

## АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ В КОРОТКОЗАМКНУТЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВИБРОВОЗМУЩАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

*Розроблена польова математична модель для аналізу електромагнітних вібробуджуючих сил в короткозамкнених асинхронних двигунах. Встановлено взаємозв'язок між вібробуджуючими силами і сигналами датчиків вібрації. Проведено аналіз сигналів датчиків при наявності ушкоджень обмотки ротора, який покладено в основу методу діагностики технічного стану двигуна.*

*Разработана полевая математическая модель для анализа электромагнитных вибровозмущающих сил в короткозамкнутых асинхронных двигателях. Установлена взаимосвязь между вибровозмущающими силами и сигналами датчиков вибрации. Проведен анализ сигналов датчиков при наличии поврежденных обмотки ротора, который положен в основу метода диагностики технического состояния двигателя.*

### ВВЕДЕНИЕ

Один из основных методов контроля технического состояния и диагностики повреждений электрических машин основан на анализе сигналов датчиков вибрации, устанавливаемых на корпусе машины. Этот метод, называемый методом вибрационного контроля и диагностики, обладает высоким уровнем чувствительности к изменению технического состояния машины и уже подтвердил свою эффективность при обеспечении надежности функционирования сложного электротехнического оборудования. Вместе с тем проблема точной идентификации вида дефекта, основанная на анализе сигналов датчиков пока еще не решена. Наиболее достоверная идентификация могла бы базироваться на результатах экспериментальных наблюдений вибраций машин при возникновении в них повреждений. Однако, с учетом огромного многообразия электрических машин, отличающихся конструкцией, мощностью и частотой вращения ротора, значительного количества возможных вариантов их повреждений и других факторов, построение полной экспериментально обоснованной базы знаний для вибрационной диагностики дефектов электрических машин встречает значительные трудности.

Решение указанной проблемы можно найти при использовании методов математического моделирования, позволяющих провести "численные эксперименты" с большим количеством различных машин, имеющих разные дефекты, и установить определенные закономерности. Результатом "численного эксперимента" является расчетная временная зависимость сигнала вибродатчика.

В данной статье рассматриваются короткозамкнутые асинхронные двигатели (АД), имеющие дефекты короткозамкнутой обмотки ротора в виде разрывов ее стержней.

### МОДЕЛЬ СИГНАЛА ВИБРОДАТЧИКА

Вначале рассмотрим способ математического моделирования сигнала вибродатчика. Будем рассматривать датчики виброускорения. Эти датчики предназначены для преобразования механических колебаний в электрические сигналы, пропорциональные среднеквадратичному значению виброускорения корпуса преобразователя. Действие преобразователя основано на пьезоэлектрическом эффекте. Внешние механические силы, воздействуя на пьезоэлектрический кристалл, вызывают в нем не только механические напряжения и деформации, но и появление на его поверхностях электрических зарядов разных знаков. При анализе будем рассматривать только вибровозмущающие силы электромагнитного происхожде-

ния, т.е. предполагаем, что из результирующего сигнала датчика удалены составляющие, вызванные вибровозмущающими силами другой физической природы. Например, механические вибрации, вызванные дефектами подшипников, небалансом ротора и другими причинами, могут быть выделены и удалены из суммарного сигнала в режиме нагрузки по результатам измерений вибраций на холостом ходу.

Под действием вибровозмущающих сил, формирующихся в магнитном поле воздушного зазора двигателя, сердечник статора совершает радиальные вынужденные колебания. Если принять модель зубца в виде простой колебательной системы, содержащей груз, подвешенный на вертикально расположенной пружине, то продольные (радиальные) колебания зубца описываются следующим уравнением [5]:

$$m_z \frac{d^2x}{dt^2} + cx = F_n(t), \quad (1)$$

где  $m_z$  – эквивалентная масса системы, равная массе зубца и присоединенной к нему массы сектора ярма статора в пределах одного зубцового деления;  $c$  – эквивалентная жесткость системы, отображающая силы упругого взаимодействия внутри материала зубца и ярма статора;  $F_n(t)$  – радиально направленная периодическая во времени электромагнитная сила, приложенная к коронке зубца;  $x$  – координата (виброперемещение), характеризующая отклонение коронки зубца от положения равновесия (в отсутствие силы  $x = 0$ ).

