

В. С. Т а р а с о в, А. А. Л и з у н о в

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
С КОМПЛЕКСОМ АППАРАТУРЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ**

Приведено моделирование динамических режимов работы системы генерирования электроэнергии с комплексом аппаратуры регулирования и контроля.

E-mail: vpk@npomash.ru

Ключевые слова: космический аппарат, система генерирования электроэнергии, аппаратура регулирования и контроля, моделирование.

Освоение и исследование космоса требуют постоянного развития и совершенствования космических аппаратов (КА) и систем, в том числе системы генерирования электроэнергии (СГЭ). Во многом выполнение полетной программы КА зависит от надежности и эффективности работы СГЭ. Один из важнейших этапов создания нового КА — его компоновка и разработка [1, 2].

Система генерирования энергии с комплексом аппаратуры регулирования и контроля (АРК) представляет собой нелинейную импульсную систему, исследование которой на устойчивость и качество переходных процессов аналитическими методами представляется очень трудоемкой задачей. В связи с этим наиболее целесообразным в настоящее время методом исследования динамических режимов таких систем является метод моделирования [3].

Принципиальная электрическая схема СГЭ с комплексом АРК, работающая на импульсную активно-емкостную нагрузку в режиме разряда аккумуляторной батареи приведена на рис. 1

На рис. 1 показаны: первичный источник — солнечная батарея БС; вторичный источник — аккумуляторная батарея АБ; дроссель — L ; задающий генератор — ЗГ, вольтодобавочное устройство, состоящее из мостового инвертора ИЗ, трансформатора $T1$ и диодов $VD1, VD2$.

Дроссель L и вольтодобавочное устройство входят в состав комплекса АРК. Кроме того, в состав комплекса входят корректирующий контур, состоящий из трансформатора $T2$ конденсатора C' и резистора R' , управляющее устройство, состоящее из двух инверторов И1 и И2, один из которых (И1) включен параллельно шинам АРК, а другой — через корректирующий контур и выходной фильтр АРК C_A .

Параметры этих элементов следующие: индуктивность $L = 3$ мкГн, $k_1 = 0,7$ и $k_2 = 4$ — коэффициенты трансформации трансформаторов

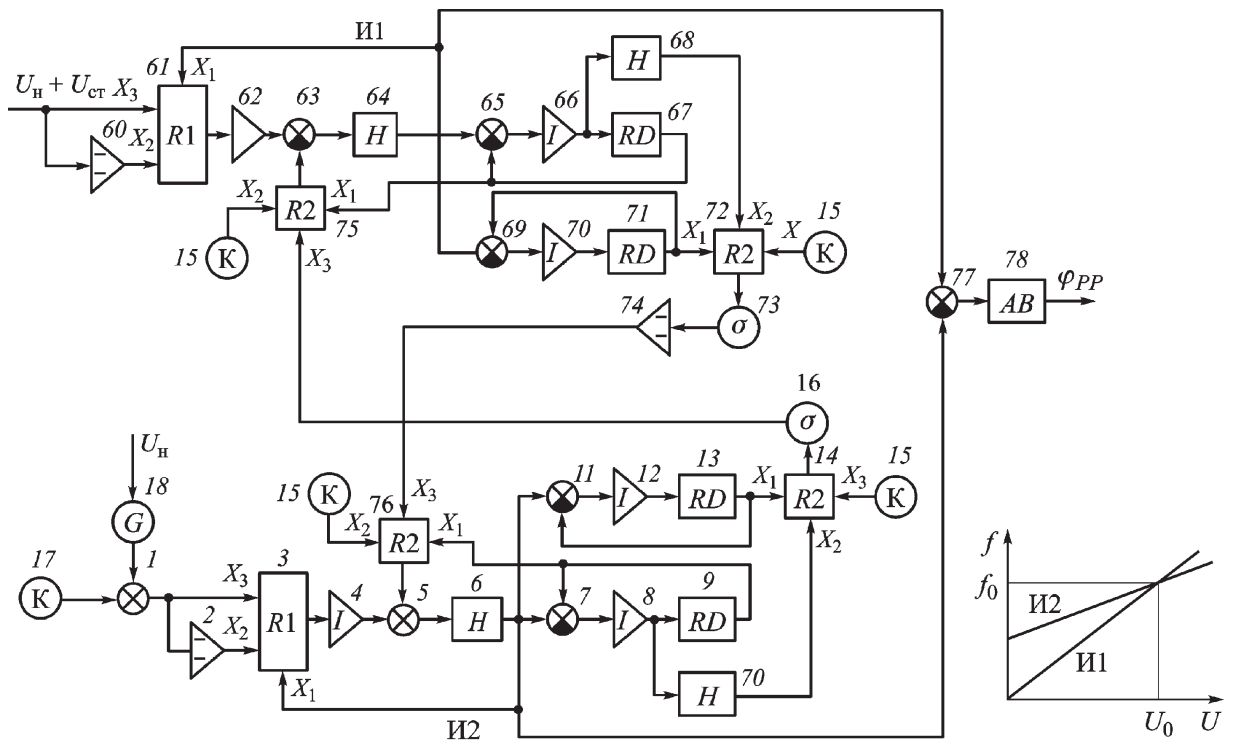


Рис. 2. Схема моделирования управляющего устройства СГЭ

Для моделирования силовой части СГЭ запишем следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{б.с} + I_{а.б} = I'; \\ I' = I_{C_A} + I_{ш}; \\ I_{ш} = I_{C_H} + I_H; \\ U_A = I_{C_A} R_{C_A} + \frac{1}{C_{C_A}} \int I_{C_A} dt = U_{а.б} - I_{а.б} R_{\Sigma} - L \frac{dI_{а.б}}{dt}; \\ U_A = L_{ш} \frac{dI_{ш}}{dt} + I_{ш} R_{ш} + U_H; \\ U_H = I_{C_H} R_{C_H} + \frac{1}{C_H} \int I_{C_H} dt = I_H R_H \end{array} \right.$$

