

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ НАГРУЗОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА\*

*Проведено моделирование и исследование нагрузочного устройства для электрических испытаний систем электропитания космических аппаратов с рекуперацией электроэнергии в сеть постоянного тока.*

*Ключевые слова: энергосбережение, нагрузочное устройство, рекуперация.*

Для электрических испытаний систем электропитания космических аппаратов, в частности вторичных источников электропитания (ВИЭП), используются нагрузочные устройства (НУ), задачей которых является имитация требуемых режимов электронагружения ВИЭП. По типу применяемого нагрузочного элемента НУ можно разделить на резистивные и транзисторные. По способу утилизации энергии НУ можно разделить на тепловые, со сбросом тепла в окружающую среду (тип Т), и рекуперационные, с частичным возвратом электроэнергии в сеть переменного или постоянного тока (тип Р). Резистивные НУ относительно просты, допускают высокую температуру нагрева нагрузочных элементов, что позволяет обеспечить хорошие массогабаритные характеристики. Основными недостатками их является плохая управляемость, что не позволяет реализовать многие режимы испытаний, и отсутствие энергосбережения из-за принадлежности к типу Т. Транзисторные НУ, работающие в непрерывном режиме, хорошо управляются, позволяют воспроизводить динамические характеристики реальных потребителей, но, вследствие ограничений на температуру транзисторов, имеют плохие массогабаритные характеристики; транзисторные НУ также принадлежат типу Т.

Известны НУ [1], в которых энергия ВИЭП рекуперирована в сеть переменного тока. Такие НУ позволяют реализовать различные режимы испытаний, обладают относительно высоким коэффициентом рекуперации. Существенным недостатком таких НУ является необходимость согласования параметров выходного напряжения рекуператора с параметрами сети и, как следствие, сложность и высокая стоимость.

Существует большой ряд ВИЭП, содержащих первичный источник электропитания (ПИЭП) с выходом на постоянном токе. Известно НУ с рекуперацией энергии в сеть постоянного тока [2], в котором выходное напряжение НУ суммируется с напряжением сети, питающей ВИЭП. В таком НУ возникает необходимость в дополнительном импульсном преобразователе (ИП), стабилизирующем напряжение питания ВИЭП, что усложняет устройство и отрицательно сказывается на массогабаритных характеристиках.

Авторами предлагается НУ с рекуперацией энергии в сеть постоянного тока с параллельным подключением выхода НУ к сети. В этом случае можно существенно улучшить массогабаритные характеристики и уменьшить энергопотребление от ПИЭП.

Возможная структура такого НУ приведена на рис. 1.

Согласно структурной схеме, ПИЭП питает постоянным напряжением ВИЭП, датчик тока ДТ измеряет ток, потребляемый НУ, импульсный модулятор ИМ формирует закон управления ИП, фильтры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  осуществляют фильтрацию тока  $I_{НУ}$  и  $I_{рек}$  соответственно. Гальванически развязанный выход ИП включен параллельно с выходом ПИЭП.

ИП работает в режиме стабилизации тока  $I_{НУ}$ , потребляемого НУ от ВИЭП. Напряжение, пропорциональное данному току  $I_{НУ}$ , с датчика тока ДТ, сравнивается в сумматоре с напряжением  $U_{оп}$ , которое пропорционально требуемому току нагрузки, затем сигнал рассогласования  $\varepsilon_p$ , пропорциональный отклонению действующего тока нагрузки от требуемого, усиливается усилителем напряжения УН и поступает на вход управления ИП. В ИП входная электроэнергия одного уровня напряжения преобразуется в электроэнергию уровня напряжения, требуемого для рекуперации в ВИЭП, минуя ПИЭП.

