

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ АВИАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Розуміння процесів регулювання напруги бортових авіаційних генераторів дає можливість при проектуванні систем електропостачання повітряних суден і бортового електроустаткування покращити якість електроенергії, зменшити масу і збільшити термін служби обладнання.*

*Понимание процессов регулирования напряжения бортовых авиационных генераторов дает возможность при проектировании систем электроснабжения воздушных судов и бортового электрооборудования улучшить качество электроэнергии, уменьшить массу и увеличить срок службы оборудования.*

*The understanding of the occurring processes in the voltage regulation of the aircraft generators allows to improve the quality of electrical current during the design of the aircraft electrical systems and electrical equipment, and it allows to reduce the weight of the system and increase the service life of equipment.*

**Введение.** По мере развития авиационных систем электроснабжения (СЭС) и бортового оборудования ужесточаются требования к качеству электроэнергии, в частности к точности поддержания напряжения. Возникает необходимость в пересмотре показателей качества электроэнергии в СЭС современных воздушных судов (ВС). Так в Российской Федерации разработан и с 2011 года введен Государственный отраслевой стандарт ГОСТ Р 54073 – 2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии». Сравнительный анализ нового ГОСТ и действующего на данный момент в Украине ГОСТ 19705-89 [1], показывает, что новый стандарт был не формальным документом, в связи с переходом к единым стандартам Российской Федерации, а переработанным и дополненным изданием технического документа.

В частности для СЭС постоянного тока современных ВС дополнительно появились параметры электроэнергии для бортового оборудования питающегося напряжением 270В с характеристиками различных режимов работы. Сузились некоторые диапазоны напряжения при различных режимах работы системы 27В, что поясняется созданием нового бортового оборудования, которое более чувствительно и к качеству электроэнергии. Очевидно в ближайшем будущем переход на новые стандарты затронут и авиационную технику, проектируемую и эксплуатируемую на территории Украины.

Повышение точности стабилизации напряжения ведет к повышению надежности бортового оборудования, увеличению срока его службы и снижению массы СЭС. Чем точнее работает система регулирования напряжения, тем на большую потерю напряжения можно рассчитывать сеть. Следовательно сечение проводов и масса сети будут меньшими.

**Постановка задачи исследования.** Учитывая выше изложенное, проведение исследований статики и динамики функционирования авиационных генераторов становится неотъемлемой частью разработок новых возможностей, закладывает новые теоретические фундаменты для будущих расчетов параметров бортового электрооборудования.

**Решение задачи исследования.** Поскольку основная корректировка стандартов коснулась СЭС постоянного тока возникает необходимость пересмотра качества электроэнергии систем ее генерирования, передачи, распределения и потребления.

Ротор авиационного генератора постоянного тока (ГПТ) приводится во вращение от выходного вала авиационного двигателя (АД) через его непосредственный привод (редуктор).

Считается что АД обладает достаточной мощностью и подключение к генератору электрической нагрузки не влияет на скорость вращения его ротора. Кроме того, считается, что ротор вращается с постоянной скоростью [3]. Эквивалентная схема ГПТ приведена на Рис.1.

Исходя из эквивалентной схемы генератора уравнение цепи возбуждения будет иметь вид:

