

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ДЕЙСТВИЙ В ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ В СТАТИКЕ И ДИНАМИКЕ

В. И. Милых

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Аннотация. Представлены принципы и результаты численно-полевого расчета координатных распределений и временных функций силовых действий электромагнитного характера в активной зоне трехфазного асинхронного двигателя в режиме нагрузки. На примере двигателя мощностью 15 кВт анализируются распределение сил по пазам статора и ротора, по зубцам статора, а также динамика изменения этих сил и еще сил радиального стягивания сердечника статора и электромагнитного момента взаимодействия статора и ротора.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный двигатель, режим нагрузки, магнитные поля, численные расчеты, силовые действия, координатные и временные функции.

Введение

В электрических машинах основной процесс электромеханического преобразования энергии сопровождается силовыми явлениями, которые имеют динамический характер. Классическая теория электрических машин [1, 2], основанная на теории электрических и магнитных цепей, не позволяет получать для силовых действий исчерпывающие расчетные результаты, тем более – динамику их изменения, т. к. это проблема достаточно точного расчета магнитных полей (МП) с учетом всех влияющих факторов.

С развитием численных методов расчета МП [3-5] проблема расчета сил в электрических машинах становится в значительной мере решенной. Уже нет ограничений на учет реальных конструктивных форм машин в целом и их элементов, на детальный учет насыщения магнитопровода.

Численно-полевым анализом силовых действий в статике и динамике был проведен в [6, 7] на примере турбогенератора. Силовые процессы происходят и в трехфазных асинхронных двигателях (ТАД), приводя к их износу ввиду многократных циклических воздействий, что проявляется, преимущественно, в режиме нагрузки. Эти самые распространенные двигатели продолжают развиваться [8] и приложение к их исследованию численных методов расчета МП дает достаточно много новой и полезной информации [9–11].

С учетом отмеченного, и продолжая курс [5] на адаптацию численных расчетов МП к анализу все большего набора параметров и характеристик электрических машин, в данной работе проводится очередной этап исследований в этом направлении.

© Милых В. И., 2017

1. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является представление методики численно-полевого расчета и анализ силовых действий в ТАД в статике и динамике в номинальном режиме работы на основе численных расчетов МП.

Задачами исследования являются анализ силовых действий в активной части ТАД на длине его сердечников. Конкретно рассматриваются координатные распределения и временные функции сил, действующих на проводники обмоток в пазах статора и ротора, на зубцы сердечника статора, на сердечник статора в целом, а также электромагнитный момент (ЭММ) взаимодействия статора и ротора с выделением его переменной составляющей.

2. Объект исследования

Для расчетного анализа взят ТАД мощностью 15 кВт, проектные параметры которого есть в [2]. Он рассчитан на номинальные фазные напряжение $U_{sN}=220$ В и ток статора $I_{sN}=29$ А; коэффициент мощности $\cos \varphi_{sN}=0,889$ и частоту $f_s=50$ Гц. Этот ТАД имеет число фаз $m_s=3$, число пар полюсов $p=2$, для него определены наружные диаметры сердечников статора $d_{se}=0,272$ м и ротора $d_r=0,184$ м, воздушный зазор $\delta=0,5$ мм; активная длина $l_a=0,13$ м; числа пазов статора $Q_s=48$ и ротора $Q_r=38$; число последовательных витков фазной обмотки статора $N_s=112$; ее обмоточный коэффициент $K_{ws}=0,959$, реактивная $I_{sor}=7,75$ А и активная $I_{soa}=0,52$ А составляющие тока холостого хода статора, номинальное скольжение $s_N=0,026$. Пазы ротора выполняются закрытыми с перемычкой толщиной 0,7 мм, без скоса; обмотка статора однослойная, диаметрально-распределенная, что характерно для ТАД определенного уровня мощности.

3. Расчетная модель ТАД

Численные расчеты магнитного поля ТАД проводились по общедоступной программе FEMM [4]. Под нее создана расчетная модель электромагнитной системы ТАД в его поперечном сечении. Она изображена на рис. 1 и представлялась подробнее в [10, 11].

Распределение фазных зон обмотки статора идентифицируется на рис. 1 индексами при соответствующих фазных токах i_{sA} , i_{sB} и i_{sC} . Принято, что МДС F_{sA} фазной обмотки A на полюсном делении вверху при указанных направлениях токов статора ориентирована по вертикальной оси, от которой отсчитывается угол α .

На рис. 1 представлены также направления токов ротора i_r и принятая нумерация его пазов со счетчиком k . Показаны еще направления вращения МП статора и вращения ротора, обозначенные идентификаторами их частот вращения n_s и n , которые соответствуют направлению действующего на ротор ЭММ при указанных направлениях токов в проводниках обмоток. Эти направления токов соответствуют, как будет еще определено далее, начальному моменту времени. В процессе вращения ротора и магнитного поля эти направления, естественно, изменяются.

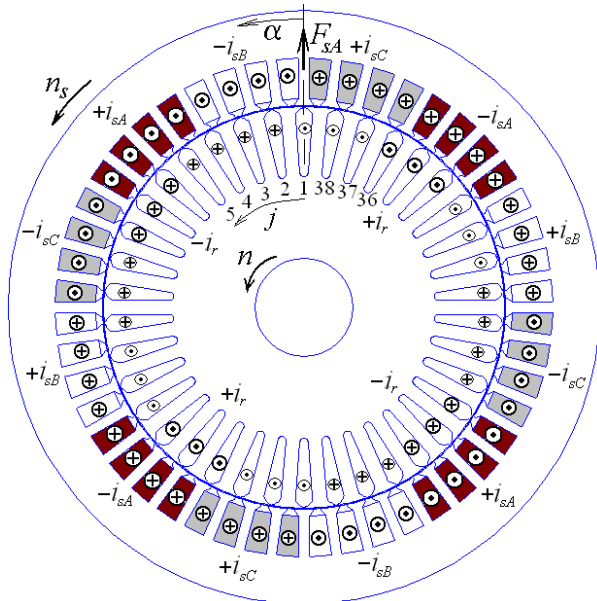


Рис. 1. Расчетная модель электромагнитной системы ТАД в его поперечном сечении

Расчетная модель ТАД преобразуется в физико-геометрическую модель, воспринимаемую программой FEMM. Это делается автоматически составленным скриптом Lua, аналогичным скрипту для турбогенератора, представленному в [12]. Физико-геометрическая модель ТАД представлена на рис. 2. В этой модели с ограниченными блоками (выделенными подобластями об-

