

В. А. Захарченко, к.т.н.

С.В. Енчев, к.т.н.

Н. Д. Красношапка, к.т.н.

С. С. Ильенко к.т.н.

В. В. Козуб

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Национальный авиационный университет

В статье рассмотрены вопросы автоматического регулирования трехфазного переменного напряжения в системе электроснабжения воздушного судна и формирования динамической модели авиационного бесконтактного синхронного генератора с тиристорным регулятором напряжения.

Постановка проблемы.

Процесс развития систем электроснабжения (СЭС) воздушных судов (ВС) сопровождается ужесточением требований к точности поддержания уровня напряжения. Увеличение точности стабилизации напряжения ведет к повышению надежности работы авиационного оборудования при эксплуатации и снижению массы СЭС при проектировании, вследствие уменьшения массы сети, поскольку чем точнее работает регулятор напряжения, тем на большую потерю напряжения можно рассчитывать сеть, а следовательно, сечение проводов и масса сети оказываются меньшими. Уменьшение ошибки регулирования напряжения с ± 2 до $\pm 1\%$ позволяет уменьшить массу оборудования на 2–4%. Что сказывается на экономичности производства СЭС. Так в [1] отмечается, что при выпуске 1000 ВС дополнительный доход составляет 5,5 млн. долларов, если масса оборудования на одном ВС уменьшится всего лишь на 1 кг.

Возмущающие воздействия в СЭС ВС, обусловленные изменениями нагрузки и частоты вращения ротора генераторов, приводят к отклонению напряжения генераторов от установленных значений. Изменение нагрузки возможно от нуля до номинального ее значения, а диапазон изменения частоты вращения роторов генераторов постоянного и переменного тока переменной частоты составляет 1,2–2,5 и более.

Анализ публикаций.

Современный уровень развития авионики требует обеспечения высокого качества электрической энергии. Анализ проблемы в области разработки, производства, сертификации и эксплуатации СЭС ВС, осветил существующие противоречия между высокими требованиями [2,3,4] к эффективности функционирования таких систем и возможностями авиапредприятий удовлетворить эти требования. Отмеченное противоречие характерно не только для процесса эксплуатации существующих СЭС, но и для процесса создания новых типов СЭС ВС. Требования к качеству электрической энергии определяются ГОСТ 19705-89, согласно которому, при указанном диапазоне изменения нагрузки в СЭС с генераторами переменного тока стабильной частоты, установившиеся значения напряжения фазы должны соответствовать значениям, указанным в табл. 1.

Без принятия специальных мер напряжение на зажимах генератора может отклоняться больше допустимого уровня. Поэтому в СЭС ВС используют специальные системы автоматического регулирования напряжения (САРН). На большинстве современных ВС основным источником переменного тока являются синхронные генераторы, а стабилизация уровня

напряжения осуществляется с помощью автоматического регулирования в цепи возбуждения.

Постановка задачи.

Для оценки динамических и статических характеристик системы регулирования напряжения (время переходного процесса, погрешность в установившемся режиме и др.) анализируется математическая модель системы. В процессе анализа выявляют влияние отдельных элементов системы регулирования на ее устойчивость, определяют области возможных значений ее параметров, обеспечивающих высокое качество переходных процессов. Как видим, необходимо в первую очередь сформировать математическую модель системы для последующей ее оценки, что и является целью данной статьи.

Таблица 1

Значения установившегося напряжения СЭС переменного трехфазного тока постоянной частоты

Точка измерения	Напряжение фазы, В			Среднее значение напряжения трех фаз, В		
	Режим работы СЭС					
	нормальный	ненормальный	аварийный	нормальный	ненормальный	аварийный
На приемнике	108–119	100–127	104–122	–	–	–
В точке регулирования	–	–	–	111–118	105–125	112–120

Формирование динамической модели.

Формирования динамической модели для оценки САРН синхронного генератора начинается с составления уравнения движения системы, вид которого зависит от типа синхронного генератора и типа регулятора напряжения.

Как пример рассмотрим наиболее перспективную систему – бесконтактный синхронный генератор (БСГ) с тиристорным регулятором напряжения (ТРН) [5].