Моделирование силовой части СГЭ осуществлялось на основе данной системы уравнений в программной среде MathLab. Схема моделирования представлена на рис. 3.

С помощью блока 81 задается ток первичного источника $I_{б.с}$. В блоке 82 осуществляется операция $I_{C_A} = I_{б.с} + I_{а.б} - I_{ш}$. С помощью блока 83 задается величина, обратная емкости C_A . Блок 96 осуществляет операцию интегрирования $U_{C_A} = \int (I_{C_A}/C_A) dt$. Блоком 97 задается сопротивление R_{C_A} . На выходе блока 84 получаем $U_A = I_{C_A} R_{C_A} + \int (I_{C_A}/C_{C_A}) dt$. В блоке 89 осуществляется операция $I_{C_H} = I_{ш} - I_H$. С помощью блока 90 задается величина, обратная емкости C_H . С помощью блоков 122 и 123 задается сопротивление R_{C_H} . В блоке 121 осуществляется операция $U_{C_H} = \int (I_{C_H}/C_H) dt$. На выходе

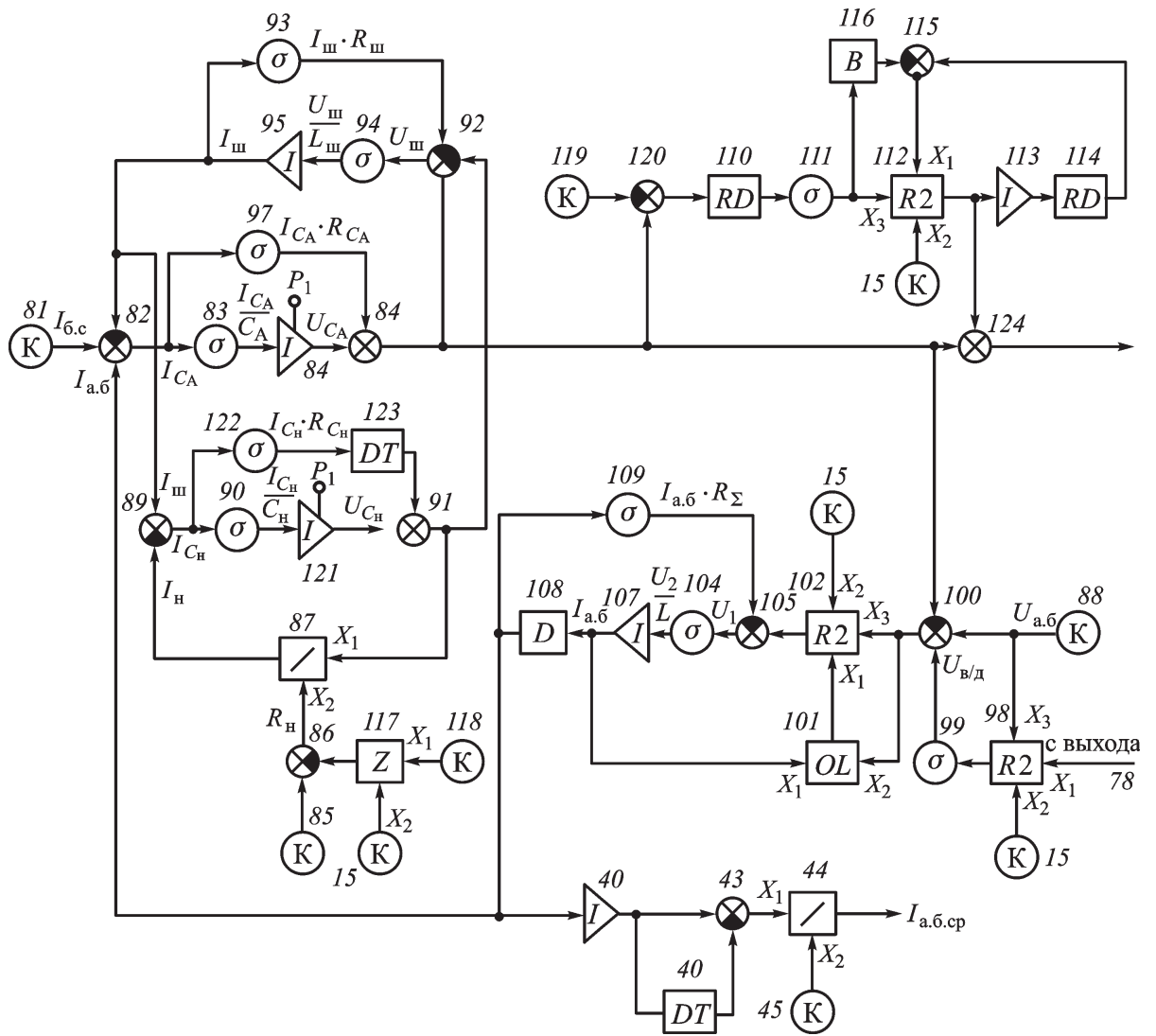


Рис. 3. Схема моделирования силовой части СГЭ

блока 91 получаем: $U_H = I_{C_H} R_{C_H} + \int (I_{C_H} / C_H) dt$. С помощью блоков 87, 86, 85, 117, 118, 15 моделируется импульсная нагрузка с определенной частотой, скважностью и амплитудой. В блоке 92 осуществляется операция $U_{ш} = U_A - U_H - I_{ш} R_{ш}$. С помощью блока 94 задается величина, обратная $L_{ш}$, и на выходе блока 95: $I_{ш} = \int (U_{ш} / L_{ш}) dt$. С помощью блока 93 задается сопротивление $R_{ш}$. С помощью блоков 110–116, 119, 120 моделируется работа корректирующего контура с учетом насыщения трансформатора T_2 . С помощью блока 88 задается напряжение аккумуляторной батареи. Блок 98 выполняет роль инвертора ИЗ. С помощью блока 99 задается коэффициент трансформации трансформатора T_1 , а блоки 15, 101, 102, 108 моделируют работу диодов VD_1, VD_2 . На выходе блока 103 получаем величину $U_L = U_{a.б} + U_{в/д} - U_A - I_{a.б} R_{\Sigma}$. В блоке 104 задается величина, обратная индуктивности дросселя, а в блоке 107 осуществляется операция интегрирования $I_{a.б} = \int (U_L / L) dt$. С помощью блока 109 задается сопротивление R_{Σ} . Блоки 40, 42, 43, 44 и 45 моделируют фильтр сред-

них значений, на выходе блока 44 получаем величину I_{ABcp} за период коммутации инверторов И1 и И2.

Следует отметить, что все параметры заданы с учетом того, что система состоит из четырех одинаковых подсистем.

Соединив соответствующим образом модель управляющего устройства и модель силовой части, получим общую модель СГЭ, работающую на импульсно-емкостную нагрузку в режиме разряда АБ.

На рис. 4 приведены осциллограммы токов нагрузки, шины и одной АБ, ее напряжений на выходе АРК и нагрузки, построенные с помощью модели СГЭ, а на рис. 5 — те же осциллограммы, полученные экспериментальным путем. Большое расхождение между токами $I_{a.бmax}$ и $I_{a.бmin}$ по результатам эксперимента и моделирования, объяс-