щей области расчета МП) связаны конкретные токи из системы, представленной на рис. 1, а также магнитные свойства, заданные магнитной постоянной в немагнитных частях и кривой намагничивания конкретной электротехнической стали в элементах сердечников.

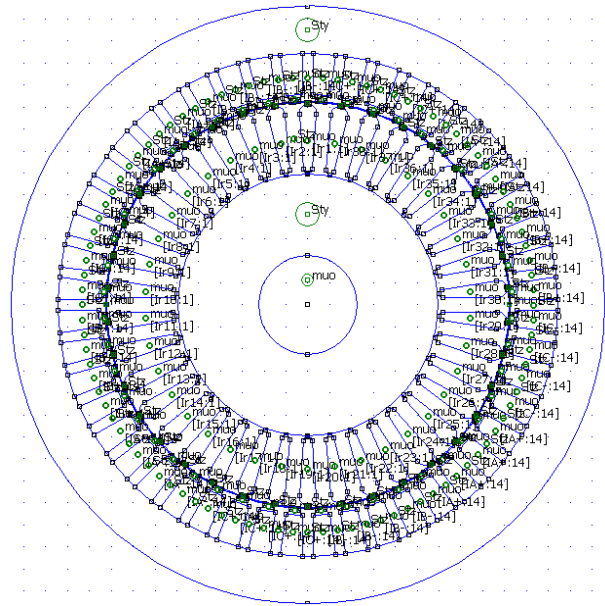


Рис. 2. Физико-геометрическая модель ТАД

4. Токи обмоток статора и ротора

В обмотке статора подразумевается симметричная трехфазная система фазных токов:

$$\begin{aligned} i_{sA} &= I_{ms} \cos(\omega_s t); \\ i_{sB} &= I_{ms} \cos(\omega_s t - \frac{2}{3}\pi); \\ i_{sC} &= I_{ms} \cos(\omega_s t - \frac{4}{3}\pi), \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; I_{ms} – амплитуда, $\omega_s = 2\pi f_s$ – угловая частота.

В начальный момент при $t=0$ токи в фазных обмотках A , B и C по (1) составляют $i_{sA}=I_{ms}$, $i_{sB}=i_{sC}=-0,5I_{ms}$. В пазах статора на рис. 1 показаны соответствующие их направления. Знаки + и – перед символами токов показывают, что они должны быть еще добавлены к определяемым по формулам (1) мгновенным значениям фазных токов.

Угловая позиция ротора может меняться, но при этом его нумерованные пазы фиксируются координатой первого паза α_{r1} и углом сдвига друг от друга $\alpha_m = 360^\circ/Q_r$.

Важным аспектом подготовительной работы к расчету магнитного поля в ТАД является определение значений токов обмотки ротора, а также их фазового сдвига по отношению к токам обмотки статора, которые уже заданы (1). Это делается по представленным выше проектным данным ТАД и иллюстрируется векторной диаграммой (ВД), построенной на рис. 3 по извест-

ным правилам [1, 10].

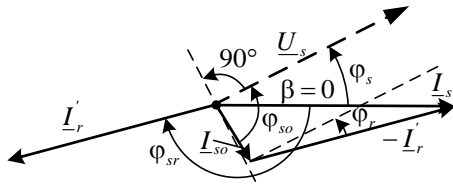


Рис. 3. Векторная диаграмма к определению тока ротора при нагрузке ТАД

Базовым принят вектор обобщенного фазного тока I_s с нулевой начальной фазой β . Под углом $\varphi_s = \arccos(\cos\varphi_{sN})$ к I_s проводится вектор фазного напряжения \underline{U}_s , а под углом $\varphi_{so} = \arctg(I_{sor}/I_{soa})$ к нему построен вектор I_{so} – тока XX статора.

Относительно вектора напряжения получают активная и реактивная составляющие обращенного приведенного фазного тока ротора:

$$-I'_{ra} = I_s \cos\varphi_s - I_{soa}; \quad -I'_{rr} = I_s \sin\varphi_s - I_{sor},$$

действующее значение этого тока и его фазовый сдвиг относительно напряжения:

$$-I'_r = \sqrt{(-I'_{ra})^2 + (-I'_{rr})^2}; \quad \varphi_r = \arctg \frac{-I'_{rr}}{-I'_{ra}}.$$

Вектор необращенного приведенного фазного тока ротора получается сменой знака, т.е. $I'_r = -(-I'_r)$. Относительно тока статора он имеет фазовый сдвиг (в электрических градусах)

$$\varphi_{sr} = 180^\circ - \varphi_s + \varphi_r.$$

Действующее значение истинного (не приведенного) фазного тока ротора находится по формуле

$$I_r = (-I'_r) \cdot K_{isr},$$

через коэффициент приведения токов [1]:

$$K_{isr} = \frac{N_s K_{Ws} m_s}{N_r K_{Wr} m_r} \cdot \frac{1}{K_{sqr}},$$

где для короткозамкнутой обмотки ротора рассматриваемого ТАД число фаз m_r равно числу пазов ротора Q_r , число витков на фазу $N_r=0,5$, обмоточный коэффициент $K_{Wr}=1$; коэффициент скоса пазов ротора $K_{sqr}=1$.

