

УДК 621.313.323

К.Г. Коноплев, д-р техн. наук, профессор

Севастопольский национальный технический университет

Ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ***Получены аналитические выражения фазных напряжений генераторов и коэффициентов несинусоидальности в зависимости от формы импульсов напряжений возбуждений и высших гармоник.*

В настоящее время в электроэнергетике все синхронные генераторы (СГ) и регуляторы всех типов используют принцип непрерывного регулирования. Однако теоретически уже давно доказано [1], что для СГ целесообразно применять системы импульсного регулирования, которые имеют много преимуществ и достоинств по сравнению с системами непрерывного регулирования:

- меньше вес и габариты за счет использования элементов полупроводниковой техники;
- более высокое быстродействие за счет использования электроники в управлении тиристоров и транзисторов;
- высокую эффективность, сравнимую с системами сильного регулирования;
- более простое конструктивное устройство по сравнению с равноценными системами сильного регулирования, что повышает надежность работы, уменьшает стоимость и способствует к массовому внедрению.

По нашему мнению импульсные способы регулирования СГ открывают новое направление развития электроэнергетики. Однако консерватизм в развитии новых способов регулирования СГ сильно препятствует развитию электроэнергетики в этом направлении, и поэтому у нас намечилось серьезное отставание от передовых западных стран. Так, например, в судовых электроэнергетических установках Франции, Японии и других стран давно и широко используется принцип импульсного регулирования СГ, а у нас только ведутся дискуссии на эту тему и не планируются практические разработки. Необходимо ликвидировать данное отставание и повернуться лицом к новому перспективному направлению электроэнергетики, т.е. импульсному регулированию СГ.

Цель статьи – исследовать качество вырабатываемой электроэнергии при различной форме импульсов регулирования.

В теории импульсного регулирования СГ важное место занимает проблема влияния различных форм импульсов на качество электроэнергии. Формы импульсов напряжения возбуждения СГ определяются схемами регуляторов, и они могут иметь самые различные формы: синусоидальные, треугольные, прямоугольные с $T = 2\tau$ (периодом, равным двум длительностям импульса, прямоугольные с $T \gg 2\tau$ и др.). Перечень всех форм импульсов приведен в [2]. В [2] также приведено разложение всех форм импульсов в гармонический ряд, которым можно воспользоваться при определении уравнений напряжений возбуждений импульсов с различной частотой импульсов.

В зависимости от форм импульсов гармонический ряд имеет следующий вид.

При синусоидальной форме импульсов получаем $U_f(at) = U_{fm} + U_{fm} \cos at$, где U_{fm} – амплитуда импульсов напряжения возбуждения; α – циклическая частота этих импульсов.

При треугольной форме импульсов (рисунок 1) можно записать:

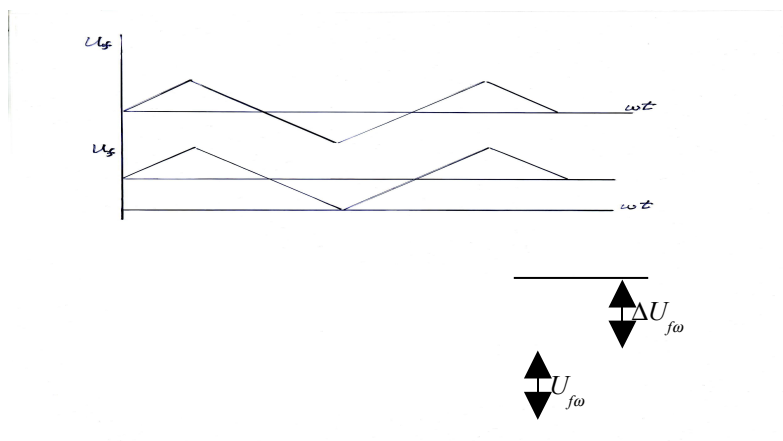


Рисунок 1 – Изменение напряжения возбуждения при треугольных импульсах

$$U_f(at) = U_{fm} + \frac{8U_{fm}}{\pi^2} \left(\sin at - \frac{1}{9} \sin 3at + \frac{1}{25} \sin 5at + \dots \right).$$

Для прямоугольных импульсов при $T = 2\tau$ (рисунок 2) имеет место:

$$U_f(at) = U_{fm} + \frac{4U_{fm}}{\pi} \left(\sin at + \frac{1}{3} \sin 3at + \frac{1}{5} \sin 5at + \dots \right).$$

