

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Получена математическая модель бесщеточного синхронного генератора (БСГ) с параметрической стабилизацией напряжения (ПСН), приведены результаты моделирования с параметрами реальной установки. Получено описание фазной кривой напряжения БСГ с ПСН.

Оптимизация параметров энергосистемы судна с целью повышения качества электроэнергии – одна из актуальных задач современной электромеханики, а эффективным способом ее решения является создание и исследование генераторов с улучшенными энергетическими показателями.

В [1,2] показана возможность оптимизации судовых энергосистем путем замены генераторов с аналоговым возбуждением на импульсные системы возбуждения.

К системам импульсного возбуждения синхронных генераторов относится, в том числе система, созданная на кафедре СПЭМС СевНТУ и работающая по принципу параметрической стабилизации напряжения [3]. Регулирование по способу ПСН заключается в следующем: выпрямляется трехфазное напряжение СГ, измеряются временные интервалы Δt каждого такта пульсаций мгновенного выпрямленного напряжения генератора, которые сравниваются с заданным опорным напряжением, и по результатам сравнения формируются импульсы напряжения, подаваемые на обмотку возбуждения, а их величина определяется режимом работы СГ. Перед измерением временных интервалов мгновенные пульсации выпрямленного напряжения генератора сглаживаются. Именно этим способ ПСН отличается от регулирования возбуждения по пульсациям [2]; измерение временных интервалов производится точнее, и повышается точность регулирования [2].

Для исследования судового синхронного генератора с параметрической стабилизацией напряжения необходимо получить его математическое описание. Рассмотрим режим одиночной работы судового БСГ с ПСН на статическую нагрузку без дополнительных систем регулирования (рисунок 1).

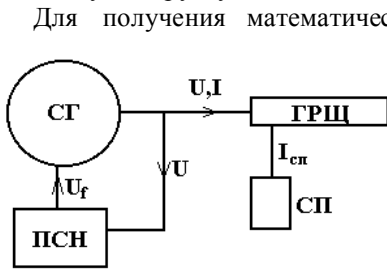


Рисунок 1 – Схема исследуемой системы

Для получения математической модели бесщеточного синхронного генератора с параметрическим стабилизатором напряжения примем, что БСГ работает на статическую нагрузку, изменением частоты вращения СГ пренебрегаем. Статический потребитель исследуемой системы учитывается уравнениями 11 и 12 (см. систему 1). С учетом принятых ограничений запишем исходные уравнения СГ с демпферными контурами в принятой форме Парка-Горева, и обозначив: p – оператор дифференцирования; $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_{\Delta d}, \Psi_{\Delta q}, \Psi_f$ – потокосцепления обмотки статора и демпферных контуров по осям d и q , и обмотки возбуждения; $T_f, T_{\Delta d}, T_{\Delta q}$ – постоянные времени обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров; i_d, i_q – токи обмотки статора по осям d и q ; $i_{\Delta d}, i_{\Delta q}$ – токи статического потребителя по осям d и q ; $i_{\Delta d}, i_{\Delta q}$ – токи продольного и поперечного демпферных контуров; $R, x_d, x_q, \mu_d, \mu_q, \mu'_d, \mu'_q$ – общепринятые обозначения параметров СГ.

$$\begin{aligned}
 p\Psi_d &= \omega \cdot U_d + R \cdot \omega \cdot i_d - \omega \cdot v \cdot \Psi_q; \\
 p\Psi_q &= -\omega \cdot U_q - R \cdot \omega \cdot i_q + \omega \cdot v \cdot \Psi_d; \\
 p\Psi_f &= \frac{1}{T_f} U_f - \frac{1}{T_f} i_f; \\
 p\Psi_{\Delta d} &= -\frac{1}{T_{\Delta d}} i_{\Delta d}; \\
 p\Psi_{\Delta q} &= -\frac{1}{T_{\Delta q}} i_{\Delta q}; \\
 i_f &= \Psi_d + x_d \cdot i_d - i_{\Delta d}; \\
 i_d &= \frac{1}{x_d \cdot \mu_d} (i_f - \Psi_f + q i_{\Delta d}); \\
 i_q &= \frac{1}{x_q} (\Psi_q + i_{\Delta q}); \\
 i_{\Delta q} &= -\mu_q x_q i_q + \Psi_{\Delta q}; \\
 i_{\Delta d} &= \Psi_{\Delta d} - q i_f + \mu'_d x_d \Psi_d;
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$U_d = R_n \cdot i_{dc} - x_n \cdot i_{qc} + p i_{dc} \cdot \frac{x_n}{\omega};$$

$$U_q = R_n \cdot i_{qc} + x_n \cdot i_{dc} + p i_{qc} \cdot \frac{x_n}{\omega}.$$

К уравнениям (1) необходимо добавить уравнения связи системы СГ – СП, т.е.

$$i_d = i_{dc};$$

$$i_q = i_{qc},$$

и уравнения регулирования напряжения СГ параметрическим стабилизатором напряжения.