Жесткость колебательной системы можно выразить как  $c = ES_z/h$ , где  $E$  – модуль упругости;  $S_z$  – площадь поверхности коронки зубца;  $h = h_z + h_j$ ,  $h_z$ ,  $h_j$  – высоты, соответственно, зубца и ярма. Масса системы соответственно равна  $m_z = \rho S_z h$ , где  $\rho$  – плотность стали.

Общее решение уравнения (1) содержит два слагаемых. Первое слагаемое  $x_c = A \sin(\omega_c t + \alpha)$  характеризует свободные гармонические колебания, где  $A$  – амплитуда колебаний,  $\alpha$  – начальная фаза колебаний,  $\omega_c = \sqrt{c/m_z}$  – собственная частота свободных колебаний. Второе слагаемое характеризует вынужденные установившиеся колебания системы с угловой частотой  $\omega_b$ , соответствующей частоте действия вынуждающей силы  $F_n(t)$ . В правильно спроектированных конструкциях электрических машин частота собственных колебаний сердечника статора намного превышает частоту вынужденных колебаний:  $\omega_c \gg \omega_b$ . Это можно показать на следующем примере. Подставляя в приведенные выражения численные значения, соответствующие физическим характеристикам стали сердечника статора и реальной геометрии мощного АД типа АТД, получим  $\omega_c = 4,9 \cdot 10^4$  рад/с или

$f_c = 7820$  Гц. Эта частота намного превышает не только частоту основной гармоники электромагнитной силы  $f_b = 100$  Гц [6], но и частоту первой зубочной гармоники, которая в АД равна 2300 Гц. Поэтому условия резонанса отсутствуют и свободные колебания в пределах одного периода действия вынуждающей силы быстро затухают. Следовательно, в уравнении (1) второй производной перемещения  $x$  можно пренебречь, а само перемещение считать пропорциональным приложенной силе [5]. Описанная модель является упрощенной, т.к. не учитывает связи зубца с ярмом, но в целом адекватно характеризует соотношение частот собственных и вынужденных колебаний статора электрической машины [6, 7].

На практике вибродатчики обычно устанавливаются на корпусе двигателя, а вибровозмущающая сила возникает и формируется на внутренней поверхности расточки статора и передается к датчику через сердечник посредством упругих колебаний. Будем предполагать, что сигнал вибрации распространяется от места его возникновения до приемного датчика без искажений и потерь. Это позволяет выбрать при моделировании расчетную точку  $M$  (точку условного расположения датчика) на коронке зубца статора. Таким образом, для моделирования сигнала датчика достаточно найти временную зависимость вибровозмущающей электромагнитной силы в точке  $M$  условного расположения датчика. Далее будем рассматривать плотность силы – электромагнитное давление (тензор магнитного натяжения)  $T_{nM}(t) = F_{nM}(t)/S_z$ .

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В основе математической модели лежит дифференциальное уравнение электромагнитного поля, записанное относительно векторного магнитного потенциала [1]. Поскольку моделируется сигнал вибродатчика, расположенного на статоре, то уравнение поля необходимо решать в статорной системе координат. При рассмотрении двумерной картины электромагнитного поля в поперечном сечении в декартовых координатах это уравнение относительно единственной осевой составляющей потенциала  $A_z$  имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \mu\gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \mu\gamma \left( v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\mu J_{z\text{стоп}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\gamma$  – электропроводность;  $v_x, v_y$  – составляющие скорости движения электропроводной среды, в данном случае ротора, относительно системы координат;  $J_{z\text{стоп}}$  – плотность сторонних токов (в данном случае это плотности токов в пазах статора, задаваемые в соответствии со схемой обмотки статора).