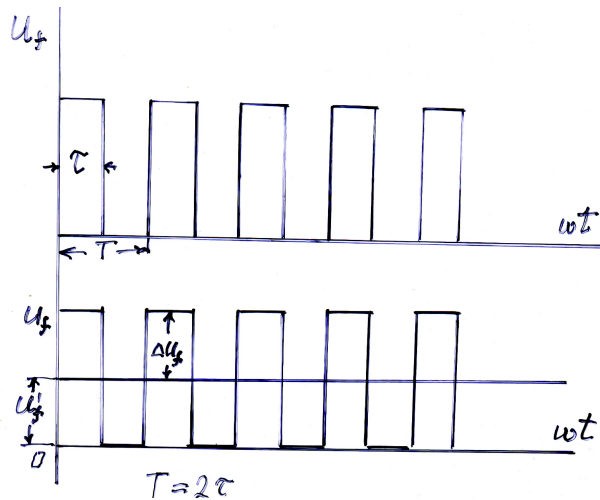


Рисунок 2 – Изменение напряжения возбуждения при $T = 2\tau$

При прямоугольных импульсах $T \gg 2\tau$ (рисунок 3) получаем:

$$U_f(at) = U_{fm} \rho + \frac{4U_{fm}}{\pi} (\sin \rho \pi \cos at + \frac{1}{3} \sin 3\rho \pi \cos 3at + \frac{1}{5} \sin 5\rho \pi \cos 5at + \dots). \quad (1)$$

Здесь $\rho = \frac{\tau}{T}$; U_{fm} – постоянная составляющая и амплитуда гармонической составляющей напряжения возбуждения; τ – время импульса; T – период.

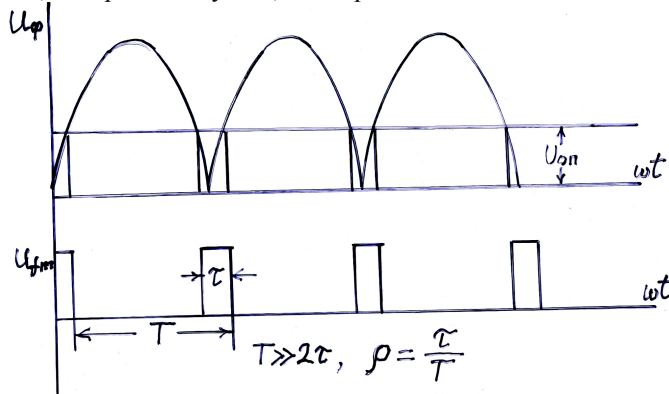


Рисунок 3 – Изменение напряжения возбуждения при $T \gg \tau$

Приведенные выражения напряжений возбуждений можно подставить в уравнения цепи возбуждения системы Горева-Парка и получить в начале фазное напряжение генератора от каждой гармоники, а затем и полное суммарное фазное напряжение СГ. Для определения фазного напряжения от каждой гармоники следует воспользоваться определением фазного напряжения СГ при импульсном регулировании [3], который основан на двух методах:

- методе изображающего вектора (ИВ);
- методе определения напряжения СГ при различных способах регулирования [4].

В методе изображающего вектора (ИВ) есть два основных положения:

1) модуль ИВ равен амплитуде фазной величины, т.е.

$$U_m = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{2}U_n = 1,41; \quad U_n = 1,0.$$

Это положение позволяет определить U_f'' – условную величину напряжения возбуждения.

2) проекция ИВ на фазную ось определяет мгновенное значение фазного напряжения

$$u_\phi = U_d \cos \omega t - U_q \sin \omega t. \quad (2)$$

Таким образом, необходимо определить $U_{dk}(t)$ и $U_{qk}(t)$ от каждой гармоники. При определении фазного напряжения от каждой гармоники необходимо учитывать, что каждая гармоника имеет свои

параметры: частоту, напряжение и сопротивление, пропорциональное частоте гармоники. Поэтому величина тока любой гармоники определяется системой уравнений, которая имеет следующий вид:

$$U_f(p) = [p\Psi_f(p) - p\Psi_f(0) + X_{fj}i_f(p)](k\alpha);$$

$$\Psi_d(p) = [X_{df}i_f(p) - X_{di}i_d(p)](k\alpha); \quad \Psi_f(p) = [X_{fj}i_f(p) - X_{fd}i_d(p)](k\alpha). \quad (3)$$

Здесь k – порядок гармоники; α – частота импульсов напряжения возбуждения.