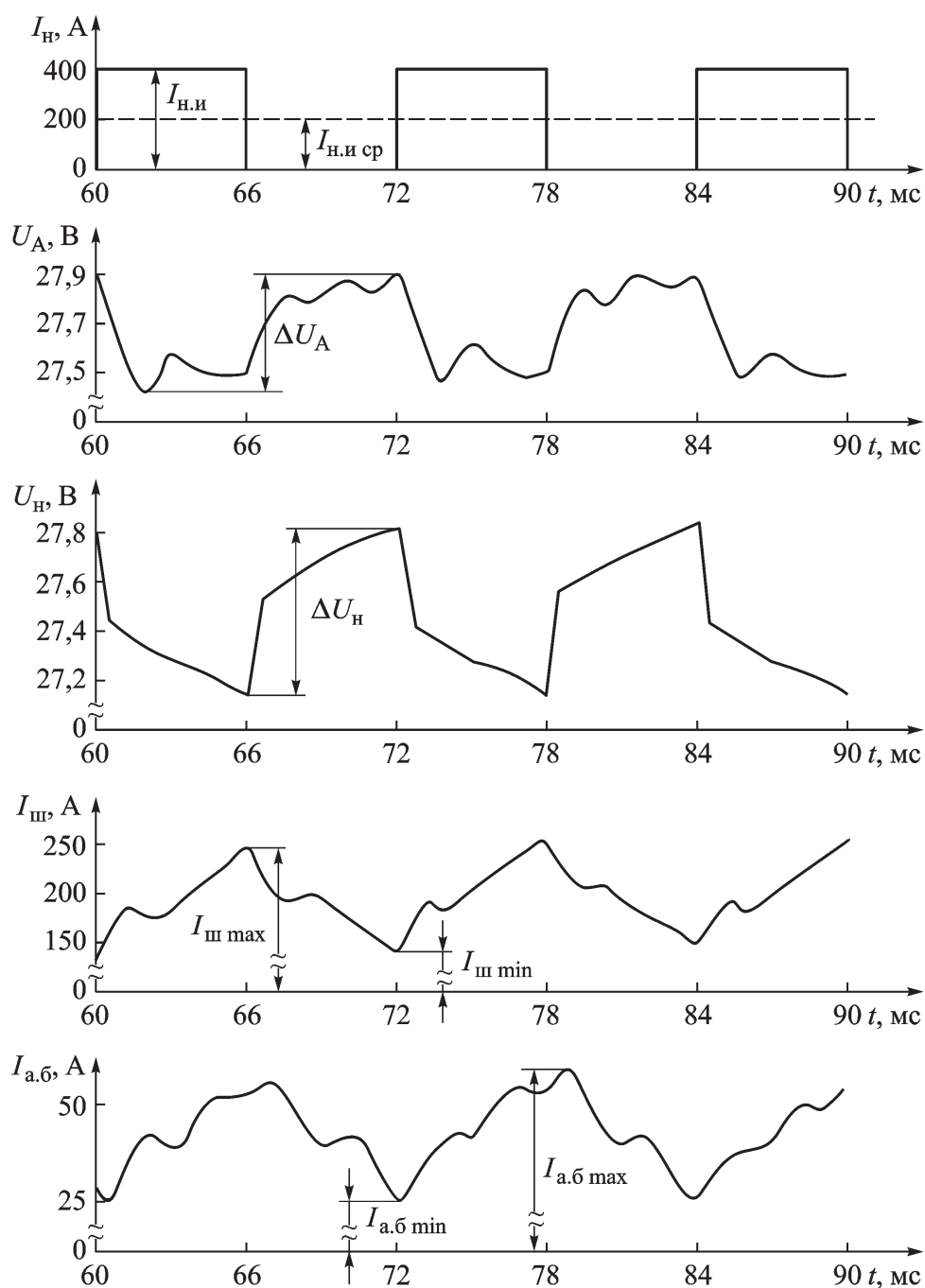


Рис. 4. Результаты моделирования СГЭ на ПЭВМ при $I_{б.с} = 0$, $I_{н.и} = 400$ А, $C_H = 3 \Phi$, $f = 80$ Гц, $\gamma = 2$

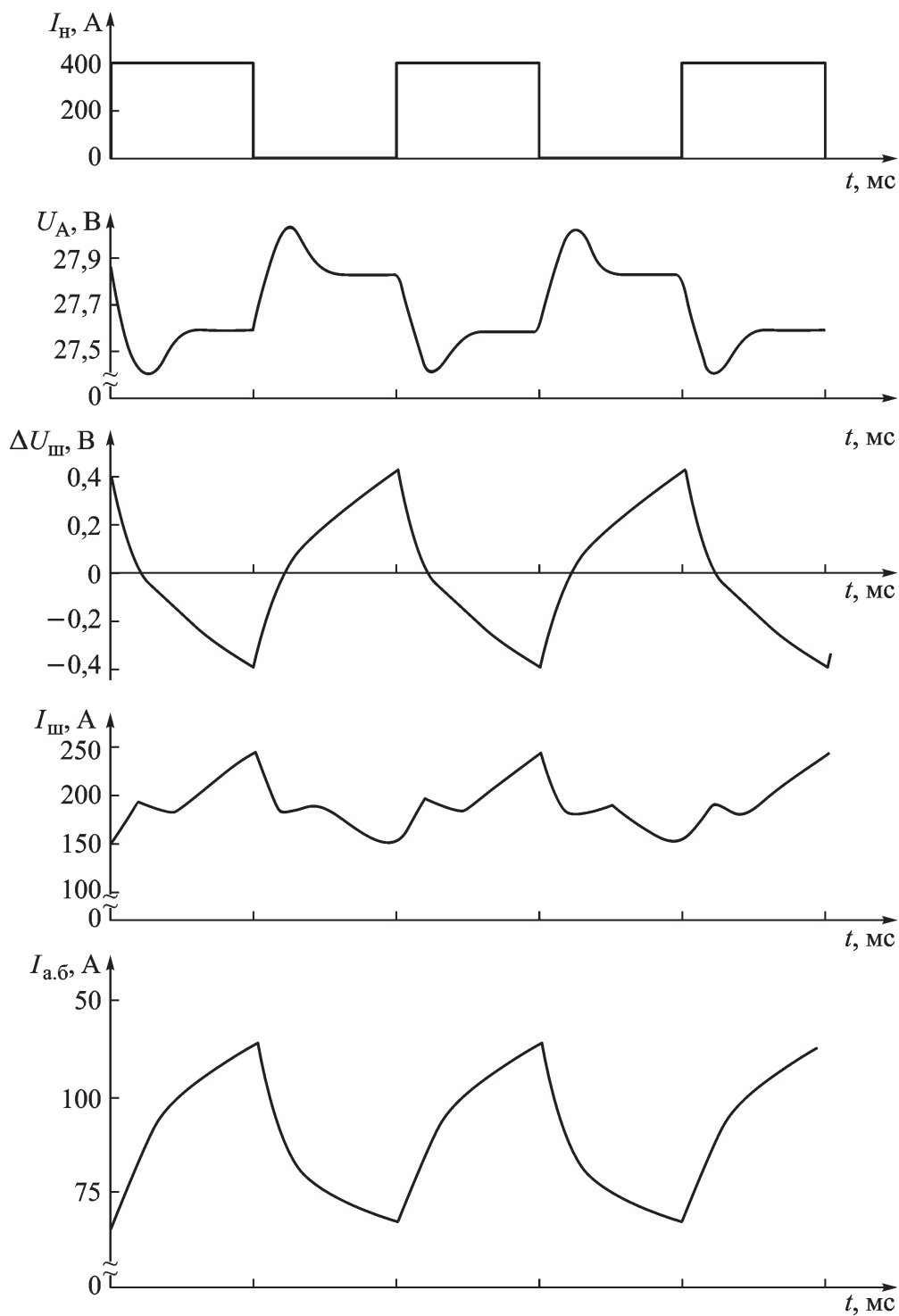


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований СГЭ

няется тем, что модель не учитывает неравномерности распределения токов из-за различной степени заряженности АБ в подсистемах.

