

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСКАЖЕНИЯ ФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ С ПОМОЩЬЮ СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Канов Л.Н., к.т.н.

Севастопольский национальный технический университет  
Украина, 99053, Севастополь, Стрелецкая бухта, СевНТУ,  
кафедра "Судовые и промышленные электромеханические системы",  
тел. (0692) 235-160

*Запропоновано методику розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності фазної напруги синхронного генератора з імпульсним збудженням на підставі схемного моделювання. Приведено приклад аналізу спотворення фазної напруги при збудженні генератора прямокутними імпульсами. Показано можливість застосування вейвлетного аналізу для дослідження форми фазної напруги.*

*Предложена методика расчета коэффициента несинусоидальности фазного напряжения синхронного генератора с импульсным возбуждением на основании схемного моделирования. Приведен пример анализа искажения фазного напряжения при возбуждении генератора прямоугольными импульсами. Показана возможность применения вейвлетного анализа для исследования формы фазного напряжения.*

### ВВЕДЕНИЕ

Важным показателем качества электроэнергии является степень искажения фазного напряжения. Эти искажения приводят к появлению высших гармоник напряжения, которые увеличивают моменты сопротивлений двигателей, разрушительно действуют на изоляцию, приводят к дополнительным потерям энергии. Увеличение искажения напряжения в современных условиях обусловлено применением полупроводниковых преобразователей, как в цепях нагрузки, так и для возбуждения синхронных генераторов. Особенно актуально это в автономных электроэнергетических системах, когда мощности генератора и статических и динамических нагрузок соизмеримы [1, 2]. Остановимся далее на оценке искажения выходного напряжения синхронного генератора при импульсной форме напряжения на обмотке возбуждения.

Несинусоидальное напряжение характеризуется коэффициентом несинусоидальности

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1}, \quad (1)$$

где  $U_1, U_i$  – действующие значения основной и высших гармоник напряжения. Основные аспекты расчета  $k_U$  разработаны в трудах Коноплева К.Г. [2, 3], где определены условия прохождения определенных гармоник напряжения от обмотки возбуждения до нагрузки генератора. Отметим, что при импульсном напряжении, когда на обмотке возбуждения существует множество гармоник напряжения, для надежного определения коэффициента несинусоидальности требуются значительные усилия. Кроме того, здесь затруднительно учесть форму кривой намагничивания магнитной цепи генератора и требуется иметь разложение напряжения возбуждения в ряд.

Альтернативным способом приближенного определения  $k_U$  является применение имитационного моделирования, например, в среде MatLab [4], где

исследование гармонического состава напряжения выполняется с помощью измерительного блока Fourier, а для визуального исследования спектрального состава напряжения применяется спектрограмма Фурье. Точность определения  $k_U$  здесь по-прежнему зависит от количества и точности расчета гармоник фазного напряжения, и, кроме того, от точности самой имитационной модели генератора и нагрузки.

Вышеперечисленные затруднения можно преодолеть с применением схемного моделирования [5, 6]. Статья посвящена расчету коэффициента несинусоидальности фазного напряжения автономного синхронного генератора с импульсным возбуждением с помощью методики схемного моделирования.

### МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом рассеяния и насыщения магнитной цепи уравнения автономного синхронного генератора при индуктивной нагрузке имеют следующий вид в  $dq$  – координатах с опережающим вращением поперечной оси

$$\left. \begin{aligned} u_d + r_i i_d + x_{\sigma d} \frac{di_d}{dt} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} - x_q i_q &= 0; \\ u_q + r_i i_q + x_q \frac{di_q}{dt} + \psi_{\delta d} + x_{\sigma d} i_d &= 0; \\ u_f &= r_f i_f + x_{\sigma f} \frac{di_f}{dt} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}; \\ 0 &= r_{kd} i_{kd} + x_{\sigma kd} \frac{di_{kd}}{dt} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}; \\ u_d &= r_H i_d + x_H \frac{di_d}{dt} - x_H i_q = 0; \\ u_q &= r_H i_q + x_H \frac{di_q}{dt} + x_H i_d = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где обозначены  $u_d, i_d, u_q, i_q$  – продольные и поперечные составляющие напряжения и тока генератора;

