

В. И. САЛКОВ, Л. С. МЕЛКОНЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
 СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ГАРМОНИЧЕСКИМ АНАЛИЗОМ
 КРИВОЙ ЗАТУХАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С целью определения частотных характеристик синхронной машины предложен и развит метод, основанный на обработке кривой затухания постоянного тока в обмотках неподвижной машины с применением интеграла Фурье [1—3]. При этом для анализа необходимо предварительное разложение кривой затухания тока на экспоненциальные составляющие. Такой подход к обработке и анализу кривой затухания тока не является единственным. К решению этой задачи с успехом может быть применен метод гармонического анализа, позволяющий непосредственно по значениям равноотстоящих ординат кривой затухания тока определить частотную характеристику машины.

1. Осциллограммы затухания постоянного тока в статорном контуре синхронной машины при замкнутой накоротко обмотке возбуждения обычно определяются по схеме, приведенной на рис. 1. Заме-

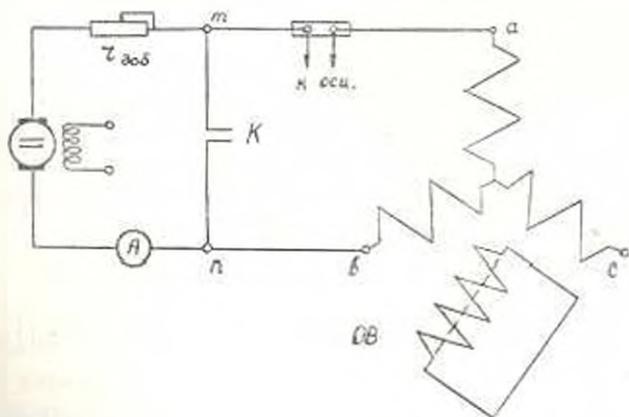


Рис. 1. Схема опытов.

тим, что переходная составляющая тока, полученная в результате физических измерений, имеет определенное время существования T_n , благодаря чему, используя кривую тока затухания, можно построить периодический процесс на зажимах машины. Для пояснения этого несколько изменим схему рис. 1, приведя ее к виду, показанному на

рис. 2, где $e(t)$ — э.д.с. источника бесконечной мощности; r_b — внешнее омическое сопротивление; $i(t)$ и $u(t)$ — соответственно ток в цепи и напряжение на зажимах статора. Уравнение цепи записывается в виде

$$e(t) = u(t) + r_b \cdot i(t). \quad (1)$$

Допустив с момента $t = 0$ скачкообразное изменение э.д.с. $e(t)$, как показано на кривой рис. 2б, получим в цепи переходный процесс,

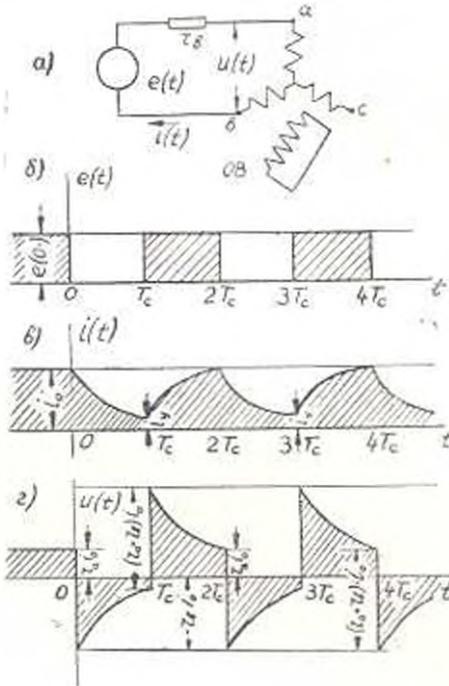


Рис. 2 Построение периодического процесса на зажимах синхронной машины по кривой затухания постоянного тока.

построен лишь по одной кривой затухания тока при отключении питающего постоянного напряжения. Внутреннее сопротивление источника э.д.с. при этом не играет роли, поскольку рассматривается процесс, происходящий при отключении этого источника.