На рис. 6 и 7 приведены осциллограммы токов и напряжений для режима $I_{б.с} = 200 \text{ А}$, $I_{н.и} = 400 \text{ А}$, $C_{н} = 3 \text{ Ф}$, $f = 80 \text{ Гц}$, $\gamma = 2$. От предыдущего случая этот режим отличается тем, что $I_{б.с} = 200 \text{ А}$. Как видно из сравнения рис. 4 и 6 (результаты моделирования на ПЭВМ) или рис. 5 и 7 (результаты экспериментальных исследований) увеличение тока $I_{б.с}$ от нуля до 200 А приводит к увеличению пульсаций напряжения на выходе АРК и снижению пульсаций токов шины и АБ.

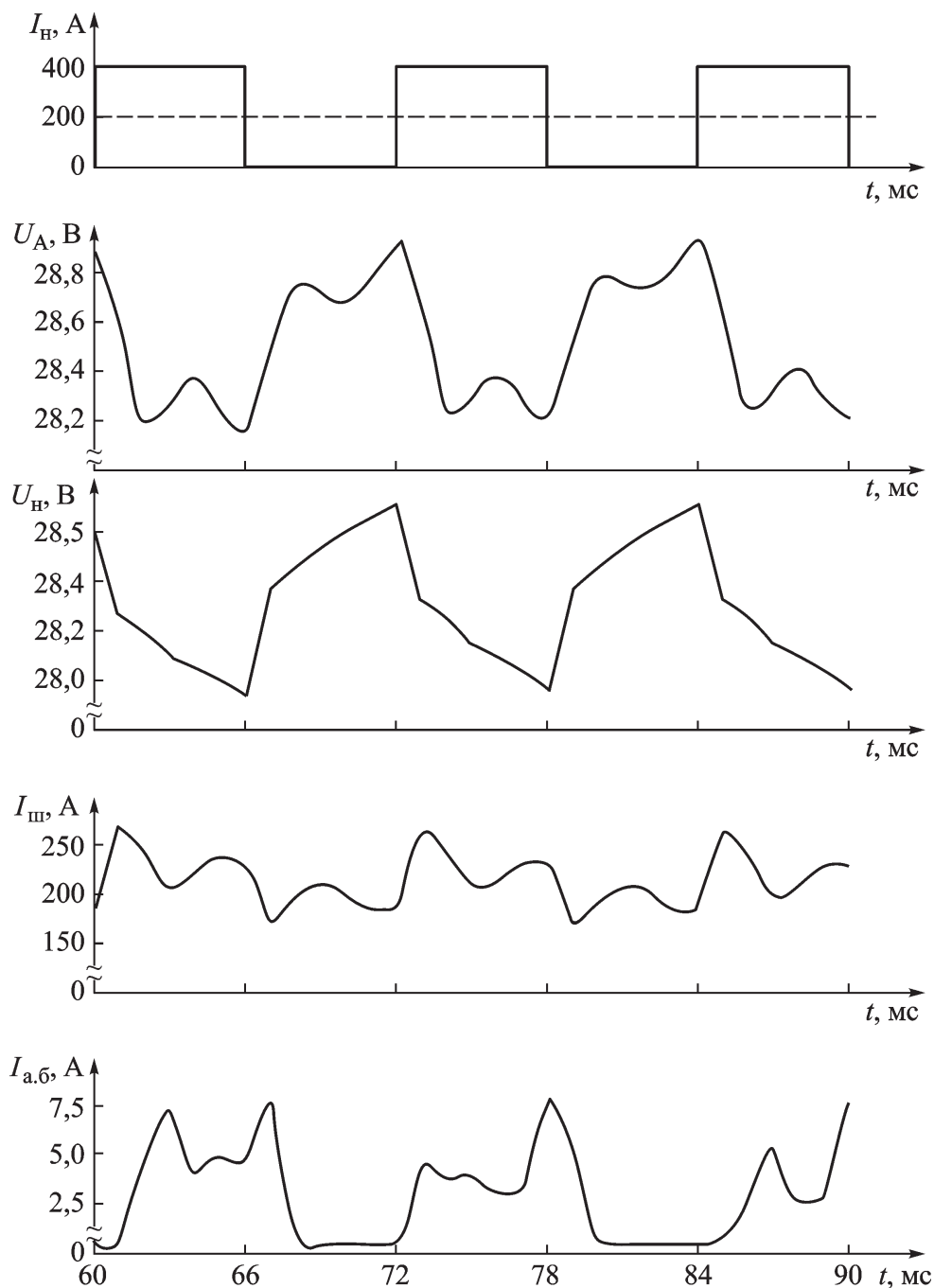


Рис. 6. Результаты моделирования СГЭ на ПЭВМ при $I_{б.с} = 200$ А, $I_{н.и} = 400$ А, $C_H = 3 \Phi$, $f = 80$ Гц, $\gamma = 2$

На рис. 8 (результаты моделирования) и рис. 9 (результаты эксперимента) представлены осциллограммы токов и напряжений в системе при увеличении амплитуды импульсного тока нагрузки до $I_{н.и} = 600$ А. Из сравнения рис. 4 и 8 (см. рис. 5 и 9) видно, что увеличение возмущающего воздействия (тока нагрузки) при неизменных других параметрах системы приводит к увеличению пульсаций напряжений на выходе АРК и нагрузки и к увеличению пульсаций шины I_{III} . При этом также увеличиваются и средние значения токов I_{III} и $I_{а.б}$.

