

БЕСКОНТАКТНЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

А. И. Скороспешкин, М. Л. Костырев, А. П. Фельзинг

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и
общей электротехники)

Однофазные синхронные генераторы получают все более широкое распространение в качестве автономных источников электрической энергии, в дорожном строительстве, сельском хозяйстве, на транспорте, в авиации, а также в различных промышленных и бытовых устройствах.

В качестве однофазных источников повышенной частоты широкое распространение получили индукторные генераторы, существенными недостатками которых являются: их значительные габаритные размеры и вес, неполное использование активных материалов, а также зависимость формы кривой выходного напряжения от величины и характера нагрузки.

Весьма перспективным представляется бесконтактный однофазный генератор повышенной частоты совмещенного типа. Совмещение двух машин, возбудителя и генератора, в одном магнитопроводе дает возможность выполнить генератор в одномашинном исполнении, уменьшает габаритные размеры и вес машины.

Следует отметить, что в технической литературе приводятся аналитические исследования преимущественно однофазных контактных генераторов, тогда как по бесконтактным генераторам приводятся лишь некоторые экспериментальные исследования [1, 2, 3]. Теоретический анализ однофазных машин затруднен тем, что дифференциальные уравнения, описывающие даже установившийся режим работы генератора, являются уравнениями с периодическими коэффициентами и не поддаются линейным преобразованиям, как у обычных машин.

В настоящей статье приводятся некоторые теоретические и экспериментальные исследования работы бесконтактного однофазного синхронного генератора повышенной частоты совмещенного типа. Исследуемый генератор (рис. 1) представляет собой каскадное соединение синхронного генератора обращенного типа и асинхронного преобразователя частоты совмещенных в общем магнитопроводе. При подаче напряжения на обмотку W_f и вращении ротора в обмотках W_1 и W_s наводится э. д. с с частотой соответственно

$$f = p_1 \cdot n, \quad (1)$$

$$f_s = \left(\frac{p_2}{p_1} \pm 1 \right) f = (k \pm 1) f, \quad (2)$$

где n — скорость вращения ротора,
 p_1, p_2 — числа пар полюсов соответственно первого и второго каскадов.

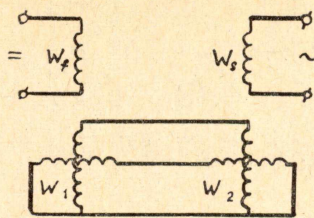


Рис. 1

Рис. 1. Схема бесконтактного однофазного синхронного генератора.

$$k = \frac{p_2}{p_1}.$$

Знак (+) в (2) относится к случаю, когда ротор и поле вращаются согласно, знак (—) — встречно. Наиболее целесообразным является первый режим, так как в этом случае отсутствуют внутренние замкнутые энергетические циклы [4]. В дальнейшем он принят за основной режим.

Одной из основных особенностей работы однофазного генератора под нагрузкой является наличие обратного синхронного поля. Это поле наводит в обмотке W_2 э.д.с. с частотой

$$f^s = (2k+1)f, \quad (3)$$

под действием которой по обмоткам ротора будет протекать ток этой же частоты. При этом поле, создаваемое обмоткой W_1 , будет вращаться согласно с ротором и наводит в обмотке W_f э.д.с. с частотой

$$f_f = 2(k+1)f \quad (4)$$

Ток этой частоты, протекая по обмотке W_f , создает пульсирующее поле, обратно вращающаяся составляющая которого наводит в обмотке W_1 э.д.с. с частотой

$$f^f = (2k+3)f. \quad (5)$$

Обмотка W_2 создает поле, которое наводит в выходной обмотке э.д.с. с частотой

$$f_{s3} = 3(k+1)f. \quad (6)$$

Таким образом, в кривой выходного напряжения появляются высшие гармонические, обусловленные наличием обратного поля.