Можно показать, что мощность, потребляемая от ПИЭП в установившемся режиме, составляет

$$P_{ПИЭП} = P_{НУ} \left( \frac{1}{\eta_2} - K_p \right), \quad (1)$$

где  $P_{ПИЭП}$  – мощность, отдаваемая ПИЭП;  $P_{НУ}$  – мощность, потребляемая НУ;  $\eta_2$  – КПД ВИЭП,  $K_p$  – коэффициент рекуперации, т. е. отношение возвращаемой (рекуперированной) мощности НУ к потребляемой:

$$K_p = \frac{P_{рек}}{P_{НУ}}, \quad (2)$$

где  $P_{рек}$  – возвращаемая (рекуперированная) мощность НУ;  $P_{НУ}$  – входная мощность НУ.

Из выражения (1) видно, что применение НУ с рекуперацией энергии в сеть постоянного тока позволяет снизить мощность, потребляемую от ПИЭП.

Основной подсистемой НУ является ИП с гальванической развязкой. В настоящее время существует множество различных типов импульсных преобразователей, однако в силовой электронике мощные ИП с гальванической развязкой выполняются, как правило, по мостовой схеме, что существенно сокращает область поиска при выборе типа ИП. Проведем сравнительный анализ нескольких типов ИП (см. таблицу).

Преобразователь с ШИМ не обладает «мягким» переключением ключей, т. е. переключением при нулевом

\*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

напряжении на ключе или нулевом токе через ключ, что обуславливает высокий уровень импульсных помех и динамические потери на ключах.

В преобразователе с резонансным контуром коэффициент формы тока через ключи не равен единице, а это значит, что при одной и той же мощности преобразователя с ШИМ и преобразователя с резонансным контуром в последнем максимальное значение тока через ключ будет выше, следовательно, и потери будут больше. Кроме того, возникает необходимость применения ключей с большим максимальным током.

В преобразователе с фазовым управлением ток через ключ имеет прямоугольную форму, и в то же время обеспечивается мягкое переключение ключей. Поэтому в данном случае целесообразно применять ИП с фазовым управлением. Принцип работы преобразователя с фазовым управлением описан в [1].

Выравнивание напряжения ИП и ПИЭП достигается следующим образом. Напряжение холостого хода на выходе ИП несколько превышает напряжение ПИЭП, но так как коэффициент рекуперации  $K_p$  меньше единицы, диод VD1 на структурной схеме (см. рис. 1) в установившемся режиме всегда будет открыт, следовательно, напряжение на выходе ИП не будет превышать напряжения ПИЭП с учетом падения напряжения на диодах.

Моделирование НУ проведено в пакете Micro-CAP (рис. 2). Схемы эксперимента и силовой части НУ показаны на рис. 3.

В системе управления НУ (см. рис. 2) для формирования и усиления сигнала рассогласования на основе сравнения опорного напряжения V2 и напряжения обратной связи (ОС) V1 применен операционный усилитель (ОУ) DA1. Корректирующее устройство (КУ) R1, R3, C1, C2 служит для обеспечения устойчивости замкнутого контура при максимальном быстродействии. Элементы DA2, DD1–DD17, R6–R9, C3–C6 образуют ФИМ, который формирует закон управления ключами НУ VT1–VT4 (см. рис. 3). В качестве ПИЭП применен источник напряжения V9. Элементы R14, R20, R21, L1, L3, L4 имитируют импеданс соединительных линий. В ВИЭП для формирования и усиления сигнала рассогласования используется ОУ DA3, ШИМ выполнен на компараторе DA4 и генераторе пилообразного напряжения V12 и управляет ключом S1. Элементы L2, C10 образуют выходной фильтр ВИЭП, необходимый для выделения постоянной составляющей в выходном сигнале. Элемент C7 и сопротивление соединительных линий образуют входной фильтр ВИЭП, снижающий пульсации входного тока. В НУ ключи VT1–VT4 образуют мост, к одной диагонали которого подключен выход ВИЭП, а к другой – гальванически развязывающий выходной трансформатор T1. Емкости C11, C12, C16, C17 ограничивают скорость нарастания напряжения сток-исток на транзисторах VT1–VT4 при выключении. Входной фильтр НУ образован емкостью C13 и сопротивлением линии R21. Диодный мост VD5, VD6, VD9, VD10 выпрямляет напряжение вторичной обмотки

