

УДК 621.3

Л. Г. Гасанова, Р. И. Мустафаев

## Методика исследования влияния высших гармонических напряжений на режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами

Синхронные машины с постоянными магнитами, частотно-управляемые со стороны статора преобразователями частоты, выполненными на базе силовых транзисторов или полностью управляемых тиристорах, находят широкое применение в качестве двигателей и генераторов. Перспективно их применение и на транспорте, в том числе морском. Современные преобразователи частоты оснащены системой управления, базирующейся на синусоидальной широтно-импульсной модуляции. При формировании напряжения на выходе преобразователя, помимо основной гармоники, в составе напряжения находятся высшие гармонические составляющие, которые безусловно влияют на режимные параметры генератора (электромагнитный момент, мощность, токи). Для определения этого влияния разработана методика моделирования и исследования высших гармоник напряжения в системе "электрическая сеть – преобразователь частоты – синхронная машина с постоянными магнитами". Предложенная форма записи уравнений частотно-управляемой синхронной машины с постоянными магнитами позволяет относительно просто воспроизводить гармонический состав напряжения на выходе преобразователя частоты, оснащенного системой управления, выполненной на базе синусоидальной широтно-импульсной модуляции. Разработанная методика может быть применена для преобразователей с любым числом и составом гармонических составляющих напряжения, питающих статорную обмотку синхронной машины с постоянными магнитами. На конкретном примере продемонстрирована эффективность методики исследования влияния высших гармоник на режимные параметры машины. При этом исследование проводилось с учетом формы кривой напряжения, питающего обмотку синхронной машины, содержащей помимо основной гармоники 8-ю, 10, 11, 13, 14 и 16-ю гармонические составляющие, а мощность самой синхронной машины была равна 1 500 кВт.

**Ключевые слова:** синхронная машина с постоянными магнитами, преобразователи частоты, высшие гармоники, математическое моделирование, широтно-импульсная модуляция.

### Введение

В настоящее время все большее применение находят синхронные генераторы с постоянными магнитами, управляемые преобразователями частоты. Особенно широкое распространение они получили в ветроэлектрических установках (ВЭУ) крупных мощностей. Эти генераторы могут быть высоко- и низкоскоростными (так называемыми Ringgenerator) для безредукторных ВЭУ [1].

Мощность современных частотно-управляемых синхронных машин с постоянными магнитами достигла таких уровней (5–6 МВт), что они могут быть с успехом применены и на транспорте, в том числе и морском, в качестве двигателей и генераторов.

В общем случае почти все преобразователи частоты для этих синхронных машин выполняются на базе силовых IGBT-транзисторов либо на базе полностью управляемых силовых GTO-тиристоров.

На схеме подключения полностью управляемого преобразователя частоты [2] на IGBT-транзисторах на статорную обмотку высокоскоростного синхронного генератора с постоянными магнитами (рис. 1) используются следующие обозначения: ПД – приводной двигатель (например, дизель); Ред. – редуктор; И – инвертор напряжения; В – выпрямитель; СГ с ПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами; ПЧ – преобразователь частоты;  $L$  и  $C$  – индуктивности и емкости фильтра  $\Phi$ ;  $Tr_c$  – трансформатор связи с энергосистемой ( $U_c$ ).

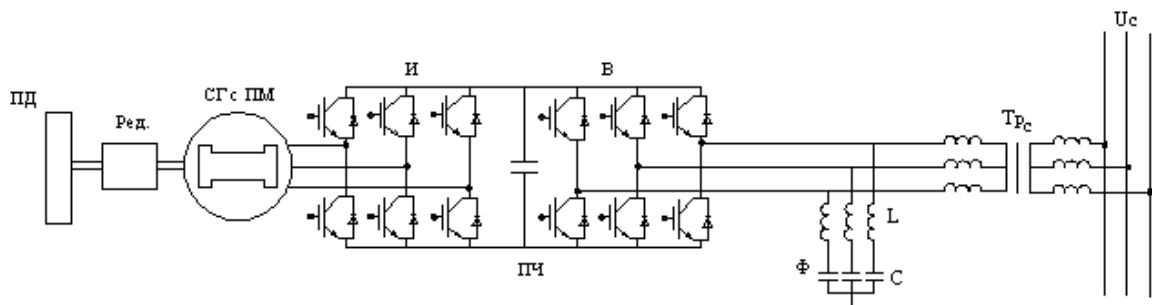


Рис. 1. Схема подключения преобразователя частоты на статорную обмотку синхронного генератора с постоянными магнитами  
Fig. 1. The connection diagram of the frequency inverter to the stator windings of the permanent magnet synchronous generator

Необходимо отметить, что современные преобразователи частоты оснащены системой управления, выполненной на базе синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом в специальной литературе можно найти различные технические решения, позволяющие посредством некоторого усложнения системы управления достичь еще большего снижения величины и числа гармонических составляющих напряжения на выходе преобразователя, приближая его к синусоидальной величине.