Для определения напряжения возбуждения примем, что пульсации выпрямленного трехфазного напряжения

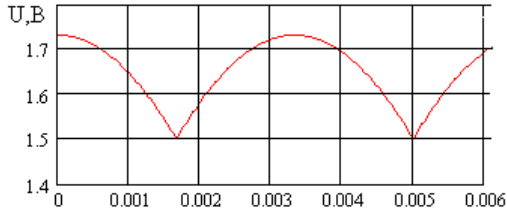


Рисунок 2 – Пульсации на выходе выпрямителя уставки

БСГ (рисунок 2) получены по схеме моста Ларионова, и поэтому в одном периоде основной частоты СГ содержится шесть пульсаций. Время каждой пульсации выпрямленного трехфазного напряжения БСГ, и следовательно период подачи импульсов на обмотку возбуждения (ОВ) составляют 3,33 мс. Опорное напряжение блока сравнения определяется параметрами ПСН и является управляемым с помощью сопротивления

В [2] приведено математическое описание способа регулирования по пульсациям в виде

$$U_n = \sqrt{3} \cdot U \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} + \omega t\right) \Big|_{120^\circ}^{60^\circ}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} U_f &= 0, \text{ if } U_n > U_{оп} \\ U_f &= k_\phi U_{fn}, \text{ if } U_n \leq U_{оп} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где U_n – напряжение на выходе выпрямителя; U – амплитуда напряжения генератора, В; $m = 6$ – количество тактов выпрямителя; $\omega = 314$ – круговая частота напряжения, рад/с; U_f – напряжение на обмотке возбуждения СГ, $U_{оп}$ – заданное опорное напряжение, k_ϕ – коэффициент форсировки возбуждения U_{fn} – номинальное напряжение возбуждения

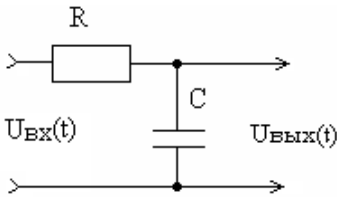


Рисунок 3 – Интегрирующая цепь

Для получения сглаженного сигнала установлена интегрирующая цепь (рисунок 3), параметры которой в установке подобраны таким образом, чтобы полученная на выходе синусоида не имела искажений. Передаточная функция такой цепи [4] равна

$$K(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{j\omega RC} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{\tau_0 j\omega} \cdot \frac{1}{1 + \tau_0 j\omega}, \quad (4)$$

где τ_0 – постоянная времени интегрирующей цепи ($\tau_0 = RC$).

Модуль передаточной функции (4) определяется как

$$|K(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что при увеличении R или C модуль передаточной функции (коэффициент передачи) уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды пульсаций.

При регулировании по способу ПСН сигнал, описываемый выражением (2), интегрируется

Для получения результата интегрирования необходимо применить спектральный метод и преобразование Фурье

$$U_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где $S(j\omega)$ – комплексный спектр сигнала.

Для получения математической модели БСГ с ПСН в окончательном виде произведем необходимые несложные алгебраические преобразования системы (1). С помощью исходных статорных уравнений и алгебраических зависимостей между величинами СГ получим выражения для составляющих напряжения СГ по осям d и q , и запишем систему дифференциальных уравнений в матричном виде. Напряжение на обмотке возбуждения СГ U_f во времени определяется в цикле сравнением напряжений пульсаций с опорным напряжением ПСН по (3): если напряжение пульсаций выше опорного напряжения, то на обмотке возбуждения напряжение равно нулю, и если напряжение пульсаций ниже опорного напряжения, то на обмотку возбуждения подключено напряжение импульса амплитудой ($k_\phi U_n$).

В машинном виде (в пакете MathCad) математическая модель БСГ с ПСН использована в программе расчета переходного процесса наброса номинальной нагрузки на генератор типа ПНТ-45 мощностью 2,5 кВт с режима холостого хода.