Разложим кривые $u(t)$ и $i(t)$ в ряды Фурье:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \frac{a_{u0}}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} \left[a_{u(2k+1)} \cos(2k+1)\omega_1 t + b_{u(2k+1)} \sin(2k+1)\omega_1 t \right], \\ i(t) &= \frac{a_{i0}}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} \left[a_{i(2k+1)} \cos(2k+1)\omega_1 t + b_{i(2k+1)} \sin(2k+1)\omega_1 t \right], \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $a_{u0}/2$ и $a_{i0}/2$ постоянные слагающие напряжения и тока; $a_{u(2k+1)}$, $b_{u(2k+1)}$, $a_{i(2k+1)}$ и $b_{i(2k+1)}$ — коэффициенты ряда Фурье, определение которых будет рассмотрено позднее; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ — основная угловая частота; $T = 2T_c$.

описываемый кривыми на рис. 2в и 2г. Согласно уравнению (1) для момента времени, предшествующего началу переходного процесса, получаем:

$$\left. \begin{aligned} i(0-) &= i(0) = i_0, \\ e(0-) &= (r_b + r_a) i_0, & e(0) &= 0, \\ u(0-) &= r_a \cdot i_0, & u(0) &= -r_b \cdot i_0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где r_a — омическое сопротивление обмоток статора по отношению к зажимам $a-b$. К моменту времени T_c ток и напряжение достигнут установившихся значений. Таким образом, отключение э.д.с. в моменты времени $t = 2n \cdot T_c$ и включение ее при $t = (2n+1)T_c$, где $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ приводит к установлению в цепи периодически повторяющегося несинусоидального процесса. Нетрудно видеть, что этот процесс может быть легко

В (3) фигурируют только нечетные гармоники, так как переменные составляющие напряжения и тока являются кососимметричными функциями.

Вычислив из (3) коэффициенты $a_{1, 2k+1}$ и $b_{1, 2k+1}$, можно определить комплексное сопротивление

$$Z_{\text{син}}(j\omega) = \frac{a_{1, (2k+1)} - j b_{1, (2k+1)}}{a_{1, (2k+1)} + j b_{1, (2k+1)}} \quad (4)$$

и комплексную проводимость

$$Y_{\text{син}}(j\omega) = \frac{a_{1, (2k+1)} + j b_{1, (2k+1)}}{a_{1, (2k+1)} - j b_{1, (2k+1)}} \quad (5)$$

неподвижной синхронной машины для дискретного ряда частот $\omega_{2k+1} = (2k+1)\omega_1$, где $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$.

Повышая чувствительность шлейфа, т. е. увеличивая T , можно снижать частоту ω_1 , с которой начинается частотная характеристика. Изменением величины τ можно регулировать время существования переходного процесса в обмотках машины и тем самым изменять диапазон частотной характеристики в желаемых пределах. Определим связь между дискретными и непрерывными частотными спектрами. Функция $f(t)$, равная нулю вне интервала времени $0-T$, может быть разложена в ряд Фурье с коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_1 t \cdot dt, \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega_1 t \cdot dt, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\text{где } \omega_1 = \frac{2\pi}{T}.$$

С другой стороны может быть найден комплексный спектр той же функции, определяемый прямым преобразованием Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (7)$$

где $F(j\omega)$ после умножения на $j\omega$ соответствует частотной характеристике, определяемой по экспонентам, на которые разлагается кривая затухания тока, а по коэффициентам a_k и b_k вычисляются точки частотной характеристики, получаемой при помощи описываемого в данной работе метода.

Согласно [4] взаимосвязь между $F(j\omega)$ и a_k и b_k может быть выражена следующим образом:

$$F(j\omega) = \sin \frac{\omega T}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (a_k - j b_k) \frac{(-1)^k}{\omega - \omega_1 k} \quad (8)$$

Таким образом вычисления по коэффициентам ряда Фурье дают необходимое количество точек частотной характеристики в зависимости от принятой длительности переходного процесса.

2. Коэффициенты a_k и b_k могут быть найдены по формулам (6), если подынтегральная функция задана аналитически. В случаях же, аналогичных рассматриваемому, когда функция задана эмпирически, применяются приближенные методы. Так для функции, заданной в $2n-1$ эквидистантных точках $t_0, t_1, \dots, t_2, \dots, t_{2n-1}$ значениями $y_0, y_1, \dots, y_2, \dots, y_{2n-1}$, используются формулы Бесселя

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{1}{n} \sum_{s=0}^{2n-1} y_s \cos k\omega_1 t_s, \quad k=0, 1, \dots, n; \\ b_k &= \frac{1}{n} \sum_{s=1}^{2n-1} y_s \sin k\omega_1 t_s, \quad k=1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ и $T = t_{2n}$.