Обозначение всех параметров приведено в [3,5,6]. Решение этой системы уравнений приведено в [4,5] и в зависимости от начальных условий может иметь, например, в режиме холостого хода, следующий вид:

$$i_{dok}(p) = \frac{\frac{1}{k}U_{f01}(x_q + x_n)(ka)}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)](ka)^2} \cdot \frac{(p + \frac{1}{T_{d0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}. \quad (4)$$

Тогда составляющие $U_{dok}(p)$ и $U_{qok}(p)$ равны [5]:

$$U_{dok}(p) = \frac{[r_n(x_q + x_n) - x_n(r + r_n)]U_{fok}(ka)^2}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)](ka)^2} \cdot \frac{(p + \frac{1}{T_{d0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}; \quad (5)$$

$$U_{qok}(p) = \frac{[r_n(r + r_n) + x_n(x_q + x_n)]U_{fok}}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)]} \cdot \frac{(p + \frac{1}{T_{d0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}. \quad (6)$$

Следует отметить, что как в первой (основной) гармонике, так и в любой другой высшей гармонике существуют три составляющие напряжения возбуждения, которые создают соответствующие продольные и поперечные составляющие напряжения генератора, т.е. методика, опубликованная в [3,5,6], является общей и для определения фазного напряжения от любой гармоники. Эти три составляющие являются следующими: постоянные составляющие напряжения возбуждения от системы холостого хода в каждой гармонике U_{fok} ; постоянные составляющие напряжения возбуждения от системы регулирования U_{fk} ; гармонические составляющие напряжения возбуждения от системы регулирования ΔU_{fk} .

Выше были приведены составляющие $U_{dok}(p)$ и $U_{qok}(p)$ от системы холостого хода. Аналогичные решения получаются от постоянных и гармонических составляющих от системы регулирования, но с другими начальными условиями. Таким образом, каждая гармоника определяется своими системами уравнений. Однако, несмотря на большие различия каждой гармоники, операторные уравнения для продольных и поперечных составляющих напряжений генераторов имеют одинаковую форму записи, потому что условные постоянные и гармонические составляющие напряжений возбуждений имеют постоянные и одинаковые выражения для любой гармоники.

Действительно, при прямоугольных импульсах с $T = 2\tau$ условные постоянные и гармонические напряжения возбуждения для каждой гармоники соответственно равны от системы регулирования

$$U''_{f1} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = const; \quad U''_{f3} = \frac{U_{f3}}{U_{f03}T_{d0}} = \frac{0,33U_{f1}}{0,33U_{f01}T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}};$$

$$U''_{fk} = \frac{U_{fk}}{U_{fok}T_{d0}} = \frac{\frac{1}{k}U_{f1}}{\frac{1}{k}U_{f01}T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}}; \quad (7)$$

или амплитуды условных гармонических составляющих напряжений возбуждений

$$\Delta U'_{f1} = \frac{1,27\Delta U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = const; \quad \Delta U'_{fk} = \frac{1,27\Delta U_{fk}}{U_{fok}T_{d0}} = \frac{1,27\frac{1}{k}\Delta U_{f1}}{\frac{1}{k}U_{f01}T_{d0}}. \quad (8)$$

При прямоугольных импульсах с $T \gg 2\tau$ получаем

$$U''_{f1} = \frac{U_{f1}^p}{U_{f01}^p T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = const;$$

$$U_{f_3}'' = \frac{U_{f_3} \rho}{U_{fo_3} T_{d_0}} = \frac{0,33 U_{f_1} \rho}{0,33 U_{fo_3} T_{d_0}} = \frac{U_{f_1}}{U_{fo_1} T_{d_0}}; \quad (9)$$

или амплитуда условной гармонической составляющей

$$\Delta U_{f_1}' = \frac{1,27 \Delta U_{f_1} \rho}{\rho U_{fo_1} T_{d_0}} = \frac{1,27 \Delta U_{f_1}}{U_{fo_1} T_{d_0}} = const; \quad \rho = \frac{\tau}{T}; \quad (10)$$

$$\Delta U_{f_3}' = \frac{1,27 \Delta U_{f_3} \rho}{\rho U_{fo_3} T_{d_0}} = \frac{1,27 \cdot 0,33 \Delta U_{f_1} \rho}{0,33 U_{fo_1} T_{d_0}} = \frac{1,27 \Delta U_H}{U_{fo_1} T_{d_0}}.$$

В результате операторные выражения для любой гармоники имеют одинаковую форму записи и одинаковые оригиналы

$$E(p) = \left[\frac{(p + \alpha)}{p + b} + \frac{U_{f_1}}{p + b} \pm \frac{1,27 \Delta U_{f_1} p^2}{(p + b)[p^2 + (k\alpha)^2]} \right], \quad (11)$$

где $\alpha = \frac{1}{T_{d_0}}$; $b = \frac{1}{T_d'}$; знак «+» для гармоник 1, 5, 9 и т.д.; знак «-» для гармоник 3, 7, 11 и т.д.

