

УДК 621.313.323

Н.Н. Чепендюк*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: natach@front.ru***ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРСИРОВКИ НА ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСЛЕ ВКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

Показано, что увеличение коэффициента форсировки напряжения возбуждения приводит к уменьшению времени восстановления выходного напряжения синхронного генератора после включения нагрузки при импульсном возбуждении по способу параметрической стабилизации.

В настоящее время на судах, в основном, устанавливаются бесщеточные синхронные генераторы (СГ), и все большее распространение получают системы импульсного регулирования напряжения СГ, имеющие существенные преимущества перед аналоговыми [1, 2]. До середины 70-х годов считалось, что импульсное регулирование сильно искажает форму кривой напряжения генератора. Однако опыт эксплуатации таких генераторов показывает, что они надежнее, а напряжение, вырабатываемое такими генераторами, имеет качество, не ниже, чем это требуется по Регистру. Цель статьи – высветить достоинства нового способа импульсного регулирования, позволяющего повысить качество напряжения синхронных генераторов.

В [1] был предложен способ импульсного регулирования возбуждения синхронных генераторов, названный авторами «регулированием по пульсациям». Способ заключается в следующем: трехфазное напряжение СГ снимается трансформатором, выпрямляется трехфазной мостовой схемой, пульсации выпрямленного напряжения U_n сравниваются с заданным опорным напряжением $U_{оп}$, измеряются временные интервалы, когда напряжение пульсаций ниже опорного, и в результате формируются импульсы напряжения U_f , подаваемые на обмотку возбуждения. Величина этих импульсов и их длительность определяется режимом работы СГ.

При импульсном управлении по пульсациям выпрямленного напряжения регулирование напряжения производится путем изменения продолжительности импульса при неизменном коэффициенте форсировки. Ширина импульса определяется зоной ниже опорного напряжения при пересечении импульсов напряжения U_n с опорным напряжением $U_{оп}$. При увеличении нагрузки (при $k_f = \text{const}$) для поддержания напряжения генератора ширина импульса должна быть увеличена и точка минимального напряжения C смещается в точку C_1 . Следовательно, изменение напряжения генератора ΔU пропорционально изменению ширины импульса Δt (рисунок 1).

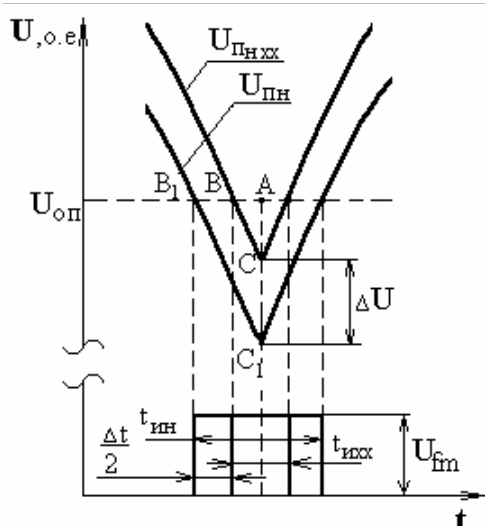


Рисунок 1 – Зависимость приращения ширины импульса напряжения возбуждения от изменения напряжения генератора: ΔU – изменение напряжения; $t_{ин}$ – продолжительность импульса при работе под нагрузкой; $t_{исх}$ – продолжительность импульса при холостом ходе; Δt – приращение ширины импульса

Схема управления подачи импульсов напряжения U_f в обмотку возбуждения настроена таким образом, что при снижении напряжения U СГ ток возбуждения i_f возрастает, а при увеличении U – уменьшается. При этом для любой нагрузки находится определенная точка пересечения напряжения U внешней характеристики СГ и тока возбуждения i_f регулировочной характеристики, которая является рабочей точкой генератора. Статическое отклонение напряжения СГ от номинального значения всегда является односторонним (только в сторону уменьшения) и определяется параметрами схемы стабилизации тока возбуждения: количеством тактов выпрямления напряжения СГ m и максимальным значением напряжения возбуждения U_{fm} . В статических режимах при незначительном изменении напряжения СГ длительность импульсов t_w , подаваемых на обмотку возбуждения, изменяется в зависимости от величины и характера нагрузки, что обеспечивает стабилизацию напряжения U_f с небольшой статической ошибкой. Особенность этого способа регулирования заключается в том, что напряжение генератора является интегральным показателем для оценки состояния системы.