Для кососимметричных функций значения ординат y'_s достаточно брать для точек от 0 до $n-1$.

$$\left. \begin{aligned} a_{2k+1} &= \frac{2}{n} \sum_{s=0}^{n-1} y'_s \cos (2k+1)\omega_1 t_s, \\ t_{2k+1} &= \frac{2}{n} \sum_{s=0}^{n-1} y'_s \sin (2k+1)\omega_1 t_s, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $k = 0, 1, \dots$, и ч. $\left(\frac{n}{2} - 1\right)$; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$; $T = 2t_n = t_{2n}$.

Для определения гармоник напряжения и тока в рассматриваемом случае расчеты по формулам (10) предпочтительней, так как объем вычислений резко сокращается, отпадает необходимость продолжения кривых напряжения и тока за пределы отрезка от 0 до T_c .

Напряжение $u(t)$ на зажимах синхронной машины (рис. 2г) имеет разрывы в точках $t \cdot T_c$, где $l = 0, 1, 2, \dots$.

При задании эквидистантными ординатами кривая напряжения в этих точках сглаживается. Для иллюстрации на рис. 3а сплошной линией показана переменная составляющая напряжения $u'(t)$; через ее эквидистантные значения проведена пунктирная кривая. Как видно, пунктирная кривая, т. е. кривая, вводимая для вычислений по формулам (9) и (10), отходит от $u'(t)$ в точках разрыва, из-за чего возможны значительные погрешности при определении гармоник напряжения, особенно, если эквидистантные отрезки недостаточно малы. Во избежание такого рода погрешностей целесообразно представить $u'(t)$ как сумму трех кривых $u'_1(t)$, $u'_2(t)$ и $u'_3(t)$, показанных на рис. 3б, в, г. Для кривых $u'_1(t)$ и $u'_2(t)$ коэффициенты разложения в

ряд Фурье рассчитываются аналитически по формулам (6), а заданная эквидистантными значениями кривая $u'_3(t)$ разрывов не имеет и ее коэффициенты вычисляются по формуле (10).

Вычисления по формулам (9) и (10) могут быть реализованы на электронной цифровой вычислительной машине при помощи несложной программы. При сравнительно небольшом числе эквидистантных ординат могут быть использованы шаблоны для гармонического анализа или гармонические анализаторы.

3. Описанным методом были определены частотные характеристики синхронной машины СГ-60 б со следующими номинальными данными: $P_n = 55$ квт, $I_n = 79,5$ а, $U_n = 400$ в, $n_n = 1000$ об/мин. Опыты проводились по схеме рис. 1 для случая совпадения оси полюсов ротора с осью намагничивания статора (частотные характеристики по оси d). Начальное значение тока затухания i_0 устанавливалось равным $10a$.

Для вычисления коэффициентов ряда Фурье по формулам (9) и (10) были составлены программы для электронной цифровой вычислительной машины. В основном использовалась программа для вычислений по формулам (10) при $n=48$. Вычисления $Z_{изм}(j\omega)$ и $Y_{изм}(j\omega)$ согласно выражениям (4) и (5) производились по программе деления комплексных чисел.

Значения T_f и соответственно T_c выбирались разными и зависели от скорости бумаги, при которой осциллографировался процесс и чувствительности шлейфа. Благодаря этому получались различные диапазоны частотной характеристики, частично перекрывающие друг друга.

На рис. 4 в логарифмических координатах кружочками изображена построенная в относительных единицах зависимость

$$X_{изм} = \text{Im} [Z_{изм}(j\omega)] = \text{Im} \left[\frac{1}{2} Z_{изм}(j\omega) \right], \quad (11)$$

