

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г. Л. АРЕНЯН

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ М.Д.С.
 НА ВЕЛИЧИНУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА
 ОДНОФАЗНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С
 ПУЛЬСИРУЮЩИМ ПОТОКОМ

В работе [1] было получено аналитическое выражение электромагнитного момента индукторного генератора, на основе которого для генератора типа $(b_1 \bar{a} b_0 \bar{a} b_1)$ $(b_1 \bar{a} b_0 \bar{a} b_1)$ определен электромагнитный момент в виде:

$$\bar{M}_e(\gamma) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos k\gamma + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \sin k\gamma. \quad (1)$$

Ниже проводится анализ влияния высших гармонических м.д.с. и коэффициентов модуляции на величину постоянной составляющей момента (C_0) и на величины амплитуд синусных (S_k) и косинусных (C_k) гармоник момента. В общем случае, когда $m_1 \neq 0$, $m_2 \neq 0$, $m_3 \neq 0$, $F_1 \neq 0$ ($\sigma = d, q$; $\nu = 1, 2, 3$), выражения для C_0, C_k, S_k ($k = 1, 2, \dots, 6$), записанные через скалярные величины м. д. с., получаются чрезвычайно громоздкими и мало пригодными для инженерных расчетов ввиду сложности. Поэтому численные расчеты удобно производить на ЭВМ, для чего составляется соответствующая программа. Расчет одного режима с печатью результатов на ЭВМ «Наирн-2» длится около 10 минут. В табл. 1 даны результаты расчета составляющих электромагнитного момента для генератора 100 кВт 8000 Гц при номинальном режиме $\cos \varphi = 0.9$ емкостной. При этом за исходные данные взяты $m_1 = 0.25$; $m_2 = 0.004$; $m_3 = 0.011$ и м. д. с., полученные для этого режима в результате решения основной системы м. д. с., которые равны:

$$\begin{aligned} \bar{F}_1^d &= \begin{vmatrix} 0.135 & 951 \\ -0.717 & 241 \\ 0.079 & 900 \end{vmatrix}; & \bar{F}_1^q &= \begin{vmatrix} 0.016 & 091 \\ 0.002 & 071 \\ 0.009 & 535 \end{vmatrix}; & \bar{F}_A^d &= \begin{vmatrix} 0.008 & 276 \\ -0.044 & 115 \\ 0.001 & 992 \end{vmatrix}; \\ \bar{F}_2^d &= \begin{vmatrix} -0.113 & 058 \\ 0.607 & 232 \\ -0.071 & 632 \end{vmatrix}; & \bar{F}_2^q &= \begin{vmatrix} -0.011 & 459 \\ -0.003 & 778 \\ -0.012 & 815 \end{vmatrix}; & \bar{F}_3^d &= \begin{vmatrix} -0.002 & 959 \\ 0.016 & 371 \\ -0.001 & 891 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

В табл. 1 приводятся также значения амплитуд гармоник моментов в процентах относительно постоянной составляющей момента.

Таблица 1

$$F_1 = 0; F_2 = 0; F_3 = 0 \quad (z = d, q); m_1 = 0; m_2 = 0; m_3 = 0$$

C_n	0.303535	100%			
C_1	0.003096	-1.02	S_1	-0.352971	-116.29
C_2	0.248790	81.96	S_2	-0.325069	-107.09
C_3	0.002567	0.85	S_3	0.001346	0.44
C_4	-0.052548	17.31	S_4	-0.070762	-23.31
C_5	0.000507	0.17	S_5	0.000195	0.06
C_6	-0.002160	-1.71	S_6	-0.003156	1.04

Как видно из табл. 1, амплитуды второй (C_2) и четвертой (C_4) гармоник косинусного ряда и амплитуды первой (S_1), второй (S_2) и четвертой (S_4) гармоник синусного ряда выражены наиболее сильно и имеют величины одного порядка с величиной постоянной составляющей момента (C_0). Зависимость электромагнитного момента $\tilde{M}_z(\tau)$ по уравнению (1) показана на рис. 1 (кривая 1). Участок вала меж-