Для дальнейшего пояснения необходимо ввести понятие *коэффициента форсировки*. Это отношение величины (например, напряжения возбуждения) при импульсном регулировании к величине (напряжения возбуждения) при аналоговом регулировании. Таким образом, коэффициент форсировки по напряжению можно записать следующим образом:

$$k_{\phi U} = \frac{U_{fн}}{U_{н}},$$

где $U_{fн}$ – максимальное значение напряжения возбуждения при импульсном регулировании; $U_{н}$ – номинальное значение напряжения возбуждения при непрерывном регулировании.

Этот коэффициент определяется параметрами системы регулирования и настраивается при холостом ходе генератора таким образом, чтоб на выходе генератора была номинальная ЭДС. При этом он ограничивается перегрузочной способностью обмотки возбуждения генератора и не должен превышать $k_{\phi max} = 22$ [1], так как при дальнейшем увеличении теряется устойчивость работы генератора.

Зависимость приращения ширины импульса от изменения нагрузки описывается выражением

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta U}{\sqrt{3} U_m \omega \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{m} + \omega \cdot t\right)},$$

где U_m – амплитудное значение выходного напряжения генератора; ω – частота напряжения (для большинства судов $\omega = 50$ Гц); m – количества тактов выпрямителя (в исследуемой схеме трехфазный двухполупериодный выпрямитель, $m = 6$).

Известно, что точность поддержания напряжения на выходе СГ при любом способе регулирования зависит от степени наклона внешней характеристики генератора, т.е. ее статизма:

$$\delta = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100 \%,$$

где U – установившееся напряжение; U_n – номинальное напряжение генератора.

При импульсном регулировании точность регулирования напряжения зависит также от коэффициента форсировки по мощности $k_{\phi P}$.

Это объясняется тем, что при увеличении коэффициента форсировки ширина импульса на холостом ходу СГ $t_{ИХХ}$ уменьшается:

$$t_{ИХХ} = \frac{T_{II}}{k_{\phi P}},$$

где $T_{II} = 3,33$ мс – период следования импульсов при $m = 6$.

Согласно рисунку 1, ширина импульса при работе генератора на нагрузку будет определяться по формуле

$$t_{II} = t_{ИХХ} + \Delta t = \frac{T_{II}}{k_{\phi}} + \frac{2\Delta U}{\sqrt{3} U_m \omega \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{m} + \omega \cdot t\right)} = \frac{T_{II} \cdot \sqrt{3} U_m \omega \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{m} + \omega \cdot t\right) + 2\Delta U}{k_{\phi} \cdot \sqrt{3} U_m \omega \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{m} + \omega \cdot t\right)}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что чем больше значение k_{ϕ} , тем меньше ширина импульса, который подает регулятор на обмотку возбуждения, т.е. регулятор работает в более нижней части пульсаций. В то же время, чем меньше приращение ширины импульса Δt , тем меньше статизм регулирования:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} U_m \omega \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{m} + \omega \cdot t\right) \cdot \Delta t}{2}.$$

Как отмечалось, при импульсном регулировании напряжения БСГ по пульсациям выпрямленного напряжения сигналы управления, формирующие ширину импульса t_{II} напряжения U_f , определяются во времени пересечением заданного опорного напряжения и напряжения выпрямленных пульсаций. С одной стороны, увеличение ширины импульса t_{II} при снижении нагрузки генератора на единицу измерения определяет статизм δ , с другой – приращение ширины импульса Δt определяется наклоном наклона β касательной к кривой пульсаций в точке пересечения с опорным напряжением, и следовательно, пропорционально $\cos \beta$ (рисунок 2).

Максимальное приращение Δt будет в точках, близких к максимальному значению угла $\omega t = 90^\circ$ (рисунок 2, точка 3), когда $\cos(90^\circ - \omega t) = 1$. Чтобы получить максимальные приращения Δt в точках, близких к $\omega t = 60^\circ$, т.е. на нижнем пике пульсаций, необходимо сгладить форму нижнего пика, как показано на рисунке 2 в точке 4.

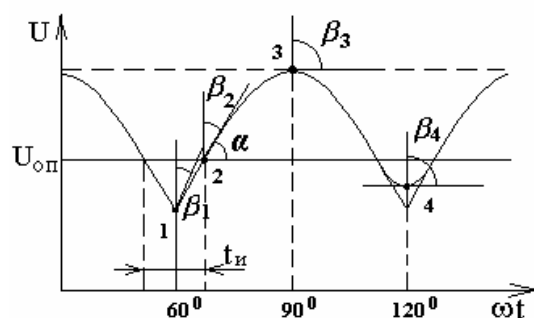


Рисунок 2 – К вопросу о сглаживании пульсаций (1... 4 – характерные точки кривой)

Таким образом, сглаживание пульсаций перед сравнением с опорным напряжением – один из способов снижения статической ошибки.