Для использования в геометрической расчетной модели ТАД (рис. 1) электрические градусы ВД (рис.3) должны перейти, как известно [1], в реальную угловую меру через деление на число пар полюсов p .

Конкретно, распределение по пазам ротора синусоидальной волны его токов должно отста-

вать на каждой паре полюсов от такой же условной волны системы токов статора (1) на геометрический угол

$$\alpha_{sr} = \varphi_{sr} / p.$$

В итоге, для рассматриваемого ТАД получено $I_r=439,9$ А; $\alpha_{sr}=-82,55^\circ$ (тут получилось некоторое уточнение значения тока ротора, т.к. по проектным данным ток I_r составлял 442 А). Отрицательное значение α_{sr} и дает отставание «волны» токов ротора от «волны» токов статора.

На представленной основе формируется многофазная система мгновенных значений токов в стержнях короткозамкнутого ротора:

$$i_{rj} = \sqrt{2} I_r \sin\{p[(j-1)\alpha_{rn} + \alpha_{sr} + \alpha_{r1}]\}, \quad (2)$$

где $j = 1, 2, \dots, Q_r$ – номер паза в соответствии с нумерацией на рис. 1.

5. Общие принципы расчета магнитного поля и силовых действий в ТАД

В поперечном сечении ТАД (рис. 1) МП описывается общеизвестным дифференциальным уравнением

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z,$$

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; \vec{k} – орт по аксиальной оси z ; μ – абсолютная магнитная проницаемость, которая для ферромагнитных сердечников определяется по их кривой намагничивания (в данном случае электротехническая сталь 2013).

На внешней поверхности сердечника статора принимается условие Дирихле $A_z=0$. Численный расчет МП проводится методом конечных элементов, как отмечалось, по программе FEMM [4] при конкретной позиции ротора и соответствующих значениях токов статора (1) и ротора (2). При этом основным допущением является пренебрежение возможной реакцией вихревых токов в электропроводящих элементах конструкции ТАД.

Одной из базовых величин МП, используемых для расчета силовых действий в ТАД, является магнитная индукция, вычисляемая по распределению ВМП на основе общего выражения $\vec{B} = \text{rot}(\vec{k} A_z)$. Исходя из этого, например, в полярных координатах ее составляющие:

$$B_r = \frac{\partial A_z}{r \partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}.$$

Для получения статических значений и координатных распределений различных электромагнитных и силовых величин (зависящих от координат α и r) достаточно провести однопозиционный расчет МП. В режиме номинальной нагрузки для момента времени $t=0$ используется изображенная на рис. 1 позиция ротора и определенные по (1) значения фазных токов $i_{sA}=41$ А; $i_{sB}=-20,5$ А; $i_{sC}=-20,5$ А, а также совокупность значений токов ротора по (2). Распределение токов по пазам ротора и статора, картина МП для этого режима в виде силовых линий, а также векторы магнитной индукции представлены на рис. 4. Более детализированный фрагмент этой картины показан на рис. 5 в зоне зазора с прилегающими зубцово-пазовыми структурами ротора и статора.

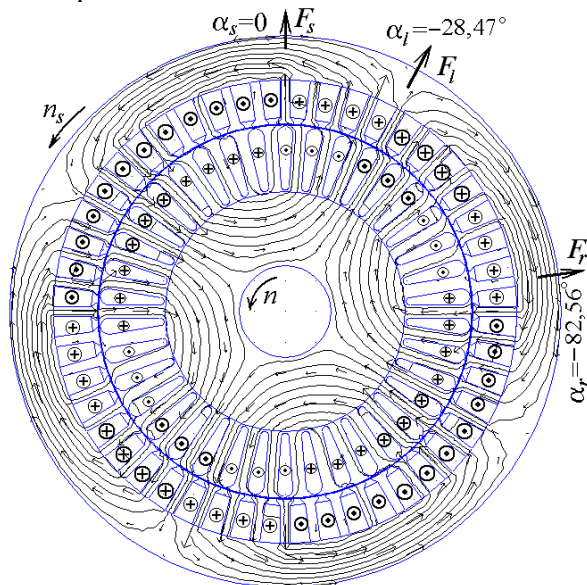


Рис. 4. Магнитное поле ТАД в режиме нагрузки

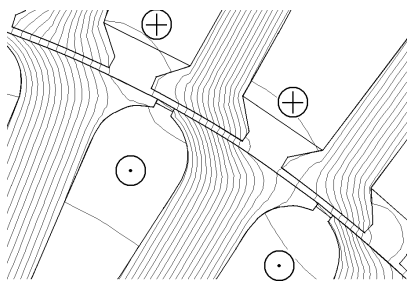


Рис. 5. Фрагмент картины магнитного поля

На рис. 4 даны условные направления МДС на одном полюсном делении: F_s – обмотки статора, F_r – обмотки ротора и F_l – условной результирующей. Соответствующие значения углов для МДС получены по правилам, изложенным в [10].

Очевидно, что при переходе от режима ХХ к номинальной нагрузке результирующая МДС и картина магнитного поля тоже (см. [10]), повернулись на угол α_l . Этот угол, по аналогии с синхронными машинами [1], в [10] названо углом нагрузки ТАД.

Для получения временных функций электромагнитных величин проводятся многопозиционные расчеты МП для задаваемого с шагом Δt временного ряда [5, 7, 13]

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); \quad k=1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (3)$$

с обеспечением имитацией вращения ротора посредством его установки в угловые позиции

$$\alpha_k = \Delta \alpha \cdot (k-1) \cdot (1-s); \quad k=1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (4)$$

с шагом $\Delta \alpha = \Omega_s \cdot \Delta t$, где k – номер момента времени и угловой позиции ротора; K_{\min} – минимальное число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на заданном временном интервале; $\Omega_s = \omega_s / p$ – угловая скорость вращающегося МП.