определенная описываемым методом. Та же зависимость, полученная

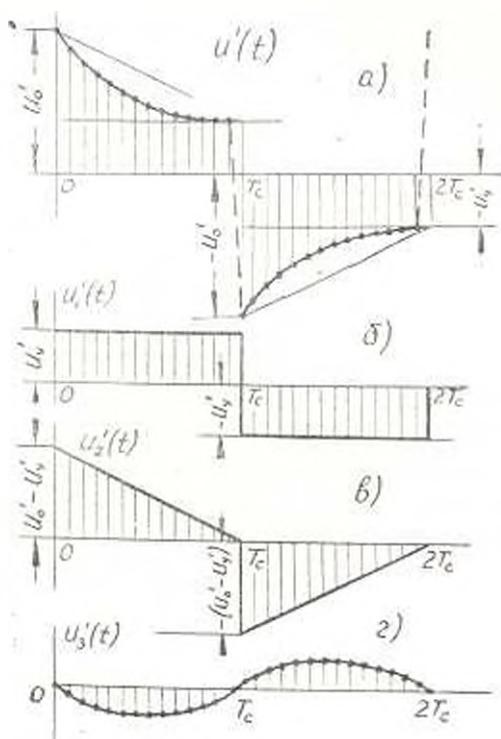


Рис. 3. Разложение кривой напряжения на зажимах синхронной машины.

ранее методом вынужденных гармонических колебаний [5]. показана на рис. 4 крестиками. Кривые практически совпадают.

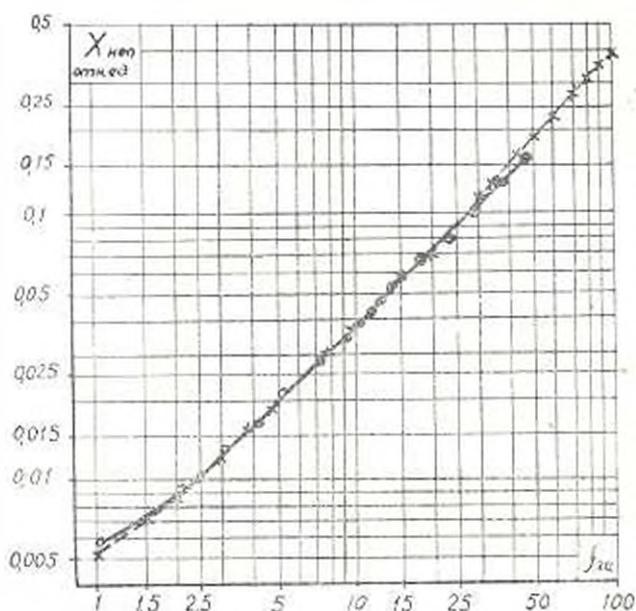


Рис. 1. Зависимость X_{nep} по оси d синхронной машины СГ-60,6 от частоты.

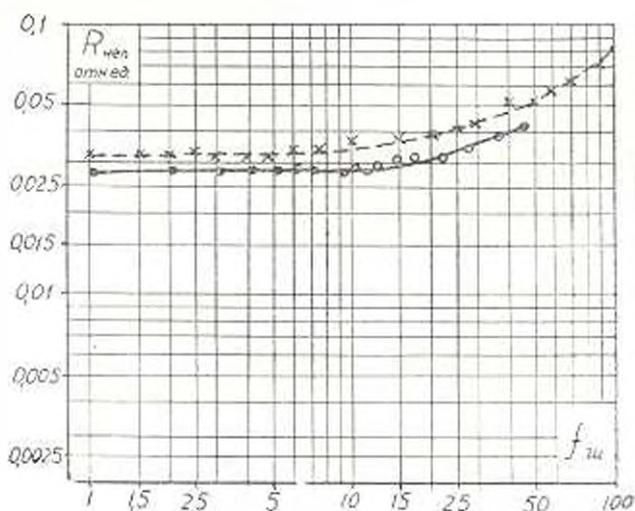


Рис. 5. Зависимость R_{nep} по оси d синхронной машины СГ-60,6 от частоты.

Определение

$$R_{nep} = \operatorname{Re} |Z_{nep}(j\omega)| = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} Z_{ком}(j\omega) \right] \quad (12)$$

описываемым методом и методом вынужденных гармонических колебаний показало, что R_{nep} зависит не только от частоты питающего то-

ка, но и от его амплитуды. Например, при частоте питания 50 Гц $R_{\text{исп}}$ по оси d машины СГ-60/6 почти постоянно при токах питания от 0,5 до 0,002 I_n , однако при дальнейшем снижении тока $R_{\text{исп}}$ заметно уменьшается. Влияние величины тока питания на сопротивление $R_{\text{исп}}$ сказывается тем больше, чем выше частота питающего тока. В то же время на $X_{\text{исп}}$ величина питающего тока почти не влияет.

