



Н.С. Карнаухов, А.Г. Капустин

## СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(Минский государственный высший авиационный колледж)

Анализ методов синтеза алгоритмов динамической коррекции показывает, что в системе автоматического регулирования (САР) напряжения полная компенсация ступенчатого изменения нагрузки будет связана с необходимостью применения корректирующих устройств с нереализуемыми аналоговыми средствами передаточными функциями. Поэтому в этом случае целесообразнее строить систему динамической коррекции, исходя не из приближенного выполнения условий инвариантности, а из условия получения оптимального переходного процесса [1,4].

За критерий оптимальности

$$Q = \int_0^{t_n} G[Y, U_K(t), F(t)] dt \quad (1)$$

который определяет цель управления, для САР напряжения может быть принят минимум длительности переходного процесса  $t_n$  [2,3].

Для реализации этого критерия разработана при обычных в этих случаях допущениях [3], система дифференциальных уравнений, описывающая бесконтактный синхронный генератор переменного тока с возбудителем как объект управления:

$$\begin{aligned} T_B \frac{dU_\Gamma}{dt} + U_\Gamma &= \frac{X_{ad}}{r_B} U_B - \left( X_d - i_d + X_d' T_B \frac{di_d}{dt} \right); \\ T_B \frac{dU_B}{dt} + U_B &= k_{BB} \cdot U_{BB}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_\Gamma$  – отклонение напряжения генератора от заданного значение;  $U_B, U_{BB}$  – напряжения на обмотке возбуждения генератора и возбудителя соответственно;  $T_B, T_{BB}$  – постоянные времени обмоток возбуждения генератора и возбудителя;  $K_B = \frac{X_{ad}}{r_B}$ ,  $K_{BB}$  – коэффициенты усиления генератора и возбудителя;  $i_d$  – ток статора генератора по продольной оси;  $X_d$  – реактивное сопротивление обмотки статора по продольной оси;  $X_d'$  – переходное реактивное сопротивление обмотки статора по продольной оси.



Обозначив фазовые координаты системы, как  $U_\Gamma = X^1$  и  $\frac{dU_\Gamma}{dt} = X^2$ , можно представить закон движения объекта под действием управления  $U_k = U_{BB}(t)$  в виде:

$$\begin{aligned} \dot{X}^1 &= X^2; \\ \dot{X}^2 &= -\frac{T_B + T_{BB}}{T_B \cdot T_{BB}} \cdot X^2 - \frac{1}{T_B \cdot T_{BB}} X^1 + \frac{K_B \cdot K_{BB}}{T_B \cdot T_{BB}} U_{BB}, \end{aligned} \quad (3)$$

при ограничениях на управление:

$$\begin{aligned} -U_{BB} &\leq U_{BB}(t) \leq U_{пв} - U_{BB0}; \\ -U_{m2} &\leq K_B \cdot K_{BB} \cdot U_{BB}(t) \leq U_{m1} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $U_{пв}$  – напряжения подвозбудителя,  $U_{BB0}$  – напряжение на обмотке возбуждения возбудителя, при котором  $U_\Gamma = 0$ .

Тогда оптимальное по быстродействию управление для рассматриваемого генератора будет содержать два интервала, на которых управление будет принимать значения  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ , а система дифференциальных уравнений (3) примет вид [1]:

$$\begin{aligned} \dot{X}^1 &= X^2, \\ \dot{X}^2 &= -\frac{a_1}{a_0} X^2 - \frac{a_2}{a_0} X^1 \pm \frac{1}{a_0} U_m; \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a_0 = T_B \cdot T_{BB}$ ;  $a_1 = T_B + T_{BB}$ ;  $a_2 = 1$ .

Определим, решив систему уравнений (4), моменты  $\tau_1$  и  $\tau_2$  переключения сигнала управления  $U_m(t)$ ,  $U_m(t)$ , при котором обеспечивается перевод объекта из начального состояния  $X^1(0) = X_0$ ,  $X^2(0) = X_0^2$  обусловленного действием возмущения, в конечное  $X^1(T) = 0$ ,  $X^2(T) = 0$  за минимальное время  $T = \tau_1 + \tau_2$ .

Для первого интервала уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} X^1(t) &= c_{11}e^{\lambda_1 t} + c_{12}e^{\lambda_2 t} + U_{m1}; \\ X^2(t) &= \lambda_1 c_{11}e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 c_{12}e^{\lambda_2 t}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для второго интервала:

$$\begin{aligned} X^1(t) &= c_{21}e^{\lambda_1 t} + c_{22}e^{\lambda_2 t} - U_{m2}; \\ X^2(t) &= \lambda_1 c_{21}e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 c_{22}e^{\lambda_2 t}. \end{aligned} \quad (7)$$

В (6) и (7)  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{22}$  – постоянные интегрирования, а  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – корни характеристического уравнения.