$$U_B = R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} \quad (1)$$

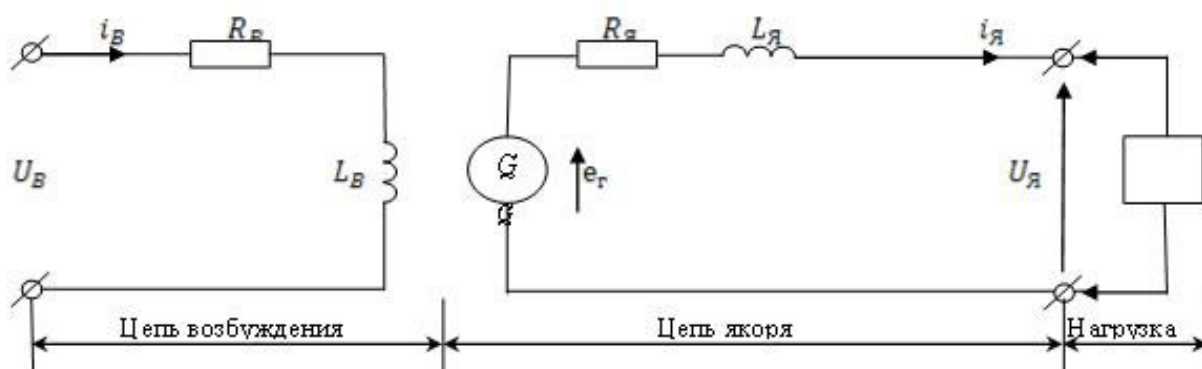


Рис.1. Эквивалентная схема генератора

Зависимость переменных от времени для удобства опустим.

В уравнении (1)  $U_B$  – напряжение возбуждения, которое принимаем за вход системы. Величины  $i_B$ ,  $R_B$  и  $L_B$  соответственно – ток возбуждения, сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения.

Уравнение цепи якоря имеет вид:

$$e_G = R_я i_я + L_я \frac{di_я}{dt} + U_я \quad (2)$$

где  $e_G$  – ЭДС генератора,  $i_я$  – ток в цепи якоря,  $U_я$  – напряжение снимаемое с якоря,  $R_я$  и  $L_я$  – соответственно сопротивление и индуктивность якорной

обмотки. ЭДС генератора и магнитный поток возбуждения связаны соотношением [4].

$$e_{\Gamma} = K_{\Gamma} \varphi \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

где  $K_{\Gamma}$  – параметр определяющийся конструктивными особенностями

генератора,  $\varphi$  – магнитный поток, а  $\frac{d\theta}{dt}$  – угловая скорость вращения якоря.

Так как скорость вращения якоря предполагается постоянной, а магнитный поток пропорционален току возбуждения  $i_B$ , то ЭДС генератора запишем в виде:

$$e_{\Gamma} = K_{\Gamma} i_B \quad (4)$$

Для определения передаточной функции предположим, что все начальные условия нулевые.

Используем интегральное преобразование Лапласа, связывающие функцию  $F(s)$  комплексного переменного (изображение)  $s = \delta + j\omega$  с функцией вещественного переменного  $f(x)$  (оригинал)

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$$

Преобразуем по Лапласу уравнения (1) и (4)

$$U_B(s) = (sL_B + R_B) I_B(s) \quad (5)$$

$$E_{\Gamma} = K_{\Gamma} I_B(s) \quad (6)$$

Используем метод полного сопротивления, в частности для индуктивности, которая описывается уравнением

$$u(t) = L \frac{di}{dt}$$

Преобразование по Лапласу этого уравнения  $u(t) = L_B I(s)$ , что можно записать в виде:

$$u(t) = Z(s) I(s),$$

где, по определению,  $Z(s)$  – полное (операторное) сопротивление элемента.

В общем случае полное сопротивление определяющееся между двумя конкретными точками пассивной цепи равно отношению изображения по Лапласу падения напряжения на этой цепи к изображению по Лапласу тока, протекающего через цепь.

Для резистор  $Z(s) = R$ , а для конденсатора  $Z(s) = \frac{1}{sC}$ .

Уравнение для цепи якоря записаны с помощью метода полного сопротивления. Считая, что  $Z_{\text{Я}}(s)$  – полное сопротивление цепи якоря, а  $Z_H(s)$  – полное сопротивление нагрузки генератора, запишем:

$$I_{\text{Я}}(s) = \frac{E_{\Gamma}(s)}{Z_{\text{Я}}(s) + Z_{\text{H}}(s)} = \frac{E_{\Gamma}(s)}{L_{\text{Я}}s + R_{\text{Я}} + Z_{\text{H}}(s)} \quad (7)$$

$$E_{\text{Я}}(s) = I_{\text{Я}}(s) Z_{\text{Я}}(s) \quad (8)$$

Поскольку напряжение цепи возбуждения - вход системы а напряжение, снимаемое с якоря,  $U_{\text{Я}}$  – выход, то мы имеем четыре неизвестных:  $I_{\text{Б}}(s)$ ,  $E_{\Gamma}(s)$ ,  $I_{\text{Я}}(s)$  и  $E_{\text{Я}}(s)$ .