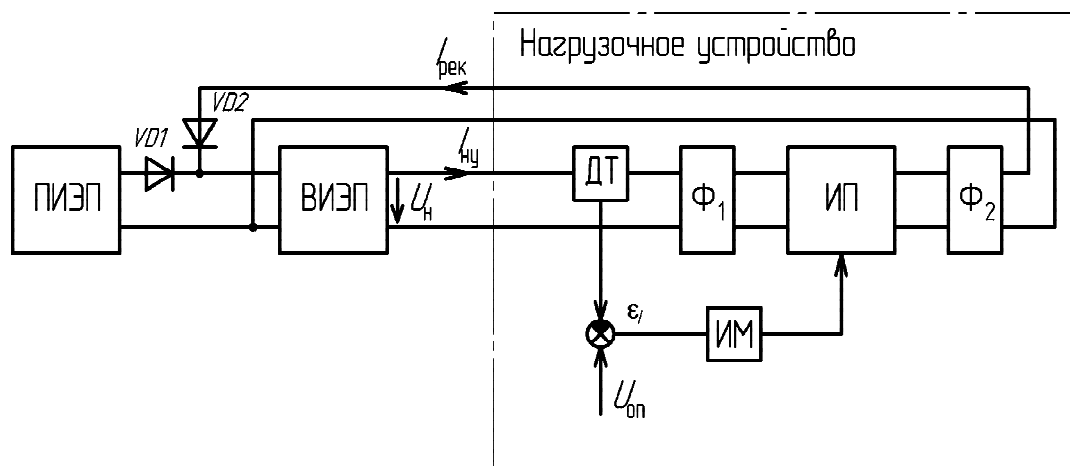


Рис. 1. Структурная схема НУ с рекуперацией в сеть постоянного тока: ПИЭП – первичный источник электропитания; ВИЭП – вторичный источник электропитания; ДТ – датчик тока; ИП – импульсный преобразователь;  $\Phi_1$  – входной фильтр;  $\Phi_2$  – выходной фильтр; ИМ – импульсный модулятор;  $U_{оп}$  – опорное напряжение, пропорциональное току нагрузки;  $U_H$  – напряжение нагрузки;  $I_{НУ}$  – ток нагрузочного устройства;  $I_{рек}$  – ток рекуперации;  $\epsilon_i$  – сигнал рассогласования

### Сравнительный анализ импульсных преобразователей

Тип преобразователя	Мягкое переключение ключей	Коэффициент формы тока через ключи	Контролирующий параметр
Преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [3]	Нет	1	Коэффициент заполнения $\gamma$
Преобразователь с резонансным контуром [1]	Да	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	Частота $f$
Преобразователь с фазовым управлением [1]	Да	1	Фаза $\phi$

трансформатора Т1, а фильтр L6, C20 выделяет постоянную составляющую.

Для составления функциональной схемы запишем уравнения согласно структурной и электрической схемам (рис. 1–3):

$$I_{НУ}(s) = \varepsilon_I W_{УС}(s) W_{КУ}(s) W_{ФИМ}(s) W_{КЛ}(s) W_{Ф}(s), \quad (3)$$

$$\varepsilon_I(s) = U_{оп} - I_{н}(s) K_{ДТ}, \quad (4)$$

где  $W_{УС}(s) = \frac{K_{УС}}{T_{УС} \cdot s + 1}$  – передаточная функция (ПФ) усилителя-сумматора (УС);

$$W_{КУ}(s) = \frac{(T_2 \cdot s + 1)(T_3 \cdot s + 1)}{(T_1 \cdot s + 1)(T_4 \cdot s + 1)}$$

– ПФ КУ;  $W_{ФИМ}(s) = K_{ФИМ} = \frac{1}{U_{пил}}$  – ПФ ФИМ;

$$W_{КЛ}(s) = K_{тр} \frac{U_{н}}{R_{вх}^{ВИЭП}} \cdot \frac{R_{вх}^{ВИЭП} C_s + 1}{LC_s^2 + \frac{L}{R_{вх}^{ВИЭП}} s + 1}$$

– ПФ ИП по току ключа;  $W_{Ф}(s) = \frac{1}{R_{л} C_{\phi} s + 1}$  – ПФ входного фильтра;  $K_{ДТ}$  – коэффициент датчика тока.