В настоящей статье продемонстрированы работоспособность и эффективность разработанной методики исследования влияния высших гармонических составляющих напряжения на режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами (электромагнитный момент, токи, мощности). Нижеприведенный гармонический состав выходного напряжения преобразователя частоты с ШИМ-управлением в каждом конкретном случае может быть и несколько другим. Но это ни в коей мере не скажется на востребованности и достоверности разработанной методики исследования.

### Материалы и методы

Гармонический состав выходного напряжения инвертора с синусоидальным ШИМ при работе его на смешанную нагрузку представляет собой зависимость амплитуд гармонических составляющих выходного напряжения от величины коэффициента модуляции для различных гармоник при разных значениях отношений несущей частоты к частоте модуляции. Для классической системы управления с синусоидальной ШИМ примем его таким, как это приведено, например, в работе [3]: при значении коэффициента  $\varepsilon$ , показывающего отношение несущей частоты  $f_{\text{нес}}$  к частоте модуляции  $F_m$ , равном  $\varepsilon = \frac{f_{\text{нес}}}{F_m} \geq 10$ , кривые гармонического состава выходного напряжения инвертора с синусоидальной ШИМ имеют вид, представленный на рис. 2.

На рис. 2 изображены зависимости величин амплитуд гармонических составляющих, отнесенных к величине опорного напряжения  $E$ , которое формируется на выходе выпрямителя  $B$  (с незначительной погрешностью можно считать, что  $E = U_{\text{баз}} = \sqrt{2}U_{\text{нф}}$ , где  $U_{\text{нф}}$  – фазное напряжение генератора). При  $\varepsilon = 12$ , если, например, принять частоту модуляции равной  $F = 50$  Гц, несущая частота будет равна  $f = 600$  Гц. Тогда в соответствии с кривыми (рис. 2) помимо основной гармоники в кривой напряжения будут присутствовать 8-я, 10, 11, 13, 14 и 16-я гармонические составляющие.

Необходимо отметить, что в инверторе с синусоидальной ШИМ можно регулировать амплитуду выходного напряжения, изменяя при постоянной величине входного напряжения лишь глубину модуляции  $\mu$  (рис. 2).

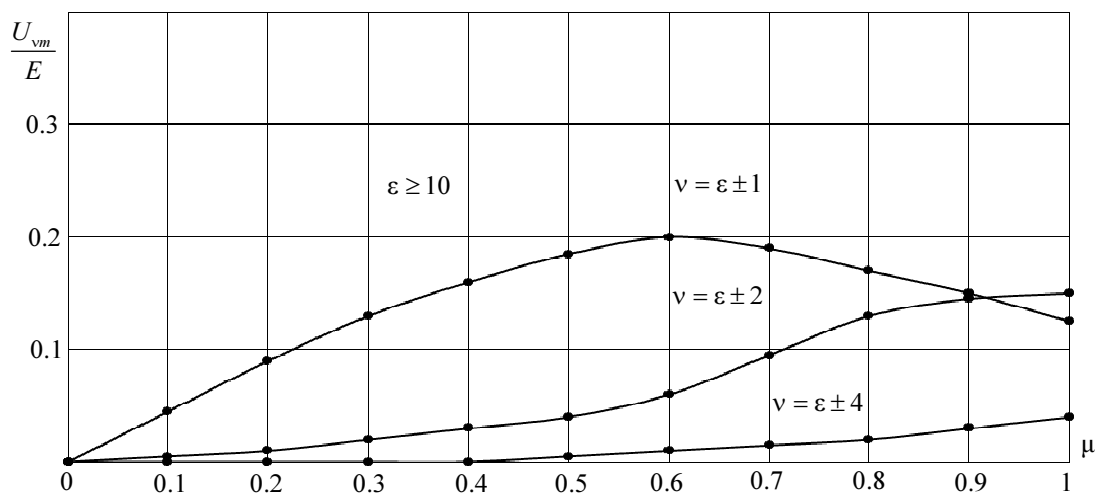


Рис. 2. Кривые гармонического состава выходного напряжения инвертора с синусоидальной ШИМ  
 Fig. 2. The curves of the harmonic composition of the output voltage of the inverter with sinusoidal PWM

Тогда можно ограничиться наличием неуправляемого выпрямителя, однако при этом нельзя обмениваться активными и реактивными мощностями между источником питания и нагрузкой, поэтому для указанных машин применяется схема, изображенная на рис. 1 (с полностью управляемым выпрямителем). В этом случае частота тока на выходе может регулироваться от нуля до максимума выходным преобразователем (инвертором), соединенным с обмоткой статора генератора, а амплитуда выходного напряжения от 0 до максимального значения – входным преобразователем (выпрямителем), соединенным с выходом питающего трансформатора. При этом глубина модуляции  $\mu$  остается постоянной и равной максимальному значению  $\mu = 1$ .

