

УДК 621.313.629.73

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С СИНХРОННЫМ
ГЕНЕРАТОРОМ И ОПТИМАЛЬНЫМ ЦИФРОВЫМ
РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

А. Г. КАПУСТИН, Н. С. КАРНАУХОВ

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

Введение

Исследование статических и динамических свойств канала генерирования с синхронным генератором и оптимальным цифровым регулятором напряжения проводилось в пакете Simulink & MatLab. В результате исследований были получены кривые переходных процессов по напряжению при различных коммутациях нагрузок [1]–[3]. Анализ этих кривых показывает, что переходные процессы при коммутациях нагрузки при отсутствии блока компенсации [1]–[4] характеризуются повышенной колебательностью. Это объясняется несоответствием электромагнитных параметров генератора в моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots$ управляющему воздействию $U_{в.в.}(t_i + \tau_3)$, формируемому с учетом некомпенсированного времени запаздывания τ_3 [3]–[5]. При учете блока компенсации колебательность отсутствует [4], [5]. Поэтому дальнейшие исследования свойств канала генерирования электроэнергии переменного тока с оптимальным цифровым регулятором напряжения проводились с учетом действия блока компенсации временного запаздывания.

Целью данной работы является решение вопросов улучшения качества электроэнергии путем реализации оптимальных законов регулирования напряжения в цифровых регуляторах напряжения.

Основная часть

Используя бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ) в качестве вычислителя, блок компенсации может быть реализован в виде соответствующей программы коррекции в этой вычислительной машине [4]–[6]. Поэтому импульсную передаточную функцию блока компенсации представим в виде [4], [5]:

$$W_{б.к.}(z) = 1 + \frac{\tau_3}{T}(1 - z^{-1}). \quad (1)$$

Очевидно [2], [7], что качество регулирования напряжения в значительной мере будет определяться периодом квантования T , а значение последнего – аппаратным решением устройств цифровой системы [4], [5], [7].

Для оценки качества электроэнергии в зависимости от величины T были построены зависимости статической ошибки $\Delta U_{ст}$, величин максимального отклонения напряжения ΔU при коммутациях нагрузки и времени регулирования t_p от отношения времени запаздывания t_3 и периода T . Их анализ показывает [4], [5], что для получения качества электроэнергии не хуже, чем в системе с серийными регуля-

торами напряжения (например, с регулятором БРН120Т5А, РНТ115ВО) нужно брать шаг квантования в пределах $(1-1,5)10^{-3}$ с (в зависимости от t_3).

В связи с этим анализ качества переходных процессов при цифровом регулировании напряжения проведен при различных t_3 и значениях T , не превышающих $1,5 \cdot 10^{-3}$ с. Из анализа графиков [1], [4], [5] следует, что улучшение качества электроэнергии во всех режимах работы авиационного синхронного генератора по сравнению с серийными регуляторами напряжения БРН120Т5А и РНТ115ВО достигается при значениях T и t_3 , не превышающих $0,12 \cdot 10^{-2}$ с. При этом реализация оптимального по быстродействию закона цифрового регулятора напряжения в реальном масштабе времени позволяет (в зависимости от величины нагрузки) в $1,1 \div 1,5$ раза уменьшить максимальные отклонения напряжения, в $1,2 \div 2$ раза сократить время регулирования и в $3 \div 5$ раз повысить точность регулирования напряжения по сравнению с аналогичными характеристиками системы регулирования напряжения с ГТ30НЖЧ12 и регулятором БРН120Т5А [1], [2], [7], [8]. Такое улучшение качества электроэнергии достигается за счет реализации нелинейных коэффициентов закона регулирования [1], [7] и учета, кроме интегральной квадратичной оценки отклонения напряжения синхронного генератора (используется в серийных регуляторах напряжения), аналогичной оценки отклонения тока возбуждения возбудителя от установившегося значения. Повышение качества электроэнергии при цифровом регулировании напряжения по сравнению с синтезированным аналоговым регулятором возможно при значениях T и t_3 , не превышающих $0,5 \cdot 10^{-3}$ [1]–[3].