Функциональная схема входной части НУ приведена на рис. 4.

Запишем ПФ разомкнутого контура без коррекции:

$$W_{ПК}(s) = W_{УС}(s) W_{ФИМ}(s) W_{КЛ}(s) W_{Ф}(s) K_{ДТ}. \quad (5)$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика нескорректированного разомкнутого контура (ЛАХ)

$$L_{ПК}(\omega) = 20 \log(|W_{ПК}(j\omega)|), \quad (6)$$

и фазовая частотная характеристика (ФЧХ)

$$\varphi_{ПК}(\omega) = \arg(W_{ПК}(j\omega)), \quad (7)$$

представлены на рис. 5.

Запас по фазе в нескорректированной системе равен  $31^\circ$ , по амплитуде – 10,2 дБ. Для увеличения запасов устойчивости введем корректирующее звено, тогда ПФ скорректированного разомкнутого контура запишется как

$$W_{СК}(s) = W_{УС}(s) W_{КУ}(s) W_{ФИМ}(s) W_{КЛ}(s) W_{Ф}(s) K_{ДТ}. \quad (8)$$

Для сравнения на том же рис. 5 представлены ЛАХ и ФЧХ скорректированного разомкнутого контура:

$$L_{СК}(\omega) = 20 \log(|W_{СК}(j\omega)|), \quad (9)$$

$$\varphi_{СК}(\omega) = \arg(W_{СК}(j\omega)). \quad (10)$$

Запас по фазе составляет  $104^\circ$ , по амплитуде – 22,8 дБ, частота среза 1,1 кГц.

