

УДК 621.313.629.73

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

А. Г. КАПУСТИН, Н. С. КАРНАУХОВ

*Учреждение образования «Белорусская государственная
академия авиации», г. Минск*

Введение

Автономные системы электроснабжения переменного тока в настоящее время широко внедрены на воздушных судах [1], [2]. Как показал опыт эксплуатации данных систем электроснабжения, их динамические и статические свойства, определяемые в значительной степени типом применяемых регуляторов напряжения, не всегда в полной мере удовлетворяют постоянно растущим требованиям к качеству электроэнергии. Дальнейшее совершенствование систем регулирования напряжения, а следовательно, и качества электроэнергии, связано с применением в них цифровой техники, способной реализовать оптимальные законы регулирования [2]–[4].

Целью данной работы является определение возможностей регулятора напряжения, синтезированного методом АКОР, по повышению показателей качества электроэнергии перспективных авиационных систем электроснабжения.

В статье проведен аналитический синтез регулятора напряжения для синхронного генератора методом аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР) [5]–[7]; разработана нелинейная математическая модель синхронного генератора в среде MatLab и доказана ее адекватность реальному объекту; исследована эффективность синтезированного регулятора напряжения (аналогового и цифрового) при различных режимах работы генератора в сравнении с действующим авиационным ГОСТ Р 54073–2010.

Основная часть

Для описания электромагнитных процессов в бесконтактном синхронном генераторе уравнения генератора и нагрузки представлены в ортогональной системе координат d, q при общепринятых допущениях. В этом случае уравнения, описывающие электромагнитные процессы в бесконтактной синхронной машине, можно записать в следующем виде [8]–[10]:

$$U_d = -I_d r_c - I_q \omega L_q; \quad (1)$$

$$U_q = -I_q r_c - I_d \omega L_{sd} + E; \quad (2)$$

$$U_B = \frac{1}{k_f \omega} \frac{dE}{dt} + I_B r_B; \quad (3)$$

$$U_{BB} = \frac{U_B}{k_B} r_{BB} + \frac{L_{BB}}{k_{BB}} \frac{dU_B}{dt}; \quad (4)$$

Анализ экспериментальных и натуральных данных показал, что математическая модель генератора адекватно отражает электромагнитные процессы реального объекта [10]. Так, расхождения между расчетными и экспериментальными значениями выходного напряжения генератора в установившихся режимах не превышают 0,8–1,2 %, в переходных – 5–7 %.

Вследствие того, что закон управления напряжением генератора необходимо получить в непараметрическом виде, задача оптимизации переходных процессов решена методом АКОР [5]–[7]. Установлено, что обеспечение наименьших отклонений напряжения генератора от номинального значения в установившихся и переходных режимах достигается, если в качестве положительно определенной функции принимается функция вида [5], [7], [9]:

$$Q = \alpha_1(U - U_n)^2 + \alpha_2\dot{U}^2, \quad (10)$$

где U_n – номинальное значение напряжения генератора; U – текущее значение напряжения генератора.

Тогда, с учетом (10) минимизируемый функционал следует записать в виде следующего выражения [5]–[7]:

$$I = \int_t^{t+\tau} [\alpha_1(U - U_n)^2 + \alpha_2\dot{U}^2] dt + \frac{1}{2} \int_t^{t+\tau} (U_{\text{вв}} K_1^{-1})^2 dt + \frac{1}{2} \int_t^{t+\tau} \left(K_1 f_1 \frac{\partial V}{\partial U_{\text{в}}} \right)^2 dt, \quad (11)$$

где α_1, α_2 – «весовые» коэффициенты функционала.