На рис. 5 для небольшого диапазона показаны значения $R_{\text{исп}}$, полученные обработкой кривой затухания описываемым методом.

Выводы

1. Рассмотренный метод позволяет получать частотные характеристики синхронной машины по эквидистантным ординатам тока затухания, что удобно с точки зрения обработки осциллограмм и подготовки данных для ввода в электронную цифровую вычислительную машину. Диапазон частотной характеристики, количество ее точек и интервалы между ними ставятся в зависимость от точности измерений тока затухания. Благодаря простоте алгоритма расчета частотных характеристик решение этой задачи на ЦМ может быть полностью автоматизировано.

2. Данные эксперимента показали совпадения значений индуктивных сопротивлений неподвижной машины, определенных описываемым методом и методом вынужденных гармонических колебаний.

3. Активные сопротивления неподвижной машины, как показали опыты, зависят не только от частоты тока питания, но и от его величины. Поэтому при сопоставлении частотных характеристик синхронной машины определяемых разными методами, одним из критериев сравнения должна быть величина тока или напряжения питания.

При практическом использовании частотных характеристик и для перехода от параметров неподвижной машины к параметрам вращающейся машины необходимо располагать семейством кривых $R_{\text{исп}} = f(\omega)$ в зависимости от величины тока. Предложенный метод, в силу своей общности, позволяет строить частотные характеристики и по переходным процессам, характер которых отличен от суммы экспонент (например, по наведенному току в коротко-замкнутой обмотке машины).

Վ Ե Ս Ա Ն Ա ՈՎ Գ Մ Ս Մ Ե Լ Ե Ր Ա Ն Ա Ն

ՍԻՆԽՐՈՆ ՄԵՓԵՆՍՅՈՒ ՀՅԱՆՍԵՍԿԱՆԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԿՐՆՐԻ ՍԱՀՄԱՆՄԱՆ ՍԵՓՈՒՄԻ ՀՈՍՏՈՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆԳԻ ՄԵՐՄԱՆ ԿՈՐԻ ՀԱՐԿՈՒՆԻՎ ԳԵՐԼՈՒՅԻՆԻԹՅԱՆԸ

Ա մ փ ա փ ու մ

Հողվածում նկարագրվում է կանգնած առտորվ սինխրոն մեքենայի հաճախահատման բնութագրերը սահմանման էքսպերիմենտայ մեթոդ, որը կառուցում է ռատատուն լարման անջատման դեպքում մարվող հոսանքի հաճախի արժեքների հարմոնիկ վերլուծության մեջ: Մեթոդը հիմնավորվում է տեսականորեն: Արդյվում է համախաղանական բնութագրի գիտապարտի և կետերի բանակի կախումը հոսանքի չափման ճշտությունից:

Մեթոդի էքսպերիմենտայ ստույգման նպատակով պատրաստված է փոքր կարողություն սինխրոն մեքենա: Մարվող հոսանքի հարմոնիկ վերլուծությունը կատարվում է էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի միջոցով: Նկարագրված մեթոդով և հասկաղրական հարմոնիկ տատանումների մեթոդով կատարված հաշվարկների արդյունքների համադրումը ցույց տվեց մոտիկ համընկնում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дьяченко Я. Б., Казовский Е. Я., Костенко М. П. Экспериментальное исследование новых методов определения параметров машин переменного тока. «Электричество», № 6, 1960.
2. Казовский Е. Я. О построении частотных характеристик переменного тока по кривой затухания постоянного тока с заданной точностью. Сб. работ по вопросам электромеханики, вып. 10, изд. АН СССР, М.—Л., 1963.
3. Костенко М. П., Казовский Е. Я., Волков О. Н., Паны-Цли. Методика определения частотных характеристик машины переменного тока. «Электричество», № 12, 1962.
4. Лампюш К. Практические методы прикладного анализа, Физматгиз, 1961.
5. Саяков В. Н., Мелконян Д. С., Аб А. Ф. Экспериментальное определение частотных характеристик синхронной машины методом вынужденных гармонических колебаний. Изв. АН АрмССР (серия Т.Н.), № 5, 1966.