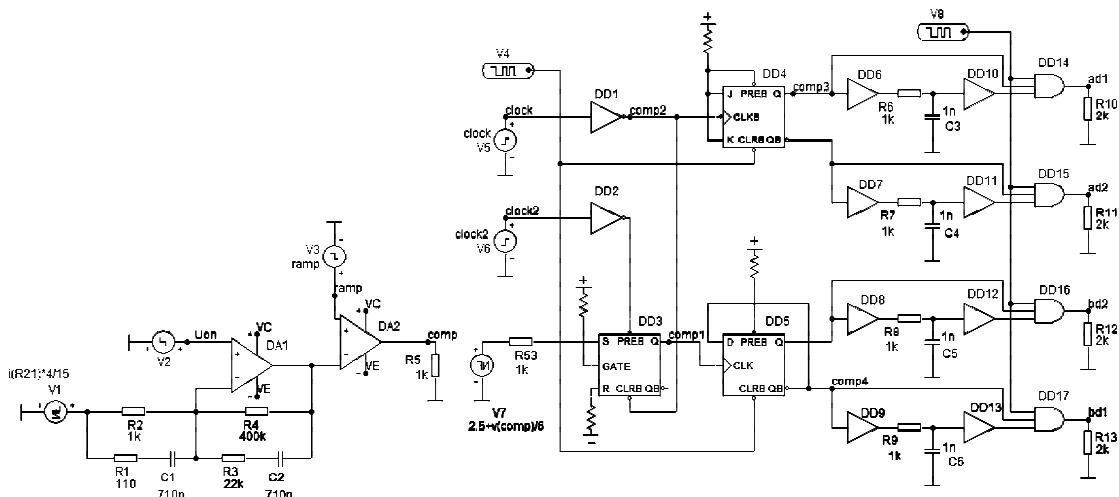


Рис. 2. Модель схемы управления НУ

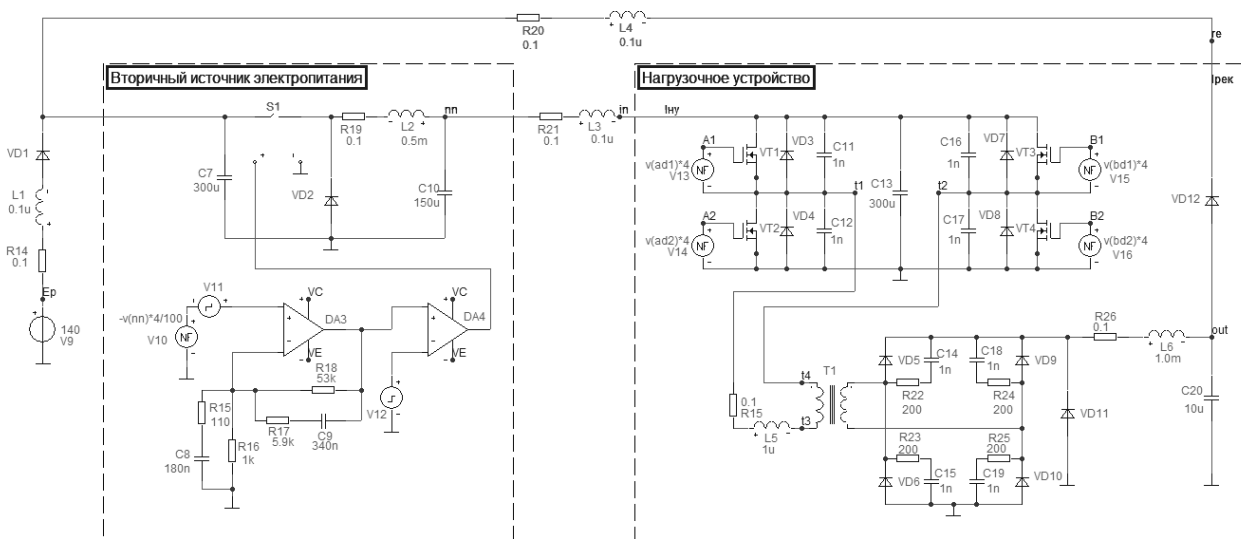


Рис. 3. Схемы эксперимента и силовой части НУ

Переходной процесс по току НУ при изменении опорного напряжения показан на рис. 6. Опорное напряжение изменяется скачком в моменты времени 6,0 мс и 10,0 мс. Ток нагрузки до момента времени 6,0 мс и после момента времени 10,0 мс равен 3А, между моментами времени 6,0 мс и 10,0 мс ток нагрузки равен 15 А. Длительность переходного процесса по фронту составляет 280 мкс, по срезу – 250 мкс.

Перерегулирование составляет не более 3,5 %. Длительность переходного процесса определяется частотой среза на ЛАХ (см. рис. 5), частота среза в свою очередь обуславливается постоянной времени сглаживающего фильтра, зависящей от частоты коммутации ключей.

Об эффективности НУ можно судить по коэффициенту рекуперации. Для нахождения значения коэффициента рекуперации НУ была снята по точкам рекуперации-

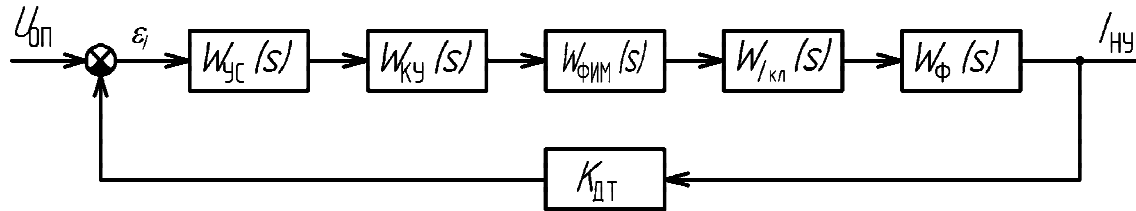


Рис. 4. Функциональная схема НУ с рекуперацией энергии в сеть постоянного тока:  $W_{ус}(s)$  – ПФ усилителя-сумматора;  $W_{кч}(s)$  – ПФ корректирующего усилителя;  $W_{фим}(s)$  – ПФ фазоимпульсного модулятора;  $W_{икп}(s)$  – ПФ ИП по току ключа;  $W_{ф}(s)$  – ПФ входного фильтра;  $K_{дт}$  – коэффициент датчика тока;  $I_{НУ}$  – ток нагрузочного устройства;  $U_{оп}$  – опорное напряжение, пропорциональное току нагрузки;  $e_i$  – сигнал рассогласования