Одним из способов уменьшения пульсаций напряжений и токов является увеличение емкости фильтра C_H .

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

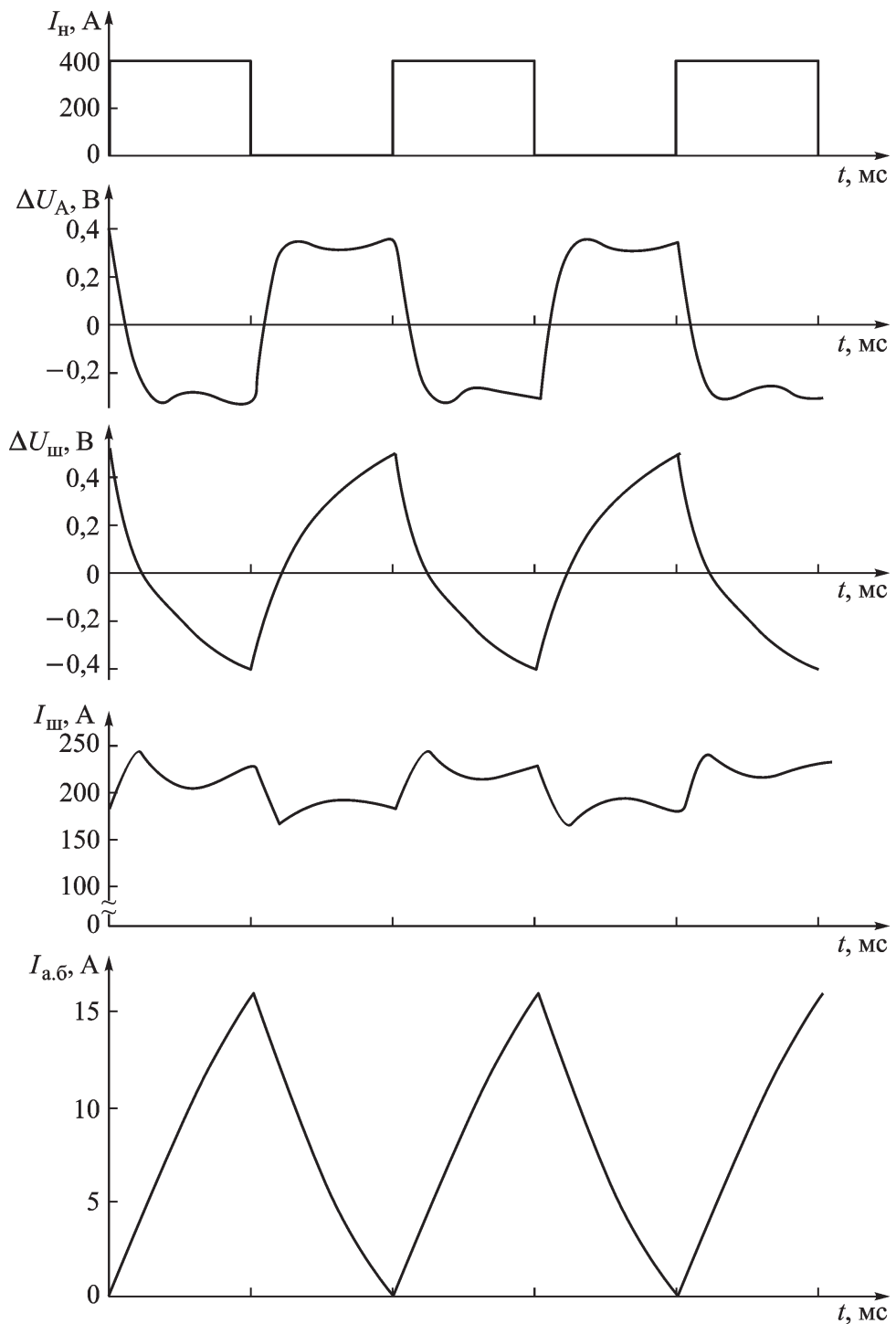


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований СГЭ при $I_{б.с} = 200$ А, $I_{н.н} = 400$ А, $C_H = 3$ Ф, $f = 80$ Гц, $\gamma = 2$

1. Увеличение амплитуды импульсного тока нагрузки (возмущающего воздействия) приводит к росту пульсаций токов и напряжений.
2. Увеличение тока первичного источника на данных режимах работы СГЭ приводит к росту пульсаций на выходе АРК и к уменьшению пульсаций токов АБ.
3. При уменьшении частоты импульсной нагрузки от 120 до 40 Гц пульсации напряжений и токов несколько увеличиваются, однако резонансного пика пульсаций в диапазоне частот $f = 40-50$ Гц не наблюдается, что объясняется действием фильтра C_H .