Уравнение (1) дополняется однородными граничными условиями первого рода  $A|_G = 0$  на линии  $G$  внешней поверхности яра статора, ограничивающей расчетную область.

Для получения зависимостей сигнала вибродатчика в режиме реального времени в математической модели необходим строгий учет перемещения ротора относительно статора. Решение такого рода сложных полевых задач связано с учетом изменения во времени конфигурации расчетной области. Численное решение нестационарного уравнения (2) осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ). При использовании МКЭ для решения задачи с вращающимся ротором необходимо применение специальных методов и алгоритмов, предусматривающих деформацию сетки конечных элементов при переме-

щении ротора [4]. Эти алгоритмы были использованы в рамках конечноэлементной системы COMSOL.

Нормальная и тангенциальная составляющие тензора натяжения в точке  $M$  на коронке зубца статора рассчитываются по следующим выражениям [1]:

$$\begin{aligned} T_{nM}(t) &= \frac{1}{2\mu} \cdot [B_{nM}^2(t) - B_{\tau M}^2(t)], \\ T_{\tau M}(t) &= \frac{B_{nM}(t) \cdot B_{\tau M}(t)}{\mu}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $B_{nM}(t), B_{\tau M}(t)$  – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции в точке  $M$ .

Интерес представляет нормальная составляющая тензора, которая формирует радиально направленные вибрации сердечника статора. Моделирование поврежденных стержней клетки ротора осуществляется заданием электропроводности  $\gamma = 0$  в пазах ротора, в которых находятся поврежденные стержни. Таким образом, результатом моделирования является расчетная временная зависимость  $T_{nM}(t)$ , которая в заданном масштабе соответствует сигналу вибродатчика.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проанализируем сигналы вибродатчика при появлении в двигателе поврежденных стержней ротора на примере двух мощных АД. На рис. 1,а и рис. 1,б представлены расчетные результаты для двухполюсного двигателя собственных нужд типа АДД мощностью 5000 кВт (номинальное линейное напряжение  $U_{нл} = 6000$  В, номинальный фазный ток  $I_{нф} = 545$  А, число пазов статора и ротора  $Z_1 = 54, Z_2 = 46$ , номинальное скольжение  $s = 0,005$ , материал стержней ротора – медь). Приведены расчетные зависимости составляющей тензора  $T_{nM}(t)$  в точке  $M$  на коронке зубца статора по вертикальной поперечной оси за время одного полного оборота ротора 0,02 с. Рис. 1,а соответствует неповрежденному двигателю, а рис. 1,б – двигателю с двумя рядом лежащими поврежденными стержнями ротора.

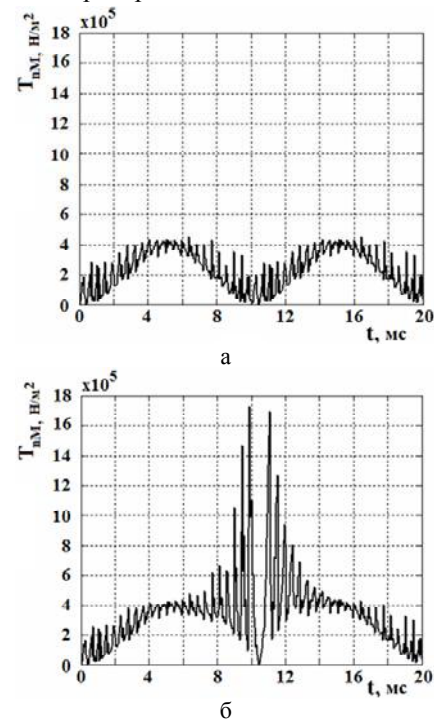


Рис. 1. Временные зависимости тензора натяжения за время одного полного поворота ротора: а – неповрежденный АДД; б – АДД с двумя поврежденными стержнями ротора