На рисунке 4 изображен график расчета переходного процесса при включении стопроцентной активной нагрузки на БСГ с ПСН (для параметров экспериментальной установки $U = 230$ В, $R = 2200$ Ом, $C = 1 \cdot 10^{-5}$ Ф). На

графике показаны основные сигналы генератора: опорное напряжение, напряжение пульсаций, модуль вектора напряжения, импульсы, подаваемые на обмотку возбуждения БСГ, ток нагрузки и ток возбуждения фазное напряжение генератора

В экспериментальной установке для согласования с входным уровнем компаратора сглаженные пульсации подаются через повторитель напряжения (усилитель с коэффициентом передачи 1 и высоким входным и низким выходным сопротивлениями) и на резистивный делитель напряжения. Поэтому амплитуда сигнала пульсаций, полученная в экспериментальной установке, отличается от расчетной на коэффициент передачи делителя. Частотные характеристики экспериментальной и расчетной кривых совпадают.

Таким образом, выражения (1), (3) и (6) являются математическим описанием генератора с системой регулирования по принципу параметрической стабилизации напряжения.

Выводы. Из графиков на рисунке 4 видно, что мгновенный максимальный провал напряжения при включении стопроцентной активной нагрузки составляет 19 % и время переходного процесса 0,0143 с. При такой скорости восстановления напряжения провал напряжения не окажет влияния на потребителей. Статическая ошибка δ – составляет (0,3... 0,5) %.

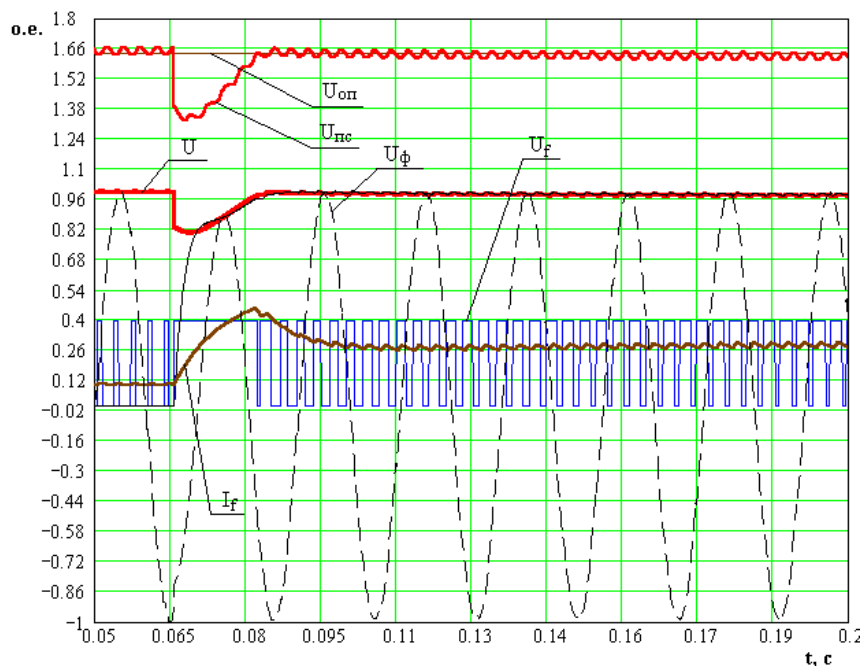


Рисунок 4 – Напряжения и токи СГ с ПСН при включении нагрузки и в установившемся режиме

Анализ результатов математического моделирования показал: величина сглаживающей емкости не влияет на время переходного процесса, но оказывает существенное влияние на величину статической ошибки (при уменьшении емкости статическая ошибка увеличивается). Однако дальнейшее увеличение емкости приводит к снижению чувствительности компаратора, вследствие чего управляющий узел блока ПСН включает постоянное напряжение на обмотку возбуждения. Аналогичные результаты были получены и при стендовых испытаниях реальной установки.

Перспективы дальнейших исследований. В дальнейшем предполагается выполнить спектральный анализ кривой напряжения СГ для определения коэффициента несинусоидальности, т.е. влияния ПСН на форму фазного напряжения генератора.

Библиографический список

1. Конопльов К.Г. Про якість електроенергії в корабельній електроенергетиці / К.Г. Конопльов // Морська держава. — 2004. — № 3. — С. 60–63.
2. Алаев В.В. Распределение реактивной мощности в судовой электроэнергетической системе при импульсном регулировании возбуждения синхронных генераторов. Дисс. ... канд. техн. наук 05.09.03. — Защ. 24.01.04; Утв. 12.05.04; 12-08/5. — Севастополь, 2004. — 168 с.: ил. — Библиогр.: С. 153–158.
3. Пат. 64442А України, МПК⁷ H03L5/00. Спосіб параметричної стабілізації напруги синхронного генератора / О.М. Олейніков, О.М. Шощкий (Україна). — № 2003065055; Заяв. 02.06.2003; Опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов / И.С. Гоноровский — М.: Сов. радио, 1971. — 340 с.

Поступила в редакцию 13.02.2006 г.