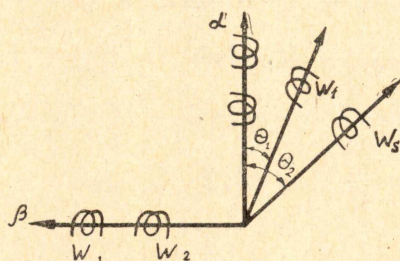


Рис. 2. Оси координат генератора

Для составления дифференциальных уравнений удобно выбрать оси координат (α и β) на роторе (рис. 2). На основании общепринятых допущений [6] составим уравнения равновесия контуров машины для мгновенных значений:

$$\begin{aligned}
u_f &= (R_f + pL_f)i_f + pM_{f1}\cos\theta_1 i_\alpha - pM_{f1}\sin\theta_1 i_\beta, \\
0 &= pM_{f1}\cos\theta_1 i_f + (R_R + pL_R)i_\alpha + pM_{S2}\cos\theta_2 i_S, \\
0 &= -pM_{f1}\sin\theta_1 i_f + (R_R + pL_R)i_\alpha + pM_{S2}\sin\theta_2 i_S, \\
-u_S &= pM_{S2}\cos\theta_2 i_\alpha + pM_{S2}\sin\theta_2 i_\beta + (R_S + pL_S)i_S,
\end{aligned} \quad (7)$$

где

$R_f, R_R = R_1 + R_2, R_S, L_f, L_R = L_1 + L_2, L_S, M_{f1}, M_{f1}, M_{S2}, M_{S2}$ — активные сопротивления, коэффициенты само- и взаимной индукции обмоток машины;

θ_1, θ_2 — углы между осями обмоток.

Система уравнений (7) содержит переменные коэффициенты, от которых не удается избавиться с помощью известных преобразований [7]. Для установившегося режима решение такой системы уравнений может быть выполнено, если известен характер изменения токов машины [6].

Согласно (1—6) токи в контурах машины для установившегося режима следует искать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
i_f &= I_f = I_{f2}\cos[(k+1)2\omega t \pm \varphi_{f2}] + \dots, \\
i_S &= I_{S1}\cos[(k+1)\omega t + \varphi_{S1}] + I_{S3}\cos[3(k+1)\omega t + \varphi_{S3}] + \dots, \\
i_\alpha &= I_{\alpha1}\cos(\omega t + \varphi_{\alpha1}) + I_{\alpha}^{2k+1}\cos[(2k+1)\omega t + \varphi_{\alpha}^{2k+1}] + \\
&\quad + I_{\alpha}^{2k+3}\cos[(2k+3)\omega t + \varphi_{\alpha}^{2k+3}] + \dots, \\
i_\beta &= -I_{\beta1}\sin(\omega t + \varphi_{\beta1}) + I_{\beta}^{2k+1}\sin[(2k+1)\omega t + \varphi_{\beta}^{2k+1}] - \\
&\quad - I_{\beta}^{2k+3}\sin[(2k+3)\omega t + \varphi_{\beta}^{2k+3}] + \dots
\end{aligned} \quad (8)$$

С учетом только постоянной составляющей тока в обмотке W_f , выражения для токов будут в виде

$$\begin{aligned}
i_f &= I_f, \\
i_S &= I_{S1}\cos[(k+1)\omega t + \varphi_{S1}], \\
i_\alpha &= I_{\alpha1}\cos(\omega t + \varphi_{\alpha1}) + I_{\alpha}^{2k+1}\cos[(2k+1)\omega t + \varphi_{\alpha}^{2k+1}], \\
i_\beta &= -I_{\beta1}\sin(\omega t + \varphi_{\beta1}) + I_{\beta}^{2k+1}\sin[(2k+1)\omega t + \varphi_{\beta}^{2k+1}].
\end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), после некоторых преобразований получаем следующие выражения для уравнений равновесия напряжения контуров машины:

$$\begin{aligned}
u_f &= R_f I_f - M_{f1} 2(k+1)\omega \sin[2(k+1)\omega t + \varphi_{f2}^{2k+1} + \delta_{01}] I_{f2}^{2k+1}, \\
0 &= M_{f1} \omega \sin(\omega t + \delta_{01}) I_f + \{R_R \cos(\omega t + \varphi_{\alpha1}) - L_R \omega \sin(\omega t + \varphi_{\alpha1})\} I_{\alpha1} + \\
&\quad + \{R_R \cos[(2k+1)\omega t + \varphi_{\alpha}^{2k+1}] - L_R (2k+1)\omega \sin[(2k+1)\omega t + \varphi_{\alpha}^{2k+1}]\} I_{\alpha}^{2k+1} - \\
&\quad - M_{S2} \left(k + \frac{1}{2}\right) \omega \sin[(2k+1)\omega t + \varphi_{S1} + \delta_{02}] I_{S1} - \\
&\quad - M_{S2} \frac{\omega}{2} \sin(\omega t + \varphi_{S1} - \delta_{02}) I_{S1}, \\
0 &= -M_{f1} \omega \cos(\omega t + \delta_{01}) I_f - \{R_R \sin(\omega t + \varphi_{\beta1}) + L_R \omega \cos(\omega t + \varphi_{\beta1})\} I_{\beta1} + \\
&\quad + \{R_R \sin[(2k+1)\omega t + \varphi_{\beta}^{2k+1}] + L_R (2k+1)\omega \cos[(2k+1)\omega t + \varphi_{\beta}^{2k+1}]\} I_{\beta}^{2k+1} + \\
&\quad + M_{S2} \left(k + \frac{1}{2}\right) \omega \cos[(2k+1)\omega t + \varphi_{S1} + \delta_{02}] I_{S1} -
\end{aligned} \quad (10)$$

$$- M_{S2} \frac{\omega}{2} \cos(\omega t + \varphi_{S1} - \delta_{02}) I_{S1},$$

$$0 = - M_{S2}(k+1)\omega \sin[(k+1)\omega t + \varphi_1 + \delta_{02}] I_1 - \\ - M_{2S}(k+1)\omega \sin[(k+1)\omega t + \varphi^{2k+1} - \delta_{02}] I^{2k+1} + \\ + R \cos[(k+1)\omega t + \varphi_{S1}] I_S - L(k+1)\omega \sin[(k+1)\omega t + \varphi_{S1}] I_{S1},$$

где

$$R = R_s + R_n,$$

$$L = L_s + L_n,$$

R_n, L_n — активное и индуктивное сопротивление нагрузки.

Так как в установившемся режиме уравновешивать друг друга могут только э.д.с. одной и той же частоты, то каждое уравнение для контуров ротора может быть представлено двумя уравнениями. Учитывая это, а также то, что в установившемся режиме

$$I_{\alpha 1} = I_{\beta 1} = I_1, \quad I_{\alpha}^{2k+1} = I_{\beta}^{2k+1} = I^{2k+1}, \quad \delta_{01} = \delta_{02} = 0,$$

получаем следующую систему уравнений в комплексном виде:

$$\dot{U}_f = R_f \cdot \dot{I}_f + jX_{f1} 2(k+1) \dot{I}^{2k+1},$$

$$0 = jX_{f1} \dot{I}_f + (R_R + jX_R) \dot{I}_1 + j \frac{1}{2} X_{S2} \dot{I}_{S1},$$

$$0 = [R_R + jX_R(2k+1)] \dot{I}^{2k+1} + jX_{S2} \left(k + \frac{1}{2}\right) \dot{I}_{S1}, \quad (11)$$

$$0 = jX_{S2}(k+1) \dot{I}_1 + jX_{S2}(k+1) \dot{I}^{2k+1} + [R + jX(k+1)] \dot{I}_{S1}.$$

Полученная система уравнений (11) позволяет рассчитывать все характеристики бесконтактного однофазного синхронного генератора в установившемся режиме.

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце 3-фазного бесконтактного ЭМУ, изготовленного на базе асинхронного двигателя АО2-42-4.

Данные образца:

$$P_n = 2400 \text{ в.а.}, \quad U_s = 127 \text{ в.},$$

$$I_s = 6,7 \text{ а.}$$

$$2p_1 = 2$$

$$2p_2 = 6$$

$$n = 3000 \text{ об/мин.}$$

На рис. 3 приведена осциллограмма тока в роторе при работе испытываемого образца в режиме однофазной нагрузки, из которой видно,