Для нахождения постоянных интегрирования и моментов переключения воспользуемся граничными условиями, а также уравнениями, указывающими, что при переключении управления состояние объекта мгновенно не изменяется:



$$\begin{aligned} X^1(\tau_1 - 0) &= X^1(\tau_1 + 0); \\ X^2(\tau_1 - 0) &= X^2(\tau_1 + 0); \\ X^1(0) &= X_0^1; X^2(0) = X_0^2; \\ X^1(T) &= 0; X^2(T) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда, учитывая (6), (7) и систему (8), исключив постоянные интегрирования  $c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}$  получим систему уравнений для определения моментов переключения:

$$\begin{aligned} &\lambda_2 \left[ \left( X_0^1 - \frac{X_0^2}{\lambda_2} - U_{m1} \right) e^{\lambda_1 \tau_1} + (U_{m1} + U_{m2}) \right] e^{\lambda_1 \tau_2} - \\ &- \lambda_1 \left[ \left( X_0^1 - \frac{X_0^2}{\lambda_2} - U_{m1} \right) e^{\lambda_2 \tau_1} + (U_{m1} + U_{m2}) \right] e^{\lambda_2 \tau_2} - (\lambda_2 - \lambda_1) U_{m2} = 0; \\ &\left[ \left( X_0^1 - \frac{X_0^2}{\lambda_2} - U_{m1} \right) e^{\lambda_1 \tau_1} + (U_{m1} + U_{m2}) \right] e^{\lambda_1 \tau_2} - \\ &- \left[ \left( X_0^1 - \frac{X_0^2}{\lambda_2} - U_{m1} \right) e^{\lambda_2 \tau_1} + (U_{m1} + U_{m2}) \right] e^{\lambda_2 \tau_2}. \end{aligned} \quad (9)$$

В этом случае алгоритм динамической коррекции напряжения при коммутации  $j$ -го приемника электроэнергии может быть представлен в виде:

$$U_{kj}(t) = U_{m1}(t) - (U_{m1} + U_{m2})(t - \tau_{1j}) + (U_{m2} + U_{Hj})(t - \tau_{2j}). \quad (10)$$

Моменты переключения оптимального управления определяются по системе трансцендентных уравнений (9). Моделирование зависимости оптимальных значений  $\tau_1, \tau_2$  и  $T = \tau_1 + \tau_2$  от мощности коммутируемой нагрузки  $P$  для синхронного генератора мощностью 30 кВА было проведено в среде Simulink & MatLab при помощи элементов из библиотеки Simulink Library. На рисунке 1 представлены результаты моделирования данных зависимостей оптимальных значений. Как следует из приведенных данных, минимальная длительность переходного процесса при ступенчатом изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения составит  $(15-20) \cdot 10^{-3}$  с.

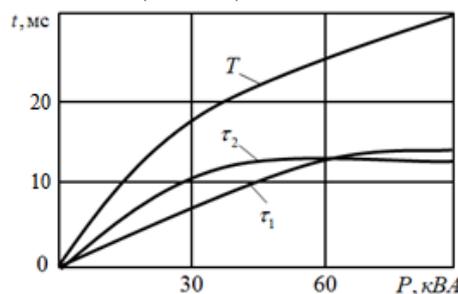


Рис. 1. Зависимости оптимальных значений  $\tau_1, \tau_2$  и  $T = \tau_1 + \tau_2$  от мощности коммутируемой нагрузки



Проведенные экспериментальные исследования работы синхронного генератора в среде Simulink & MatLab при коммутациях нагрузки позволили оценить эффективность применения синтезированного оптимального закона коррекции (10). На рисунке 2 показаны графики переходных процессов при включении номинальной нагрузки:

- 1 – при оптимальном по быстродействию управлении,
- 2 – при использовании транзисторного регулятора напряжения,
- 3 – при использовании регулятора напряжения на магнитных усилителях,
- 4 – при  $U_{BB} = \text{const}$ .

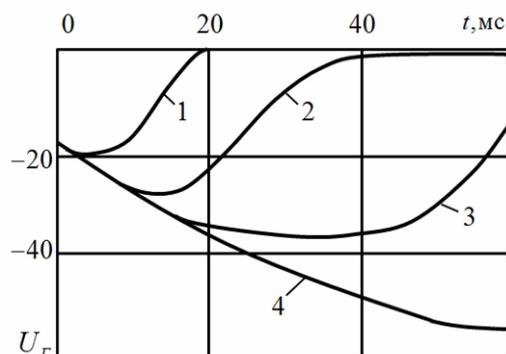


Рис. 2. Графики переходных процессов при включении номинальной нагрузки

Анализ полученных результатов показывает, что при оптимальной по быстродействию коррекции напряжения синхронного генератора обеспечивается минимально возможное значение динамической ошибки (на 25-40% меньше, чем в САР с современными регуляторами напряжения). При этом длительность переходного процесса уменьшается в 3-7 раз.

### Литература

1. Капустин А.Г., Карнаухов Н.С. Исследование систем генерирования методом структурного моделирования. «Совершенствование обеспечения полетов авиации»: Тезисы докладов 3-й военно-научной конференции курсантов и молодых ученых/ ред. коллегия: Санько А. А., Савостеев С. А. и др. – Минск: МГВАК. 2013. 273с.
2. Карнаухов Н.С. Применение пакета Simulink & MatLab для исследования переходных процессов в автономной системе генерирования переменного тока «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации»: Тезисы докладов 3-й международной научно-технической конференции. – Минск: Военная академия РБ. 2013. 215с.
3. Карнаухов Н.С. Исследование переходных процессов в автономной системе генерирования при действии конечных сигналов по цепям управления и нагрузки «Гражданская авиация XXI век»: Тезисы докладов IV Международной молодежной научной конференции. – Ульяновск: УВАУГА(И). 2013. 256с.