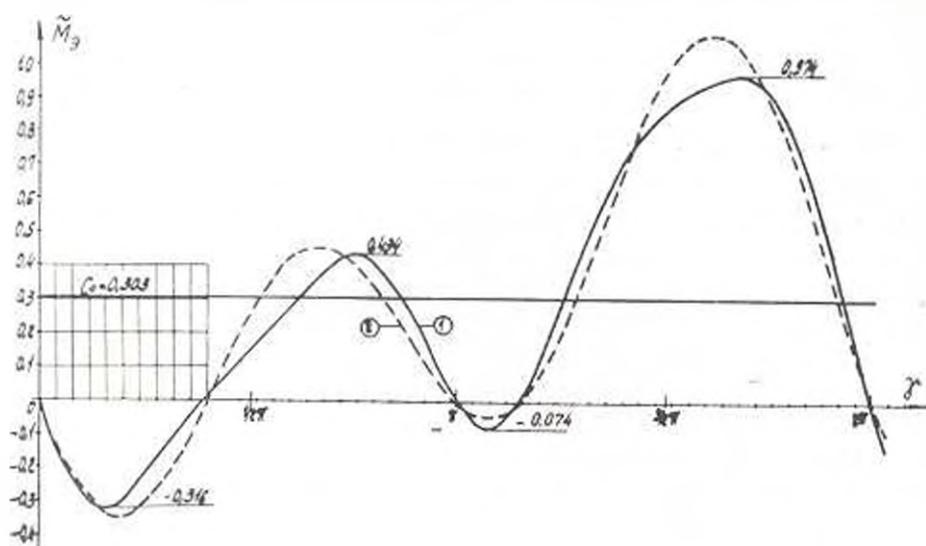


Рис. 1

ду генератором и первичным двигателем преобразователя оказывается под воздействием знакопеременных крутящих моментов, достигающих -100 и $+320\%$ и экстремальных точках (за 100% принята величина постоянной составляющей крутящего момента).

В табл. 2 и кривой 2 (рис. 1) приведены значения C_0 , C_2 , S_2 и $\tilde{M}_z(\tau)$ для случая, когда вторые и третьи гармоники м. д. с. равны

нулю во всех обмотках, а также равны нулю вторые и третьи коэффициенты модуляции: т. е. расчеты проведены при условиях: $\bar{F}_1^2 \neq 0$; $\bar{F}_2^2 = \bar{F}_3^2 = 0$ ($s = d, q$); $m_1 \neq 0$; $m_2 = m_3 = 0$. Численные значения \bar{F}_1^2 и m_1 те же, что и для первого расчета. В табл. 2, кроме того приведены значения C_0 , C_k и S_k в процентах. За 100% принята величина $C_0 = 0,303535$ таблицы 1.

Таблица 2

$$\bar{F}_1^2 \neq 0; \bar{F}_2^2 = \bar{F}_3^2 = 0 \quad (s = d, q); m_1 \neq 0; m_2 = m_3 = 0$$

C_0	0,303616	100,03%			
C_1	-0,001043	-0,34	S_1	0,356673	-117,51
C_2	-0,303616	-100,03	S_2	0,358622	-118,15
C_3	0,001043	0,34	S_3	0,000165	0,05
C_4	0	0	S_4	0	0
C_5	0	0	S_5	0	0
C_6	0	0	S_6	0	0

Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает влияние вторых и третьих гармоник м.д.с. и одновременно влияние второго и третьего коэффициентов модуляции на величины составляющих моментов. Как следует из сравнения, отбрасывание высших гармоник м.д.с. и коэффициентов модуляции практически не сказывается на величине постоянной составляющей момента C_0 и на величину амплитуды первой гармоники синусного ряда S_1 . Погрешность порядка 10-20% получается для амплитуд вторых и четвертых гармоник косинусного и синусного рядов.

Кривая момента $\bar{M}_z(\gamma)$ также заметно деформируется.

Расчеты, проведенные для других режимов генератора (режим холостого хода, режим активной нагрузки и режим короткого замыкания), показывают, что характер влияния высших гармонических м.д.с. и коэффициентов модуляции на составляющие моменты сохраняется и для других режимов, т. е. выводы, полученные для номинального режима, можно распространить и на другие режимы работы генератора. Как указывалось, расчетные формулы для C_0 , C_k и S_k ($k=1, 2, \dots, 6$) для общего случая получаются очень громоздкими. Но для частного случая, когда принимаем $m_1 \neq 0$, $m_2 = m_3 = 0$ и $\bar{F}_1^2 \neq 0$, $\bar{F}_2^2 = \bar{F}_3^2 = 0$ ($s = d, q$) (т. е. когда учитываются в расчете только первые гармоники м. д. с. обмоток и m_1), на основе формул работы [1] получаем:

величину постоянной составляющей электромагнитного момента

$$C_0 = 2m_1 \bar{F}_1^2 S_1$$

амплитуды косинусных составляющих момента, равными:

$$C_1 = 0,5m_1[2(\bar{F}_{01}^d \bar{F}_{c1}^e - \bar{F}_{01}^e \bar{F}_{c1}^d) + \bar{F}_{c1}^d \bar{F}_{c1}^e + \bar{F}_{c1}^d \bar{F}_{01}^e + \bar{F}_{c1}^e \bar{F}_{01}^d];$$

$$C_2 = C_0; \quad C_3 = C_1; \quad C_4 = C_5 = C_6 = 0. \quad (4)$$

амплитуды синусных составляющих момента, равными:

$$S_1 = 0,25m_1[4\bar{F}_{01}^d \bar{F}_{c1}^e + (\bar{F}_{c1}^d)^2 + 2\bar{F}_{c1}^d \bar{F}_{01}^e] + 0,75m_1[4\bar{F}_{01}^e \bar{F}_{c1}^d - (\bar{F}_{c1}^e)^2 + 2\bar{F}_{c1}^e \bar{F}_{01}^d];$$

$$S_2 = 2m_1 \bar{F}_{c1}^e;$$

$$S_3 = 0,25m_1[4\bar{F}_{01}^e \bar{F}_{c1}^d - \bar{F}_{c1}^e \bar{F}_{c1}^d + (\bar{F}_{c1}^d)^2 - (\bar{F}_{c1}^e)^2 - 2\bar{F}_{c1}^e \bar{F}_{01}^d - 2\bar{F}_{c1}^d \bar{F}_{01}^e];$$

$$S_4 = S_5 = S_6 = 0. \quad (5)$$

Формулы (3) - (5) можно использовать для инженерных расчетов, когда допустимо пренебрегать высшими гармониками.

Наконец, в заключение, приведем выражение для постоянной составляющей электромагнитного момента при учете первого и второго коэффициентов модуляции и первых гармоник м.д.с.

В матричной записи

$$C_0 = (\bar{F}_1^d)^T A_1 \bar{F}_0 + 0,5(\bar{F}_1^e)^T A_2 \bar{F}_1^d \quad (6)$$

и эквивалентное выражение*

$$C_0 = (\bar{F}_0)^T A_1 \bar{F}_1^d + 0,5(\bar{F}_1^e)^T A_2 \bar{F}_1^e. \quad (7)$$

где матрицы A_1 и A_2 берутся по уравнению (12) работы [1].

На основе (6) и (7) получаем два эквивалентных друг другу выражения для C_0 , записанные через скалярные значения м.д.с.

$$C_0 = 2m_1 \bar{F}_{c1}^e - m_1 |\bar{F}_{01}^e| (8\bar{F}_{01}^e + 2\bar{F}_{c1}^e + \bar{F}_{01}^d) - \bar{F}_{c1}^e (2\bar{F}_{01}^e + \bar{F}_{c1}^e + \bar{F}_{01}^d) +$$

$$- \bar{F}_{01}^e (4\bar{F}_{01}^e + \bar{F}_{c1}^e + 2\bar{F}_{01}^d)];$$

$$C_0 = 2m_1 \bar{F}_{c1}^e + m_2 |\bar{F}_{01}^d| (8\bar{F}_{01}^d + 2\bar{F}_{c1}^d + 4\bar{F}_{01}^e) + \bar{F}_{c1}^e (2\bar{F}_{01}^d + \bar{F}_{c1}^d + \bar{F}_{01}^e) +$$

$$+ \bar{F}_{01}^d (4\bar{F}_{01}^d + \bar{F}_{c1}^d + 2\bar{F}_{01}^e)]. \quad (8)$$

Если отбросить первые гармоники м.д.с. в обмотках возбуждения и демпферной, то из (8) при $\bar{F}_{01}^d = \bar{F}_{01}^e = 0$ ($z = d, q$) получаем:

$$C_0 = 2m_1 \bar{F}_{c1}^e - m_2 \bar{F}_{01}^e \bar{F}_{c1}^e. \quad (9)$$

Постоянная составляющая момента с учетом (2) и уравнения (11) работы [1] будет равна:

* Легко показать, что $B^T A C = C^T A B$, если B и C — столбцовые матрицы, а A — квадратная симметричная матрица.

$$M_{Э0} = M_0 C_0 = \frac{z_2}{2} \frac{i_{cp}}{4p_n} f_{\omega} 2m_1 F_{cl}^q + \frac{z_2}{2} \frac{i_{cp}}{4p_n} m_2 F_{cl}^2 F_{cl}^q. \quad (10)$$

где p заменено на z_2 , т. к. $p = z_2$.

На основе теории индукторных генераторов [2] собственные машинные индуктивные сопротивления силовой обмотки для первой гармоники тока этой же обмотки для рассматриваемого типа генератора равны:

$$\begin{aligned} X_{cc}^d &= \omega_c^2 \frac{i_{cp}}{4p_n} \omega_1 (1 - 0,5z_2 + z_c + 0,5m_2); \\ X_{cc}^q &= \omega_c^2 \frac{i_{cp}}{4p_n} \omega_1 (1 - 0,5z_2 - z_c - 0,5m_2), \end{aligned} \quad (11)$$

где p и ω_c — элементы матрицы магнитных проводимостей (см. ур. (8) работы [1]); ω_1 — круговая частота; ω_c — число витков силовой обмотки.

