}{dt} \cdot a_2 + \Theta_2 \cdot a_1 = 0 \quad (22)$$

и частного решения $\Theta_{2ч}(t)$ неоднородного. Уравнению (22) соответствует характеристическое

$$k^2 \cdot a_3 + k \cdot a_2 + a_1 = 0,$$

корни которого найдем из выражения

$$k_{1,2} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_3}. \quad (23)$$

Решение уравнения (21) проведено аналогично с решением уравнения (8), получено выражение:

$$\Theta_2(t) = \Theta_{2об}(t) + \Theta_{2ч}(t) = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + \frac{a_0}{a_1}. \quad (24)$$

Постоянные интегрирования (C_1, C_2) в (24) находим с учетом начальных и конечных условий переходного теплового процесса:

$$\Theta_2(0) = \Theta_{2нач}, \quad \Theta_{2Y} = \Theta_B = \frac{a'_0}{a'_1}, \quad C_1 = -\Theta_{2Y}, \quad C_2 = \Theta_{2нач}.$$

Подстановка постоянных интегрирования в (24) дает выражение для определения неустановившегося превышения температуры корпуса при проведении статической формовки собранного коллектора:

$$\Theta_2(t) = \Theta_{2нач} \cdot e^{k'_2 t} + (1 - e^{k'_1 t}) \Theta_{2Y}. \quad (25)$$

При нагревании коллектора: $\Theta_{2нач} = 0$, $\Theta_{2Y} = \Theta_{н.}$ При охлаждении коллектора: $\Theta_{2нач} = \Theta_{н.}$, $\Theta_{2Y} = 0$.

Выражения (18) и (25) по виду математического описания близки к классическому выражению, применяемому для расчета температуры однородного тела. Однако, существенно отличаются от него, так как получены с учетом конструктивного сопряжения деталей коллектора (пластины, прокладки, манжеты, корпуса), изготовленных из разнородных материалов. При их выводе использованы конструктивные параметры деталей коллектора, теплофизические параметры их материалов, параметры теплоотдачи наружных поверхностей. Указанные отличия позволяют глубже исследовать переходные тепловые процессы в коллекторе при его формовке, их влияние на термомеханические параметры технологического процесса, совершенствовать этот процесс [1-3].

Решение задачи теплового расчета дает возможность для перехода к анализу неустановившихся термомеханических параметров процесса формовки. Результаты анализа по этапам цикла формовки позволяют контролировать текущее состояние материала изоляционных деталей, управлять процессом формовки с целью повышения качественных показателей выпекаемых манжет и эксплуатационной надежности выпускаемых коллекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климченкова Н.В. Совершенствование технологии формовки коллекторного кольца электрических машин // Электротехника і енергетика: Збірник наук. праць Донецького держ. техн. ун-ту.-Донецьк: Изд-во ДонГТУ.-2000.-Вип.17.-с.106-107.
2. Климченкова Н.В. Совершенствование технологии статической формовки коллектора электрических машин // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідомчий науково-техн. збірник Одеського держ. політехн. ун-ту.- Київ: Техніка.-2000.-Вип.55.-с.58-62.
3. Климченкова Н.В. Аналитический способ расчета температуры деталей коллектора в переходных технологических режимах статической формовки // Надежность реж. ин-та и оптимизация технологических систем: Сб. науч.тр. Донбасской госуд. машиностроительной академии.- Краматорск: Изд-во ДГМА.- 1997.-Том.1.-с.255-258.