Здесь первое слагаемое учитывает влияние постоянной составляющей напряжения возбуждения от системы холостого хода; второе слагаемое учитывает влияние постоянной составляющей от системы регулирования; третье слагаемое учитывает влияние гармонической составляющей системы регулирования. Оригиналы $E(t)$ приведены в [3, 5].

Тогда продольные и поперечные составляющие напряжения генератора от каждой гармоники согласно [3, 5] равны:

$$U_{dk}(p) = (A_k + C_k p)E(p); \quad (12)$$

$$U_{qk}(p) = (B_k + D_k p)E(p), \quad (13)$$

$$\text{Здесь} \quad A_k = \frac{[r_H(x_q + x_H) - x_H(r + r_H)]U_{fo_k}}{[(r + r_H)^2 + (x_d' + x_H)(x_q + x_H)]}; \quad B_k = \frac{[r_H(r + r_H) + x_H(x_q + x_H)]U_{fo_k}}{[(r + r_H)^2 + (x_d' + x_H)(x_q + x_H)]};$$

$$D_k = \frac{[(r + r_H)(x_q + x_H)]U_{fo_k}}{[(r + r_H)^2 + (x_d' + x_H)(x_q + x_H)]}; \quad C_k = \frac{[(x_d' + x_H)(x_q + x_H)]U_{fo_k}}{[(r + r_H)^2 + (x_d' + x_H)(x_q + x_H)]}.$$

Обозначения параметров приведены в [3, 5, 6]. Фазное напряжение каждой гармоники соответственно равно

$$u_{\phi k} = U_{dk} \cos \omega t - U_{qk} \sin \omega t, \quad (14)$$

где $\omega = 2\pi f_1$; $f_1 = 50$ Гц – частота сети.

Суммарное фазное напряжение генератора равно сумме всех фазных напряжений от каждой гармоники, т.е.

$$u_{\phi \Sigma} = u_{\phi_1} + u_{\phi_3} + u_{\phi_5} + u_{\phi_7} + \dots + u_{\phi_k} \dots \quad (15)$$

При суммировании фазных напряжений следует учитывать следующее: во-первых, фазные напряжения гармоник и коэффициенты A_k , B_k , C_k , D_k , прямо пропорциональны своим напряжениям, U_{fo_k} . Во-вторых, суммарное постоянное напряжение возбуждения от всех гармоник согласно определения не должно превышать средней постоянной величины напряжения возбуждения согласно формул [1] при разложении в гармонический ряд.

В результате для каждой формы импульса суммарное фазное напряжение СГ определяется следующими выражениями:

$$u_{\phi} = \left[\left(\frac{T_d'}{T_{d_0}} + U_{f_1}'' T_d' \right) A_1 - W_i C_1 \Delta U_{f_1}' \sin(\alpha t) \right] \cos \omega t - \left[\left(\frac{T_d'}{T_{d_0}} + U_{f_1}'' T_d' \right) B_1 - W_i D_1 \Delta U_{f_1}' \sin(\alpha t) \right] \sin \omega t. \quad (16)$$

При прямоугольных импульсах и $T = 2\tau$ получаем

$$u_{\phi \Sigma} = \left[\left(\frac{T_d'}{T_{d_0}} + U_{f_1}'' T_d' \right) A_1 - 0,927 W_i C_1 \Delta U_{f_1}' \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\alpha) t \right] \cos \omega t -$$

$$- \left[\left(\frac{T'd}{T_{d0}} + U'' f_1 T'd \right) B_1 - 0,927 \cdot W_i D_1 \Delta U' f_1 \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\alpha) t \right] \sin \omega t. \quad (17)$$

$$U''_{f1} = \frac{1,41 - \frac{T'd}{T_{d0}} B}{T'd B}.$$

При прямоугольных импульсах и $T \gg 2\tau$ имеем

$$u_{\phi_\Sigma} = \left[\left(\frac{T'd}{T_{d0}} + U'' f_1 T'd \right) A_1 - 0,927 \cdot W_i C_1 \Delta U' f_1 \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\pi) \sin(k\alpha) t \right] \cos \omega t -$$

$$- \left[\left(\frac{T'd}{T_{d0}} + U'' f_1 T'd \right) B_1 - 0,927 \cdot W_i D_1 \Delta U' f_1 \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\pi) \sin(k\alpha) t \right] \sin \omega t; \quad (18)$$

$$U''_{f1} = \Delta U'_{f1}; \quad U''_{f1} = \frac{1,41 - \frac{T'd}{T_{d0}} B_1 \rho}{T'd B \rho}.$$