Амплитуда первой гармоники э. д. с. в силовой обмотке, индуктированная постоянной составляющей м. д. с., на основе той же теории (при условии, что комплекс матрицы токов задан в виде $I = I^q + jI^d$) равна:

$$E_{ccm}^q = \omega_c \frac{i_{cp}}{4p_n} f_{\omega} 2m_1 \omega_1. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12), выражение (10) для эффективных (действующих) значений э. д. с. и токов принимает вид:

$$M_{Э0} = \frac{z_2}{\omega_1} E_{cc}^q I_{cl}^q + \frac{z_2}{\omega_1} (X_{cc}^d - X_{cc}^q) I_{cl}^d I_{cl}^q, \quad (13)$$

или в синхронных ваттах, т. е. для электромагнитной мощности генератора, получаем:

$$P_s = E_{cc}^q I_{cl}^q + (X_{cc}^d - X_{cc}^q) I_{cl}^d I_{cl}^q. \quad (14)$$

Выражение (14) полностью совпадает с выражением электромагнитной мощности обычного явнополюсного однофазного синхронного генератора, для которого из векторной диаграммы Бен-Эшенбурга при нагрузке емкостного типа имеем:

$$P_s = E_{cl}^q I_{cl}^q + (X_d - X_q) I_{cl}^d I_{cl}^q.$$

В заключении укажем на основные выводы, которые вытекают из работы.

1. Кривая электромагнитного момента однофазного индукторного генератора как функция угла положения ротора, кроме постоянной составляющей, содержит сильно выраженные первые, вторые и четвертые синусовые гармоники, а также сильно выраженные вторые и четвертые косинусовые гармоники.

В номинальном режиме работы генератора амплитуды указанных гармоник по величине оказываются одного порядка с величиной постоянной составляющей электромагнитного момента.

2. Функция электромагнитного момента, являясь периодической (период равен перемещению ротора на 2π электрических радиан), ввиду сильно выраженных гармоник, оказывается знакопеременной. Выбросы кривой момента в экстремальных точках могут достигать трехкратной положительной величины (относительно среднего значения) и однократной отрицательной величины. Эти явления необходимо учитывать при расчете вала на усталость. Это же явление может явиться источником вибраций и дополнительных акустических шумов.

3. Вышние гармонические м.д.с. обмоток практически не влияют на величину постоянной составляющей и на величину амплитуды первой синусоидальной гармоники момента. Вышние гармонические м.д.с. играют заметную роль при определении величины остальных, сильно выраженных, гармоник момента. Отбрасывание при расчетах вышних гармонических м.д.с. вызывает погрешность порядка 10-20%.

Երևանի Կ. Մարքս

Получено 18.11.1975.

Ն. Վ. ԱՐԵՏՅԱՆ

ԲԱՐԱՆՈՂ ՀԱՌՔՈՂ ԻՆԴԱՍՏՐ ԵՆՈՒՆՏՐԱՅԻՆ ԿՈՆՏՐԱՏՈՐԻ
ԷԼԵԿՏՐԱՄԵԿԱՆԻԿԱՆ ԻՌԻՏՈՒՄԻ ԻՆՏԵՆՏՅՈՆ ՎՐԱ ԵՐԱՆԻՍՏԱՆԱՐԻ
ՈՒՅԻՐԻ ԲԱՐՁՐ ՀԱՐԻՑՆԵՐԿԱՆԵՐԻ ԱՋՐԵՑՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐՈՒՄՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա ս ի ս ի ո ս լ

Վերլուծության հիման վրա շույց է տրված, որ էլեկտրամագնիսական մոմենտը, բացի հաստատուն բաղադրիչից, պարունակում է նաև արտահայտված երկրորդ ու չորրորդ կոսինուսային և սինուսային, երկրորդ ու չորրորդ սինուսային հարմոնիկաներ: Այդ պատճառով մոմենտի կորը ստացվում է եղանակախառն Մագնիսաշարժ ուժերի բարձր հարմոնիկաները փոփոխում են մոմենտի հարմոնիկաների ամպլիտուդաները 10-20 տոկոսով:

Լ Ի Թ Ե Ր Ա Տ Ր Ա

1. *Արեշյան Գ. Մ.* Аналитические выражение электромагнитного момента индукторного однофазного генератора с пульсирующим током. «Известия АН АрмССР (серия технических наук)» т. XXVIII, № 3, 1975.
2. *Արեշյան Գ. Մ.* Теория установившихся процессов однофазных индукторных генераторов с пульсирующим током. ДАН АрмССР, т. 58, № 5, 1974.