Способ регулирования, при котором пульсации перед сравнением с опорным напряжением сглаживаются, получил название параметрической стабилизации напряжения. На кафедре СПЭМС СевНТУ создан испытательный стенд, в котором регулирование напряжения СГ осуществляется по принципу параметрической стабилизации напряжения (ПСН) [3]. На рисунке 3 изображены результаты математического моделирования для систем с регулированием по пульсациям и при ПСН.

Один из параметров системы импульсного возбуждения генератора – коэффициент форсировки напряжения возбуждения k_f . В [4] рассмотрено влияние k_f на точность поддержания напряжения в статических режимах. Однако необходимо отметить, что величина коэффициента форсировки влияет также и на время восстановления напряжения после включения нагрузки. Так как время восстановления напряжения – один из показателей качества напряжения, нормируемых Морским Регистром, определение его величины является важной задачей.

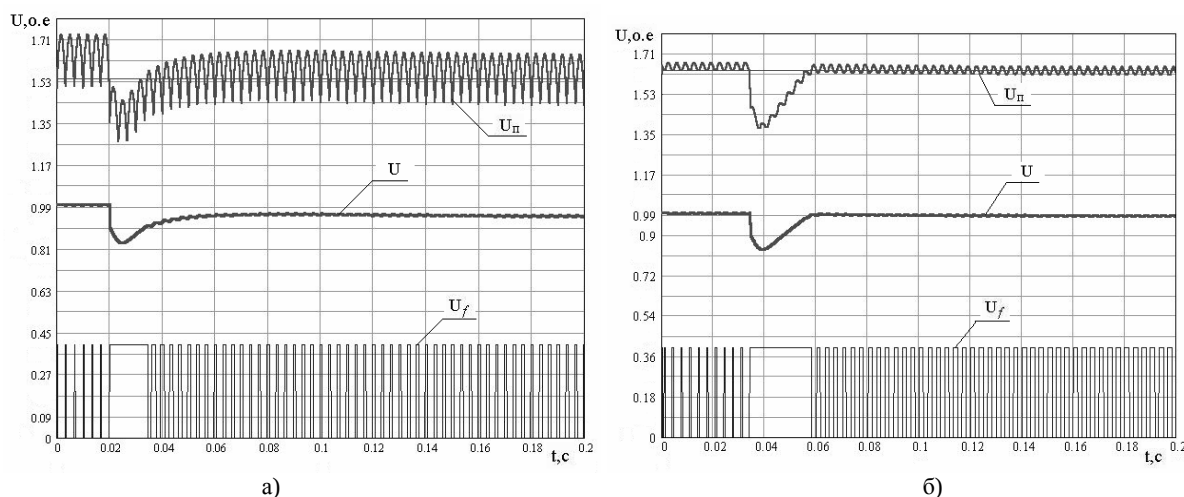


Рисунок 3 – Точность поддержания напряжения при разных способах импульсного регулирования: а) при регулировании по пульсациям ($\delta = 3,6\%$); б) при регулировании по способу ПСН ($\delta = 1,0\%$)

Изменение тока в обмотке возбуждения i_f при подаче на нее напряжения происходит по экспоненциальному закону (рисунок 4)

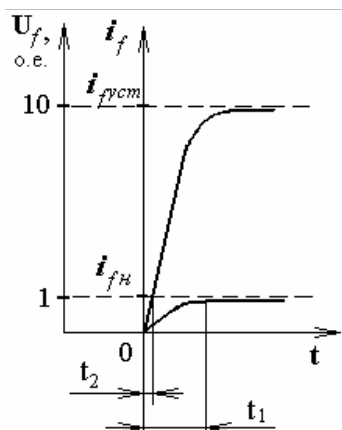


Рисунок 4 – Влияние коэффициента форсировки на скорость нарастания тока в обмотке возбуждения

$$i_f(t) = i_{fуст} - \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2)$$

где $i_{уст}$ – установившееся значение тока в конце переходного процесса; τ – постоянная времени обмотки возбуждения, равная

$$\tau = \frac{L_f}{r_f}.$$

Из выражения (2) получим зависимость времени восстановления тока возбуждения от параметров цепи возбуждения. При $U = U_{уст}$ ток возбуждения определяется соотношением

$$i_{fуст} = \frac{U_{уст}}{z_f},$$

где z_f – сопротивление цепи возбуждения. Переход от i_{fn} к $i_{fуст}$ подчиняется закону

$$\frac{i_{fn}}{i_{fycm}} = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

поэтому время переходного процесса t_{nn} можно представить в виде

$$t_{nn} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{i_{fn}}{i_{fycm}}\right)}{\tau}. \quad (3)$$

Из (3) и рисунка 4 видно, что при увеличении степени форсировки фронт импульса тока возбуждения становится более крутым, что приводит к снижению времени восстановления напряжения ($t_1 > t_2$).