Из рис. 1,б видно, что при прохождении поврежденных стержней над датчиком в нем формируется сильный импульс, обусловленный искажением магнитного поля в воздушном зазоре. Показанная на рис.1,б форма сигнала соответствует такому состоянию ротора, при котором *стержни ротора находятся в середине токового полюса ротора*. Это ведет к максимальному искажению сигнала. Индуцированные токи ротора вращаются с частотой скольжения относительно поврежденных стержней, в результате чего в дальнейшем стержни оказываются расположенными между токовыми полюсами ротора (в зоне отсутствия токов ротора). При этом искажение магнитного поля в зазоре исчезает и сигнал датчика идентичен сигналу неповрежденного АД. Далее поврежденные стержни ротора оказываются в зоне токов ротора противоположной полярности, в результате искажение сигнала вновь становится максимальным, но смещенным по фазе на  $180^\circ$  относительно показанного на рис. 1,б.

На рис. 2 изображены аналогичные кривые для *шестиполюсного* тягового асинхронного двигателя типа СТА мощностью 1200 кВт (номинальное линейное напряжение  $U_{\text{нл}} = 1080$  В, номинальный фазный ток  $I_{\text{нф}} = 452$  А, число пазов статора и ротора  $Z_1 = 72$ ,  $Z_2 = 62$ , номинальное скольжение  $s = 0,01$ , материал стержней ротора – медь). Приведены расчетные зависимости  $T_{\text{нМ}}(t)$  в точке М, расположенной на коронке зубца статора по вертикальной оси, за время *одного полного оборота* ротора 0,06 с.

Рис. 2,а соответствует неповрежденному двигателю, а рис. 2,б – двигателю с двумя рядом лежащими поврежденными стержнями ротора.

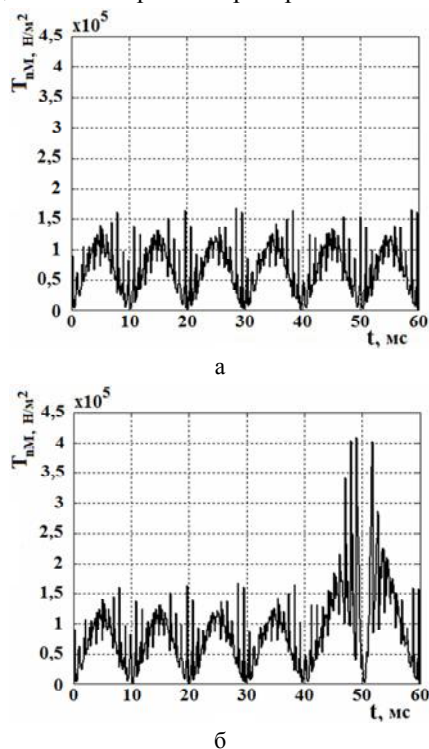


Рис. 2. Временные зависимости тензора натяжения за время одного полного поворота ротора: а – неповрежденный СТА; б – СТА с двумя поврежденными стержнями ротора

За один полный оборот ротора СТА в сигнале датчика возникает шесть максимумов, причем, как видно из рис. 2,б, искажение сигнала возникает только под одним полюсом, где в данный момент времени находятся поврежденные стержни ротора. В дальнейшем это искажение будет постепенно переме-

щаться под другие полюса по мере того как токи ротора вращаются с частотой скольжения относительно стержней ротора.