Таким образом, предложенный новый метод определения фазного напряжения позволил для каждой формы импульсов получить аналитические выражения для определения формы фазного напряжения СГ, выявить возникновение высших гармоник и их влияние на форму фазного напряжения и определить коэффициенты несинусоидальности при любой форме импульса, т.е. определить качество электроэнергии при импульсном регулировании СГ. Следовательно, в целом [3, 5, 6] предложенный новый метод позволил создать основы теории импульсного регулирования СГ.

Для СГ типа МСК-500 с его параметрами кривые фазного напряжения генератора и коэффициенты несинусоидальности в зависимости от формы импульсов имеют следующие виды и значения. При синусоидальной форме импульсов согласно [3, 5, 6] $f_2 = 300$ Гц, $U''_{f1} = 1,27 \frac{1}{c}$. При этом можно записать:

$$u_{\phi} = [0,68 - 0,03 \sin(1884t)] \cos(314t) - [1,4 - 0,0092 \sin(1884t)] \sin(314t);$$

$K_{HC} = 1,41\%$, при независимом возбуждении СГ без демпферных обмоток (рисунок 4).

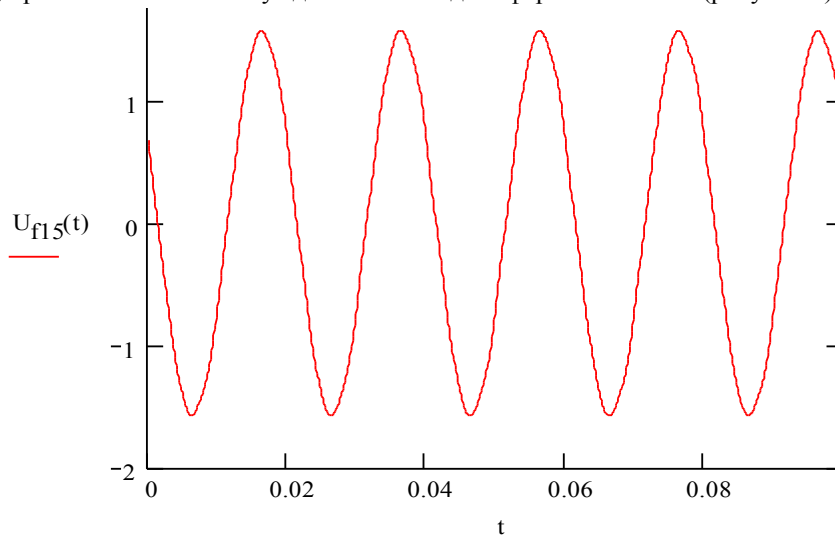


Рисунок 4 – Фазные напряжения генератора при синусоидальной форме импульса

При прямоугольных импульсах при $T = 2\tau$ получаем: $U''_{f1} = 1,29 \frac{1}{c}$; $f_2 = 300$ Гц, $f_1 = 50$ Гц.

$$u_{\phi_\Sigma} = \{0,68 - 0,03[-\sin(1884t) + \sin(5652t) - \sin(9420t)]\} \cos(314t) -$$

$$- \{1,4 - 0,0085[-\sin(1884t) + \sin(5652t) - \sin(9420t) + \sin(3184t)]\} \sin(314t);$$

