

УДК 621.311.001.57

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ КАНАЛА БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ю.П. АРТЁМЕНКО, А.Г. ДЕМЧЕНКО

Статья представлена доктором технических наук, профессором Кузнецовым С.В.

Данная статья посвящена математическому моделированию канала бортовой системы электроснабжения (СЭС) переменного тока. Рассматривается математическое моделирование генератора, регулятора напряжения, привода постоянной частоты вращения.

Ключевые слова: математическое моделирование, бортовая система электроснабжения, генератор, регулятор напряжения.

Электромагнитные и электромеханические процессы, возникающие в электроэнергетических системах, достаточно подробно изложены в [1].

На основании ранее полученных результатов моделирования самолетных электроэнергетических систем в [2; 3; 4] в статье рассматривается дальнейшее совершенствование модели канала бортовой СЭС переменного тока. Детально рассматриваются и реализуются в приложении SIMULINK пакета MATLAB математические модели регулятора напряжения, привода постоянной частоты вращения, трехфазной статической нагрузки (несимметричной в том числе) в составе канала бортовой СЭС переменного тока. В отличие от работы [2], где в качестве моделей регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения использовались модели из библиотеки SimPowerSystems пакета MATLAB, в статье рассматриваются модели регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения, устанавливаемых на современных воздушных судах. С помощью приложения SIMULINK пакета MATLAB моделируется режим коммутации трёхфазной статической нагрузки.

Структура канала бортовой СЭС переменного тока

При моделировании канала бортовой СЭС переменного тока за основу была взята типовая структурная схема канала бортовой СЭС среднемагистрального самолёта (рис. 1).

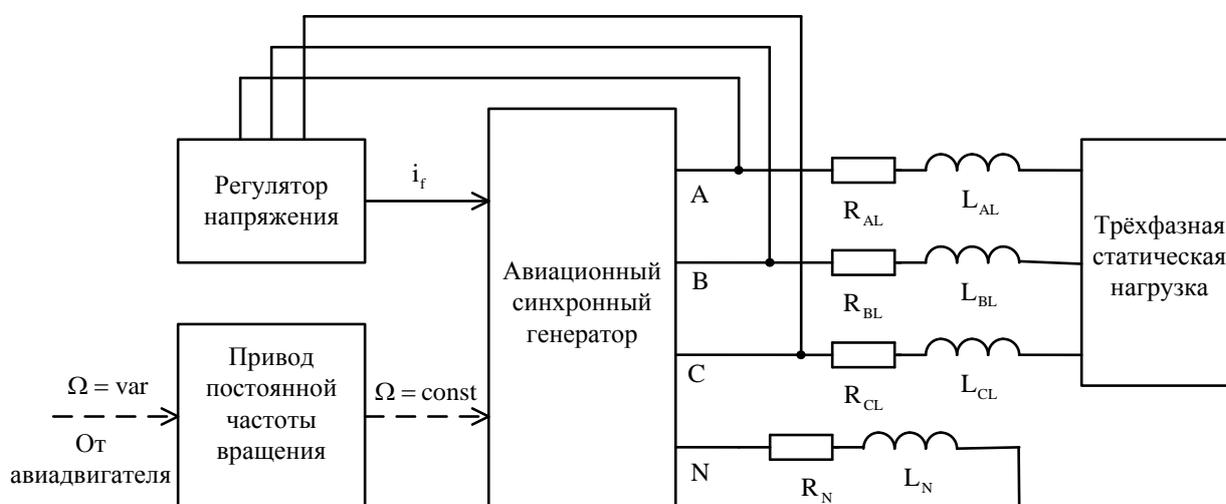


Рис. 1. Структурная схема канала бортовой СЭС переменного тока

На схеме канала бортовой СЭС (рис. 1) обозначены следующие элементы: R_{AL}, R_{BL}, R_{CL} – активные сопротивления соединительных проводов фаз А, В, С; L_{AL}, L_{BL}, L_{CL} – индуктивности соединительных проводов фаз А, В, С; R_N, L_N – активное сопротивление и индуктивность нейтрального провода генератора.

Модель синхронного генератора

Для получения моделей регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения в математической модели генератора необходимо рассмотреть модели электрической и механической частей.