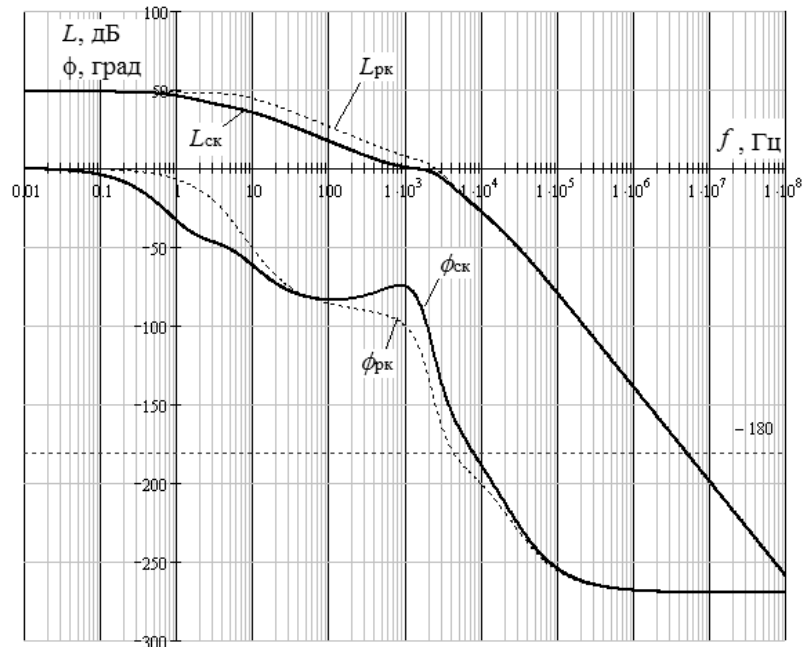


Рис. 5. ЛАХ и ФЧХ НУ с рекуперацией энергии в сеть постоянного тока

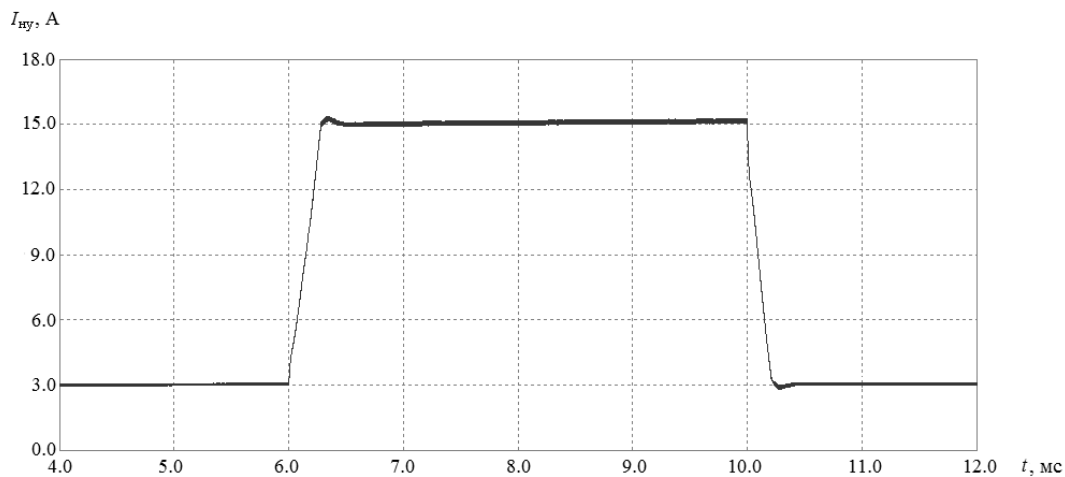


Рис. 6. Переходной процесс в режиме стабилизации требуемого тока нагрузки

онная характеристика НУ (рис. 7). Коэффициент рекуперации составил 85 % и почти линейно зависит от мощности  $P_{НУ}$ , потребляемой НУ.