Показанные на рис. 1,б и рис. 2,б сигналы можно получить наложением двух сигналов: сигналов неповрежденных двигателей  $T_{\text{нМ0}}(t)$  (показаны соответственно на рис. 1,а и рис. 1,б) и разностных сигналов – "сигналов повреждений"  $T_{\text{нМД}}(t)$ , показанных на рис.3:

$$T_{\text{нМ}}(t) = T_{\text{нМ0}}(t) + T_{\text{нМД}}(t). \quad (4)$$

Относительно датчика магнитное поле двигателя вращается с периодом  $T_{\text{М1}} = p/f_1$ , где  $p$  – число пар полюсов,  $f_1$  – частота питания сети. Поврежденные стержни ротора вращаются относительно датчика с периодом  $T_{\text{МОБ}} = p/f_{\text{ОБ}} = p/f_1(1-s)$ , где  $f_{\text{ОБ}}$  – оборотная частота,  $s$  – скольжение. Токи ротора вращаются относительно стержней ротора с периодом  $T_{\text{С}} = p/f_1 s$ . Вращение токов ротора относительно поврежденных стержней ротора ведет к *амплитудной модуляции* "сигнала повреждения"  $T_{\text{нМД}}(t)$  – показанные на рис. 3 сигналы пульсируют в датчике с частотой скольжения. При этом на каждом обороте ротора они отстают от поля статора на интервал  $\Delta t = T_{\text{М1}} - T_{\text{МОБ}} = T_{\text{М1}}s/(1-s)$ . Таким образом, полный временной период функции  $T_{\text{нМ}}(t)$  с учетом модуляции ее составляющей  $T_{\text{нМД}}(t)$  равен  $T_{\text{С}}$ .

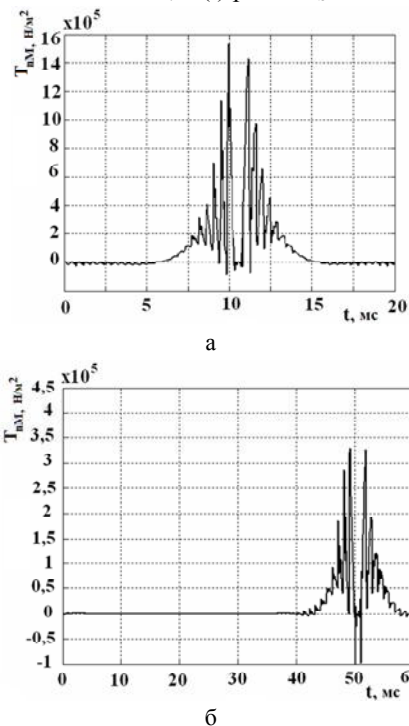


Рис. 3. "Сигналы повреждений": а – АТД; б – СТА

Например, для АТД он равен 4 с (при этом ротор успевает совершить около 200 оборотов), а для СТА – 6 с (ротор совершает 100 оборотов). Численные эксперименты показали, что для адекватного решения нестационарного уравнения (2) на отрезке времени, на котором ротор совершает *один оборот*, для АТД необходимо применить 400 шагов по времени (временной шаг  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$  с), а для СТА – 600 шагов. Для покрытия всего периода  $T_{\text{С}}$ , например, для АТД, потребовалось бы  $8 \cdot 10^4$  шагов. Столь значительное количество расчетных шагов ведет к значительным затратам процессорного времени. Поэтому были разработаны эффективные и малозатратные алгоритмы решения рассматриваемой задачи.

Модулированный на полном периоде  $T_{\text{С}}$  "сигнал

повреждения" можно представить следующим выражением:

$$T_{nMD}(t) = T_{nMDMAX}(t)[1 + \cos(\omega_1 2st)]/2, \quad (5)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $T_{nMDMAX}(t)$  – функция максимального "сигнала повреждения" на одном обороте ротора, соответствующая положению поврежденных стержней ротора посередине токового полюса ротора, как показано на рис. 1 и рис. 3. Например, при  $t = 0$  имеем  $T_{nMD}(t) = T_{nMDMAX}(t)$ , при  $t = \pi/2s\omega_1$  (т.е. при повороте токов ротора относительно поврежденных стержней на угол  $\pi/2$  имеем  $T_{nMD}(t) = 0$ ). Используя такой подход достаточно решить уравнение (2) на одном повороте ротора, а для получения сигнала на других оборотах использовать модулирующее выражение (5). При этом на каждом последующем обороте ротора необходимо сдвигать "сигнал повреждения" в сторону отставания от направления вращения поля статора на временной интервал  $\Delta t$  таким образом, что в результате будет формироваться результирующее время отставания