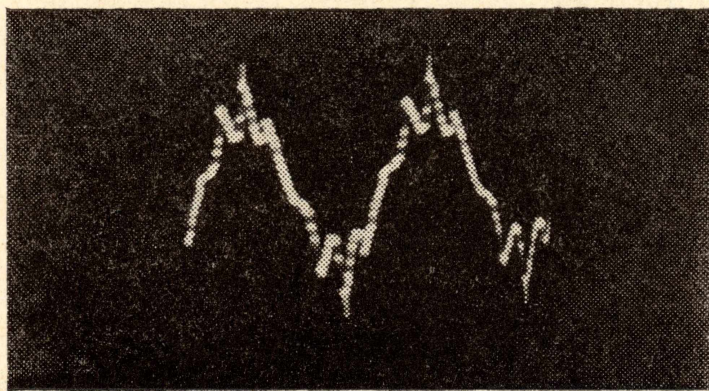


Рис. 3. Осциллограмма тока в роторе при однофазной нагрузке

что на кривую тока основной частоты накладывается частота, определяемая выражением (3). На рис. 4, 5, 6 приведены осциллограммы напряжения на выходе генератора, снятые на холостом ходу и в режиме однофазной нагрузки без дросселя и с дросселем в цепи обмотки возбуждения W_f . Как было отмечено выше, в режиме однофазной нагрузки в обмотке W_f наводится э.д.с. с частотой, определяемой по (4). При отсутствии дросселя в цепи возбуждения токи этой частоты, замыкаясь через источник питания и обмотку W_f , создают пульсирующее поле, которое по (5) и (6) приводит к искажению формы кривой выходного напряжения (рис. 5).

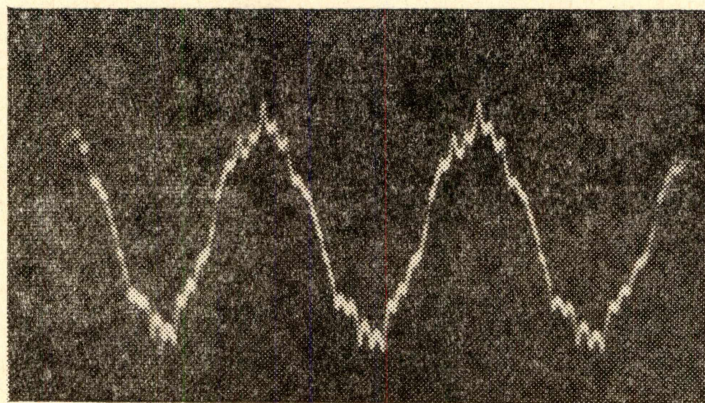


Рис. 4 Осциллограмма выходного напряжения в режиме холостого хода

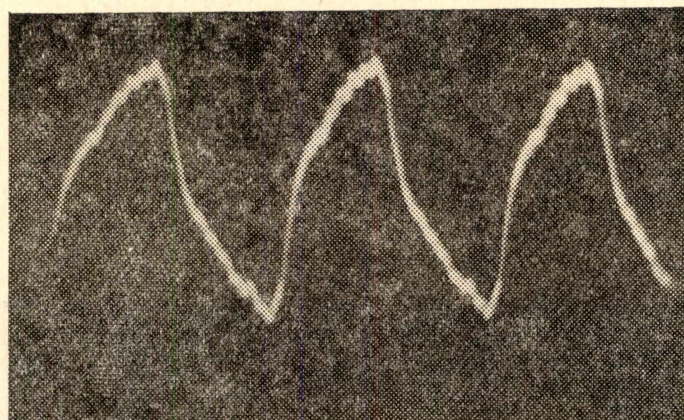


Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения при однофазной нагрузке без дросселя в цепи обмотки возбуждения.

Включение дросселя в цепь возбуждения значительно улучшает форму кривой напряжения (рис. 6). В табл. 1 приведены данные гармонического анализа кривых тока в роторе и напряжения на выходе генератора, приведенного с помощью гармонического анализатора типа С4-7.