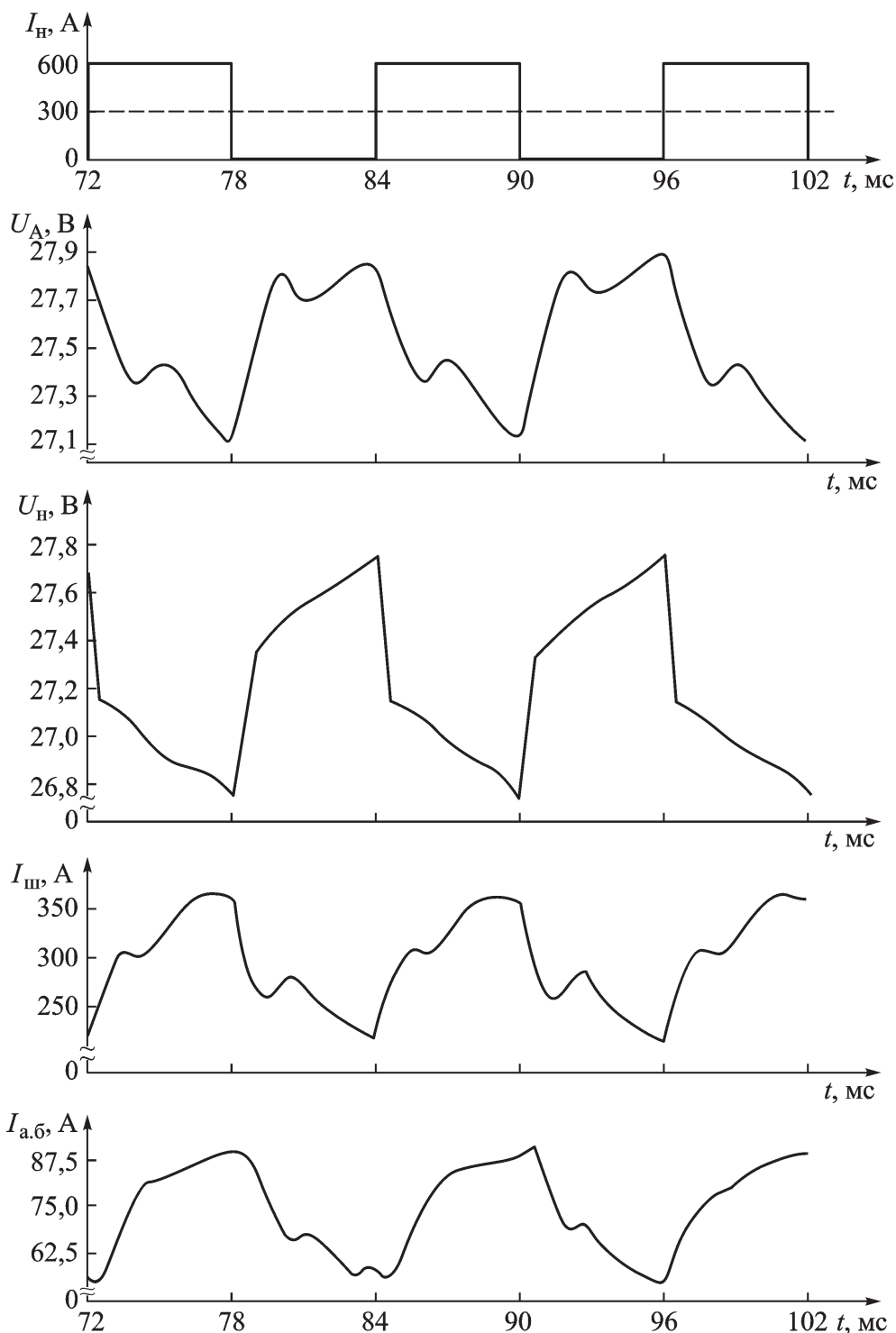


Рис. 8. Результаты моделирования СГЭ на ПЭВМ при $I_{б.с} = 0$, $I_{н.н} = 600$ А, $C_H = 3 \Phi$, $f = 80$ Гц, $\gamma = 2$

4. Возможными способами уменьшения пульсаций напряжений и токов в системе следует считать: увеличение емкости фильтра нагрузки C_H ($C_H = 3 \Phi$); применение индуктивно-емкостного фильтра ($L_{ш} - C_H$ -фильтра), причем пульсации напряжений и токов будут уменьшаться при увеличении C_H и $L_{ш}$, (значение $L_{ш}$ подбиралось экспериментальным путем); уменьшение активного сопротивления цепи фильтра нагрузки $R_{с.н}$; комбинации вышеперечисленных способов.

В настоящее время специалистами ОАО “ВПК “НПО машиностроения” модифицирован стенд системы электропитания (С-312), на кото-