В рассматриваемой системе на рис. 1, при условии, что корректирующие и стабилизирующие устройства не учитываются, выделим три основных звена:

- синхронный генератор G;
- возбудитель В;
- ТРН.

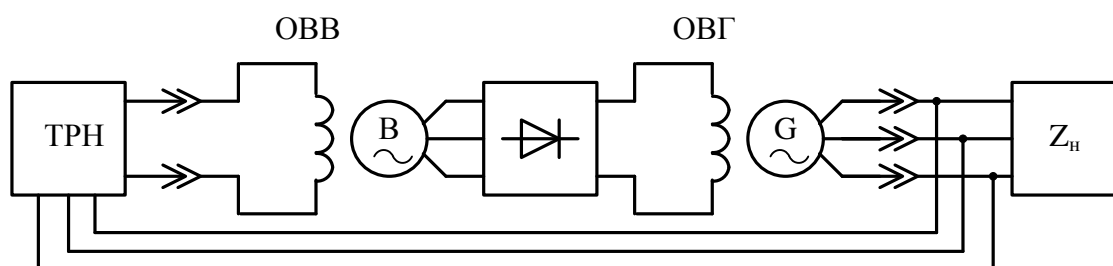


Рис. 1. Принципиальная схема САР напряжения БСГ с тиристорным регулятором

Составление уравнений отдельных звеньев системы удобнее начинать с составления уравнения для регулятора, а затем рассматривать другие звенья путем обхода замкнутого контура регулирования в направлении от регулятора к генератору.

ТРН относится к классу фазоимпульсных регуляторов и, как показано на рис. 2, состоит из измерительного устройства ИУ, фазосдвигающего устройства ФСУ, формирователей импульсов ФИ, усилителя мощности УМ и стабилизирующего контура СК.

Регулирование напряжения БСГ осуществляется, как известно, воздействием на ток возбуждения возбудителя В путем фазового управления тиристорами, которые, будучи включенными в цепь синусоидального напряжения, периодически отпираются кратковременными управляющими импульсами, синхронизированными с напряжением питания.

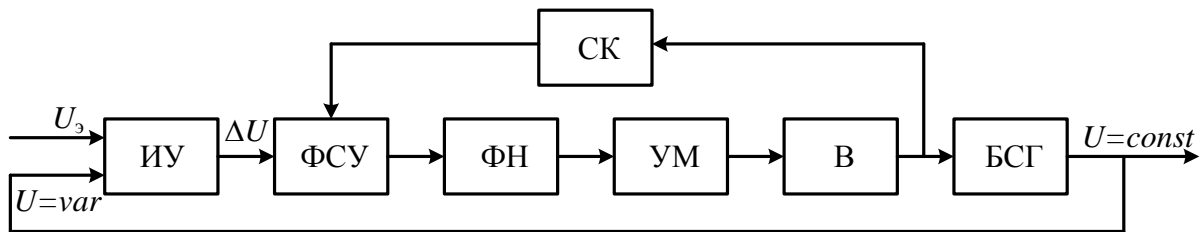


Рис. 2. Функциональная схема САР напряжения

Принципиальная электрическая схема ТРН и принцип его действия описаны в [1, 5]. Из круговой векторной диаграммы ФСУ следует, что напряжение на выходе ТРН

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(kU_{\text{ВХ}}/2)e^{j\alpha},$$

где k – коэффициент пропорциональности, α – угол сдвига фаз между выходным ($U_{\text{ВЫХ}}$) и входным ($U_{\text{ВХ}}$) напряжениями.

Угол φ между вектором тока и вектором выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ является внешним по отношению к углу α , следовательно, $\alpha = 2\varphi$ [1], а

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(kU_{\text{ВХ}}/2)e^{j2\varphi}.$$

Тиристоры коммутуются импульсами управления. При изменении угла отпирания тиристоров α_k изменяется среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{\text{ср}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{\text{max}} \frac{(1 + \cos \alpha_k)}{2},$$

где U_{max} – амплитудное значение фазного напряжения (напряжение подвозбудителя).