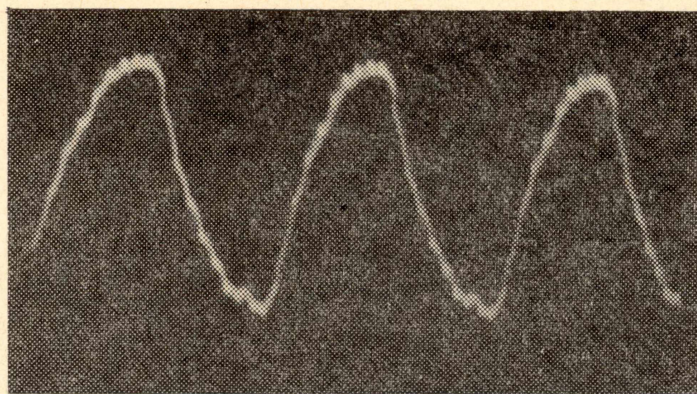


Рис. 6. Осциллограмма выходного напряжения при однофазной нагрузке. В цепь обмотки возбуждения включен дроссель

Таблица 1

Гармонические в % к основной гармонике		нагрузка		
№ гармоники	Холостой ход			
		без дросселя	с дросселем	
I	1	100	100	100
	3	—	—	—
	5	—	—	—
	7	—	21,7	13,1
	9	—	14	6,4
U _s	1	100	100	100
	3	2	18	9,5
	5	5,4	7	4,5
	7	1,4	3,6	1,2
	9	0,5	0,84	0,64

На рис. 7 приведены рассчитанная по (11) и снятая экспериментально регулировочные характеристики. Расчетная кривая проходит несколько ниже экспериментально снятой, так как в расчет не учтены потери в стали.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Возникающее в однофазном режиме обратно-синхронное поле приводит к целому ряду нежелательных явлений: перенапряжению в обмотках ротора, пульсации в обмотке возбуждения, искажению формы кривой выходного напряжения.

2. Достаточно хорошее совпадение расчетной и опытной регулировочных характеристик показывает, что проведенные теоретические ис-

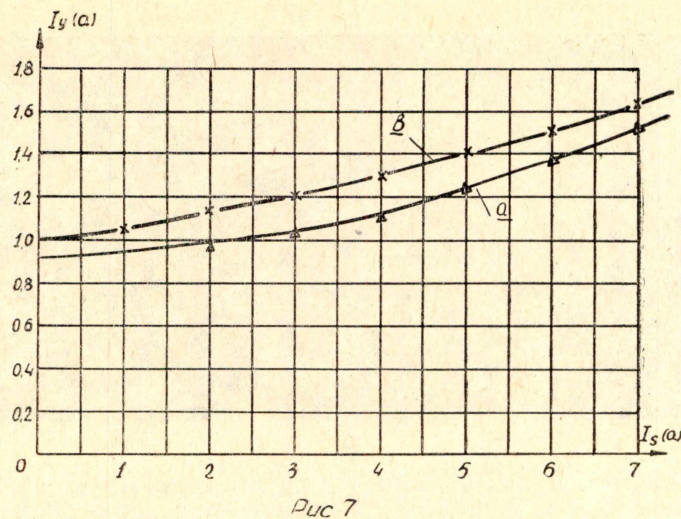


Рис. 7. Регулировочные характеристики: а) расчетная, б) экспериментальная

следования правильно отображают основные процессы, происходящие в однофазном бесконтактном синхронном генераторе при работе его в установившемся режиме.

3. Анализ приведенных осциллограмм и табл. 1 показывает, что включение дросселя в цепь обмотки возбуждения резко снижает процентное содержание высших гармонических в кривой выходного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Антонов. Бесконтактный однофазный синхронный генератор с использованием обратно-синхронного поля. «Электротехника», 1966, № 8.
2. В. М. Петров и Н. С. Сиунов. Экспериментальное исследование кривых напряжения и тока 3-фазных синхронных генераторов при однофазных нагрузках. «Электромеханика», 1964, № 1.
3. Л. М. Паластин. Расчет установившихся режимов нагрузки однофазных синхронных генераторов. ВЭП, № 9, 1958.
4. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1960.
5. М. Л. Костырев. Разработка и исследование бесконтактных электромашиных усилителей повышенной частоты. Диссертация, Томск, 1968.
6. Л. Н. Грузов. Методы математического исследования электрических машин. ГЭИ, 1953.
7. Н. Хэнкок. Матричный анализ электрических машин. «Энергия», М., 1957.