В (4) текущее отставание ротора от вращающегося МП статора учитывается скольжением s . Это не следует путать с объясненным выше и учтенным в (2) установившимся отставанием «волны» токов ротора от «волны» токов статора в процессе их синхронного вращения.

Важно то, что каждое новое распределение токов по пазам ротора в соответствии с (2) должно происходить уже после очередного поворота ротора на угол $\Delta \alpha$. И здесь уже рассматривается не некоторый общий угол поворота (4), а угловые позиции пазов ротора. В формуле (2) они будут адекватными благодаря пересчету каждый раз координаты перемещающегося с вращающимся ротором его 1-го паза:

$$\alpha_{r1} = \alpha_{r10} + \Delta \alpha \cdot (k-1) \cdot (1-s); \quad k=1, 2, \dots, K_{\min},$$

где α_{r10} – координата 1-го паза ротора в начальный момент времени, когда паз является ближайшим к вертикальной оси в сторону возрастания угла α .

Повороты ротора (4), вычисление токов статора (1) и ротора (2) в моменты времени (3), а также вычисление и сбор необходимых результатов расчета проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в FEMM, по аналогии с [13].

При расчетах угол поворота ротора $\Delta \alpha$ между фиксированными позициями, а также размеры треугольников конечно-элементной структуры взяты достаточно малыми для обеспечения необходимой детализации функций рассматриваемых величин. В основных расчетах число узлов составляло 40 тыс., в контрольных – до 123 тыс.

В итоге временные функции электромагнитных и силовых величин представлялась дискретными рядами типа

$$\Gamma(t_k), \quad k=1, 2, \dots, K_{\min},$$

где пока использован абстрактный символ Γ .

Пробовались разные тестовые варианты углового шага $\Delta\alpha$, и в результате основным был принят вариант $\Delta\alpha=1^\circ$, обеспечивающий достаточную детализацию временных функций. Эти функции формировались на периоде T изменения токов статора (1) при числе позиций K_{\min} , составляющем 181. Время расчета на компьютере достаточно высокого уровня заняло около 3,2 часа.

Следует заметить, что в «идеале» полный период электромагнитных и силовых величин в ТАД составляет $T_p=T/s_N$. При этом значения токов обмоток, а также взаимное расположение зубцов статора и ротора полностью повторяются, и в этом случае можно обеспечить точное совпадение значений временных функций $\Gamma(T_p) = \Gamma(0)$. Однако при таком периоде время расчета оказалось бы чрезмерно большим и не оправдывающим его цели. В реальности, для выявления локальных и практически наглядных условных периодов рассматриваемых силовых функций достаточно указанного периода T , несмотря на то, что значения $\Gamma(T)$ и $\Gamma(0)$ имеют некоторые незначительные расхождения.

6. Анализ силовых действий в ТАД

Электродинамические усилия, действующие в пазах ротора и статора непосредственно на проводники обмоток с током, определяются на основе закона Ампера, как и в [5-7]. В полярной системе координат угловая и радиальная составляющие и модуль силы на весь паз:

$$F_{A\alpha} = l_a \int_S [B_\alpha \sin(\Delta\alpha_n) - B_r \cos(\Delta\alpha_n)] J_z dS; \quad (5)$$

$$F_{Ar} = l_a \int_S [B_\alpha \cos(\Delta\alpha_n) + B_r \sin(\Delta\alpha_n)] J_z dS; \quad (6)$$

$$F_A = \sqrt{F_{A\alpha}^2 + F_{Ar}^2}, \quad (7)$$

где $\Delta\alpha_n = \alpha - \alpha_n$ – угол приведения; α_n – угол оси паза, к которой приводятся эти силы; S – площадь сечения паза, занятая током.

Распределения сил F_A по пазам статора и ротора в начальный момент времени, соответствующий картине МП на рис. 4, показаны в векторной форме на рис. 6, длины векторов даны в указанном масштабе. Общий характер действия сил очевиден: они направлены вглубь своего сердечника, т.е. имеют практически только радиальную составляющую. В целом эти силы вносят в результирующий ЭММ ТАД, составляющий 101 Н·м, как будет показано далее, незначительную долю: в роторе вращающий момент от этих сил 0,53 Н·м, в статоре 0,70 Н·м.

Резкая неравномерность распределения сил по обмотке статора на рис. 6 объясняется тем,

что в разных фазных обмотках проходят разные мгновенные значения токов (1). Наибольшая сила на паз ротора составляет 5,0 Н, на паз статора – 3,2 Н.

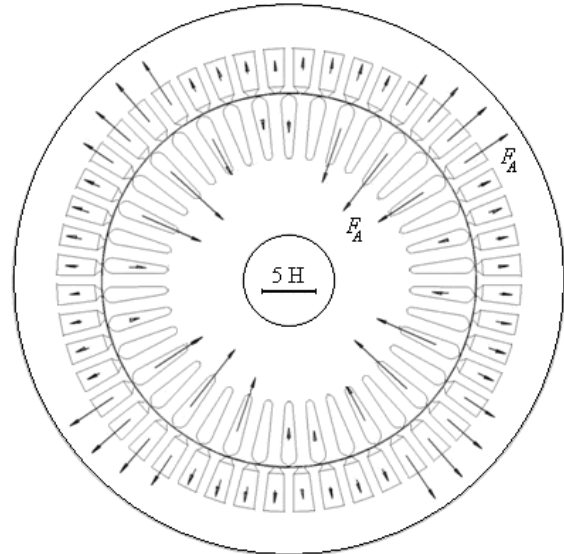


Рис. 6. Векторы сил, действующих на проводники обмоток статора и ротора

В качестве объекта для демонстрации *временных функций электродинамических сил* избран паз обмотки статора, находящийся на рис. 1 в фазной зоне $+i_A$ вторым по угловому отсчету. Расчеты, проведенные в заданные моменты времени (3), дали дискретные временные функции координатных составляющих сил:

$$F_{A\alpha}(t_k); \quad F_{Ar}(t_k), \quad k=1, 2, \dots, K_{\min}. \quad (8)$$

Эти функции рассматриваемых сил показаны на рис. 7, где время дано в о.е. от периода токов статора T . Их условный период T_2 составляет $T/2$, т.е. они имеют несущую частоту f_{s2} в два раза большую, чем частота токов статора f_s .