В работах [4; 5] представлена разработанная нами математическая модель частотно-управляемой синхронной машины с постоянными магнитами. Суть ее состоит в том, что известные уравнения Парка для синхронных машин, которые записаны в осях  $d, q$ , вращающихся со скоростью ротора машины, преобразованы таким образом, чтобы в них появилась возможность учесть изменение амплитуды и частоты напряжения, подводимого к статорной обмотке машины. Помимо этого, в данных уравнениях введен коэффициент, учитывающий магнитную энергию постоянных магнитов машины, приходящуюся на единицу объема, или при малых значениях остаточной магнитной индукции он трактуется как коэрцитивная сила магнитов.

$$\left. \begin{aligned}
 p\Psi_{ds} &= U_{ds} - \omega_r \Psi_{qs} - r_s i_{ds}, \\
 p\Psi_{qs} &= U_{qs} + \omega_r \Psi_{ds} - r_s i_{qs}, \\
 p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{x_{dr}} \Psi_{dr} + \frac{r_{qr} x_{ad}}{x_{dr}} i_{qs} + \frac{r_{dr}}{x_{dr}} M_f, \\
 p\Psi_{qr} &= \frac{r_{qr}}{x_{qr}} \Psi_{qr} + \frac{r_{qr} x_{aq}}{x_{qr}} i_{qs}, \\
 p\alpha &= \omega_r, \\
 p\omega_r &= \frac{1}{T_j} m_{пд} - \frac{1}{T_j} m_{эм}, \\
 m_{эм} &= \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}, \\
 \dot{i}_{qs} &= \frac{x_{dr}}{x_{ds} x_{dr} - x_{ad}^2} \Psi_{ds} - \frac{x_{dr} - x_{ad}}{x_{ds} x_{dr} - x_{ad}^2} M_f - \frac{x_{ad}}{x_{ds} x_{dr} - x_{ad}^2} \Psi_{dr}, \\
 \dot{i}_{qs} &= \frac{x_{qr}}{x_{qs} x_{qr} - x_{ad}^2} \Psi_{qs} - \frac{x_{aq}}{x_{qs} x_{qr} - x_{ad}^2} \Psi_{qr}, \\
 U_{ds} &= 0,707 k_{us} \left[ \cos(k_{fs} \tau) (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \tau) (\cos \alpha + \sin \alpha) \right], \\
 U_{qs} &= 0,707 k_{us} \left[ \cos(k_{fs} \tau) (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \tau) (\cos \alpha - \sin \alpha) \right].
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В системе уравнения (1) приняты следующие обозначения:  $p$  – символ дифференцирования по синхронному времени  $\tau = 314t$ , где  $\tau$  – время, рад,  $t$  – время, с, т. е. 1 с соответствует 314 рад;  $\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$  – потокосцепления статорных и роторных контуров машины, о. е.;  $U_{ds}, U_{qs}$  – составляющие вектора статорного напряжения машины, учитывающие изменения (регулирование) амплитуды  $k_{us}$  и частоты  $k_{fs}$  напряжения, подводимого к статорной обмотке машины от выхода преобразователя частоты;  $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$  – токи статорной и роторной обмоток по осям  $d, q$ ;  $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора, о. е.;  $M_f$  – коэффициент, учитывающий магнитную энергию постоянных магнитов синхронной машины, отнесенную к единице объема,  $M_f = 1$  – значение энергии магнитов, способное при холостом ходе синхронного генератора обеспечить ЭДС на его зажимах, равную  $E_{xx} = 1$ ;  $\alpha$  – угол между осями  $d, q$ , вращающимися со скоростью ротора  $\omega_r$ , и неподвижными в пространстве осями;  $m_{пд}$  – вращающийся момент приводного двигателя (при работе синхронной машины в режиме генератора) или тормозной момент рабочего механизма (при работе двигателя);  $m_{эм}$  – электромагнитный момент синхронной машины;  $r_s$  – активное сопротивление статорной обмотки;  $r_{dr}, r_{qr}$  – активные сопротивления роторных демферных обмоток по осям  $d, q$ ;  $x_{dr}, x_{qr}$  – полные индуктивные сопротивления обмотки ротора по осям  $d$  и  $q$ ;  $x_{ds}, x_{qs}$  – сопротивления взаимной индуктивности по осям  $d$  и  $q$ ;  $x_{ds}$  – полное индуктивное сопротивление статорной обмотки машины;  $T_j$  – инерционная постоянная ротора СМ и первичного двигателя, рад.