Математическая модель механической части генератора описывается уравнением, учитывающим динамику вращательного движения ротора

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = M_{DR}(t) - M_{EL}(t) - M_L(t), \quad (1)$$

где J – момент инерции ротора генератора; $\Omega(t)$ – скорость вращения ротора; $M_{DR}(t)$ – момент на валу генератора, развиваемый приводом постоянной частоты вращения; $M_{EL}(t)$ – электромагнитный момент на валу генератора; $M_L(t)$ – момент сопротивления на валу генератора.

Электромагнитный момент генератора определяется как

$$M_{EL}(t) = \frac{dW_M(t)}{d\Theta_R(t)}, \quad (2)$$

где $W_M(t)$ – энергия магнитного поля обмоток и контуров генератора; $\Theta_R(t)$ – угол поворота ротора генератора.

Энергия магнитного поля обмоток и контуров генератора определяется как

$$W_M(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k i_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq k}}^n L_{ks} i_k(t) i_s(t), \quad (3)$$

где L_k – индуктивность k -й обмотки (контура) генератора; L_{ks} – взаимная индуктивность между k -й и s -й обмотками (контурами) генератора; i_k – ток k -й обмотки (контура) генератора; i_s – ток s -й обмотки (контура) генератора.

Преобразуем выражение (3)

$$\begin{aligned} W_M(t) = & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k i_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{s=1, \\ k \neq s}}^n L_{ks} i_k(t) i_s(t) = \frac{L_A i_A^2(t)}{2} + \frac{L_B i_B^2(t)}{2} + \frac{L_C i_C^2(t)}{2} + \frac{L_f i_f^2(t)}{2} + \\ & + \frac{L_{rd} i_{rd}^2(t)}{2} + \frac{L_{rq} i_{rq}^2(t)}{2} + \frac{M_{AB} i_A(t) i_B(t)}{2} + \frac{M_{BC} i_B(t) i_C(t)}{2} + \frac{M_{AC} i_A(t) i_C(t)}{2} + \frac{M_{BA} i_A(t) i_B(t)}{2} + \\ & + \frac{M_{CB} i_B(t) i_C(t)}{2} + \frac{M_{CA} i_A(t) i_C(t)}{2} + \frac{M_{Af} i_A(t) i_f(t)}{2} + \frac{M_{Bf} i_B(t) i_f(t)}{2} + \frac{M_{Cf} i_C(t) i_f(t)}{2} + \\ & + \frac{M_{Af} i_A(t) i_f(t)}{2} + \frac{M_{Bf} i_B(t) i_f(t)}{2} + \frac{M_{Cf} i_C(t) i_f(t)}{2} + \frac{M_{Ard} i_A(t) i_{rd}(t)}{2} + \frac{M_{Brd} i_B(t) i_{rd}(t)}{2} + \\ & + \frac{M_{Crd} i_C(t) i_{rd}(t)}{2} + \frac{M_{Ard} i_A(t) i_{rd}(t)}{2} + \frac{M_{Brd} i_B(t) i_{rd}(t)}{2} + \frac{M_{Crd} i_C(t) i_{rd}(t)}{2} + \frac{M_{Arq} i_A(t) i_{rq}(t)}{2} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{M_{Brq} i_B(t) i_{rq}(t)}{2} + \frac{M_{Crq} i_C(t) i_{rq}(t)}{2} + \frac{M_{Arq} i_A(t) i_{rq}(t)}{2} + \frac{M_{Brq} i_B(t) i_{rq}(t)}{2} + \frac{M_{Crq} i_C(t) i_{rq}(t)}{2} + \\
& + \frac{M_{frd} i_f(t) i_{rd}(t)}{2} + \frac{M_{frd} i_f(t) i_{rd}(t)}{2},
\end{aligned}$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения фазных токов синхронного генератора; $i_f(t)$, $i_{rd}(t)$, $i_{rq}(t)$ – мгновенные значения токов цепей ротора синхронного генератора; L_A , L_B , L_C – индуктивности фаз обмотки статора генератора; M_{AB} , M_{BC} , M_{AC} – взаимные индуктивности фаз обмотки статора генератора; M_{Af} , M_{Bf} , M_{Cf} , M_{Ard} , M_{Brd} , M_{Crd} , M_{Arq} , M_{Brq} , M_{Crq} – взаимные индуктивности обмотки статора и контуров ротора; L_f , L_{rd} , L_{rq} – индуктивности роторных цепей генератора; M_{frd} – взаимная индуктивность обмотки возбуждения и продольного демпферного контура.