$$K_{HC} = 3,4\% \text{ (рисунок 5).}$$

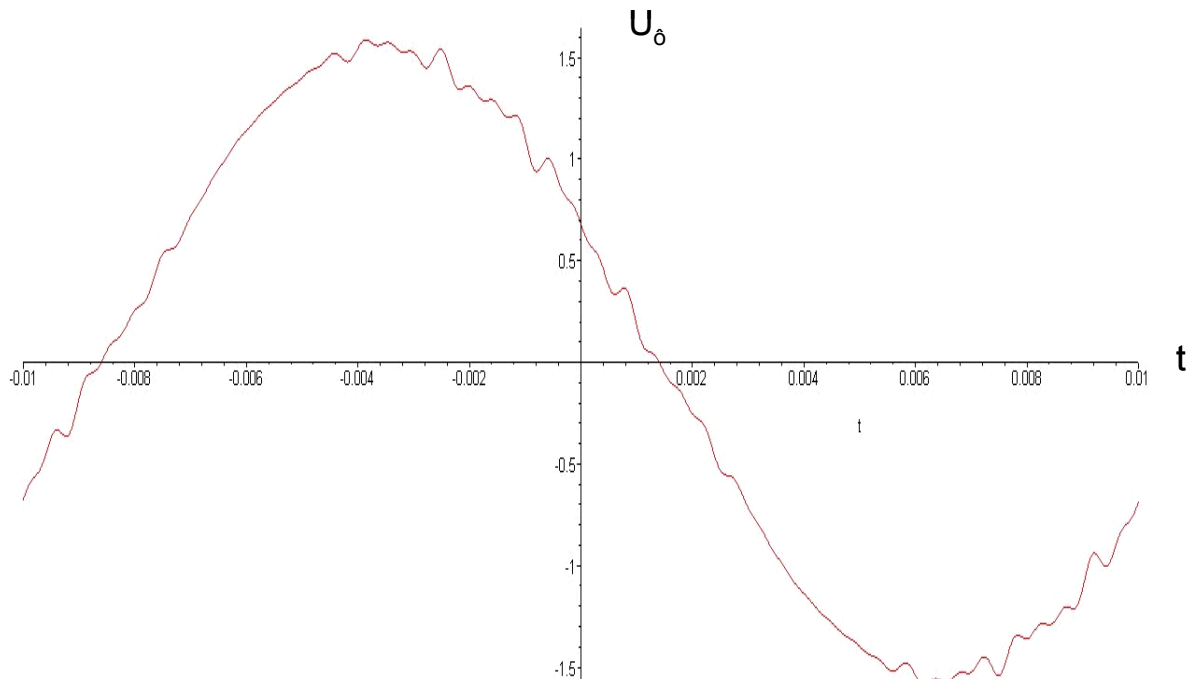


Рисунок 5 – Фазные напряжения генератора при прямоугольных импульсах при $T=2\tau$, $f_2 = 300$ Гц, $U''_f = 1,29$ 1/с

При прямоугольных импульсах при $T \gg 2\tau$ имеем:

$$\rho = 0,166; \quad U''_f = 9,6 \text{ 1/с}; \quad f_2 = 100 \text{ Гц}, \quad f_1 = 50 \text{ Гц}; \quad T = 0,01 \text{ с}.$$

$$u_{\phi\Sigma} = \{0,68 - 0,223[-0,5\sin(628t) + \sin(1884t) - 0,5\sin(3140t) - 0,5\sin(4396t)]\} \cos(314t) - \{1,4 - 0,68[-0,5\sin(628t) + \sin(1884t) - 0,5\sin(3140t) - 0,5\sin(4396t)]\} \sin(314t),$$

$$K_{HC} = 30,5\% \text{ (рисунок 6)}.$$

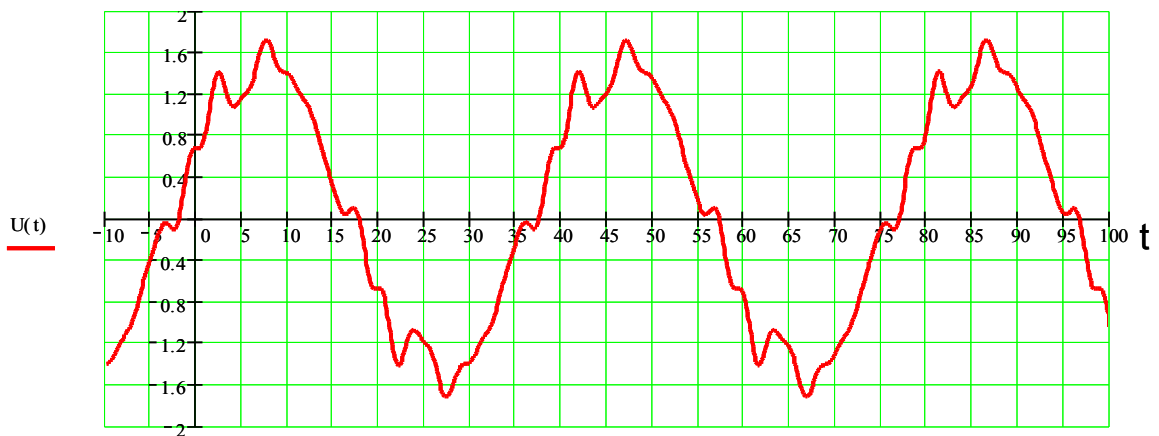


Рисунок 6 – Фазное напряжение при прямоугольных импульсах при $T \gg 2\tau$, $f_2 = 100$ Гц,

$$U''_f = 9,3 \text{ 1/с}, \quad W_i = 0,01, \quad K_{HC} = 30\%$$

Для выявления гармоник приведенные уравнения можно видоизменить с учетом того, что

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]; \quad \sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)].$$

Тогда полученные уравнения превращаются в следующие.