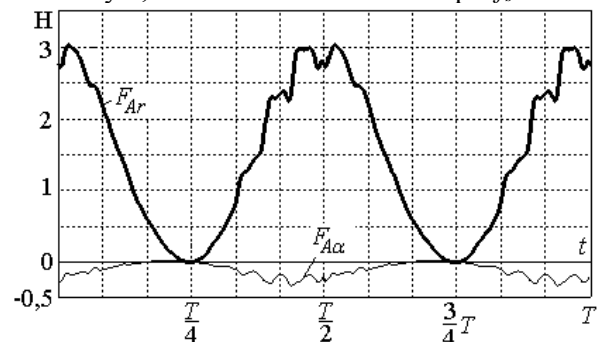


Рис. 7. Временные функции координатных составляющих электродинамической силы, действующей на проводники паза статора

Силовые действия на ферромагнитный сердечник ТАД в целом и его элементы, в т. ч. и ЭММ, после расчета МП определяются через тензор магнитного натяжения (ТМН) Максвелла [14], как и в [5-7]. В нашем случае ТМН рассмат-

ривається як давление на единицу цилиндрической поверхности S в зазоре, как это уже представлено в [7]. На этой поверхности определяются нормальная (радиальная) и касательная (угловая) к ней составляющие ТМН, Н/м²:

$$f_{Tr} = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2 - B_\alpha^2); \quad f_{T\alpha} = \frac{1}{\mu_0}(B_r \cdot B_\alpha), \quad (9)$$

где $\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Для на зубцов сердечника статора силовые действия определяется в пределах их зубцовых делений на дуге с радиусом r_δ вблизи расточки сердечника статора. Угловая и радиальная составляющие силы магнитного тяжения на основе составляющих ТМН (9) определяются интегрированием по формулам

$$F_{T\alpha t} = r_\delta l_a \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [f_{T\alpha} \cos(\Delta\alpha_z) + f_{Tr} \sin(\Delta\alpha_z)] d\alpha; \quad (10)$$

$$F_{Trt} = r_\delta l_a \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [f_{Tr} \cos(\Delta\alpha_z) - f_{T\alpha} \sin(\Delta\alpha_z)] d\alpha, \quad (11)$$

где α_1, α_2 – начальная и конечная угловые координаты указанной дуги; $\Delta\alpha_z = \alpha - \alpha_z$ – угол приведения; α_z – угловая координата оси зубца, к которой приводятся эти силы.

Графики статического распределения сил по зубцам статора в начальный момент времени, соответствующий картине МП на рис. 4, показаны на рис. 8.

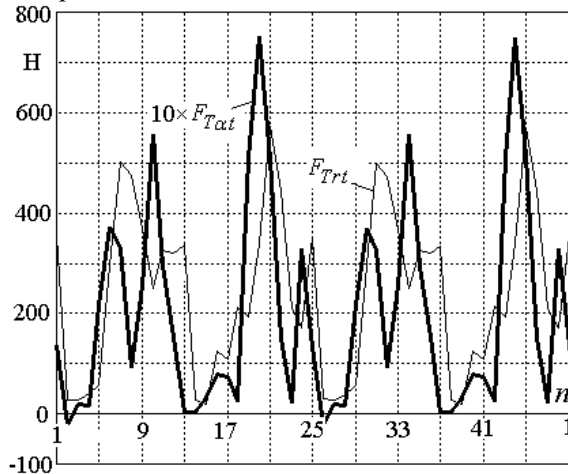


Рис. 8. Распределение угловой $F_{T\alpha t}$ и радиальной F_{Trt} составляющих сил по зубцовым делениям статора в воздушном зазоре (n – номер зубца)

Для совмещения на одном рисунке составляющие сил даны в разных масштабах. Очевидно, что радиальная составляющая сил примерно на порядок больше угловой. Полезной является именно угловая составляющая, так как совокупность таких сил и обеспечивает ЭММ ТАД. А в

целом силы по (10), (11) оказались многократно большими, чем электродинамические силы по формулам (5)-(7), представленные на рис. 6 и рис. 7.

Для получения временных функций сил конкретно рассматривался один зубец на вертикальной оси в верхней части рис.1. Расчеты, проведенные по (10), (11) в заданные моменты времени (3), дали дискретные временные функции составляющих силы

$$F_{T\alpha t}(t_k), \quad F_{Trt}(t_k), \quad k=1,2,\dots, K_{\min}. \quad (12)$$

Так же, как и для функций (5), (6), здесь несущей является частота f_{s2} .

Динамика изменения сил, действующих на зубцовом делении статора, представлена на рис. 9 временной функцией угловой составляющей силы $F_{T\alpha t}$, как полезной для создания ЭММ. Она является резко пульсирующей с изменением знака (т.е. направления) на локальном участке и имеет значительную долю постоянной составляющей. На рисунке показан зубец статора и связанные с ним углы α_1, α_2 и α_z , входящие в формулы (10), (11), а также показано преимущественное направление силы $F_{T\alpha t}$.