$i_f, i_{kd}$  – токи возбуждения и продольного демпфирующего контура;  $\psi_{\delta d}$  – продольная составляющая потокосцепления в зазоре;  $r, x_{\sigma d}, r_f, x_{\sigma f}, r_{kd}, x_{\sigma kd}$  – активные сопротивления и сопротивления рассеяния соответственно фазной обмотки, обмотки возбуждения и продольного демпфирующего контура;  $r_H, x_H$  – активное и реактивное сопротивление нагрузки;  $u_f$  – напряжение возбуждения.

Потокосцепление в зазоре по продольной оси для учета насыщения магнитной цепи аппроксимируется через продольные составляющие намагничивающего тока  $i_{\delta d} = i_d + i_f + i_{kd}$ :

$$\psi_{\delta d} = a \cdot \arctg bi_{\delta d} + ci_{\delta d},$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты аппроксимации.

При постоянном напряжении возбуждения  $U_f$  уравнения (2), (3) позволяют определить стационарные, постоянные значения составляющих токов и напряжений генератора:  $I_d, I_q, I_f, I_{kd}, U_d, U_q$ , причем  $I_{kd} = 0$ . Представим выражение потокосцепления (3) в виде ряда относительно стационарного значения намагничивающего тока  $I_{kd}$ :

$$\psi_{\delta d} = \psi_{0\delta d} + K_1 i_{\delta d} - K_2 i_{\delta d}^2 + \dots \quad (4)$$

и ограничимся двумя записанными слагаемыми. В выражении (4) обозначены:

$$\psi_{0\delta d} = a \cdot \arctg bI_{\delta d} + cI_{\delta d}; \quad K_1 = \frac{ab}{1 + (bI_{\delta d})^2} + c;$$

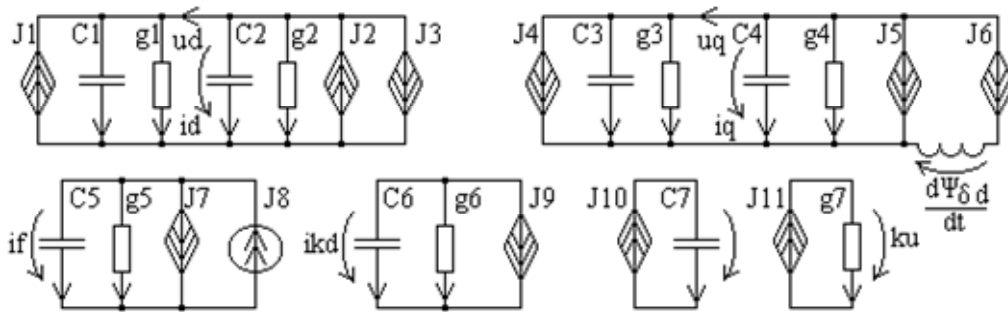


Рис. 1. Схемная модель генератора под индуктивной нагрузкой

Непосредственное решение уравнений для отклонений вида (2) невозможно, поэтому применим методику схемного моделирования [5]. Параллельная схемная модель генератора под индуктивной нагрузкой, соответствующая уравнениям (2), изображена на рис. 1, на котором обозначены линейные проводимости:  $g1 = g3 = r_H, g2 = g4 = r, g5 = r_f, g6 = r_{kd}, g7 = 1$ ; емкости:  $C1 = C3 = x_H, C2 = x_{\sigma d}, C4 = x_q, C5 = x_{\sigma f}, C6 = x_{\sigma kd}, C7 = 1$ ; линейные управляемые источники тока:  $J1 = x_H i_q, J2 = x_q i_d, J3 = J7 = J9 = 1 \cdot \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}, J4 = x_H i_d, J5 = x_{\sigma d} i_d$ ; нелинейные управляемые источники тока:  $J6 = \psi_{\delta d}$  – отклонение потокосцепления по (5),  $J10 = u_d^2 + u_q^2$ ,

$$K_2 = \frac{ab^3 I_{\delta d}}{(1 + (bI_{\delta d})^2)^2}; \quad I_{\delta d} = I_d + I_f; \quad \text{переменные}$$

