

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. А. АВАКЯН

ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
 ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ
 МОДЕЛЕЙ ВИБРАЦИИ

Возможности балансировки по снижению суммарной вибрации электрических машин (ЭМ) ограничены: она не гарантирует устранение вибрации даже на частоте вращения, поскольку на ней достаточно часто проявляются источники вибрации, не имеющие дисбалансный характер [1], например, перекос наружного кольца подшипника, который также проявится на частоте вращения ротора. Устранение вибраций ЭМ, обусловленных другими источниками, очевидно, требует решение диагностических задач — распознавание источников (дефектов) по их спектральным признакам. Такую задачу наиболее успешно можно решить на моделях вибрации, позволяющих установить математическую зависимость между дефектом и их проявлением — вибрацией. При этом определяется спектр силового воздействия дефектов, от которого умножением на передаточную функцию машины $W(\omega)$ можно перейти к вибрации корпуса. Здесь допускается, что $W(\omega)$ не зависит от величины силового воздействия, обусловленного дефектами.

На основе разработанной в Закавказском филиале ЭНМС модели вибрации одиночных воздействий дефектов [2], рассмотрим модель вибрации ЭМ при множественных дефектах — обобщенное решение.

При рассмотрении обобщенного решения будем придерживаться схемы, приведенной в [2] и [3]: силовой элемент, состоящий из z_c полюсов (шаров) с характеристиками $F_p(\varphi)$, вращается относительно неподвижной системы координат XO_1Y (рис. 1) со скоростью ω_c и одновременно (или раздельно) взаимодействует с вращающимися со скоростью ω_n неподвижными дефектами, имеющими характеристики $\Delta_n(\varphi)$ (искривленность бочки ротора или желобов вращающихся колес подшипников) и $\Delta_n(\varphi)$ (искривленность расточки статора или неподвижных колес подшипников).

Силовое воздействие F_c системы z_c силовых полюсов, действующих на твердое тело, может быть представлено периодическим вектором силы $F(z_c, z_n)$, где $z_c = \omega_c t$ и $z_n = \omega_n t$, допускающим спектральное (Фурье) представление. Однако из-за направленности (векторной формы) этой силы необходимо Фурье-разложение в комплекс-

вой форме. Причем, полученные при этом комплексные амплитуды разложения в ряд Фурье отражают физическую сущность — гармонические ряды вращающихся векторов вибрации, т. е. комплексных колебаний [4]. Таким образом, в данной задаче комплексная форма преобразования Фурье должна вводиться не для удобства, компактности записи [5], как это обычно принято, а по необходимости, преобразование возможно лишь в комплексной области [1; 6].

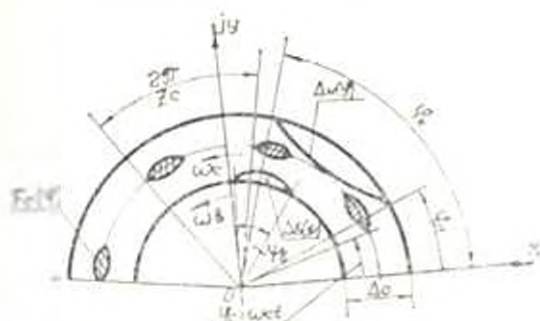


Рис. 1

Периодический вектор силы $F(z, t) = 1$ может быть получен лишь суммированием (интегрированием) по всем z полям F^z по всей комплексной плоскости XOY для каждого момента времени, т. е.

$$F(\mathbf{z}_0, \mathbf{z}_0) = \int_{\mathbf{z}_0}^{\mathbf{z}_0} \sum_{i=1}^N F_i(\mathbf{z} - \mathbf{z}_i) e^{i\mathbf{z}} d\mathbf{z}, \quad (1)$$

Однако силовые поля $F_i(\tau, \Delta)$ являются нелинейными функциями не только протяженности (угла φ), но и глубины (радиус-вектора) действия Δ , который, в свою очередь, является функцией отклонения формы, обусловленной дефектами, т. е. опять-таки протяженности φ (рис. 1).

$$z = z_0 - z_1 - z_{-1}$$

где $\Delta_n = \Delta_n(\frac{1}{2})$; $\Delta_n = \Delta_n(-1)$.