При обосновании требований к цифровой системе регулирования напряжения учитывался ряд специфических факторов, обусловленных функционированием системы [4], [5]. Так, величина такта обмена информации для процессов регулирования напряжения должна быть не более $(1-1,5)10^{-3}$ с, в то время как такт обмена информации при решении задач защиты и управления может быть около $(80-100)10^{-3}$ с [5]–[7], [9]. Отсюда следует приоритетность выполнения задачи регулирования напряжения по отношению к задачам защиты и управления, что необходимо учитывать при построении оптимальной цифровой системы управления каналом генерирования [6], [7].

Другой особенностью функционирования оптимального цифрового регулятора напряжения является квантование измеряемых величин по времени и по уровню при их аналого-цифровом и цифро-аналоговом преобразовании [4], [5], [7].

Требуемый период квантования может быть определен из следующего соотношения [4], [5]:

$$\frac{dx_i}{dt} \leq \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{T \cdot 2^n}, \quad (2)$$

где x_i – измеряемые непрерывные величины закона управления [7], [8]; n – число двоичных разрядов АЦП.

Определение периода квантования целесообразно проводить для режимов близких к установившимся, где требуется более высокая точность измерений. Такими режимами для канала генерирования электроэнергии переменного тока являются те, когда $|x_i(t)| \leq (0,2 - 0,4)x_{i\text{ном}}$. При квантовании по уровню мгновенное значение $x_i(t)$ заменяется ближайшим дискретным значением $x_i[nT]$ и число уровней q зависит от разрядности аналого-цифрового преобразователя [4]–[6]:

$$q = 2^n - 1. \quad (3)$$

При выборе типа преобразователя также необходимо учитывать диапазон изменения непрерывной величины [4], [5]: $D = \frac{x_{i\max}}{x_{i\min}}$.

Для аналого-цифрового преобразователя, применяемого в оптимальном цифровом регуляторе напряжения синхронного генератора, величина D определяется в основном отношением величин токов нагрузки генератора при номинальном режиме и холостом ходе и равна (в зависимости от мощности генератора) $D = 40 \div 80$.

Полная погрешность аналого-цифрового преобразователя в момент t_i может быть определена по формуле

$$\Delta_{\text{ащп}} = \frac{q(\delta_{\text{сл}} + \delta_{\text{с}} + 0,5q)100\%}{x(t_i)}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{сл}}$ – случайная погрешность; $\delta_{\text{с}}$ – статическая погрешность.

Принимая во внимание характеристики современных АЦП переменного тока, можно полагать, что полная погрешность преобразователя $\Delta_{\text{ащп}}$ не превысит 0,15–0,3 % [4]–[6].

Для выбора и оценки цифро-аналогового преобразователя целесообразно пользоваться зависимостями (1)–(4). При этом, учитывая, что величина полной погрешности $\Delta_{\text{щп}}$ находится в тех же пределах, что и $\Delta_{\text{ащп}}$, можно заключить, что суммарная погрешность контура оптимального цифрового регулятора напряжения не превысит 0,3–0,7 % [4]–[7]. Это позволит повысить точность регулирования напряжения при использовании цифрового регулирования в 3–5 раз.

Время запаздывания t_3 определяется зависимостью $t_3 = nt_{\text{ащп}} + t_{\text{бцвм}} + mt_{\text{щп}}$, где n и m – количество измеряемых и выходных сигналов; $t_{\text{ащп}}$ и $t_{\text{щп}}$ – время, затрачиваемое преобразователями на обработку и выдачу соответствующих сигналов; $t_{\text{бцвм}}$ – время, затрачиваемое БЦВМ на обработку алгоритма и выдачу управляющего сигнала, определяемое по сложным зависимостям [4], [6], [7].

Расчеты, проведенные по формуле (2) с учетом характеристик современных цифровых устройств, показывают, что при использовании БЦВМ с быстродействием $(3-5)10^5$ оп/с и преобразователей со временем преобразования $t_{\text{ащп}} = (20-30)$ мкс и $t_{\text{щп}} = (4-6)$ мкс запаздывание контура оптимального цифрового регулятора напряжения не превысит $(0,75-1,2)10^{-3}$ с. Таким образом, подтверждается вывод о возможности организации цифрового регулирования напряжения в авиационных системах электроснабжения в реальном масштабе времени ($t_3 \leq T$).