$$\Delta T = T_{M1} \sum_{i=1}^N si/(1-s), \quad (6)$$

где  $N$  – полное число оборотов на периоде  $T_s$ .

Эффект модуляции приводит к появлению в датчике не только оборотной гармоники, пропорциональной частоте вращения ротора  $f_{OB}$ , но и пары "боковых" частот. Например, если функцию  $T_{nMDMAX}(t)$  аппроксимировать только ее основной гармоникой:  $T_{nMDMAX}(t) \approx A_1 \sin(\omega_{OB}t)$ , то из (5) после преобразования получим:

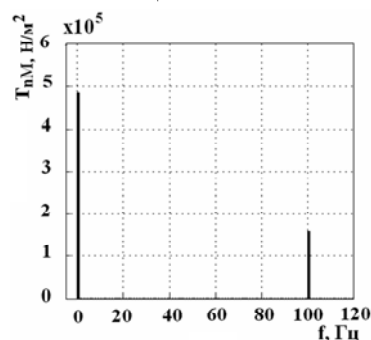
$$T_{nMD}(t) \approx A_1 \sin(\omega_{OB}t)[1 + \cos(\omega_1 2st)]/2 = A_1 \sin(\omega_{OB}t)/2 + A_1[\sin(\omega_{B1}t) + \sin(\omega_{B2}t)]/4, \quad (7)$$

где  $\omega_{B1} = \omega_{OB}(1 - 2s)$ ,  $\omega_{B2} = \omega_{OB}(1 + 2s)$ .

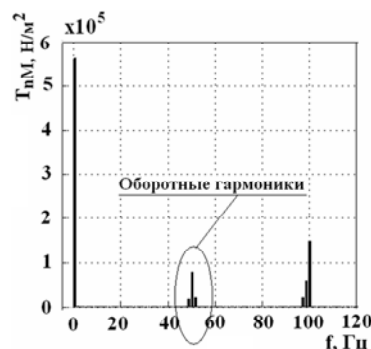
Ввиду малости скольжения  $s$  эти две "боковые" частоты в спектре лежат в непосредственной близости справа и слева от основной оборотной частоты.

Эффективная вибродиагностика поврежденных короткозамкнутой обмотки ротора базируется на спектральных методах анализа, основанных на разложении полученной периодической функции  $T_{nM}(t)$  в гармонический ряд. На рис. 4 представлены отрезки двух спектрограмм: для неповрежденного АТД и для АТД с двумя поврежденными рядом лежащими стержнями ротора. Основными составляющими спектрограммы на рис. 4,а являются: постоянная составляющая, основная гармоника частоты 100 Гц и зубцовые гармоники частотой порядка  $f_z = f_1 Z_2 = 50 \cdot 46 = 2,3$  кГц, обусловленные перемещением зубцов ротора относительно статора (на спектрограмме не по-

казаны). Изменения в спектрограмме на рис. 4,б связаны с появлением оборотных гармоник (основной и боковых), появлением дополнительных боковых гармоник в зоне частоты 100 Гц и увеличением на 16 % постоянной составляющей.



а



б

Рис. 4. Спектрограммы АТД: а – неповрежденный АТД; б – АТД с двумя поврежденными стержнями ротора

Частота основной оборотной гармоники АТД равна  $f_{OB} = f_1(1 - s) = 49,75$  Гц. Аналогичные изменения наблюдаются в спектрограммах СТА. Основная оборотная гармоника СТА имеет частоту  $f_{OB} = 16,5$  Гц. При этом возникают также и кратные оборотные гармоники с частотами 33 Гц, 49,5 Гц и т.д.