Момент сопротивления на валу ротора генератора в общем случае может быть представлен в виде суммы двух составляющих

$$M_L(t) = M_{L1}(t) + M_{L2}(t) = M_0 + K_{G1} \cdot \Omega(t), \quad (4)$$

где $M_{L1}(t) = M_0$ – момент сухого трения, не зависящая от времени величина; $M_{L2}(t) = K_{G1} \cdot \Omega(t)$ – момент вязкого трения, пропорциональный скорости вращения ротора; K_{G1} – коэффициент пропорциональности.

Подставляя значение $M_L(t)$ из выражения (4) в уравнение (1), получаем

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = M_{DR}(t) - M_{EL}(t) - M_0 - K_{G1} \cdot \Omega(t). \quad (5)$$

Применяя к уравнению (5) преобразование Лапласа, получаем

$$pJ\Omega(p) = M_{DR}(p) - M_{EL}(p) - \frac{M_0}{p} - K_{G1} \cdot \Omega(p), \quad (6)$$

где $\Omega(p)$ – скорость вращения ротора, выраженная в преобразовании Лапласа; $M_{DR}(p)$ – момент на валу генератора, развиваемый приводом постоянной частоты вращения, выраженный в преобразовании Лапласа; $M_{EL}(p)$ – электромагнитный момент на валу генератора, выраженный в преобразовании Лапласа.

Выполняя далее необходимые преобразования, получаем математическую модель механической части генератора

$$(pJ + K_{G1})\Omega(p) = M_{DR}(p) - M_{EL}(p) - \frac{M_0}{p}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведена структурная схема, соответствующая математической модели механической части генератора.

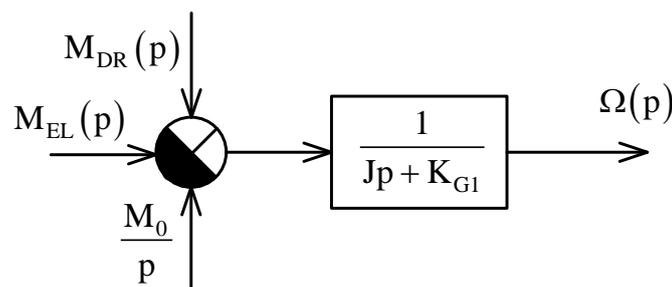


Рис. 2. Структурная схема механической части генератора

При реализации математической модели электрической части генератора использовались результаты, полученные в работе [4].

Математическая модель электрической части генератора описывается системой матричных уравнений

$$\begin{cases} [u_s] = -p[\psi_s] - [r_s] \cdot [i_s] \\ [u_r] = p[\psi_r] + [r_r] \cdot [i_r] \\ [\psi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [L_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\psi_r] = [L_{rs}] \cdot [i_s] + [L_{rr}] \cdot [i_r] \end{cases}, \quad (8)$$

где $[u_s] = \begin{bmatrix} U_A(p) \\ U_B(p) \\ U_C(p) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец фазных напряжений синхронного генератора, выраженных

в преобразовании Лапласа;

$[u_r] = \begin{bmatrix} U_f(p) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор-столбец напряжений цепей ротора синхронного генератора, выра-

женных в преобразовании Лапласа;

$[\psi_s] = \begin{bmatrix} \Psi_A(p) \\ \Psi_B(p) \\ \Psi_C(p) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец потокосцеплений фаз обмотки статора синхронного гене-

ратора, выраженных в преобразовании Лапласа;

$[\psi_r] = \begin{bmatrix} \Psi_f(p) \\ \Psi_{rd}(p) \\ \Psi_{rq}(p) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец потокосцеплений контуров ротора синхронного генера-

тора, выраженных в преобразовании Лапласа;

$[i_s] = \begin{bmatrix} I_A(p) \\ I_B(p) \\ I_C(p) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец фазных токов синхронного генератора, выраженных в пре-

образовании Лапласа;

$[i_r] = \begin{bmatrix} I_f(p) \\ I_{rd}(p) \\ I_{rq}(p) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец токов роторных цепей синхронного генератора, выражен-

ных в преобразовании Лапласа;