$i_{\delta d}, i_d, i_f, i_{kd}, u_d, u_q$  здесь и далее будут означать отклонения токов и напряжений от постоянных значений  $I_d, I_q, I_f, I_{kd}, U_d, U_q$ . Тогда уравнения для отклонений будут иметь вид, совпадающий с (2), в котором в соответствии с (4)

$$\psi_{\delta d} = K_1 i_{\delta d} - K_2 i_{\delta d}^2 \quad (5)$$

есть отклонение продольной составляющей потокосцепления.

Так как значениям  $U_d, U_q$ , определяющим стационарный, постоянный режим, соответствует неискажённая синусоидальная форма напряжения, отклонения  $u_d, u_q$  обуславливают искажения этого напряжения. Тогда для оценки коэффициента несинусоидальности выражению (1) можно придать вид

$$k_U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_d^2 + u_q^2) dt}$$

при  $U_1 = 1$ . Таким образом, коэффициент несинусоидальности фазного напряжения будем оценивать не по совокупности гармоник, а непосредственно по отклонению его формы от синусоиды. Это избавляет от необходимости иметь разложение в ряд гармоник напряжения возбуждения и от расчета по отдельным многим гармоникам фазного напряжения.

$$J11 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_d^2 + u_q^2) dt} = k_U; \quad \text{независимый источник}$$

тока  $J8 = u_f$ . Напряжения на емкостях  $C1, C3, C5, C6$  численно равны отклонениям токов  $i_d, i_q, i_f, i_{kd}$ ; токи в проводниках, соединяющих  $g1, C2$  и  $g3, C4$  – отклонения составляющих напряжений  $u_d, u_q$ ;  $J10, C7$  представляют интегрирующий, а  $J11, g7$  – выходной контуры схемной модели. Просчет схемной модели на периоде промышленной частоты при заданной форме отклонения напряжения на обмотке возбуждения от постоянного  $U_f$  определяет форму отклонений всех переменных, а напряжение на вы-

ходной, единичной проводимости  $g_7$  в момент  $t = T$  дает значение коэффициента несинусоидальности.

При просчете схемной модели по рис. 1 значения напряжений на емкостях и соответствующие значения тока в индуктивности в начале и в конце периода следования импульсов возбуждения должны совпадать, а средние значения графиков отклонений переменных должны быть нулевыми. Это достигается соответствующим выбором среднего значения напряжения возбуждения  $U_f$  и времени просчета, достаточного для затухания переходных процессов.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для иллюстрации рассмотрим стационарный режим автономного синхронного генератора под индуктивной нагрузкой при напряжении на обмотке возбуждения в виде последовательности прямоугольных импульсов, рис. 2, рассчитанный по полной схемной модели генератора [6].