При нахождении передаточной функции системы необходимо исключить из уравнений (5), (6), (7) и (8) промежуточные переменные, оставив только связь между входом и выходом.

$$I_{\text{Б}}(s) = \frac{F_{\text{Б}}(s)}{L_{\text{Б}}(s) + R_{\text{Б}}} \quad (9)$$

что позволит нам изобразить первый блок (Рис.2). Второй блок получим из уравнения (6)

$$K_{\Gamma} = \frac{E_{\Gamma}(s)}{I_{\text{Б}}(s)} \quad (10)$$

Третий блок на схеме определяется за счёт уравнения (7), а четвертый воспроизводит уравнение (8).

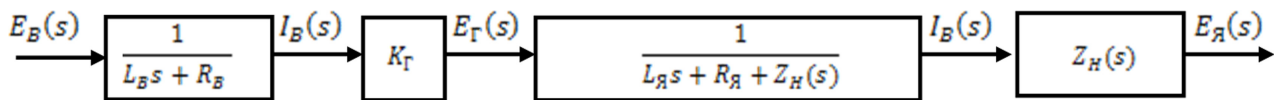


Рис.2. Структурная схема генератора

Поскольку структурная схема на рис.2. не имеет контура с обратной связью, то передаточная функция находится путем перемножения операторных коэффициентов передачи всех четырех блоков:

$$W(s) = \frac{E_{\text{Я}}(s)}{E_{\text{Б}}(s)} = \frac{K_{\Gamma} Z_{\text{H}}(s)}{(L_{\text{Б}}s + R_{\text{Б}})[L_{\text{Я}}s + R_{\text{Я}} + Z_{\text{H}}(s)]} \quad (11)$$

Общее уравнение всей САРН для ГПТ подадим в виде:

$$(a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \Delta U = (b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \Delta R \quad (12)$$

На основании полученного выражения для значения статической ошибки регулирования напряжения  $\Delta U_{\text{доп}}$  выбирают численные значения коэффициентов для исследования динамических свойств системы регулирования. При этом необходимо вычислить корни характеристического уравнения (12). Для уравнения третьего порядка вида:

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$$

имеем три корня, что по условиям постоянства системы должны располагаться в левой, относительно оси  $j$ , части комплексной плоскости.

Для проведения качественной оценки переходного процесса в системе выполняется следующая процедура

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

Для характеристического уравнения системы ГПТ-УРН воспользуемся нормируемой диаграммой И.А. Вышнеградского. Нормируемое уравнение системы ГПТ-РН запишем в виде:

$$p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + 1 = 0,$$

где  $A_1 = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_3 \cdot a_0^2}}, A_2 = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_3^2 \cdot a_0}}.$

В плоскости параметров  $A_1$  и  $A_2$  строим область устойчивости для нормируемой системы (рис.3).

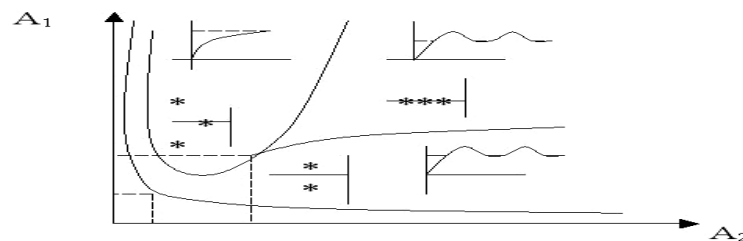


Рис.3. Расположение областей постоянного и неустойчивого состояний процесса регулирования на плоскости параметров  $A_1$  и  $A_2$ .