Результаты математического моделирования (описание уравнений модели приведены в [3]) для генератора типа МСК-92-4 мощностью 100 кВт (напряжение 400 В) при параметрической стабилизации напряжения показаны на рисунке 5, где U – напряжение генератора, U_f – напряжение возбуждения генератора, I_f – ток в обмотке возбуждения, U_n – напряжение пульсаций. Из рисунка видно, что с увеличением коэффициента форсировки изменяется угол наклона кривой тока возбуждения при переходном процессе, и так как ток в обмотке возбуждения и напряжение на выходе генератора взаимосвязаны, то и время восстановления напряжения изменяется.

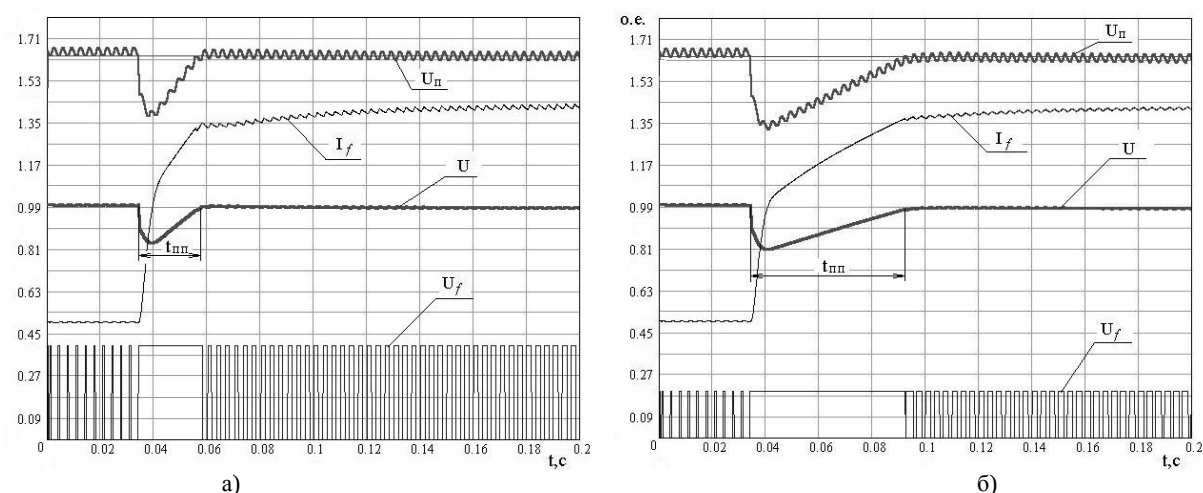


Рисунок 5 – Зависимость времени восстановления напряжения генератора от коэффициента форсировки:

а) при $k_\phi = 10$; б) при $k_\phi = 5$

Вывод. Применение систем импульсного регулирования возбуждения СГ по способу параметрической стабилизации напряжения позволяет повысить качество напряжения генератора. При этом повышение коэффициента форсировки напряжения возбуждения в пределах, допустимых перегрузочной способностью обмотки возбуждения, позволяет уменьшить время переходных процессов при включении нагрузки на генератор.

Так как данная работа выполняется по плану, предусмотренному госбюджетной темой «Магнит-2» (2008–2009 г., рег. № 0108U002337, СевНТУ), возникла необходимость исследования возможности применения синхронных генераторов с импульсным возбуждением для ветроэлектрических установок, а также влияния изменения скорости ветра на качество напряжения СГ.

Библиографический список

1. Алаев В.В. Распределение реактивной мощности в судовой электроэнергетической системе при импульсном регулировании возбуждения синхронных генераторов: дис.... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 23.01.04; утв. 12.05.04 / Алаев Виктор Васильевич. — Севастополь, 2004. — 168 с.
2. Коноплёв К.Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронного генератора с самовозбуждением в автономных электрических системах / К.Г. Коноплёв // Промышленная электроэнергетика и электротехника. — К., 2005. — № 5. — С. 24–28.
3. Чепендюк Н.Н. Математическая модель бесщеточного синхронного генератора с параметрической стабилизацией напряжения / Н.Н. Чепендюк // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 9. — С. 65–71.
4. Чепендюк Н.Н. Влияние параметров импульсного регулирования / Н.Н. Чепендюк // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 80. — С. 67–69.

Поступила в редакцию 26.01.2009 г.