Сравним потребляемую  $P_{НУ}$  и рекуперированную  $P_{рек}$  мощности НУ (рис. 7) с мощностью  $P_{ПИЭП}$ , потребляемой от ПИЭП при коммутации тока НУ (см. рис. 6). Сравнение показывает, что мощность, потребляемая от ПИЭП, значительно меньше мощности, выделяемой на нагрузке.

Так как рекуперированная энергия возвращается сразу в ВИЭП, минуя ПИЭП, от последнего потребляется только энергия, необходимая для компенсации потерь в имитаторе нагрузки и ВИЭП (1). Например, при требуемой нагрузке в 1,5 кВт, коэффициенте рекуперации 85 % и КПД вторичного источника 80 % от ПИЭП в установившемся режиме потребляется мощность 600 Вт.

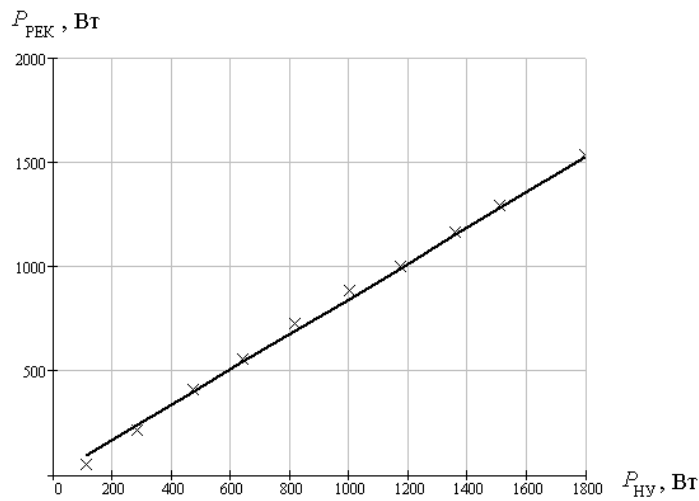


Рис. 7. Рекуперационная характеристика НУ

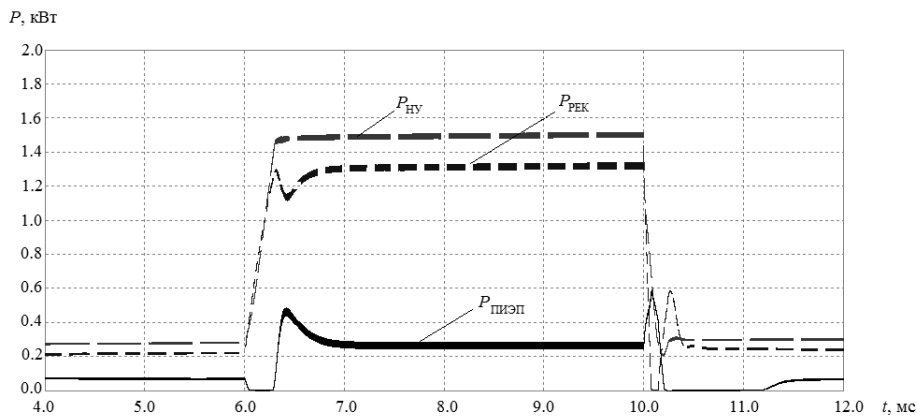


Рис. 8. Графики изменения мощностей  $P_{ПИЭП}$ ,  $P_{НУ}$  и  $P_{рек}$  при коммутации тока НУ

Е. А. Mizrakh, D. K. Lobanov

## ENERGY-SAVING DC LOAD FOR DC POWER SUPPLY SYSTEMS TESTING

Result of simulation and research of DC loading device for electric testing of power supply systems of spacecrafts with energy recuperation into DC network is presented in this paper.

Keywords: energy-saving, loading device, recuperation.