При напряжении БСГ равном номинальному, напряжение на выходе БСГ будет сдвинуто на некоторый угол α относительно опорного. При этом угол отпирания тиристоров $\alpha_k = \alpha$ и напряжение, приложенное к цепи возбуждения возбудителя, равно $U_{\text{ср}}$. Если напряжение на выходных клеммах БСГ понизится, то напряжение на выходе ИУ повысится, угол сдвига фаз α уменьшится, уменьшится угол отпирания тиристоров α_k , что приведет к увеличению напряжения в цепи возбуждения возбудителя и напряжение на клеммах БСГ увеличится. При повышении напряжения процессы происходят в обратном порядке.

ТРН по своим динамическим свойствам можно отнести к аperiodическому звену первого порядка. Переходные процессы согласно [5] могут быть описаны уравнением:

$$T_{\text{ТРН}} \frac{dU_{\text{ВВ}}(t)}{dt} + U_{\text{ВВ}}(t) = k_{\text{ТРН}} U_{\text{ВЫХ}}(t)$$

или в изображениях по Лапласу:

$$(T_{\text{ТРН}} p + 1)U_{\text{ВВ}}(p) = k_{\text{ТРН}} U_{\text{ВЫХ}}(p), \quad (1)$$

где $T_{\text{ТРН}}$, $k_{\text{ТРН}}$ – постоянная времени и коэффициент усиления ТРН; $U_{\text{ВВ}}$ – напряжение возбуждения возбудителя.

Из выражения (1) несложно получить передаточную функцию ТРН:

$$W_{\text{ТРН}}(p) = \frac{U_{\text{ВВ}}(p)}{U_{\text{ВЫХ}}(p)} = \frac{k_{\text{ТРН}}}{T_{\text{ТРН}} p + 1}.$$

К выходу ТРН подключена активно-индуктивная нагрузка в виде обмотки возбуждения возбудителя. В возбудителе можно выделить два звена: цепь возбуждения и якорную цепь.

Для цепи возбуждения возбудителя справедливо уравнение

$$U_{\text{ВВ}} = R_{\text{ВВ}} i_{\text{ВВ}} + L_{\text{ВВ}} \frac{di_{\text{ВВ}}(t)}{dt} \quad \text{или} \quad U_{\text{ВВ}}(p) = (R_{\text{ВВ}} + L_{\text{ВВ}} p) I_{\text{ВВ}}(p),$$

где $R_{\text{ВВ}}$ и $L_{\text{ВВ}}$ – активное и индуктивное сопротивление обмотки возбуждения возбудителя.

Конструкция авиационных генераторов полагает обязательное наличие обмотки возбуждения (ОВГ), поскольку регулирование напряжения осуществляется путем изменения тока в ее цепи.

Цепь возбуждения возбудителя связана с ОВГ через выпрямительный блок. Напряжение на выходе выпрямительного блока $U_{\text{В}}$ зависит от тока возбуждения возбудителя $I_{\text{ВВ}}$ и угловой скорости ротора БСГ, что в малых приращениях можно записать как:

$$\Delta I_{\text{ВВ}} = \frac{\Delta U_{\text{В}} - \left(\frac{\partial U_{\text{В}}}{\partial \omega} \right) \Delta \omega}{\left(\frac{\partial U_{\text{В}}}{\partial i_{\text{ВВ}}} \right)}.$$

Пренебрегая взаимоиндукцией обмотки возбуждения возбудителя с обмоткой якоря, переходные процессы в цепи возбуждения можно описать уравнением:

$$(T_{\text{ВВ}} p + 1) \Delta I_{\text{ВВ}} = \frac{1}{R_{\text{ВВ}}} \Delta U_{\text{ВВ}},$$

где $T_{\text{ВВ}} = \frac{L_{\text{ВВ}}}{R_{\text{ВВ}}}$ – постоянная времени цепи возбуждения возбудителя.

Расчет переходных процессов в якорной цепи возбудителя, подключенного через выпрямитель к активно-индуктивной нагрузке, достаточно сложен, поэтому в инженерной практике, как правило, переходят к расчету среднего значения выпрямленного тока в цепи нагрузки возбудителя по схеме, представляющей собой последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности, включенных на выпрямленное напряжение холостого хода ($U_{\text{ВГ}}$).

$$\Delta U_{\text{ВГ}} = K_{\text{ВЫП}} \Delta E_{\text{В}},$$

где $K_{\text{ВЫП}}$ – коэффициент выпрямления выпрямителя; $\Delta E_{\text{В}}$ – приращение фазной ЭДС возбудителя.