$[r_s] = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix}$ – матрица активных сопротивлений фаз обмотки статора;

$$[r_R] = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_{rd} & 0 \\ 0 & 0 & r_{rq} \end{bmatrix} \text{ – матрица активных сопротивлений цепей ротора;}$$

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{AB} & L_B & M_{BC} \\ M_{AC} & M_{BC} & L_C \end{bmatrix} \text{ – матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток}$$

статора, являющихся периодическими функциями времени;

$$[L_{SR}] = \begin{bmatrix} M_{Af} & M_{Ard} & M_{Arq} \\ M_{Bf} & M_{Brd} & M_{Brq} \\ M_{Cf} & M_{Crd} & M_{Crq} \end{bmatrix} \text{ – матрица взаимных индуктивностей обмотки статора и цепей}$$

ротора, являющихся периодическими функциями времени;

$$[L_{RS}] = [L_{SR}]^T = \begin{bmatrix} M_{Af} & M_{Bf} & M_{Cf} \\ M_{Ard} & M_{Brd} & M_{Crd} \\ M_{Arq} & M_{Brq} & M_{Crq} \end{bmatrix} \text{ – транспонированная матрица } [L_{SR}];$$

$$[L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{frd} & 0 \\ M_{frd} & L_{rd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{rq} \end{bmatrix} \text{ – матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей цепей ро-}$$

тора, не зависящих от времени.

Моделирование трёхфазной статической нагрузки

При моделировании трёхфазной статической нагрузки использовалась математическая модель трёхфазной статической активно-индуктивной нагрузки, полученная в работе [4]

$$[U_H] = [Z_H] \cdot [I_S], \quad (9)$$

$$\text{где } [Z_H] = \begin{bmatrix} Z_{AH}(p) & 0 & 0 \\ 0 & Z_{BH}(p) & 0 \\ 0 & 0 & Z_{CH}(p) \end{bmatrix} \text{ – матрица операторных сопротивлений нагрузки;}$$

$$[U_H] = \begin{bmatrix} U_{AH}(p) \\ U_{BH}(p) \\ U_{CH}(p) \end{bmatrix} \text{ – вектор-столбец фазных напряжений на нагрузке.}$$

Моделирование системы распределения бортовой СЭС

При моделировании системы распределения бортовой СЭС переменного тока использовалась математическая модель системы распределения, полученная в работе [4]

$$[U_L] = [Z_L] \cdot [I_S], \quad (10)$$

где $[Z_L] = \begin{bmatrix} Z_{AL}(p) & 0 & 0 \\ 0 & Z_{BL}(p) & 0 \\ 0 & 0 & Z_{CL}(p) \end{bmatrix}$ – матрица операторных сопротивлений проводов;

$[U_L] = \begin{bmatrix} U_{AL}(p) \\ U_{BL}(p) \\ U_{CL}(p) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец падений напряжений на соединительных проводах.

Моделирование регулятора напряжения

При получении математической модели регулятора напряжения использовались материалы работы [2]. Математическая модель регулятора напряжения описывается уравнением, учитывающим наличие в реальных регуляторах цепи параллельной коррекции, образованной путем охвата усилителя регулятора гибкой обратной связью по току возбуждения возбудителя

$$u_{BB}(t) = K_{R1} \cdot (u_P(t) - u_0) - K_{R2} \frac{di_{BB}(t)}{dt}, \quad (11)$$

где $u_{BB}(t)$ – напряжение возбуждения возбудителя; $i_{BB}(t)$ – ток обмотки возбуждения возбудителя; u_0 – уставка регулятора напряжения; $u_P(t) = \frac{|u_A(t)| + |u_B(t)| + |u_C(t)|}{3}$ – напряжение на выходе измерительного органа регулятора напряжения; $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ – мгновенные значения напряжений фаз генератора; K_{R1} – коэффициент усиления регулятора по приращению напряжения; K_{R2} – коэффициент обратной связи по производной тока возбуждения возбудителя $i_{BB}(t)$.