Зная коэффициенты  $a_3, a_2, a_1$  и  $a_0$ , можно определить  $A_1$  и  $A_2$ , а затем дать качественную характеристику переходному процессу, но получить количественную оценку качества переходного процесса нельзя.

Количественная оценка необходима для проверки соответствия работы системы требованиям [1], согласованным с требованиями ИСАО. Количественная оценка переходного процесса в системе производится таким способом.

Известно [5,6], если  $X(t)$  – кривая переходного процесса системы, то, зная корни характеристического уравнения, можно построить две кривые (рис.4): мажоранту  $V(t)$  и миноранту  $U(t)$ , что ограничивают кривую переходного процесса сверху и снизу:

$$U(t) \leq X(t) \leq V(t).$$

Если корни характеристического уравнения действительные и начальные условия нулевые

$$X(0) = 0 \quad X^{(n-1)}(0) = X^{(n-1)}(0), \quad \text{где} \quad V(t) = e^{-\eta t} \left[ 1 + \eta t + \dots + \frac{\eta^{n-1} t^{n-1}}{(n-1)!} \right];$$

$$U(t) = e^{-\eta t},$$

где  $\eta$  – затухание (или степень устойчивости) – расстояние от мнимой оси  $j$  к ближайшему корню или ближайшей паре сопряженных комплексных корней.

При наличии сопряженных комплексных корней и при нулевых начальных условиях  $u(t) = -V(t)$ .

Таким образом, определив корни характеристического уравнения и построив мажоранту и миноранту [5], их необходимо сравнить с требованиями [1], то есть с границами допустимых значений ступенчатой характеристики и переходного напряжения СЭС ГПТ (рис.4).

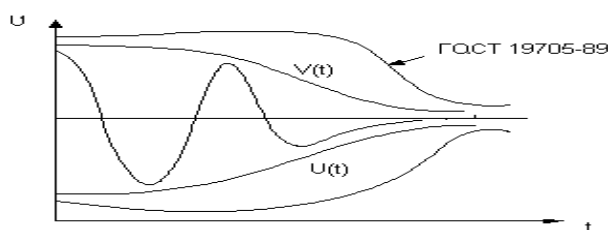


Рис.4. Принцип оценки качества динамического регулирования напряжения по критериям ГОСТ 19705-89.

**Выводы.** Передаточная функция (11) позволяет определить характер изменения выходного напряжения если напряжение возбуждения будет определенной функцией времени, т.е. выражение (11) описывает динамику генератора, говоря о том что изменение параметров нагрузки влияет на передаточную функцию системы.

Структурная схема и определенные ее параметры дает возможность судить о влиянии параметров на статическую ошибку функционирования ГПТ.

Для проведения качественной оценки переходного процесса использована нормированная диаграммой И.А. Вышнеградского.

Количественная оценка необходима для проверки соответствия работы системы требованиям [1], согласованным с требованиями ИСАО. Количественную оценку переходного процесса в системе получаем определив корни характеристического уравнения, а построив мажоранту и миноранту [5], и сравнив полученный результат с требованиями [1], то есть с границами допустимых значений ступенчатой характеристики и переходного напряжения СЭС ГПТ получим качественную характеристику переходного процесса

### Литература

1. ГОСТ 19705-89. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Требования к качеству электроэнергии. М.: ГК СССР по стандартам, 1989. – с.45
2. ГОСТ Р 54073 – 2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. М.: Стандартформ, 2011.
3. Синдеев И. М., Савелов А. А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
4. G. Mc Pherson and R.D. Laramore. An introduction to Electrical Machines and Transformers. New York: Wiley, 1991.
5. Теория автоматического управления /Под ред. А.А.Воронова. М.: Высшая школа, 1986. - 367 с.
6. Основы автоматического управления / В.С.Пугачев, И.Е.Казаков, Д.И.Гладков и др.- М.: Наука, 1974. – 720 с.