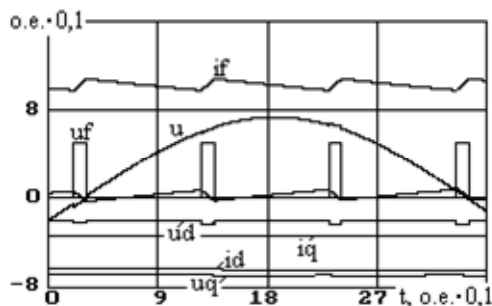


Рис. 2. Стационарный режим генератора с импульсным возбуждением

Генератор мощностью 150 кВт имеет следующие параметры (в относительных единицах):  $x_d = 1,25$ ;  $x_{ad} = 1,2$ ;  $x_q = 0,7$ ;  $x_f = 1,638$ ;  $r_f = 0,085$ ;  $x_{kd} = 1,227$ ;  $r_{kd} = 0,04$ ; коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания:  $a = 0,72$ ;  $b = 4$ ;  $c = 0,065$ ; параметры индуктивной нагрузки:  $x_H = r_H = 0,7$ . Импульсы возбуждения амплитудой 0,5 следуют с частотой 300 Гц и скважностью 10. На рис. 2 видны искажения продольной составляющей и заметны искажения фазного напряжения, в поперечной составляющей искажения выражены слабо. На рис. 3 изображены рассчитанные по схемной модели, рис. 1, графики отклонений составляющих напряжения и токов от стационарного режима, который существовал бы при постоянном напряжении возбуждения, равном среднему уровню импульсного напряжения на рис. 2. Для наглядности отклонения  $u_d, u_q$  показаны увеличенными в 5 раз. Из рис. 3 следует, что отклонение продольной составляющей равно 0,025 о.е., а поперечной – 0,008 о.е. Практически все искажение фазного напряжения генератора обусловлено искажением продольной составляющей,  $k_U$  здесь равен 0,0104. Мгновенное значение намагничивающего тока  $i_{\delta d}$  равно нулю, что говорит о постоянном потокоцеплении в зазоре.

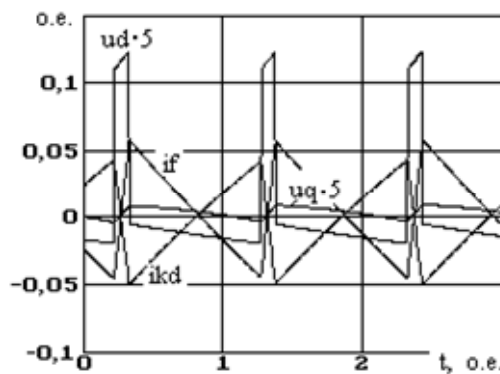


Рис. 3. Отклонения составляющих фазного напряжения

Предлагаемый подход позволяет исследовать влияние различных параметров генератора и напряжения возбуждения на степень искажения фазного напряжения. Так, например, подобное исследование при изменении частоты импульсов возбуждения показывает, что при частоте 150 Гц  $k_U$  увеличивается до 0,0171. Увеличение сопротивления обмотки возбуждения также ведет к возрастанию искажений.

Из рис. 2 следует также, что, располагая только графиком фазного напряжения, полученным непосредственным просчетом схемной модели генератора или осциллограммой, затруднительно не только подсчитать  $k_U$ , но и выявить наличие искажений.

С этой точки зрения перспективным для исследования искажений фазного напряжения может быть применение вейвлетного анализа [7]. Основным свойством вейвлетного преобразования является способность выявлять локальные особенности исследуемого сигнала: если функция локально гладкая, соответствующие коэффициенты вейвлетного преобразования малы, а при наличии особенности функции в некоторые моменты времени амплитуды коэффициентов возрастают.

На рис. 4 изображен вейвлетный спектр фазного напряжения генератора в рассматриваемом режиме, построенный с использованием комплексного Паульвейвлета [8]:

$$\Psi_{t_0, s}(t) = \frac{(2j)^m}{\sqrt{\pi s(2 \cdot m!)}} \left( 1 - j \left( \frac{t - t_0}{s} \right) \right)^{-(m+1)} ; m = 4, \quad (6)$$

где параметр  $s$  определяет амплитуду и ширину вейвлета, а  $t_0$  – сдвиг вдоль оси времени. По оси абсцисс отложено время, соответствующее периоду промышленной частоты  $T = 6,28$ , а по оси ординат – параметр  $s$  в логарифмическом масштабе. Значения модулей вейвлетных коэффициентов, подсчитанные при каждом значении  $t_0$  и  $s$ , показаны интенсивностью цвета. Для Паульвейвлета (6) величина периода  $T$  связана с параметром  $s$  соотношением  $T \approx 1,4s$ , поэтому максимальные значения вейвлетных коэффициентов наблюдаются при  $s = 4,49$  или в логарифмическом масштабе 0,652. Высокочастотные особенности отражаются в области малых значений  $s$ .