Применяя к уравнению (11) преобразование Лапласа, получаем

$$U_{BB}(p) = K_{R1} \cdot \left(U_P(p) - \frac{u_0}{p} \right) - K_{R2} p I_{BB}(p), \quad (12)$$

где $U_{BB}(p)$ – напряжение возбуждения возбудителя, выраженное в преобразовании Лапласа; $I_{BB}(p)$ – ток обмотки возбуждения возбудителя, выраженный в преобразовании Лапласа; $U_P(p)$ – напряжение на выходе измерительного органа регулятора напряжения, выраженное в преобразовании Лапласа.

Уравнение цепи возбуждения возбудителя генератора

$$u_{BB}(t) = R_{BB} \cdot i_{BB}(t) + L_{BB} \frac{di_{BB}(t)}{dt}, \quad (13)$$

где R_{BB} – активное сопротивление обмотки возбуждения возбудителя; L_{BB} – индуктивность обмотки возбуждения возбудителя.

Применяя к уравнению (13) преобразование Лапласа, получаем

$$U_{BB}(p) = R_{BB} \cdot I_{BB}(p) + L_{BB} p I_{BB}(p). \quad (14)$$

Уравнение, связывающее напряжение возбуждения генератора с током возбуждения возбудителя

$$u_f(t) = K_B \cdot i_{BB}(t), \quad (15)$$

где $u_f(t)$ – напряжение возбуждения генератора; K_B – коэффициент пропорциональности.

Применяя к уравнению (15) преобразование Лапласа, получаем

$$U_f(p) = K_B \cdot I_{BB}(p), \quad (16)$$

где $U_f(p)$ – напряжение возбуждения генератора, выраженное в преобразовании Лапласа.

В результате совместного решения уравнений (12), (14) и (16) получим

$$pI_{BB}(p) = \frac{1}{K_{R2} + L_{BB}} \left[K_{R1} \cdot \left(U_P(p) - \frac{u_0}{p} \right) - R_{BB} \cdot I_{BB}(p) \right]. \quad (17)$$

Выполняя далее необходимые преобразования, получаем математическую модель регулятора напряжения

$$pU_f(p) = \frac{K_B}{K_{R2} + L_{BB}} \left[K_{R1} \cdot \left(U_P(p) - \frac{u_0}{p} \right) - \frac{R_{BB}}{K_B} \cdot U_f(p) \right]. \quad (18)$$

Моделирование привода постоянной частоты вращения

Математическая модель привода постоянной частоты вращения должна связывать изменение скорости вращения ротора генератора с моментом, создаваемым приводом.

Математическая модель гидромеханического привода постоянной частоты вращения может быть представлена ПИ-регулятором

$$M_{DR}(t) = K_{D1} \cdot (\Omega_n - \Omega(t)) + K_{D2} \int (\Omega_n - \Omega(t)) dt, \quad (19)$$

где K_{D1} , K_{D2} – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих привода;

Ω_n – номинальная скорость вращения ротора.

Применяя к уравнению (19) преобразование Лапласа, получаем

$$M_{DR}(p) = \left(K_{D1} + \frac{K_{D2}}{p} \right) \cdot \left(\frac{\Omega_n}{p} - \Omega(p) \right). \quad (20)$$

Рассматривая совместно математическую модель механической части генератора (7) и математическую модель привода постоянной частоты вращения (20), получим структурную схему (рис. 3).

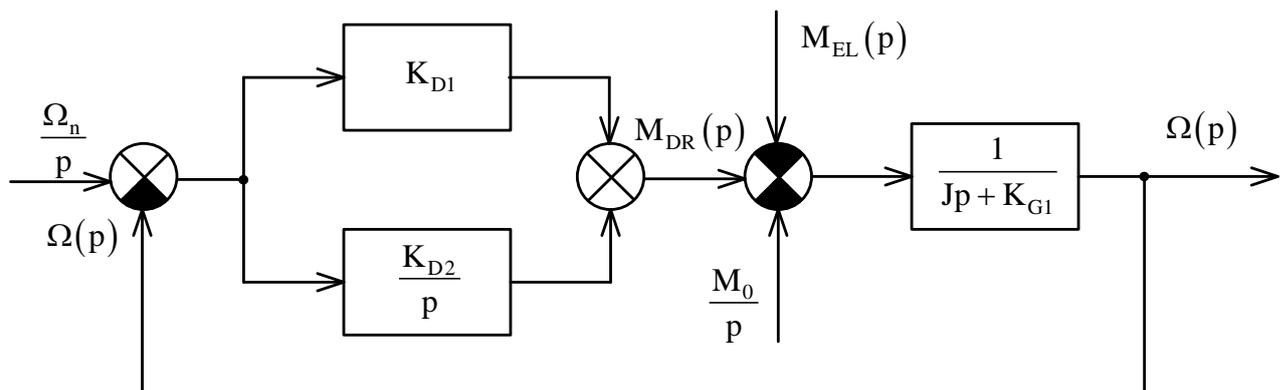


Рис. 3. Структурная схема математической модели механической части генератора совместно с математической моделью привода