При принятом условии о пренебрежении переходными процессами в якорной цепи возбудителя, уравнение цепи можно записать в следующем виде:

$$\Delta E_{\text{В}} = K_{\text{ЕВ}} \Delta I_{\text{ВВ}},$$

где $K_{\text{ЕВ}} = \left(\frac{\partial E_{\text{В}}}{\partial I_{\text{ВВ}}} \right)_0$ – коэффициент линеаризации, определяемый по характеристике холостого хода возбудителя для рассматриваемого установившегося режима.

Переходные процессы в БСГ, в общем виде, описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с периодически изменяющимися коэффициентами, решение которых представляет достаточно сложную задачу.

На практике часто пользуются преобразованными уравнениями, записанными для фазовых величин относительно прямоугольной системы координат, жестко связанной с ротором БСГ (уравнения Горева – Парка), которые целесообразно использовать, когда учитывается инерционность якорной цепи генератора [1]. Но поскольку переходные процессы в цепи якоря протекают очень быстро, то инерционностью якорной цепи можно пренебречь, что облегчает задачу и переходные процессы в БСГ можно описать более простыми уравнениями.

БСГ имеет два звена: цепь обмотки возбуждения (ОВГ) и якорную цепь.

Если пренебречь взаимоиндукцией обмотки якоря и ОВГ то уравнение цепи ОВГ можно записать так:

$$(T_{\text{ВГ}} p + 1) \Delta I_{\text{ВГ}} = \frac{1}{R_{\text{ВГ}}} \Delta U_{\text{ВГ}},$$

где $T_{\text{ВГ}} = \frac{L_{\text{ВГ}}}{R_{\text{ВГ}}}$ – постоянная времени цепи ОВГ.

- Уравнение якорной цепи генератора составим при следующих допущениях:
- ротор БСГ вращается с постоянной скоростью;
 - нагрузка активно-индуктивная и симметрична (соединение параллельное);
 - активное сопротивление обмотки якоря не учитываем;
 - насыщение магнитной цепи не учитываем.

На основании векторной диаграммы [1], представленной на рис. 3, для любой фазы явнуполусного трехфазного БСГ:

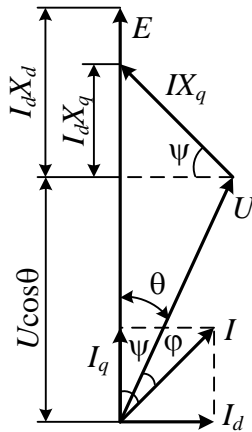


Рис. 3. Векторная диаграмма явнуполусного трехфазного БСГ с ненасыщенной магнитной системой

$$E = U \cos \theta + I_d X_d;$$

$$\cos \theta = \cos(\psi - \varphi) = \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi;$$

$$I_d = I \sin \psi.$$

Величины синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям X_d и X_q определяются на основании характеристик БСГ или методом скольжения [6].

Согласно [7] уравнение внешней характеристики БСГ

$$U = E \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{X_q}{X}\right)^2 + \left(\frac{X_q}{X}\right)^2}}{1 + \frac{X_q + X_d}{X} + \frac{X_q X_d}{R^2} \left[1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2\right]},$$

где R – активное, а X – реактивное сопротивления нагрузки; E – ЭДС холостого хода, а U – напряжение генератора.

Уравнению якорной цепи БСГ в отклонениях будет соответствовать выражение:

$$\Delta U = K_{\text{ЯГ}} \Delta I_{\text{ВГ}} + K_{\text{Н}} \Delta R,$$

где $K_{\text{ЯГ}}$ – коэффициент передачи якорной цепи генератора; $K_{\text{Н}}$ – коэффициент передачи нагрузки генератора.