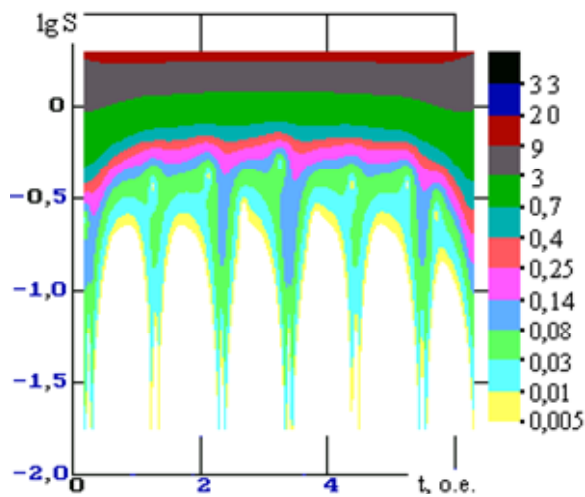


Рис. 4. Вейвлетный спектр фазного напряжения

Наличие множества высших гармоник, т.е. наибольшее локальное искажение напряжения наблюдается в моменты времени, соответствующие импульсам напряжения возбуждения. Отклонение полос спектра с обеих сторон рисунка объясняется влиянием краевых условий. Применение вейвлетного анализа позволяет выявлять импульсные возмущения напряжения, составляющие 0,05...0,1 % от номинального напряжения.

#### ВЫВОДЫ

Существующие способы расчета коэффициента несинусоидальности фазного напряжения автономных синхронных генераторов при импульсном возбуждении, основанные на исследовании гармонического состава напряжения, являются приближенными, не учитывают нелинейность магнитной цепи генератора и требуют значительного объема вычислений.

Применение схемного моделирования позволяет получить точные значения коэффициента несинусоидальности на основании непосредственного анализа отклонения формы фазного напряжения от синусоиды и учесть как рассеяние, так и нелинейность магнитной цепи.

Параметры генератора и характер напряжения возбуждения существенно влияют на степень искажения фазного напряжения. Так рост сопротивления обмотки возбуждения, или сопротивления нагрузки или уменьшение частоты импульсов напряжения возбуждения приводит к увеличению коэффициента несинусоидальности.

Перспективным средством анализа искажений фазного напряжения генератора является вейвлетный анализ, позволяющий выявить отклонения от синусоиды 0,05...0,1 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жежеленко И.В. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.С. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 262 с.
- [2] Коноплев К.Г. Повышение качества электроэнергии в автономных электрических системах при импульсном регулировании. – Севастополь: Изд-во СВМИ им. П.С. Нахимова, 2006. – 208 с.
- [3] Коноплев К.С. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронных генераторов в автономных электрических системах // Технічна електродінаміка. – 2006. – №1. – С. 32-36.
- [4] Алтунин Б.Ю. Исследование гармонического состава напряжения трансформаторного тиристорного регулятора напряжения с импульсным управлением / Б.Ю. Алтунин, А.А. Крамин // Известия Академии инженерных наук им. А.И.Прохорова. – 2005. – №15. – С. 61-64.
- [5] Канов Л.Н. Параметрический синтез механических характеристик асинхронного двигателя на основе метода схемного моделирования // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №2. – С. 26-29.
- [6] Канов Л.Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока // Електротехніка та електроенергетика. – 2004. – №1. – С. 5-9.
- [7] Съянов А.М. Исследование сигналов вейвлет-преобразованием / А.М.Съянов, М.В.Кулик. – Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: Материалы науч.-техн. конф., Севастополь, 24-28 сентября 2007 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 141-143.
- [8] Короновский А.А. Непрерывный вейвлетный анализ в приложениях к задачам нелинейной динамики / А.А.Короновский, А.Е.Храмов. – Саратов: Изд-во Гос. УНЦ "Колледж", 2002. – 216 с.

Поступила 25.12.2007