Два последних уравнения системы (1) запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= 0,707k_{us} \cos(k_{fs} \tau)(\cos \alpha - \sin \alpha) - 0,707k_{us} \sin(k_{fs} \tau)(\cos \alpha + \sin \alpha), \\ U_{qs} &= 0,707k_{us} \cos(k_{fs} \tau)(\cos \alpha + \sin \alpha) + 0,707k_{us} \sin(k_{fs} \tau)(\cos \alpha - \sin \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В уравнении (2)  $k_{us} = U_s / U_{\text{баз}}$  – относительное значение модуля напряжения на выходе преобразователя (т. е. на зажимах статорной обмотки синхронной машины);  $k_{fs} = f / f_{\text{баз}}$  – относительное значение частоты тока (напряжения) на выходе преобразователя.

Если в соответствии с рис. 2 описать кривую напряжения с учетом гармонических составляющих, то она с учетом основной гармоники запишется в виде

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,9 \sin(k_{fs} \tau) - 0,035 \sin(8k_{fs} \tau) + 0,15 \sin(10k_{fs} \tau) - 0,125 \sin(11k_{fs} \tau) + \\ &+ 0,125 \sin(13k_{fs} \tau) - 0,15 \sin(14k_{fs} \tau) + 0,035 \sin(16k_{fs} \tau) = \sin(k_{fs} \tau). \end{aligned} \quad (3)$$

По аналогии с выражением (3) для косинусной функции:

$$\begin{aligned} A_2 &= 0,9 \cos(k_{fs} \tau) - 0,035 \cos(8k_{fs} \tau) + 0,15 \cos(10k_{fs} \tau) - 0,125 \cos(11k_{fs} \tau) + \\ &+ 0,125 \cos(13k_{fs} \tau) - 0,15 \cos(14k_{fs} \tau) + 0,035 \cos(16k_{fs} \tau) = \cos(k_{fs} \tau). \end{aligned} \quad (4)$$

Значения амплитуд гармонических составляющих в уравнениях (3) и (4) были определены соответствующими координатами (рис. 2).

С учетом выражений (3) и (4) соотношения (2) примут вид

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= 0,707k_{us} A_2 (\cos \alpha - \sin \alpha) - 0,707k_{us} A_1 (\cos \alpha + \sin \alpha), \\ U_{qs} &= 0,707k_{us} A_2 (\cos \alpha + \sin \alpha) + 0,707k_{us} A_1 (\cos \alpha - \sin \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

### Результаты и обсуждение

При номинальных значениях амплитуды и частоты  $k_{us} = k_{fs} = 1$  и номинальном движущем моменте, равном  $m_{\text{нд}} = -0,9$  (знак минус указывает на генераторный режим), для синхронной машины был воспроизведен режим прямого подключения к электрической сети.

На рис. 3, а, б, в, г представлены флюктограммы изменения режимных параметров синхронного генератора с постоянными магнитами с учетом влияния высших гармоник напряжения. На первой флюктограмме (рис. 3, а) изображена кривая электромагнитного момента  $m_{\text{эм}} = f(\tau)$ , из которой видно, что после пускового режима ( $\tau_{\text{пуска}} = 0 \div 1200$  рад) среднее значение  $m_{\text{эм}}$  в установившемся режиме равно  $m_{\text{эм}} = 0,9$ , а флуктуации момента из-за влияния гармоник составляют  $\Delta m = \pm 14,3$  %. Величина частоты вращения  $\omega_r$  (рис. 3, б) без колебаний устанавливается на значении  $\omega_r = 1$  (строго синхронная частота вращения). Это становится возможным благодаря значительной величине  $J_{\text{об}}$  – момента инерции движущихся частей ротора синхронной машины и приводного двигателя.

Величины составляющих токов статора генератора по осям  $d, q, i_d, i_q$  (рис. 3, в, г) устанавливаются на значениях  $i_{ds} = -0,67, i_{qs} = -0,7$ .