Общее уравнение для якорной цепи возбудителя, выпрямительного моста и цепи ОВГ:

$$\Delta I_{\text{ВГ}} = \frac{K_{\text{ЕВ}} K_{\text{ВЫП}} \frac{1}{R_{\text{ВГ}}}}{T_{\text{ВГ}} p + 1} \Delta I_{\text{ВВ}}.$$

Исходя из полученных уравнений, согласно [8] запишем уравнение всей системы:

$$\left[T_{\text{ВВ}} T_{\text{ВГ}} T_{\text{ТРН}} p^3 + (T_{\text{ВВ}} T_{\text{ТРН}} + T_{\text{ВВ}} T_{\text{ВГ}} + T_{\text{ВГ}} T_{\text{ТРН}}) p^2 + (T_{\text{ВВ}} + T_{\text{ВГ}} + T_{\text{ТРН}}) p + 1 + k_{\text{ТРН}} k_{\text{ВВ}} K_{\text{ЕВ}} K_{\text{ВЫП}} k_{\text{ВГ}} k_{\text{ЯГ}} \right] U(p) = K_{\text{Н}} R(p) + k_{\text{ТРН}} k_{\text{ВВ}} K_{\text{ЕВ}} K_{\text{ВЫП}} k_{\text{ВГ}} k_{\text{ЯГ}} U_{\text{У}}(p) \quad (2)$$

или через передаточные функции

$$U(p) = W_R^U(p) R(p) + W_{U_{\text{У}}}^U(p) U_{\text{У}}(p), \quad (3)$$

где $W_R^U(p) = \frac{K_{\text{Н}}}{\Delta(p)}$ и $W_{U_{\text{У}}}^U(p) = \frac{k_{\text{ТРН}} k_{\text{ВВ}} K_{\text{ЕВ}} K_{\text{ВЫП}} k_{\text{ВГ}} k_{\text{ЯГ}}}{\Delta(p)}$ – передаточные функции ТРН соответственно по возмущению $R(p)$ и управлению $U_{\text{У}}(p)$; $\Delta(p)$ – характеристический полином.

Уравнению системы (2) соответствует, согласно [8,9], развернутая структурная схема, представленная на рис. 4, а уравнению (3) – свернутая структурная схема системы на рис. 5.

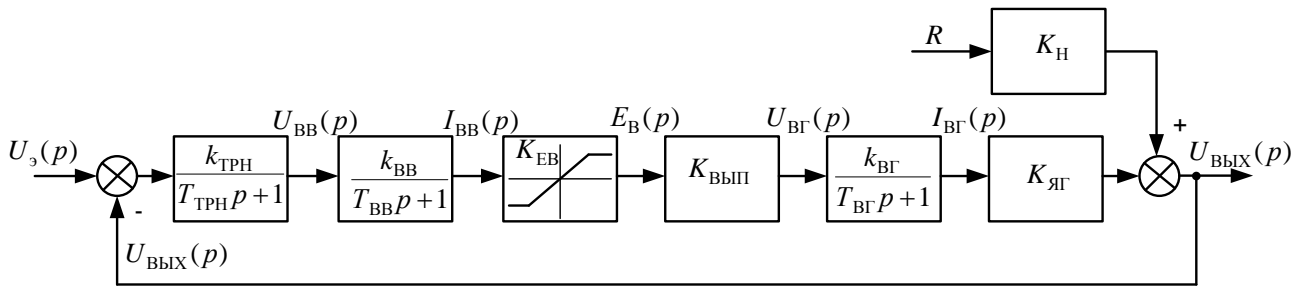


Рис. 4. Развернутая структурная схема системы автоматического регулирования БСГ с тиристорным регулятором

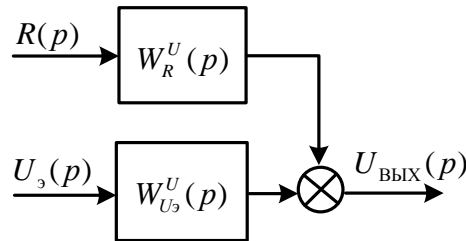


Рис. 5. Свернутая структурная схема САРН БСГ с ТРН

Точность регулирования характеризуется величиной статической ошибки. При малых отклонениях изменяемых величин статическая ошибка находится из уравнения системы (2) при $p = 0$:

$$\Delta U_{\infty} = \frac{K_H}{1 + K_{\Gamma} K_p} \Delta R, \quad (4)$$

где $K_{\Gamma} = K_{\text{ЕВ}} K_{\text{ВЫП}} \frac{1}{R_{\text{ВГ}}} K_{\text{ВГ}}$ – коэффициент передачи генератора как объекта регулирования; K_p – коэффициент передачи регулятора.