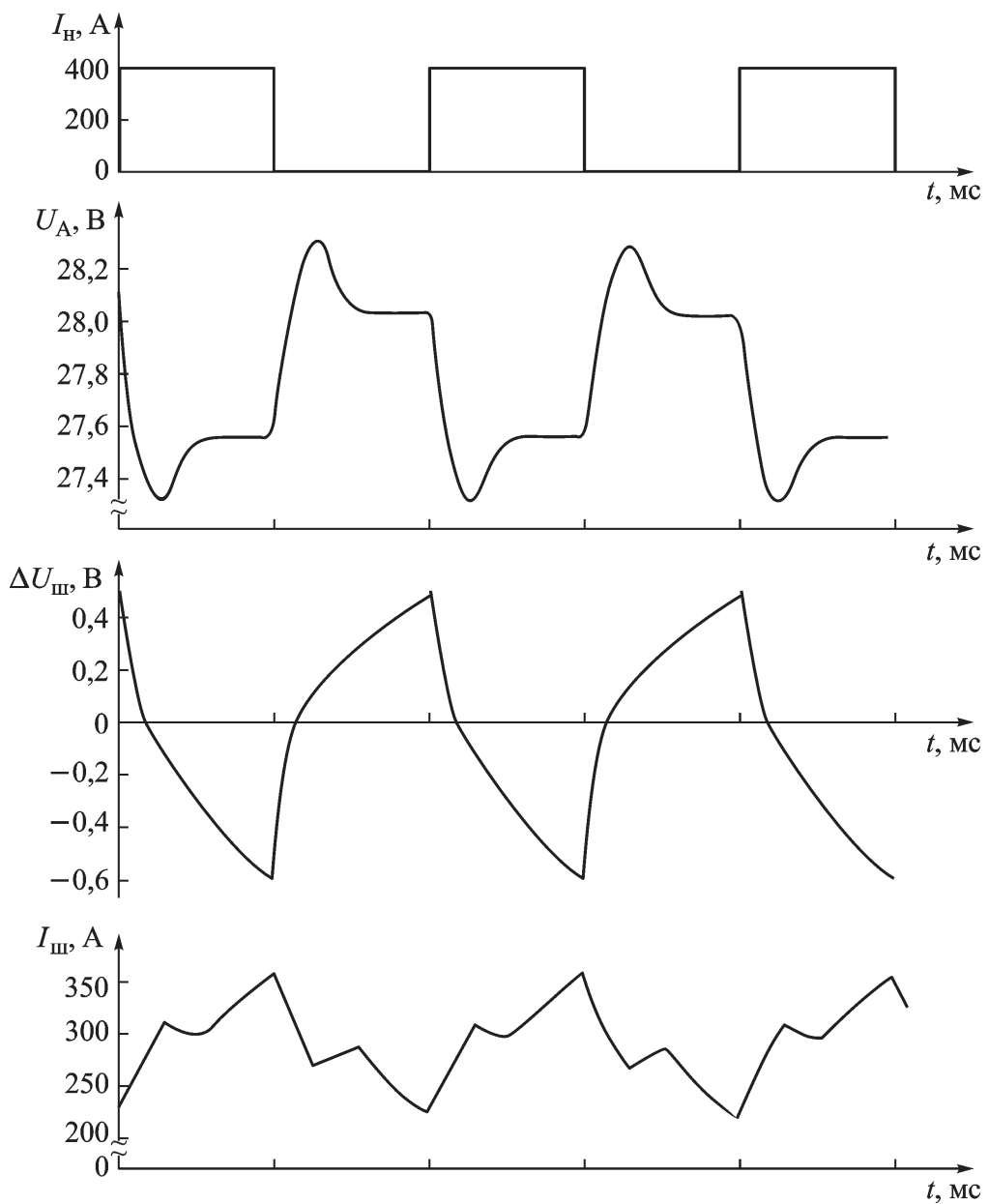


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований СГЭ при $I_{б.с} = 0$, $I_{н.н} = 600$ А, $C_H = 3$ Ф, $f = 80$ Гц, $\gamma = 2$

ром будут продолжены исследования нелинейности характеристик системы СГЭ малых космических аппаратов, исследованы динамические и статические характеристики устойчивости системы к воздействию импульсной нагрузки на штатных, нештатных и аварийных режимах эксплуатации.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы” (Государственный контракт № П608 от 06.08.09).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.

2. С а в е н к о в В. В. Проблемные вопросы разработки приборов для высоковольтной системы электроснабжения российского сегмента Международной космической станции // Энергия. – 2000. – № 2. – С. 26–30.
3. Н а к а з н е н к о М. Н. Математическое моделирование электрохимических накопителей в составе системы генерирования энергоснабжения // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 9. – С. 182–186.

Статья поступила в редакцию 27.01.2011

Андрей Аркадьевич Лизунов родился в 1953 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. Канд. техн. наук, начальник расчетно-конструкторского и экспериментально-исследовательского отдела систем электропитания ОАО “ВПК “НПО машиностроения”. Специалист в области систем электропитания и альтернативной энергетики.

A.A. Lizunov (b. 1953) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Ph. D. (Eng.), head of design-construction and experiment-research department for electric power supply systems of OAO “VPK “NPO mashinostroeniya”. Specializes in the field of electric power supply systems and alternative power engineering.

Вячеслав Сергеевич Тарасов родился в 1985 г., окончил Московскую государственную академию водного транспорта в 2005 г. и Брестский государственный технический университет в 2008 г. Аспирант, инженер расчетно-конструкторского и экспериментально-исследовательского отдела систем электропитания ОАО “ВПК “НПО машиностроения”. Специализируется в области систем электропитания и альтернативной энергетики.

V.S. Tarasov (b. 1985) graduated from the Moscow State Academy of Water Transport in 2005 and the Brest State Technical University in 2008. Post-graduate, engineer of design-construction and experiment-research department for electric power supply systems of OAO “VPK “NPO mashinostroeniya”. Specializes in the field of electric power supply systems and alternative power engineering.