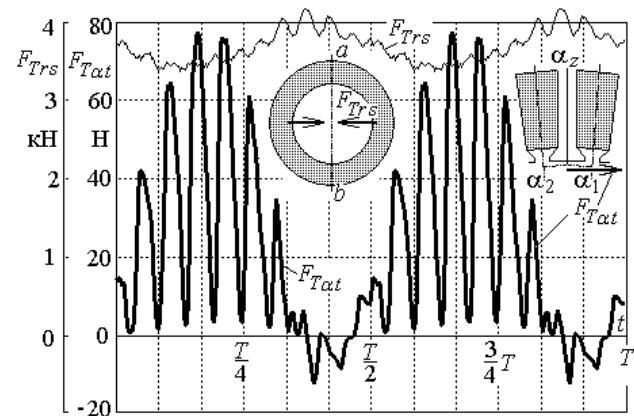


Рис. 9. Временные функции:

$F_{T\alpha t}$ – угловая сила на зубцовом делении статора; F_{Trs} – стягивающая сила на половине окружности сердечника статора

Силы, действующие на сердечник статора в целом, также определялись в его поперечном сечении на основе составляющих ТМН (9). Конкретно рассматривалась радиальная сила

$$F_{Trs} = r_\delta l_a \int_0^\pi [f_{Tr} \cos(\alpha - \alpha_q) - f_{T\alpha} \sin(\alpha - \alpha_q)] d\alpha, \quad (13)$$

приходящаяся на половину сечения сердечника. Она определялась на дуге окружности в пределах двух полюсных делений ТАД, проведенной вблизи расточки сердечника статора на радиусе r_δ . Эта сила приведена к горизонтальной оси, расположенной под углом $\alpha_q = 90^\circ$.

Расчеты для заданных моментов времени (3) дали дискретную временную функцию силы

$$F_{Trs}(t_k), k=1,2,\dots, K_{min}, \quad (14)$$

с периодом повторения T_2 и несущей частотой f_{s2} – такими же, как и для функций (8), (12).

Динамика изменения силы F_{Trs} представлена на рис. 9, где показан сердечник статора, а также даны направления сил F_{Trs} , действующих на его половинки. Эти силы являются пульсирующими с главенством постоянной составляющей. Они приложены к аксиальному сечению сердечника по линии ab . Для любого другого аксиального сечения временные функции силы повторяются, только с соответствующим временным сдвигом.

Для определения *электромагнитного момента* в программе FEMM [4] предусмотрена процедура, которая в кольцевом слое зазора формирует совокупность контуров, и ЭММ определяется через угловую составляющую ТМН, как поверхностный интеграл по площади S_δ поперечного сечения такого слоя, распространяющегося на аксиальную длину ТАД:

$$\begin{aligned} M_{em} &= \frac{l_a}{(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} r f_{T\alpha} dS = \\ &= \frac{l_a}{\mu_0 (r_s - r_r)} \int_0^{2\pi} \int_{r_r}^{r_s} B_r B_\alpha r dr d\alpha, \end{aligned} \quad (15)$$

где r_r и r_s – радиусы цилиндрических поверхностей, ограничивающие площадь S_δ сечения зазора со сторон ротора и статора.

Расчеты, проведенные в заданные моменты времени (3), дали дискретную временную функцию ЭММ

$$M_{em}(t_k), k=1,2,\dots, K_{min}. \quad (16)$$

Из функции ЭММ $M_{em}(t_k)$ выделили переменную составляющую

$$dM_{em}(t_k) = M_{em}(t_k) - M_{emav}, k=1,2,\dots, K_{min}, \quad (17)$$

которая имеет период повторения T_6 , равный шестой части от глобального периода T , что вызвано дискретной структурой фазных зон обмотки статора.

Графики функций (16), (17) даны на рис. 10 на шести периодах T_6 , что соответствует глобальному периоду T или двум периодам T_2 уже рассмотренных функций (8), (12) и (14).

Наряду с уже названными пульсациями очевидны явно выраженные в функции $dM_{em}(t)$ «стихийные» зубцовые пульсации. Конечно, значения переменной составляющей ЭММ dM_{em} на два порядка меньше его среднего значения M_{emav} , которое для рассмотренного ТАД составляет 101 Н·м. Пульсации ЭММ, наряду с другими –

рассмотренными выше циклическими силовыми действиями в ТАД, как известно, и приводят к шуму и вибрации его активной части.

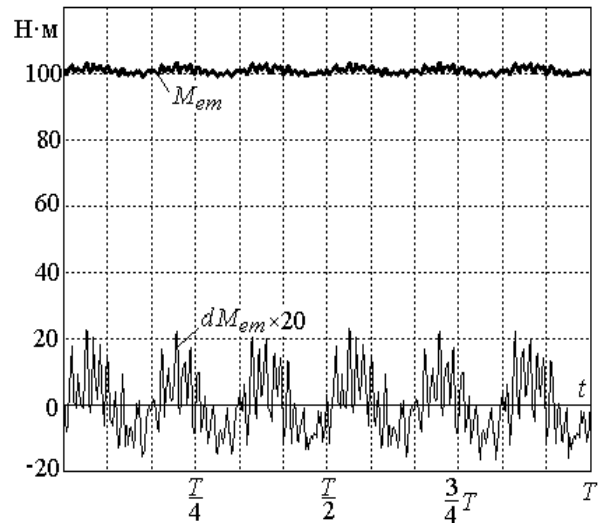


Рис. 10. Временные функции электромагнитного момента – M_{em} и его переменной составляющей – dM_{em} (в увеличенном масштабе)

В завершение анализа силовых действий в ТАД отметим, что вычисления по формулам (5), (6), (10), (11), (13) и (15), связанные с интегрированием, не представляют сколько-нибудь серьезной проблемы. В программе FEMM интегрирование осуществляется численно и организуется с помощью управляющей программы на скрипте Lua, о которой уже было упоминание выше по тексту и что представлено в [13].