И наконец, на рис. 3, д представлена флюктограмма изменения активной мощности на зажимах генератора. Из нее видно, что колебания мощности, обусловленные высшими гармониками напряжения, достигают значительных величин и составляют  $\sim \pm 40$  % от величины установившегося значения, равного  $p_r = -0,89$ . Это объяснимо, потому что активная мощность на зажимах синхронных машин, записанных в осях, вращающихся со скоростью ротора, определяется по выражению

$$p_r = U_{ds} i_{ds} + U_{qs} i_{qs}, \quad (6)$$

т. е. она состоит из произведений составляющих напряжений и токов, кривые которых зависят от гармоник.

Если необходимо представить токи в неподвижной системе координат  $\alpha_0, \beta_0$ , то они примут вид

$$\left. \begin{aligned} i_{\alpha_0} &= i_{ds} \cos \alpha + i_{qs} \sin \alpha, \\ i_{\beta_0} &= -i_{ds} \sin \alpha + i_{qs} \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

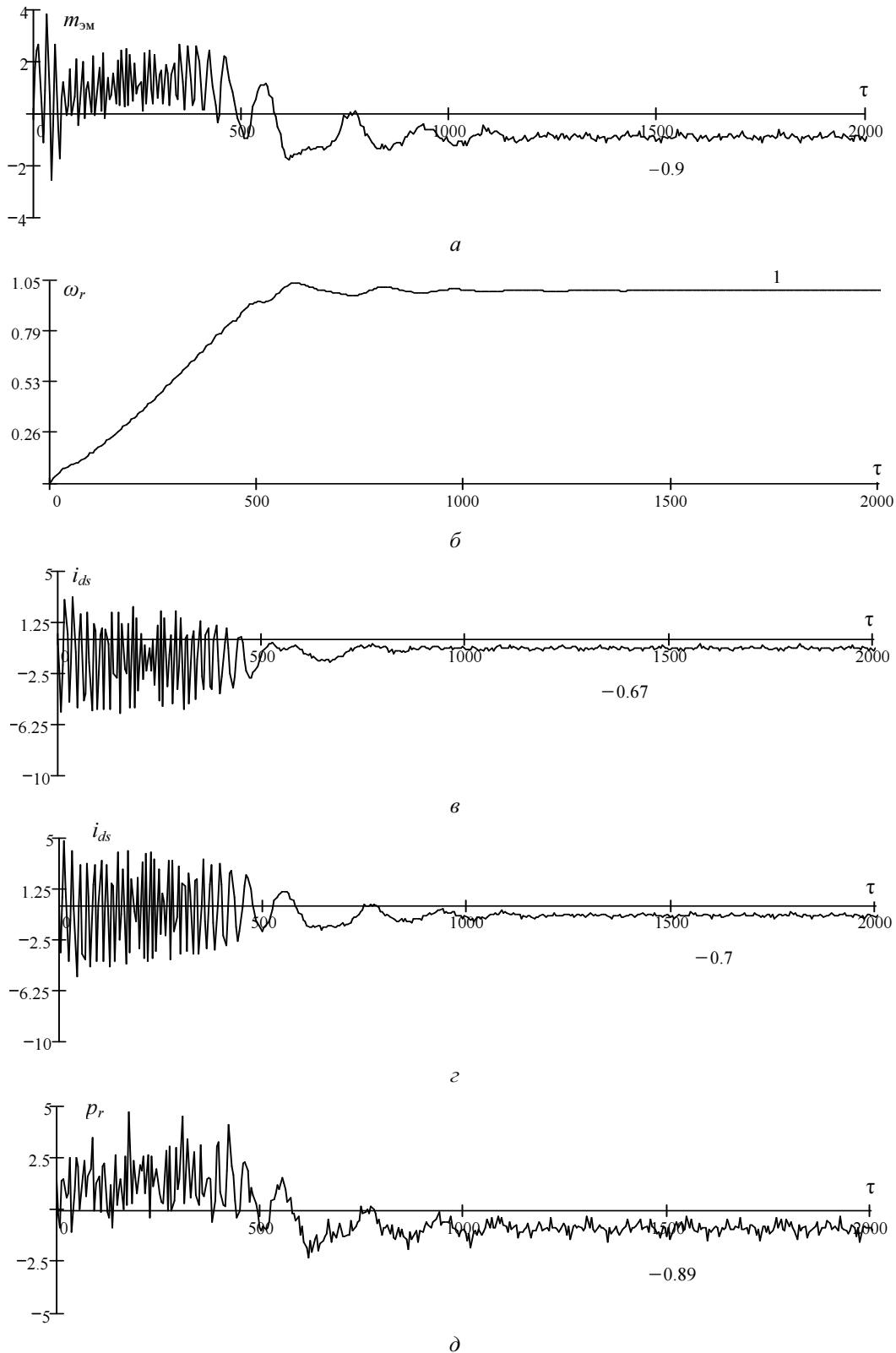


Рис. 3. Флуктограммы изменения режимных параметров синхронного генератора с постоянными магнитами с учетом влияния высших гармонических напряжения  
Fig. 3. The fluctograms of the change in the operating parameters of the permanent magnet synchronous generator taking into account the effect of higher harmonic voltages

На рис. 4, а, б представлена флюктограмма тока  $i_{\alpha_0}$ , полученная по выражению (7) (рис. 4, а), и развернутое значение этого же тока на интервале 1 500–2 000 рад.