Из формулы (4) следует, что при прочих равных условиях ΔU_{∞} тем меньше, чем больше величина K_p . При $K_p \rightarrow \infty$ $\Delta U_{\infty} \rightarrow 0$.

Для любого режима работы БСГ величина K_p должна быть такой, чтобы статическая ошибка не выходила за допустимые пределы [3].

Проверку системы на устойчивость обычно производят, анализируя характеристическое уравнение системы [10, 11]. Приравняв правую часть уравнения (2) нулю и произведя несложные преобразования, получим характеристическое уравнение вида:

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (5)$$

где a_3, a_2, a_1, a_0 – коэффициенты характеристического уравнения; $a_3 = T_{\text{ВВ}} T_{\text{ВГ}} T_{\text{ТРН}}$; $a_2 = T_{\text{ВВ}} T_{\text{ТРН}} + T_{\text{ВВ}} T_{\text{ВГ}} + T_{\text{ВГ}} T_{\text{ТРН}}$; $a_1 = T_{\text{ВВ}} + T_{\text{ВГ}} + T_{\text{ТРН}}$; $a_0 = 1 + k_{\text{ТРН}} k_{\text{ВВ}} K_{\text{ЕВ}} K_{\text{ВЫП}} k_{\text{ВГ}} k_{\text{ЯГ}}$.

Условием устойчивости по Гурвицу является положительность определителя

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_2 a_0 \\ a_3 a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_3 a_0 > 0. \quad (6)$$

Задавшись конкретными условиями, можно на основании неравенства (6) проверить систему на устойчивость.

Выводы

Основными показателями, характеризующими качество переходного процесса регулирования напряжения БСГ, являются время регулирования и величина перерегулирования.

Наиболее точно время регулирования и величину перерегулирования можно определить по кривой переходного процесса, получаемой при решении уравнения движения систе-

мы (2). Приближенно качество переходного процесса и время регулирования можно оценить непосредственно по коэффициентам характеристического уравнения третьего порядка (5) на основании диаграммы Д.А. Браславского [12] или используя нормированную диаграмму И.А. Вышнеградского, а учитывая требования ГОСТ 19705-89, как показано в [11] мы можем получить количественную оценку, необходимую для проверки соответствия работы системы требованиям [3], согласованным с требованиями ИСАО.

Список литературы

1. Синдеев И. М., Савелов А. А. Системы электроснабжения воздушных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 296 с.
2. ГОСТ 19705–81. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Изд.станд., 1981. – 45 с.
3. ГОСТ 19705–89. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Изд.станд., 1989. – 45 с.
4. ГОСТ Р 54073–2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. Национальный стандарт Российской Федерации. Разработан ФГУП НИИСУ, ФГУП «НИИАО». Введен 2011–01–01.
5. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
6. Алюшин Г. Н. Авиационные электрические машины переменного тока. Часть II. Синхронные машины. – К.: КВИАВУ ВВС, 1965. – 320 с.
7. Красношапка М. М., Евсеев П. П., Овечкин В. А., Ставровский Б.А. Электроэнергетические системы летательных аппаратов. – К.: КВИАВУ ВВС, 1969. – 432 с.
8. Теория автоматического управления /Под ред. А.А.Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
9. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 616 с.
10. Захарченко В.П., Воробйов В.М., Кічигін А.А. Оцінка якості функціонування бортових динамічних систем за перехідними характеристиками // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2003. – Т. 9. – С. 149–157.
11. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. – К.: КМУГА, 1984. – 36 с.
12. Браславский Д.А. Оценка времени регулирования по коэффициентам характеристического уравнения // Труды МАИ, Выпуск 75. – М.: Оборонгиз, 1957.