Исследование переходных процессов в канале генерирования электроэнергии с синхронным генератором и оптимальной цифровой системой управления напряжением, реализующей оптимальный по быстродействию закон управления напряжением, при значениях $T = \tau_3 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ с позволило определить пределы допустимых значений ступенчатых характеристик переходного напряжения (рис. 1). Из рисунка видно, что длительность переходных процессов при реализации оптимального по быстродействию закона регулирования напряжения цифровой системой управления позволит добиться сокращения времени регулирования до $(15-20)10^{-3}$ с при одно-временном уменьшении диапазона изменения напряжения с $88 \div 155$ В (рис. 1, П – закон регулирования) до $107 \div 122$ В (рис. 1, оптимальный закон регулирования

с использованием цифрового регулятора напряжения). Приведенные данные удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к системам электроснабжения переменного тока, и превосходят показатели качества электрической энергии в существующих системах, определенных в ГОСТ Р 54073–2010 [9].

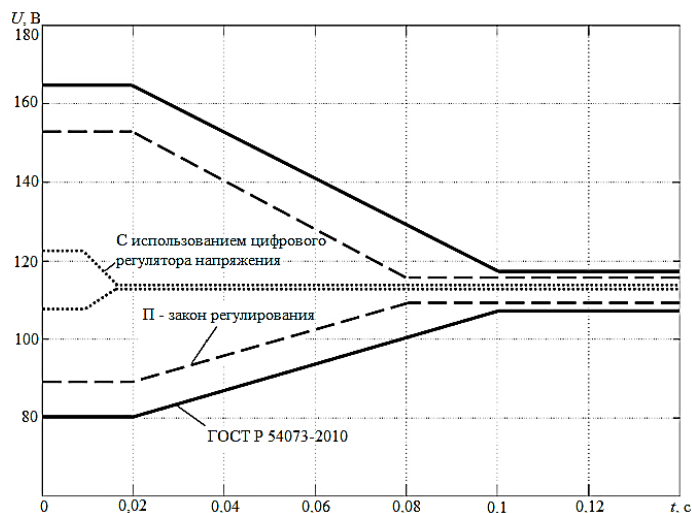


Рис. 1. Переходные характеристики электроэнергии переменного тока

Заключение

Таким образом, на основании изложенного материала и проведенных исследований сформулирован ряд основных требований к оптимальному цифровому регулятору напряжения электроэнергии с синхронным генератором: требуемый период квантования $T \geq 1,5 \cdot 10^{-3}$ с; общее время запаздывания, определяемое аппаратурным решением элементов тракта цифрового регулирования напряжения $t_3 \geq 1,5 \cdot 10^{-3}$ с; быстродействие цифровой системы управления должно быть не менее $3 \cdot 10^5$ оп/с; требуемая память постоянного запоминающего устройства – не более $(0,3 \div 0,5)$ К, оперативного запоминающего устройства – несколько десятков слов; преобразователи АЦП и ЦАП должны быть вида «постоянное напряжение (ток) – код» и «код – постоянное напряжение (ток)», соответственно.

Однако, независимо от того, как будет организована оптимальная цифровая система управления – на многопроцессорной бортовой цифровой вычислительной машине или с применением микропроцессорных комплексов, перечисленные требования должны быть учтены.

Результаты проведенных исследований разработанной оптимальной цифровой системы регулирования напряжения канала генерирования электроэнергии с синхронным генератором показывают эффективность данной системы и уменьшают с ее помощью пределы нормальных переходных напряжений [9], что, несомненно, положительно скажется на увеличении надежности функционирования приемников и повышении безопасности полетов воздушных судов.

Литература

1. Карнаухов, Н. С. Исследование переходных процессов в автономной системе генерирования при действии конечных сигналов по цепям управления и нагрузки / Н. С. Карнаухов // Гражданская авиация: XXI век : сб. материалов V Междунар. молодеж. науч. конф., Ульяновск, 11–12 апр. 2013 г. – Ульяновск : УВАУГА(И), 2013. – 244 с.

2. Карнаухов, Н. С. Применение пакета Simulink & MatLab для исследования переходных процессов в автономной системе генерирования переменного тока / Н. С. Карнаухов // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–17 мая 2013 г. – Минск : Воен. акад. Респ. Беларусь, 2013. – 254 с.
3. 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.
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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Карнаухов, Н. С. Система автоматического регулирования напряжения генератора переменного тока : решение о выдаче пат. на полезную модель Респ. Беларусь / Н. С. Карнаухов ; по заявке № и 20140432 от 24.03.2015 г.
9. ГОСТ Р 54073–2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М. : Стандартинформ, 2011. – 33 с.

Получено 12.06.2015 г.