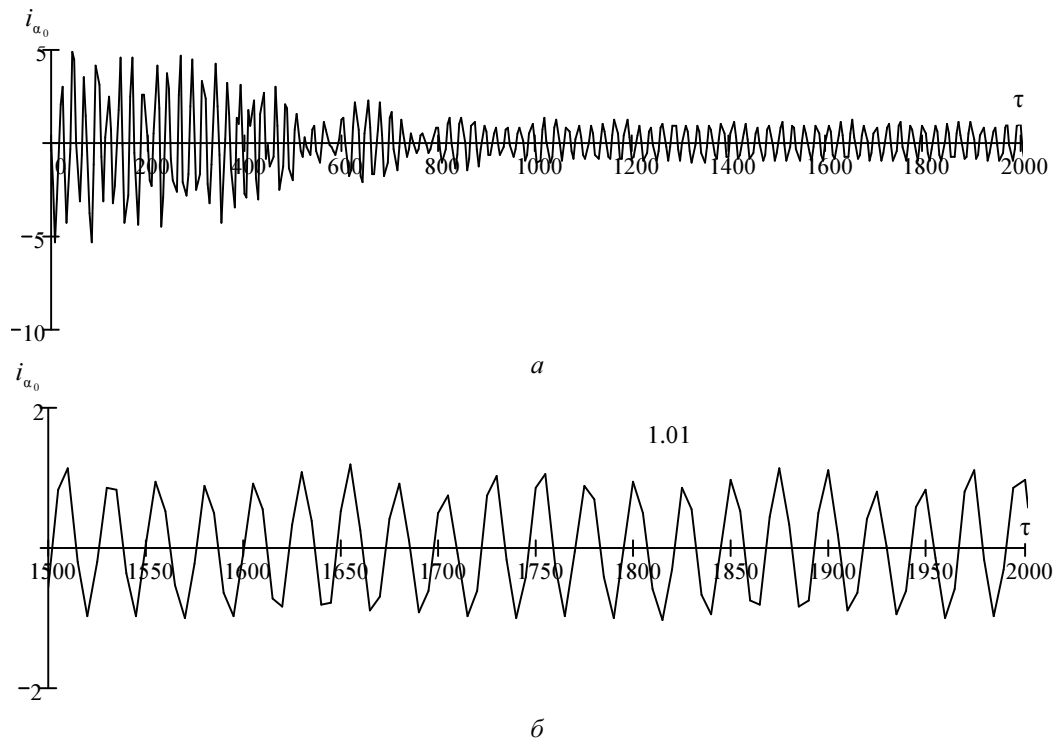


Рис. 4. Флюктограммы изменения тока статора генератора в неподвижной системе координат  
Fig. 4. The fluctograms of the stator current of the generator in a fixed coordinate system

*Параметры синхронного генератора с постоянными магнитами*

$P_n = 1\,500$ кВт	$U_n = 690$ В	$x_{ad} = 0,9135$	$r_s = 0,02$
$\cos \varphi = 0,96$ (опережающий)	$U_\phi = 400$ В	$x_{aq} = 0,385$	$r_{dr} = 0,08$
$S_n = \frac{1\,500}{\cos \varphi} = 1\,645$ кВА	$I_\phi = 1\,378$ А	$x_{dr} = 1,039$	$r_{qr} = 0,07$
$M_n = \frac{P_n}{\omega_s} = 4\,777$ Нм	$x_{ds} = 1,008$	$x_{qr} = 0,511$	$J_{\text{об.}} = 53$ кгм <sup>2</sup>
(приведенный к базовой частоте вращения)	$x_{qs} = 0,487$	$M_j^* = 1,5$	$\eta = 0,95$