Разработанная методика анализа сигналов датчиков вибрации, основанная на решении уравнений поля в активной зоне двигателя, позволяет моделировать различные варианты повреждения обмотки ротора АД. Рассмотрим, например, три варианта повреждения двух стержней ротора в АТД. Варианты отличаются друг от друга различным расположением стержней в роторе: а – стержни расположены рядом в соседних пазах, б – стержни сдвинуты друг к другу на угол  $45^\circ$ , в – стержни сдвинуты друг к другу на угол  $90^\circ$ .

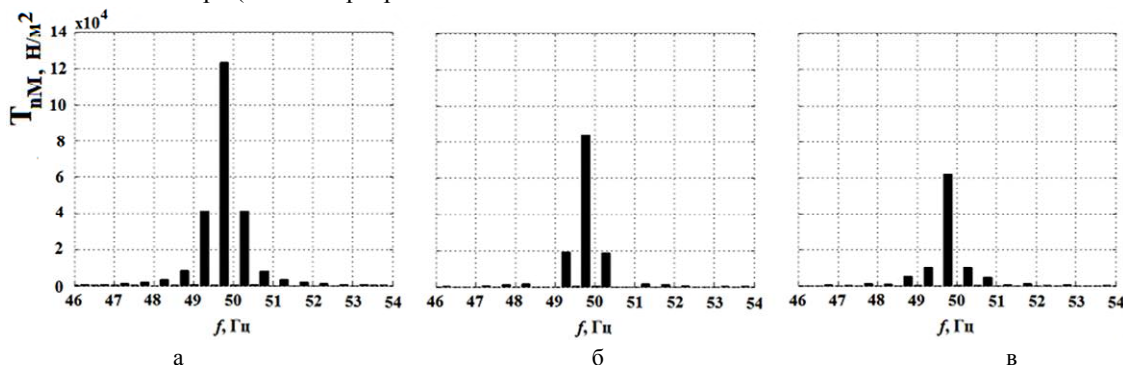


Рис 5. Спектрограммы АТД с двумя поврежденными стержнями в зоне оборотных гармоник: а – стержни расположены рядом в соседних пазах; б – стержни сдвинуты на  $45^\circ$ ; в – стержни сдвинуты на  $90^\circ$



Временные зависимости сигнала датчика за время одного полного оборота ротора в этих трех вариантах существенно отличаются друг от друга. Однако за время  $T_s$ , равное полному периоду модулированного частотой скольжения сигнала датчика, полные спектрограммы всех вариантов схожи, но отличаются: а) амплитудами оборотных гармоник; б) амплитудами дополнительных боковых гармоник в зоне частоты 100 Гц (рис. 4,б).

На рис. 5 изображены спектрограммы в зоне оборотных гармоник для трех вариантов повреждения двух стержней АТД. В частности, как видно из сравнения спектрограмм на рис. 5,а и 5,в, при сдвиге поврежденных стержней на  $90^\circ$  амплитуда оборотной гармоники снижается в 2 раза. При этом в варианте 5,в увеличиваются амплитуды боковых гармоник в зоне частоты 100 Гц.