Функция V , являющаяся решением линейного дифференциального уравнения в частных производных

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \sum_{i=1}^n \frac{dV}{dx_i} f_i = -Q, \quad (12)$$

определена в соответствии с методикой, изложенной в [5], [7], [9]. Для рассматриваемого случая после решения уравнения (12) она представлена в «усеченном» виде [5], [6]:

$$V_{\mu} = \tau [(U - U_n)^2 + \alpha_2\dot{U}^2] - (\tau^2/2) f_2 [2\alpha_1(U - U_n) + \alpha_2\dot{U}^2]. \quad (13)$$

С учетом этого синтезированное оптимальное управление записано в виде следующего выражения [6], [7]:

$$U_{\text{вв}} = -K_1^2 f_1 (\partial V_{\mu} / \partial U_{\text{в}}). \quad (14)$$

Дифференцируя уравнение (13) по $U_{\text{в}}$ и подставляя результат дифференцирования в (14), получим «усеченное» оптимальное непараметрическое управление напряжением бесконтактного синхронного генератора в аналитической форме

$$U_{\text{вв}} = \xi(U - U_n) - \xi\dot{U}, \quad (15)$$

где
$$\xi = K_1^2 K_{\text{в}} L_{\text{вв}}^{-1} \alpha_1 \tau^2 K_f w \sigma, \quad (16)$$

переменные коэффициенты, зависящие от режима работы генератора [6], [7].

На управляющее воздействие наложены ограничения, обусловленные конечной величиной мощности и характером кривой внешней характеристики возбудителя генератора, которые записаны в следующем виде [6], [7]:

$$0,0 \leq U_{\text{вв}} \leq 10,6 \text{ В.} \quad (17)$$

В результате проведенных исследований установлено, что наилучшие показатели качества электроэнергии достигаются при значении коэффициентов $\alpha_1 = 1,502$, $\alpha_2 = 140,724$ [6], [7].

Анализ результатов исследований эффективности синтезированного регулятора напряжения при выбранных выше коэффициентах и ограничениях позволил заключить, что при реализации синтезированного закона (15) время регулирования может быть уменьшено на 25–35 %, статическая ошибка – на 0,5–1,0 % по сравнению с аналогичными характеристиками серийной системы регулирования.

Таким образом, синтезированное управление (15), определяя структуру регулятора напряжения и соотношение коэффициентов при его координатах, позволяет получить улучшение качества переходных процессов по сравнению с серийными регуляторами напряжения. Данное обстоятельство обусловлено более эффективной «работой» сигналов управления в начальный момент действия возмущений по сравнению с «работой» линейных законов, реализованных в серийных регуляторах. Оценивая по приведенным переходным процессам «работу» серийных регуляторов напряжения и «работу» оптимального в смысле заданного функционала (11), управления (15), можно заключить, что характер их действия практически одинаков. Это говорит о возможности реализации синтезированного управления в серийных регуляторах путем непосредственного введения сигнала \dot{U} в регулятор. При этом параметры и структура серийных регуляторов напряжения претерпят незначительные изменения [6], [7].

Исследования переходных процессов с синтезированным регулятором напряжения позволили определить пределы допустимых значений ступенчатых характеристик переходного напряжения [11]–[13]. Результаты моделирования для нормальных режимов работы синхронного генератора представлены на рис. 2.

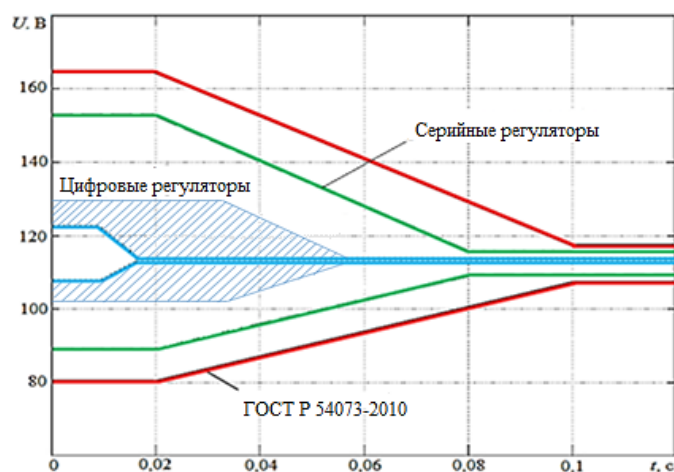


Рис. 2. Пределы нормальных переходных напряжений

Как видно из данного рисунка, длительность переходных процессов при реализации закона (15) позволяет сократить время регулирования до 0,02–0,04 с при одновременном уменьшении диапазона изменения напряжения с 90–150 В до 100–122 В. Эти показатели качества электроэнергии удовлетворяют современным требованиям к качеству электроэнергии перспективных воздушных судов [11].