Поэтому для решения (1) нужно исключить нелинейную зависимость $F_2(\Delta)$ путем разложения $F_2(\varepsilon, \Delta)$ в ряд Тейлора по степеням (Δ_1, Δ_2) в окрестности точки равновесия системы Δ_0 .

$$F_r(\bar{r}) = (\Delta_n + \Delta_n) F_r(\bar{r})_0 + \frac{1}{2} (\Delta_n - \Delta_n)^2 F''(\bar{r})_0 + \dots \quad (2)$$

11. учитывая малость отклонений Δ_1 и Δ_2 , ограничиться первыми членами разложения. При этом (1) сведется к наборам одиночных (раздельных) —

$$\int \left[\Delta_n(\tau) F_c(\tau)_0 + \frac{1}{2} \Delta_n^2(\tau) F_c'(\tau)_0 + \frac{1}{6} \Delta_n^3(\tau) F_c''(\tau)_0 + \dots \right] e^{i\tau} d\tau, \\ \int \left[\Delta_n(\tau) F_c(\tau)_0 + \frac{1}{2} \Delta_n^2(\tau) F_c'(\tau)_0 + \frac{1}{6} \Delta_n^3(\tau) F_c''(\tau)_0 + \dots \right] e^{i\tau} d\tau, \quad (1')$$

и гармоник (совместных)

$$\int \left[\Delta_n(\tau) \Delta_n(\tau) F_c(\tau)_0 + \frac{1}{2} [\Delta_n^2(\tau) \Delta_n(\tau) + \Delta_n^3(\tau) \Delta_n(\tau)] F_c'''(\tau)_0 + \dots \right] e^{i\tau} d\tau, \quad (1'')$$

воздействий дефектов.

Таким образом, решение поставленной задачи—определение силовых взаимодействий—следует искать в виде трехкратного применения преобразования: дифференциального разложения по Теёлору (2) и двух интегральных в комплексной области—(1) и Фурье.

Основываясь на модели силовых воздействий, в [2] получено выражение комплексной амплитуды C_k ряда Фурье для частот kz_c при одиночных воздействиях дефектов:

$$C_k = \frac{z_c}{2\pi} \delta_n(z) f_c(s-z)_{s=j(kz_c-1)} = \frac{z_c}{2\pi} \delta_n | j(kz_c-1) f_c(-jkz_c), \quad (a)$$

т. е. комплексные амплитуды ряда Фурье для частот kz_c равны произведению Фурье-изображений (L -изображений) дефекта $\delta_n(z)$ и силового элемента $f_c(z)$ при частотах $j(kz_c-1)$ и $-jkz_c$, соответственно.

Рассмотрим случай одновременного воздействия множества дефектов. В качестве характеристики силового поля здесь необходимо принимать систему всех полюсов $F_c(z)$, а не одного полюса $F_c(\tau)$ (дефекты могут быть множественными—опранки, волнистости), и их представить обобщенно. В пользу такого обобщенного подхода говорит и большая простота выкладок. Действительно, при этом вырезания мгновенного вектора от взаимодействия силового элемента с неподвижным дефектом (2)

$$F_n(\tau_c) = L \{ F_c(\tau - \tau_c) \Delta_n(\tau) \}_{s=-i} \quad (б)$$

(L -преобразование при определенном значении параметра $s = -i$) и найденное L -изображение этого произведения^а

$$F_n(z_c) = e^{-iz_c} L^{-1} [\delta_n(z) f_c(s-z)]_{s=-i} \quad (в)$$

останутся без изменений, а вместо суммы комплексных амплитуд^б [2]

^а Отыскается как комплексная свертка их изображений [4].

^б Т. е. как L -преобразование вектора в комплексной форме $F_n(z_c)$ при параметре $s = jkz_c$, где номера гармоник $k = \pm 1, \pm 2, \pm \dots$ принимают как положительные (векторы прямого вращения), так и отрицательные (векторы обратного вращения).

$$C_k = \frac{z_c}{2\pi} \sum_{l=0}^{z_c-1} \int_{l z_c/z_c}^{(l+1)z_c/z_c} F_s(z_c) e^{-jk' z_c} dz_c =$$

$$= \frac{z_c}{2\pi} \int_0^{z_c} F_s(z_c) e^{-jk' z_c} dz_c \Big|_{z=jk' z_c} = \frac{z_c}{2\pi} L[F_s(z_c)] \Big|_{z=jk' z_c} \quad (1)$$

остается лишь первый член.

$$C_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{z_c} F_{s0}(z_c) e^{-jk' z_c} dz_c = \frac{1}{2\pi} L[F_{s0}(z_c)] \Big|_{z=jk' z_c} \quad (3)$$