Моделирование переходных режимов

Используя разработанные математические модели регулятора напряжения, привода постоянной частоты вращения, генератора, системы распределения, трёхфазной статической нагрузки, в приложении SIMULINK математического пакета MATLAB были смоделированы переходные режимы коммутации номинальной трёхфазной статической нагрузки.

На рис. 4 представлены переходные процессы, демонстрирующие работу привода постоянной частоты вращения и показывающие взаимосвязь процессов регулирования напряжения и частоты. В момент времени 1 с, происходит включение номинальной трёхфазной статической нагрузки, при этом напряжение генератора вначале «просаживается», а затем его стабилизирует регулятор напряжения путем увеличения тока возбуждения возбудителя. Время переходного процесса по напряжению при включении нагрузки составляет $t_p \approx 0,05$ с. Как видно из переходного процесса по частоте, при включении нагрузки в момент времени 1 с частота вначале резко снижается из-за возникшего электромагнитного момента генератора, а затем привод постоянной частоты вращения её стабилизирует путем изменения угла положения наклонной шайбы гидромашины с соответствующим увеличением момента привода на валу генератора. В момент времени 2 с происходит отключение нагрузки, при этом напряжение генератора вначале резко возрастает, а затем его стабилизирует регулятор напряжения путем уменьшения тока возбуждения возбудителя, частота вначале резко возрастает, а затем ее стабилизирует привод постоянной частоты вращения путем изменения угла положения наклонной шайбы гидромашины с соответствующим уменьшением момента привода на валу генератора. Время переходного процесса по напряжению при отключении нагрузки составляет $t_p \approx 0,07$ с. Время переходных процессов по частоте при включении и отключении нагрузки составляет $t_p \approx 0,5$ с.

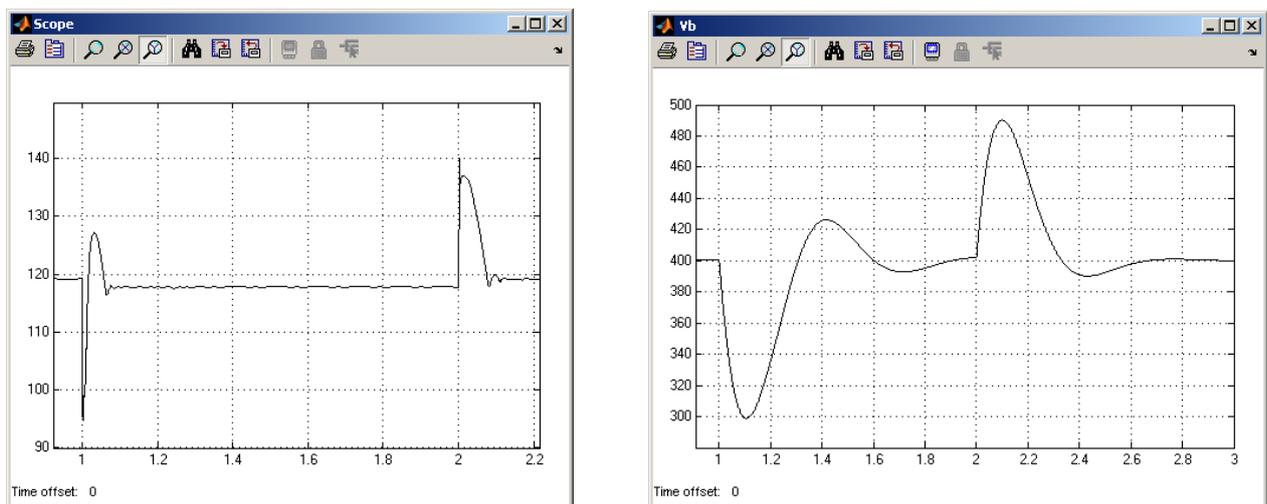


Рис. 4. Переходные процессы по действующему значению напряжения фазы «А» и частоте

По итогам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. На основании материалов работы [4] в данной работе была рассмотрена математическая модель канала генерирования бортовой СЭС переменного тока. В составе канала были рассмотрены математическая модель синхронного генератора, математическая модель регулятора напряжения, математическая модель привода постоянной частоты вращения, математическая модель трёхфазной статической нагрузки.