Следует подчеркнуть, что в двухполюсном АТД при сдвиге двух поврежденных стержней ротора на  $180^\circ$  оборотные гармоники в спектре вибраций исчезают, но при этом существенно увеличиваются амплитуды гармоник, близких к 100 Гц. Это объясняется тем, что два поврежденных стержня, последовательно с равными промежутками времени проходя над датчиком, индуцируют в нем сигнал удвоенной оборотной частоты, близкий к частоте основной гармоники электромагнитных вибраций 100 Гц (в спектре появляются левые боковые гармоники, примыкающие к гармонике 100 Гц). Следовательно, при таком характере повреждения стержней ротора наличие повреждения невозможно выявить только с помощью регистрации оборотных гармоник, появившихся в спектре сигнала датчика. Необходимо дополнительно анализировать интегральный показатель вибраций – среднеквадратичное значение (СКЗ) всех гармоник. Расчеты показали, что, если за единицу принять СКЗ виброускорения неповрежденного АТД, то СКЗ в трех рассматриваемых вариантах повреждений увеличиваются соответственно до 1,26; 1,18; 1,14. Показатель СКЗ служит дополнительным диагностическим признаком, который может дать более подробную информацию о повреждении двигателя. Для оценки уровня вибрации используется также показатель СКЗ виброскорости, который можно получить интегрированием сигнала датчика. По сравнению с неповрежденным двигателем СКЗ виброскорости в варианте а) увеличивается в 1,77 раз, а в варианте в) – в 1,32 раза.

Разработанная модель может эффективно использоваться для диагностики повреждений и оценки технического состояния АД. В частности, моделирование и исследование характеристик поврежденного АД для большого числа возможных вариантов его повреждения и сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными датчиков вибрации дает не только обоснованный прогноз дальнейшей работы АД, но и формирует технические мероприятия по устранению повреждений.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана полевая математическая модель и вычислительные алгоритмы для эффективного анализа сигналов датчиков вибрации, устанавливаемых на корпусе электрической машины. Модель ориентирована на асинхронные короткозамкнутые двигатели и строго учитывает в режиме реального времени взаимное перемещение статора и ротора.

2. Показано, что при появлении в АД поврежденных стержней ротора, в спектрограммах сигналов датчика появляются оборотные гармоники (основная и боковые), амплитуда которых зависит от характера повреждений. Для полной идентификации характера повреждения целесообразно анализировать также изменение величины СКЗ.

3. Разработанная модель перспективна для целей вибродиагностики повреждений конструкции АД, в том числе, короткозамкнутой обмотки ротора, поскольку позволяет моделировать и исследовать большее количество различных вариантов повреждений и принимать адекватные технические решения и рекомендации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – Київ: НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.
2. Васьковский Ю.М., Гайдено Ю.А. Дослідження методів теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора // Електротехніка і електромеханіка. – № 3. – 2007. – С. 19-22.
3. Васьковский Ю.Н., Гераскин А.А. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 2 – С. 56-61.
4. Васьковский Ю.Н., Дынник Л.Н. Применение метода конечных элементов для моделирования двумерных электромагнитных полей в движущихся элементах электромеханических устройств // Известия вузов "Электромеханика". – 1990. – № 9. – С. 28-34.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по соприкосновению материалов. Киев: "Наукова думка", 1988. – 735 с.
6. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, Л.О., 1986. – 207 с.
7. Шумилов Ю.А., Чебанюк В.К. Магнитные вибрации асинхронных двигателей. – Техніка, 1991. – 180 с.

Поступила 25.10.2010

*Васьковский Юрий Николаевич, д.т.н., проф.  
Гераскин Александр Анатольевич  
Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт  
кафедра электромеханики  
03056, Украина, Киев, пр. Победы, 37  
тел. (044) 454-95-18, e-mail: vun157@voliacable.com*

*Y.N. Vas'kovskiy, A.A. Geraskin  
Analysis of squirrel-cage induction motor vibration sensor signals on the basis of vibration-exciting electromagnetic force mathematical models.*

A field mathematical model for analyzing vibration-exciting electromagnetic forces in squirrel-cage induction motors is developed. Correlation between the vibration-exciting forces and vibration sensor signals is revealed. Analysis of the sensors signals under the rotor winding faults is performed to lay the foundation of a motor technical state diagnostics method.

*Key words – squirrel-cage induction motor, vibration-exciting electromagnetic force, vibration sensor signals, correlation, analysis.*