7. Энергетические параметры ТАД

Электромагнитный момент и потери мощности, определенные при проектировании ТАД, дают возможность проверить, как это показано в [10], насколько его выходная мощность соответствует проекту [1].

Электромагнитная мощность ТАД:

$$P_{em} = M_{em} \cdot \Omega_s \cdot 10^{-3} = 15,87 \text{ кВт.}$$

Полезная (выходная) мощность на валу ТАД получается за вычетом потерь мощности в роторе ТАД, взятым по проектным данным:

$$P_{out} = P_{em} - P_{magad} - P_{elr} - P_{mec} - P_{ad}, \quad (18)$$

где потери мощности: электрические в роторе $P_{elr} = 410$ Вт; добавочные магнитные в роторе $P_{magad} = P_{arr} + P_{pulr} = 87,3$ Вт складываются из поверхностных $P_{arr} = 18,2$ Вт и пульсационных $P_{pulr} = 69,1$ Вт; полные механические потери мощности $P_{mec} = 117$ Вт; добавочные потери мощности $P_{ad} = 84,3$ Вт.

В итоге по (18) $P_{out} = 15,17$ кВт, что весьма близко к заданной номинальной мощности ТАД. Хотя погрешность могла быть, в принципе, и большей, так как при расчетах использовался

целый ряд допущений. Но, как бы то ни было, результаты численно-полевого расчета подтвердили правильность проекта данного ТАД в пределах возможных погрешностей.

Выводы

1. Численный расчет МП является эффективной основой для определения и анализа широкого спектра силовых действий в электрических машинах. При этом вычисление разных сил и вращающих моментов практически лишено каких-либо серьезных условий и дает качественно и количественно достоверную информацию с учетом практически любой формы конструкции и насыщения магнитопровода, а динамика изменения силовых действий выявляется на основе многопозиционных расчетов вращающегося МП.

2. Численно-полевым анализом силовых действий в ТАД проявил их физическую основу и показал их величину и динамику для элементов его конструкции. При этом выявлено, что силы, действующие на проводники обмоток статора и ротора, относительно небольшие и не вносят сколько-нибудь заметного вклада в ЭММ ТАД. В то же время, силы, действующие на зубцы сердечника статора и внутри сердечника в целом, достигают весьма существенных значений, которые должны учитываться при расчете механической устойчивости активной части ТАД, ее вибраций и шума. Особенно с учетом того, что эти силовые действия имеют удвоенную несущую частоту и высшие гармонические составляющие.

3. Во временной функции ЭММ на фоне основной постоянной составляющей выявлены пульсации, связанные с дискретной структурой фазных зон обмотки статора, а также зубцовые пульсации, что может явиться также основой расчета вибро-акустических характеристик ТАД.

4. Принцип расчетного анализа динамики силовых действий, продемонстрированный на примере ТАД, может быть распространен и на другие типы электрических машин с иной конструкцией элементов их активной части.

Список использованной литературы

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока [Текст] / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2010. – 356 с.

2. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. Под ред. И. П. Копылова. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

3. Bianchi, Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)

[Text] / Nicola Bianchi // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.

4. Finite Element Method Magnetics : Old Versions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.

5. Милых, В. И. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 40–46.

6. Милых, В. И. Силовые взаимодействия в турбогенераторе в различных стационарных режимах работы [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 47–54.

7. Милых, В. И. Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцовыми структурами в номинальном режиме работы [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 56–63.

8. Петрушин, В. С. Использование многокритериальной оптимизации при проектировании регулируемых асинхронных двигателей [Текст] / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // Вісник НТУ «ХП». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 11 (1183). – С. 11–14.

9. Васьковський, Ю. М. Діагностика кутового ексцентриситету ротора асинхронних двигунів на основі аналізу вібробуджуючих сил [Текст] / Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін, Н. В. Беленок // Вісник НТУ «ХП». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 11 (1183). – С. 30–35.

10. Милых, В. И. Численно-полевым повелочный анализ проектных параметров трехфазных асинхронных двигателей [Текст] / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук : 2016. – Вип. 1/2016 (33). – С. 58–65.

11. Милых, В. И. Численно-полевым анализ магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя в статике и динамике [Текст] / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Вісник НТУ «ХП». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 11 (1183). – С. 80–87.

12. Милых, В. И. Автоматизированное формирование расчетных моделей турбогенераторов для программной среды FEMM [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 4. – С. 7–14. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.02.

13. Милых, В. И. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 6. – С. 14–20. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.04.

14. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Высш. школа, 1989. – 312 с.

References

1. Voldek, A. I., Popov, V. V., (2010), “Electrical Machines. Machines of alternating current” [Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka], SPb, Russian Federation, Piter Publ, 356 p.

2. Kopylov, I. P., Goryainov, F. A., Klokov, B. K., (2011), “Design of electrical machines” [Proektirovanie elektricheskikh mashin], Moscow, Russian Federation, Yurait Publ, 767 p.

3. Bianchi, Nicola, (2005), *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements* (Copyrighted Material). CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 276 p.

4. “Finite Element Method Magnetics : OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable”, available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.

5. Milykh, V. I., Polyakova, N. V., (2006), “Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field” [Opredelenie elektromagnitnykh parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley], *Electrotehnika i Electromekhanika*, Kharkiv, Ukraine, No. 2, pp. 40–46.

6. Milykh, V. I., Polyakova, N. V., (2013), “The force interactions in turbogenerator in different steady-state working conditions” [Silovyye vzaimodeystviya v turbogeneratorakh v razlichnykh statsionarnykh rezhimakh raboty], *Tekhnichna Elektrodinamika*, Kiev, Ukraine, No. 5, pp. 47–54.