При синусоидальной форме импульса:

$$u_{\phi} = 0,68 \cos \omega t - 1,4 \sin \omega t - 0,015 \cos 5\omega t - 0,0046 \sin 5\omega t - 0,015 \cos 7\omega t - 0,0046 \sin 7\omega t.$$

При прямоугольных импульсах и $T = 2\tau$, $f_2 = 300$ Гц:

$$\begin{aligned}
u_{\phi\Sigma} = & 0,68 \cos \omega t - 1,4 \sin \omega t + 0,0165 \cos 5\omega t - 0,00425 \sin 5\omega t - \\
& - 0,0165 \cos 7\omega t - 0,00425 \sin 7\omega t - 0,0165 \cos 15\omega t - 0,00425 \sin 15\omega t - \\
& - 0,0165 \cos 17\omega t - 0,00425 \sin 17\omega t - 0,0165 \cos 29\omega t - 0,0042 \sin 29\omega t - \\
& - 0,0165 \cos 31\omega t - 0,00425 \sin 31\omega t - 0,0165 \cos 41\omega t - 0,0042 \sin 41\omega t - \\
& - 0,0165 \cos 43\omega t - 0,0042 \sin 43\omega t.
\end{aligned}$$

При прямоугольных импульсах и $T \gg 2\tau$, $f_2 = 100$ Гц:

$$\begin{aligned}
u_{\phi\Sigma} = & 0,68 \cos \omega t - 1,4 \sin \omega t + 0,0055 \sin \omega t - 0,017 \cos \omega t + \\
& + 0,0055 \sin 3\omega t + 0,017 \cos 3\omega t - 0,111 \sin 5\omega t + 0,034 \cos 5\omega t - \\
& - 0,111 \sin 7\omega t - 0,034 \cos 7\omega t + 0,055 \sin 9\omega t + 0,055 \cos 9\omega t - \\
& + - 0,055 \sin 11\omega t - 0,055 \cos 11\omega t + 0,055 \sin 13\omega t - 0,055 \cos 13\omega t + - \\
& + - 0,055 \sin 15\omega t + 0,055 \cos 15\omega t.
\end{aligned}$$

Коэффициент несинусоидальности равен

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{\sum U_v^2}}{U_1} 100,$$

где U_v – действующее значение напряжения v – гармоник; v – порядок гармоник.

После подстановки параметров гармоник получим значения коэффициентов несинусоидальности.

При синусоидальной форме импульсов получаем:

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{(0,015^2 + 0,0046^2)}}{1,1} 100 = 1,4\%.$$

При прямоугольных импульсах $T = 2\tau$ можно получить:

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{8(0,015^2 + 0,0425^2)/2}}{\sqrt{(1,4^2 + 0,68^2)/2}} 100 = 3,17\%.$$

При прямоугольных импульсах $T \gg 2\tau$ имеем:

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{2(0,111^2 + 0,034^2)/2 + (0,055^2 + 0,017^2)/2 + 8(0,055^2)/2}}{\sqrt{(0,563^2 + 1,345^2)/2}} 100 = 30\%.$$

Следует отметить, что значение коэффициента W_i с увеличением частоты импульсов и гармоник быстро уменьшается. Так, при частоте $f_2 = 50$ Гц $W_i = 0,01$, а при $f_2 = 1500$ Гц $W_i = 0,0002$. Поэтому коэффициенты при высоких гармониках будут фактически резко уменьшаться. Например, при постоянном коэффициенте W_i для всех гармоник $W_i = 0,01$, $K_{nc} = 30\%$, рисунок 6. При переменном коэффициенте W_i . Для гармоник 1, 3, 5, 7 $W_i = 0,01$, а для гармоник 9, 11, 13 и 15 $W_i = 0,001$, $K_{nc} = 15,5\%$, рисунок 7.