При этом лишь вместо изображения силового элемента $f_s(z)$ нужно применять в (б) и (в) изображение силового поля $f_{s0}(z)$, которое связано с $f_s(z)$ как сумма z_c членов ряда геометрической прогрессии

$$f_{s0}(z) = f_s(z) \frac{1 - e^{-2\pi z}}{1 - e^{-2\pi z/z_c}} \quad (4)$$

В (4) числитель $\neq 0$; поэтому f_{s0} имеет конечное значение, если и его знаменатель $\neq 0$, т. е. $z = jk' z_c$ [или $k = k' z_c$, где $k' = 0; \pm 1; \pm 2, \dots$, т. е. гармоника k в (3) кратна z_c]. Тогда после раскрытия в (4) неопределенности получим:

$$f_{s0}(jk' z_c) = f_s(jk' z_c) z_c \quad (4')$$

После подстановки (б) и (в) — при $f_s = f_{s0}$ — в (3) получаем обобщенное выражение для амплитуды комплексных колебаний

$$C_k = \frac{1}{2\pi} z_c(z) f_{s0}(z - z_c) \Big|_{z=jk' z_c} = \frac{1}{2\pi} z_c [f(k-1)] f_{s0}(-jk), \quad (5)$$

которое при учете (4) превращается в (а).

Эти два подхода по существу равнозначены и трудно отдать предпочтение какому-либо одному из них. C_k по (5) выражается проще и лучше отвечает представлению о гармониках в Фурье-анализе (например, из него следует вывод, что проявляются не любые, а лишь кратные z_c гармоники), но сложнее в практическом применении — требует более тонкого понимания исходных положений и использования более сложного изображения силового поля (4). С другой стороны, (а) значительно удобнее для приложений (например, вывод о проявлении кратных гармоник силового поля из него следует автоматически, без какого-либо дополнительного анализа). Поэтому основной подход (а) может быть применен в дальнейшем для конкретного анализа вариантов простых взаимодействий, а обобщенный (б) — для анализа в общем виде сложных взаимодействий.

Ряд комплексных амплитуд C_k силового воздействия $W(j\omega)$ преобразуется в ряд ω , вращающихся с частотами $k\omega_c$ векторов вращения (комплексных колебаний)

$$C_k = |W(jk\omega_c)| e^{j\omega_c t} e^{j(k\omega_c - \omega_c)t} = C_k e^{j(k-1)\omega_c t}, \quad (6)$$

т. е. получается гармонический ряд эллипсов вращения, большие оси которых, как показывают экспериментальные исследования [1], направлены по оси дефекта.

Вышеизложенные теоретические положения неоднократно подтверждены экспериментально, что рассматривается в [1], [7], [8].

Заключительный формула — НИИМО.

Поступило 9.1.1976

Վ. Ա. ԱՎԱԿՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈԴԱՆԱՆ ԻՆՏԵՆՍԻՏԵՏԻՆԵՐԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ
ԹԵՐՈԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԹԵՐՈՍԿՈՒԹՅՈՒՆՈՍՏԻԿԱՆ
ԹԵՐՈՒՄԱՆ ԻՆՏԵՆՍԻՏԵՐԻ ՇԻՄԱՆ ՎԵՐ.

Ա. Վ. Փ. Ո. Փ. Ո. Փ. Ո. Փ.

Էլեկտրական ինտենսիտետների թերոսկոպիկական չափումների դիագնոստիկական նշանակությունը, որը պայմանավորված է վերաբերումների բաղադրությամբ: Յուրաքանչյուր շիմային ինտենսիտետների կախվածությունը վերաբերումների ձևերից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Авакян В. А., Бронмян Я. С., Демирчян К. С., Шмютер С. А. Вибрация и дисбаланс электрической машины. «Электротехника», 1974, № 7.
2. Бронмян Я. С., Демирчян К. С., Шмютер С. А. О зависимости спектра вибрации от форм дефектов асинхронного электродвигателя. «Известия АН АрмССР (серия техн. наук)», т. XXVI, № 3, 1973.
3. Бронмян Я. С., Демирчян К. С., Шмютер С. А. Модель вибрации асинхронного электродвигателя. «Известия АН АрмССР (серия техн. наук)», т. XXV, № 3, 1972.
4. Дич Е. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. М., «Наука», 1971.
5. Хуангшань Л. Ч. Спектры и анализ. М., Физматгиз, 1962.
6. Вилер Н., Нельс Р. Преобразование Фурье в комплексной области. М., «Наука», 1964.
7. Авакян В. А., Бронмян Я. С., Демирчян К. С., Шмютер С. А. Оценка неравномерности воздушного зазора асинхронного электродвигателя на основе измерения его вибраций. «Технология электрохимического производства», 1974, № 32. М., Циформстандарт-электро.
8. Бронмян Я. С., Демирчян К. С., Шмютер С. А. Диагностика неисправностей вибрации асинхронного двигателя. «Электротехника», 1973, № 1.