*Базовые величины*

$$S_{\text{баз}} = S_n = 1\,645 \text{ кВА}$$

$$M_{\text{баз}} = \frac{S_{\text{баз}}}{\omega_{\text{баз}}} = \frac{1\,645\,000}{314} = 5238,8 \text{ Нм}$$

$$U_{\text{баз}} = \sqrt{2}U_{\phi_n} = 565,7 \text{ В}$$

$$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}}} = 0,26 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{баз}} = \sqrt{2}I_{\phi_n} = 1948,8 \text{ А}$$

$$L_{\text{баз}} = \frac{Z_{\text{баз}}}{\omega_{\text{баз}}} = \frac{0,29}{314} = 0,924 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{с}$$

$$\omega_{\text{баз}} = \omega_{s0} = 314 \text{ 1/с}$$

$$T_j = J_{\text{об.}} \frac{\omega_{\text{баз}}^3}{S_{\text{баз}}} = 53 \cdot \frac{314^3}{1\,645 \cdot 10^3} = 997,5 \text{ рад}$$

Так как все индуктивные сопротивления (в о. е.) равны  $x^* = x[\text{Ом}]/Z_{\text{баз}}$ , то и соответствующие им индуктивности (в о. е.) равны  $L^* = L/L_{\text{баз}} = L\omega_{\text{баз}}/Z_{\text{баз}} = x[\text{Ом}]/Z_{\text{баз}}$ . Таким образом, индуктивные сопротивления равны соответствующим значениям индуктивностей:  $x^* = L^*$ .

Уравнения решались на базе программы для решения дифференциальных уравнений Matchad; использовался следующий алгоритм решения:

$$D(\tau, Y) = \begin{bmatrix} [A_{12}(\cos(Y_6) - \sin(Y_6)) - [A_{11}(\cos(Y_6) + \sin(Y_6))]] - Y_2 Y_5 - 0,02(4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3), \\ [A_{12}(\cos(Y_6) + \sin(Y_6)) + [A_{11}(\cos(Y_6) - \sin(Y_6))]] + Y_1 Y_5 - 0,02(5,22Y_2 - 3,906Y_4), \\ -0,077Y_3 + 0,0703(4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3) - 0,1155, \\ -0,137Y_4 + 0,052(5,22Y_2 - 3,906Y_4), \\ 0,001(m_{\text{нд}}) - 0,001[Y_1(5,22Y_2 - 3,906Y_4) - Y_2(4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3)], \\ Y_5, \end{bmatrix} Y_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = 0,707k_{us}(0,9\sin(k_{fs}\tau) - 0,035\sin(8k_{fs}\tau) + 0,15\sin(10k_{fs}\tau) - 0,125\sin(11k_{fs}\tau) + 0,125\sin(13k_{fs}\tau) - 0,15\sin(14k_{fs}\tau) + 0,035\sin(16k_{fs}\tau)),$$

$$A_{12} = U_3 k_{us}(0,9\cos(k_{fs}\tau) - 0,035\cos(8k_{fs}\tau) + 0,15\cos(10k_{fs}\tau) - 0,125\cos(11k_{fs}\tau) + 0,125\cos(13k_{fs}\tau) - 0,15\cos(14k_{fs}\tau) + 0,035\cos(16k_{fs}\tau)),$$

$$Y_1 = \psi_{ds}; Y_2 = \psi_{qs}; Y_3 = \psi_{dr}; Y_4 = \psi_{qr}; Y_5 = \omega_r; Y_6 = \alpha.$$

Исследования проведены для режима  $m_{\text{нд}} = -0,8$  при  $k_{us} = k_{fs} = 1$ .

Как было указано выше, флюктограммы, представленные на рис. 3 и 4, отражают номинальный режим работы синхронной машины с постоянными магнитами при номинальных значениях амплитуды и частоты подводимого к статорной обмотке напряжения.

Структура уравнений позволяет исследовать и другие режимы частотного управления, подставляя в эти уравнения другие значения  $k_{us} = k_{fs}$  (меньше единицы). Кроме того, данная структура позволяет также воспроизводить любой состав гармонических составляющих инвертора напряжения преобразователя частоты (рис. 1). Указанные исследования необходимы, во-первых, для выявления влияния гармонических составляющих на режимные параметры синхронного генератора и, во-вторых, что особенно важно, для правильного расчета параметров фильтра Ф (рис. 1).

### Заключение

Разработана методика моделирования, позволяющая учесть влияние высших гармонических составляющих напряжения на режимные параметры частотно-управляемой синхронной машины с постоянными магнитами (причем она предоставляет возможность учесть влияние каждой из гармоник на эти параметры).

Данная методика применяется также для расчета и настройки параметров фильтра (при необходимости его применения).