7. Milykh, V. I., Polyakova, N. V., (2014), “Dynamics of force action in turbogenerators with different tooth-slot structures in nominal mode” [Dinamika silovykh deystviy v turbogeneratorakh s raznyimi zubtsovo-pazovymi strukturami v nominalnom rezhime raboty], *Tekhnichna Elektrodinamika*, Kiev, Ukraine, No. 3, pp. 56–63.

8. Petrushin, V. S., Yenoktaiev, R. N., (2016), “Using a multi-criteria optimization in the design of controlled asynchronous motors” [Ispolzovanie mnogokriterialnoy optimizatsii pri proektirovanii reguliruemyykh asinhronnykh dvigateley], *Bulletin of NTU KhPI. Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, Kharkiv, NTU KhPI, Ukraine, No. 11 (1183), pp. 11–14.

9. Vaskovskiy, Yu. N., Geraskin, A. A., Belevok, N. V., (2016), “Induction motors angular rotor eccentricity diagnosis by analyzing vibroperturbing forces” [Diagnostika kutovogo ekscentrisiteta rotora asinhronnykh dviguniv na osnovi analizu vibrozbudzhuyuchih sil], *Bulletin of NTU KhPI. Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, Kharkiv, NTU KhPI, Ukraine, No. 11 (1183), pp. 30–35.

10. Milykh, V. I., Shilkova, L. V., (2016), “Numerically-field confirmatory analysis of a three-phase induction motor design parameter” [Chislennopolevoy poverochnyy analiz proektnykh parametrov trehfaznykh asinhronnykh dvigateley], *Electromekhanika i Energozberigayuchi Sistemi*, Kremenchug, Ukraine, No. 1/2016 (33), pp. 58–65.

11. Milykh, V. I., Shilkova, L. V., (2016), “Numerical-field analysis of the magnetic field of a three-phase induction motor in statics and dynamics” [Chislennopolevoy analiz magnitnogo polya trehfaznogo asinhronnogo dvigatelya v statike i dinamike], *Bulletin of NTU KhPI. Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, Kharkiv, NTU KhPI, Ukraine, No. 11 (1183), pp. 80–87.

12. Milykh, V. I., Polyakova, N. V., (2015), “Automated formation of calculation models of turbogenerator for software environment FEMM” [Avtomatizirovannoe formirovanie raschetnykh modeley turbogeneratorov dlya programmnoy sredy FEMM], *Electrotehnika i Electromekhanika*, Kharkiv, Ukraine, No. 4, pp. 7–14. (In Russian), doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.02.

13. Milykh, V. I., Polyakova, N. V., (2015), “Automated calculations of the dynamics of a turbogenerator electromagnetic processes in the software environment FEMM” [Avtomatizirovannyye raschety v programmnoy srede FEMM dinamiki elektromagnitnykh protsessov turbogeneratorov], *Electrotehnika i Electromekhanika*, Kharkiv, Ukraine, No. 6, pp. 16–20.

14. Иванов-Смоленский, А. В., (1989), “Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines” [Elektromagnitnyye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh], Moscow, Russian Federation, Vysshaya shkola, 312 p.

NUMERICAL-FIELD ANALYSIS OF POWER ACTIONS IN A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR IN STATICS AND DYNAMICS

V. I. Milykh

National technical university "Kharkiv polytechnic institute"

Abstract. Purpose. Presentation of the principles and results of numerical-field calculation of the coordinate and temporal functions of power actions of an electromagnetic nature in the active zone of a three-phase induction motor (TIM) under load conditions. **Methodology.** Calculations of magnetic fields are carried out with the finite elements method by the FEMM program. The calculations are automated by controlling the operation of the program by means of the scripts created in Lua language. Coordinate functions are obtained by a one-time calculation in a statics, temporal functions – in dynamics by multi-position calculations of rotating magnetic fields within the full rotation of the rotor. **Results.** Test calculations are carried out on a 15 kW TIM. The distribution of forces along the stator and rotor grooves, along the stator teeth, as well as the dynamics of the changes of these forces and also the forces of radial contraction of the stator core and of the electromagnetic moment of the stator and rotor interaction are analyzed. **Originality.** The updated principles of forming the design model of TIM are presented on the basis of design data with the original formation of the current structure in the rotor grooves, as well as the author's principles for organizing multi-position calculations of the rotating magnetic fields of TIM in dynamics. Unique temporal functions of forces acting on individual elements of the electromagnetic system of TIM are obtained. **Practical value.** Numerical-field analysis of the coordinate functions of the forces acting in the TIM allowed to reveal aspects that were previously unavailable when using classical methods for calculating the TIM magnetic circuit. The results showed that when they are taken into account, the TIM design process has reserves of refinement in terms of ensuring its mechanical reliability and durability.

Key words: three-phase induction motor, load mode, magnetic fields, numeral calculations, power interactions, coordinate and temporal functions.

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВИЙ АНАЛІЗ СИЛОВИХ ДІЙ У ТРИФАЗНОМУ АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ В СТАТИЦІ І ДИНАМІЦІ

В. І. Мілих

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Представлені принципи і результати чисельно-польового розрахунку координатних розподілів і часових функцій силових дій електромагнітного характеру в активній зоні трифазного асинхронного двигуна в режимі навантаження. На прикладі двигуна потужністю 15 кВт аналізуються розподіл сил по пазах статора і ротора, по зубцях статора, а також динаміка зміни цих сил і ще сил радіального стягання осердя статора і електромагнітного моменту взаємодії статора і ротора.

Ключові слова: трифазний асинхронний двигун, режим навантаження, магнітні поля, чисельні розрахунки, силові дії, координатні і часові функції.

Получено 10.04.2017



Милых Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Ул. Кирпичева, 2, Харьков, Украина, E-mail: mvikemkpi@gmail.com, тел. +38-050-751-52-65

Vladimir Milykh, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of Electrical machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpichova str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-6176-3103