Заключение

Таким образом, реализация синтезированного по методу АКОР закона регулирования напряжения может обеспечить повышение показателей качества электроэнергии как по величине перерегулирования и времени переходных процессов, так и по величине статической ошибки, что несомненно положительно скажется на надежности работы бортовых приемников электроэнергии, особенно перспективных воздушных судов.

Литература

1. Воронович, С. Полностью электрический самолет. Современное состояние и перспективы развития / С. Воронович, В. Каргопольцев, В. Кутахов // Авиапанорама. – 2009. – Март–апрель. – С. 14–17.
2. Капустин, А. Г. Перспективы развития современных систем электроснабжения воздушных судов / А. Г. Капустин // Современная военно-техническая политика: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф. – Минск : Воен. акад. Респ. Беларусь, 2013. – 429 с.
3. Карнаухов, Н. С. Перспективные направления повышения показателей качества электроэнергии первичных систем электроснабжения воздушных судов / Н. С. Карнаухов // Академические жуковские чтения : Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж / Воен.-воздуш. акад. им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. – Воронеж, 2013. – 294 с.
4. Капустин, А. Г. Анализ свойств системы электроснабжения с цифровой системой управления / А. Г. Капустин // Совершенствование обеспечения полетов авиации : сб. ст. 4-й Воен.-науч. конф. курсантов и молодых ученых, Минск, 28–29 нояб. 2013 г. – Минск : МГВАК, 2013. – 342 с.
5. Красовский, А. А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / А. А. Красовский, В. Н. Буков, В. С. Шендрик. – М. : Наука, 1977. – 420 с.
6. Капустин, А. Г. Аналитическое проектирование регулятора напряжения для авиационного вентильного генератора постоянного тока / А. Г. Капустин // тез. докл. 12-й Междунар. конф. «Авиация и космонавтика–2013», Москва, 12–15 нояб. 2013 г. – СПб., 2013. – 647 с.
7. Карнаухов, Н. С. Синтез оптимального по быстродействию регулятора напряжения синхронного генератора / Н. С. Карнаухов // Авиация: история, современность, перспективы развития : тез. докл. 4-й междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24 апр. 2014 г. – Минск, 2014. – 270 с.
8. Адкинс, Б. Общая теория электрических машин / Б. Адкинс. – М. : ГЭИ, 1960. – 272 с.
9. Карнаухов, Н. С. Субоптимальная автоматическая система регулирования напряжения авиационного синхронного генератора для перспективных воздушных судов / Н. С. Карнаухов // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации космонавтики» : сб. аннот. работ, 17–21 нояб. 2014 г. – М., 2014. – 326 с.

10. Карнаухов, Н. С. Исследование влияния трансформаторных ЭДС, демпферных контуров и процессов делящейся коммутации вентилей на динамические характеристики математической модели бесконтактного (вентильного) генератора постоянного тока / Н. С. Карнаухов // *Авиация и космонавтика 2013* : Москов. молодеж. науч.-практ. конф., Москва, 2013 г. – М., 2013. – 328 с.
11. ГОСТ Р 54073–2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М. : Стандартинформ, 2011. – 33 с.
12. Карнаухов, Н. С. Цифровой алгоритм полной компенсации возмущений в статическом режиме работы автономной системы электроснабжения / Н. С. Карнаухов, А. Г. Капустин // *Совершенствование обеспечения полетов авиации : 4-я Воен.-науч. конф. курсантов и молодых ученых, Минск, 2013 г. / МГВАК (воен. фак.). – Минск : МГВАК, 2013. – 192 с.*
13. Капустин, А. Г. Влияние инерционности цифровых регуляторов напряжения на качество электроэнергии каналов генерирования / А. Г. Капустин // *Совершенствование обеспечения полетов авиации : сб. ст. 4-й Воен.-науч. конф. курсантов и молодых ученых, Минск, 28–29 нояб. 2013 г. – Минск : МГВАК, 2013. – 342 с.*

Получено 20.06.2015 г.