2. В отличие от работы [2], где в качестве моделей регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения использовались модели из библиотеки SimPowerSystems пакета MATLAB, в настоящей работе были рассмотрены модели регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения, устанавливаемых на современных воздушных судах.

3. В работе была использована математическая модель трёхфазной статической нагрузки в фазных координатах «ABC», которая в отличие от модели в координатах «dq0» [2] позволяет описывать процессы как в симметричных, так и в несимметричных режимах.

4. С помощью приложения SIMULINK математического пакета MATLAB были смоделированы режимы коммутации статической нагрузки, и рассмотрена взаимосвязь процессов регу-

лирования напряжения и частоты.

5. Рассмотренная в работе модель канала генерирования имеет ряд направлений для дальнейшего совершенствования: рассмотрения математической модели асинхронного двигателя, рассмотрения математической модели вентильного двигателя, рассмотрения математической модели нелинейной выпрямительной нагрузки, рассмотрение математических моделей элементов СЭС постоянного тока. Получение математических моделей всех элементов, входящих в состав СЭС, позволит детально рассмотреть работу СЭС в различных режимах. В связи с этим появляется возможность контролировать поведение СЭС при любом ненормальном режиме, тем самым значительно снижая вероятность возникновения аварийных ситуаций в полете. Как следствие, это приводит к значительному повышению уровня безопасности полетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веретенников Л.П.** *Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах*. Л.: Судостроение, 1975.
2. **Демченко А.Г., Артёмов Ю.П.** Моделирование параллельной работы бортовой системы электроснабжения переменного тока в пакете MATLAB // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2012. № 185. С. 55-60.
3. **Демченко А.Г.** Моделирование элементов бортовых систем электроснабжения в программной среде MATLAB / *Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2012»: сб. тезисов докладов*. М.: ООО «Принт-салон». 2012. С. 13-14.
4. **Демченко А.Г.** Модель канала бортовой системы электроснабжения переменного тока // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2014. № 201. С. 74-85.

IMPROVING MODEL OF CHANNEL AIRBORN ELECTRICAL POWER SYSTEM OF ALTERNATING CURRENT

Artemenko Yu.P., Demchenko A.G.

This article is devoted to math modeling of channel of alternating current airborne electrical power-supply system. Mathematical modeling of generator, voltage regulator, constant speed drive is considered.

Keywords: mathematical modeling, airborne electrical power-supply system, generator, voltage regulator.

REFERENCES

1. **Veretennikov L.P.** *Issledovaniye protsessov v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh*. L.: Sudostroyeniye. 1975. (In Russian).
2. **Demchenko A.G., Artemenko Yu.P.** Modelirovaniye parallel'noy raboty bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka v pakete MATLAB. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2012. № 185. Pp. 55-60. (In Russian).
3. **Demchenko A.G.** Modelirovaniye elementov bortovykh sistem elektrosnabzheniya v programmnoy srede MATLAB. *Moskovskaya molodozhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsii v aviatsii i kosmonavtike - 2012»: sb. tezisov dokladov*. M.: ООО «Print-salon». 2012. Pp. 13-14. (In Russian).
4. **Demchenko A.G.** Model' kanala bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2014. № 201. Pp. 74-85. (In Russian).

Сведения об авторах

Артёмов Юрий Петрович, 1954 г.р., окончил МИИГА (1977), кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и авиационного электрооборудования МГТУ ГА, заведующий кафедрой электротехники и авиационного электрооборудования МГТУ ГА, автор более 50 научных работ, область научных интересов – моделирование авиационных электросистем.

Демченко Алексей Геннадьевич, 1987 г.р., окончил МГТУ ГА (2009), старший преподаватель кафедры технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов МГТУ ГА, автор более 10 научных работ, область научных интересов – эксплуатация воздушного транспорта, моделирование электроэнергетических систем.