Основными причинами снижения качества электроэнергии при прямоугольных импульсах с $T \gg 2\tau$ является уменьшение количества импульсов за единицу времени по сравнению, например, с прямоугольными импульсами с $T = 2\tau$. В результате поступление количества электроэнергии возбуждения в СГ получается более равномерным, чем при импульсах, когда $T \gg 2\tau$. При этом амплитуда импульса напряжения значительно возрастает с $U_{f_1}'' = 1,29 \frac{1}{C}$ до $U_{f_1}'' = 9,6 \frac{1}{C}$, т.е. в 7,44 раза при $T \gg 2\tau$.

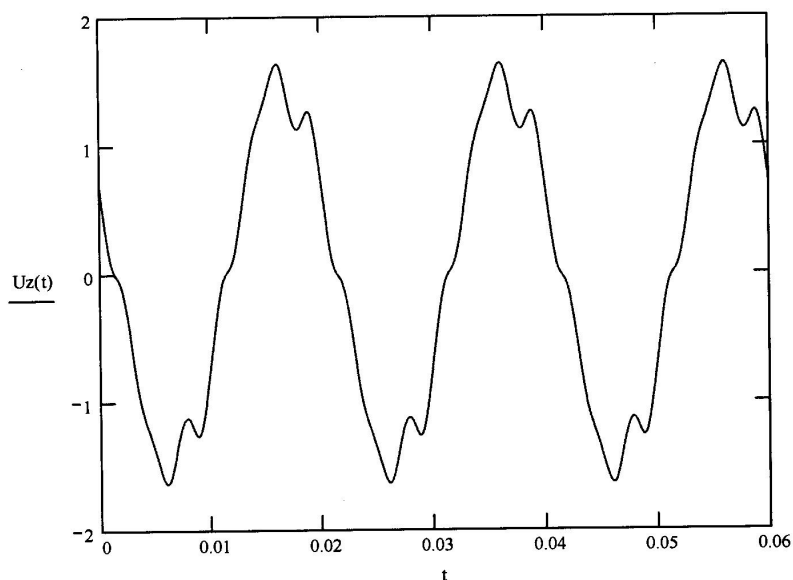


Рисунок 7 – Фазное напряжение при прямоугольных импульсах при $T \gg 2\tau$, $f = 100$ Гц, $U_f'' = 9,3$ 1/с, $K_{nc} = 15,5\%$, для гармоник 1, 3, 5, 7 $W_i = 0,01$, для 9, 11, 13, 15 $W_i = 0,001$

Выводы

1. Приведенные расчетные примеры показывают, как формы импульсов напряжения возбуждения СГ влияют на качество электроэнергии, и что необходимо учитывать при разработке импульсных регуляторов СГ.

2. Основной причиной снижения качества электроэнергии при использовании прямоугольных импульсов с $T \gg 2\tau$ является увеличение промежутка времени при отсутствии импульса напряжения возбуждения, что ведет к неравномерному поступлению энергии возбуждения в СГ и увеличению условного напряжения возбуждений U_{f1}'' с $U_{f1}'' = 1,29$ 1/с до $U_{f1}'' = 9,61$ 1/с, т.е. в 7,4 раза по сравнению с прямоугольными импульсами при $T = 2\tau$.

3. Методика определения фазного напряжения генератора от любой гармоники является точно такой же, как и методика определения фазного напряжения от основной гармоники, которая подробно изложена в [3, 5, 6]. Поэтому последняя является общей для определения фазного напряжения от любой гармоники и при любой форме импульса, но с учетом своих особенностей.

Задачей дальнейших исследований может быть рассмотрение влияния импульсов различной формы на качество электроэнергии численными методами.

Библиографический список

1. Петров Ю.П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин / Ю.П. Петров. — М: Электричество, 1964. — № 10. — С. 45–48.
2. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. — М.: Энергия, 1975. — 571 с.
3. Коноплев К.Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронных генераторов с системой самовозбуждения в автономных электрических сетях / К.Г. Коноплев. — К.: Промэлектро, 2005. — № 5. — С. 48–56.
4. Коноплев К.Г. Определение синхронного генератора с различными системами регулирования при включении нагрузки / К.Г. Коноплев // Изв. АН РФ. Сер. Энергетика. — 1999. — № 6. — С. 93–109.
5. Коноплев К.Г. Повышение качества электроэнергии в автономных электрических системах при импульсном регулировании / К.Г. Коноплев. — Севастополь: Изд-во СВМИ им. П.С. Нахимова, 2006. — 200 с.
6. Коноплев К.Г. Определение высших гармоник, возникающих при импульсном регулировании синхронных генераторов / К.Г. Коноплев. — К.: Промэлектро, 2007. — № 3. — С. 16–19.

Поступила в редакцию 21.01.2008 г.