### Библиографический список

1. Wind Energy : Market Survey. Osnabrück : BWE-Service GmbH, 2006. 286 p.
2. Sikorski A., Korzeniewski M. AC/DC/AC converter in a small hydroelectric power plant // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences. 2011. V. 59, N 4. URL: [http://bulletin.pan.pl/\(59-4\)507.pdf/](http://bulletin.pan.pl/(59-4)507.pdf/).
3. Сандлер А. С., Гусяцкий Ю. М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями. М. : Энергия, 1968. 98 с.
4. Мустафаев Р. И., Гасанова Л. Г. Моделирование и исследование режимов работы синхронных генераторов ветроэлектрических установок при частотном управлении // Электричество. 2010. № 7. С. 34–40.
5. Мустафаев Р. И., Гасанова Л. Г. Универсальная структура математической модели управляемых электрических машин переменного тока // Электричество. 2015. № 2. С. 40–48.

### References

1. Wind Energy : Market Survey. Osnabrück : BWE-Service GmbH, 2006. 286 p.
2. Sikorski A., Korzeniewski M. AC/DC/AC converter in a small hydroelectric power plant // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences. 2011. V. 59, N 4. URL: [http://bulletin.pan.pl/\(59-4\)507.pdf/](http://bulletin.pan.pl/(59-4)507.pdf/).
3. Sandler A. S., Gusyatskiy Yu. M. Tiristornye inventory s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey dlya upravleniya asinhronnymi dvigatelyami [Thyristor invertors with pulse-width modulation for asynchronous motors control]. M. : Energiya, 1968. 98 p.

4. Mustafaev R. I., Gasanova L. G. Modelirovanie i issledovanie rezhimov raboty sinhronnyh generatorov vetroelektricheskikh ustanovok pri chastotnom upravlenii [Modeling and research of operating modes of synchronous generators of wind power plants under frequency control] // Elektrichestvo. 2010. N 7. P. 34–40.

5. Mustafaev R. I., Gasanova L. G. Universalnaya struktura matematicheskoy modeli upravlyaemykh elektricheskikh mashin peremennogo toka [The universal structure of a mathematical model of controlled AC electrical machines] // Elektrichestvo. 2015. N 2. P. 40–48.

#### **Сведения об авторах**

**Гасанова Ляман Гасан гызы** – пр. Зардаби, 94, г. Баку, Азербайджан, Az 1012; Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, канд. техн. наук, доцент; e-mail: gasanovalg@mail.ru

**Hasanova L. H.** – 94, Zardabi Pr., Baku, Azerbaijan, Az 1012; Azerbaijan Scientific-Research & Designed-Prospecting Institute of Energetics, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: gasanovalg@mail.ru

**Мустафаев Рауф Исмайл оглу** – пр. Зардаби, 94, г. Баку, Азербайджан, Az 1012; Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; e-mail: mustafayevri@mail.ru

**Mustafayev R. I.** – 94, Zardabi Pr., Baku, Azerbaijan, Az 1012; Azerbaijan Scientific-Research & Designed-Prospecting Institute of Energetics, Dr of Tech. Sci., Professor, Chief Researcher; e-mail: mustafayevri@mail.ru



L. H. Hasanova, R. I. Mustafayev

## **A research technique for the effect of higher harmonic voltages on the operating parameters of a permanent magnet synchronous generator**

Nowadays permanent magnet synchronous machines those frequency-controlled from stator side with frequency inverters made on the basis of power transistors or fully controlled thyristors, are widely used as motors and generators. In future they are also promising a good application in transport, including marine. Modern frequency inverters are equipped with a control system based on sine-shaped pulse width modulation. While shaping the voltage in the output of the inverter, in addition to the fundamental harmonic, higher harmonic components are also included in the voltage shape, which certainly affect the operating parameters of the generator (electromagnetic torque, power, currents). To determine this effect the modeling and investigation technique of higher harmonic voltages in the "electric network – frequency converter – synchronous machine with permanent magnets" system has been developed. The proposed equations of a frequency-controlled permanent magnet synchronous machine allow relatively simply reproduce the harmonic composition of the voltage in the output of a frequency inverter equipped with the control system based on a sinusoidal pulse width modulation. The developed research technique can be used for inverters with any number and composition of voltage harmonic components feeding a stator winding of a permanent magnet synchronous machine. On a particular case, the efficiency of the research technique of the higher harmonics influence on the operating parameters of the generator has been demonstrated. At the same time, the study has been carried out taking into account the shape of the voltage curve feeding the windings of the synchronous machine containing in addition to the fundamental harmonic the 8, 10, 11, 13, 14 and 16-th harmonic components, and the rated active power of the synchronous machine has been equal to 1 500 kW.

**Key words:** synchronous machine with permanent magnets, frequency converters, higher harmonics, mathematical modeling, pulse width modulation.