

УДК 621.314.26

ШАВЬОЛКІН О. О., СТАНОВСЬКИЙ Є. Ю.,  
ПІДГАЙНИЙ М. О.

Київський національний університет технологій та дизайну

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ  
ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ З  
БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИМ  
АГРЕГАТОМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ БАТАРЕЇ**

**Мета.** Розробка деталізованої математичної моделі системи «мережа – багатофункціональний перетворювальний агрегат з фотоелектричною батареєю – навантаження», що дозволить здійснити комплексне дослідження процесів в системі з оцінкою ефективності агрегату.

**Методика.** Синтез структури моделі та системи керування агрегатом на базі аналізу процесів у електричних колах з використанням комп'ютерного моделювання.

**Результати.** Залежності для апроксимації вольт-амперної характеристики фотоелектричної батареї. Запропоновано використання в якості нелінійного реактора стандартної моделі трансформатора з насиченням магнітного кола. Модель для визначення втрат потужності в напівпровідникових ключах за миттєвими значеннями струмів і напруги та їх каталожними даними.

**Наукова новизна.** Удосконалено математичну модель фотоелектричної батареї за паспортними даними з введенням залежності напруги холостого ходу від інтенсивності сонячного випромінювання. Удосконалено структуру системи керування з внутрішнім контуром регулювання струму та перемиканням зовнішніх регуляторів згідно режиму роботи: за роботи з мережею в «денному» режимі це регулятор напруги фотоелектричної батареї, в «нічному» - регулятор вхідної напруги інвертору; в автономному режимі - регулятор напруги навантаження. Обґрунтовано зміну налаштування контуру регулювання струму і частоти модуляції в автономному режимі, що виключає зростання втрат потужності в ключах.

**Практичне значення.** Отримані рішення є основою для проектування і аналізу показників багатофункціональних перетворювальних агрегатів для систем з поновлювальними джерелами електроенергії з покращеною енергоефективністю.

**Ключові слова:** багатофункціональний перетворювальний агрегат, ШІМ, втрати потужності в ключах, фотоелектрична батарея, перемикання режимів роботи агрегату, коефіцієнт гармонік, моделювання.

**Вступ.** Зараз широкого розповсюдження для локальних об'єктів промислового та побутового призначення набувають комбіновані системи електроживлення (КСЕ) з фотоелектричними сонячними батареями (СБ) та підключенням до розподільчої мережі змінного струму (РМ). За цього навантаження локального об'єкту отримує живлення від двох і більше джерел енергії. Такі системи мають достатньо дорогий перетворювальний агрегат з мережевим інвертором, який з урахуванням тривалості денного часу і кліматичних умов здебільшого простоє або недовикористовується за потужністю. Підвищення ефективності використання обладнання таких систем пов'язують з застосуванням багатофункціональних перетворювальних агрегатів (БПА) з цілодобовим режимом роботи [1, 2, 3], що суміщають функцію силового активного фільтру (САФ) підтримуючи близький до одиниці коефіцієнт потужності в точці підключення до РМ, автономний режим у разі відключення РМ та інше. Розглядається використання таких рішень для різних потужностей, топологій схем, умов експлуатації з урахуванням властивостей локальних об'єктів, що часто

мають значну віддаленість від трансформаторних підстанцій і в реальних умовах значні коливання напруги. Слід враховувати, що для об'єктів з розподіленими джерелами енергії діють жорсткі вимоги щодо якості струму в точці підключення до мережі [5, 6].

За цього на етапі розробки та проектування таких рішень ефективним інструментом є математичне моделювання на ПК з використанням широко апробованих програмних пакетів, зокрема, Matlab (SimPower System). Їх бібліотеки постійно розширюються з додавання моделей елементів електричних кіл, силової електроніки, математичних функцій, вимірювання різноманітних параметрів тощо.

При удосконаленні існуючих і розробці нових рішень БПА виникають питання щодо оцінювання їх працездатності за певних умов, визначення показників ефективності, зокрема, ККД. За цього важливим є врахування властивостей СБ, можливостей використання в мережевому автономному інверторі напруги (АІН) нелінійного вихідного реактору, індуктивність якого залежить від струму. Це ж стосується і перемикання режимів роботи ПА. Разом з тим, відсутні моделі для визначення втрат потужності в ключах, нелінійного реактору. Моделі СБ [7, 8, 9] будуються на підставі еквівалентних схем фотоелемента. За цього ряд параметрів, які використовуються, відсутні в каталожних даних, що потребує додаткових розрахунків [8, 9]. В [10, 11] подано математичні моделі, в яких використовуються лише каталожні значення напруги та струму для режиму холостого ходу, максимальної потужності та короткого замикання. Моделі базуються на тому, що значення напруги холостого ходу не залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. Але це не завжди є коректним і може призвести до значної похибки.

Отже питання математичного моделювання КСЕ є недостатньо вивченим і потребує подальшої доробки і удосконалення.

**Мета роботи.** Розробка деталізованої математичної моделі системи «мережа – БПА з СБ – навантаження», що дозволить здійснити комплексне дослідження процесів в системі з оцінкою ефективності перетворювального агрегату.

Завдання, що підлягають вирішенню:

- розробка та удосконалення моделей елементів системи;
- розробка відповідної структури системи керування БПА;
- розробка загальної деталізованої моделі системи;
- дослідження процесів і показників роботи БПА у різних режимах роботи.

**Результати роботи.** Розглянемо принципи реалізації математичної моделі системи «мережа – БПА з СБ – навантаження» з використанням однофазного БПА з прямим підключенням СБ до АІН за відсутності акумуляторної батареї (АКБ). Цей варіант порівняно з використанням проміжного перетворювача в ланці постійного струму є більш складним при аналізі процесів у схемі, оскільки напруга СБ  $U_{CB}$  і, відповідно, напруга на вході АІН  $U$  суттєво змінюється із змінюванням температури СБ, а в автономному режимі зі змінюванням навантаження. За цього БПА повинен забезпечувати: роботу паралельно з РМ за наявності та відсутності генерації енергії СБ («денний» та «нічний» режими); автономний режим роботи (АРР) за наявності генерації енергії СБ, перемикання режимів роботи і заряджання конденсатора на вході АІН.

Загальна структура моделі системи (рис.1) містить: РМ у вигляді джерела змінної напруги з активним і індуктивним опорами мережі ( $R_M, X_L = \omega L_M$ ); мережевий мостовий АІН з

вихідним реактором; навантаження (активно-індуктивне і нелінійне – випрямляч з вихідним ємнісним фільтром); конденсатор  $C_f$  з невеликим резистором  $R_f$  в спільній точці підключення АІН і навантаження до мережі для придушення модуляційних складових струму АІН; сонячну батарею СБ; блок визначення втрат потужності в ключах АІН (БВВ); систему керування СК.

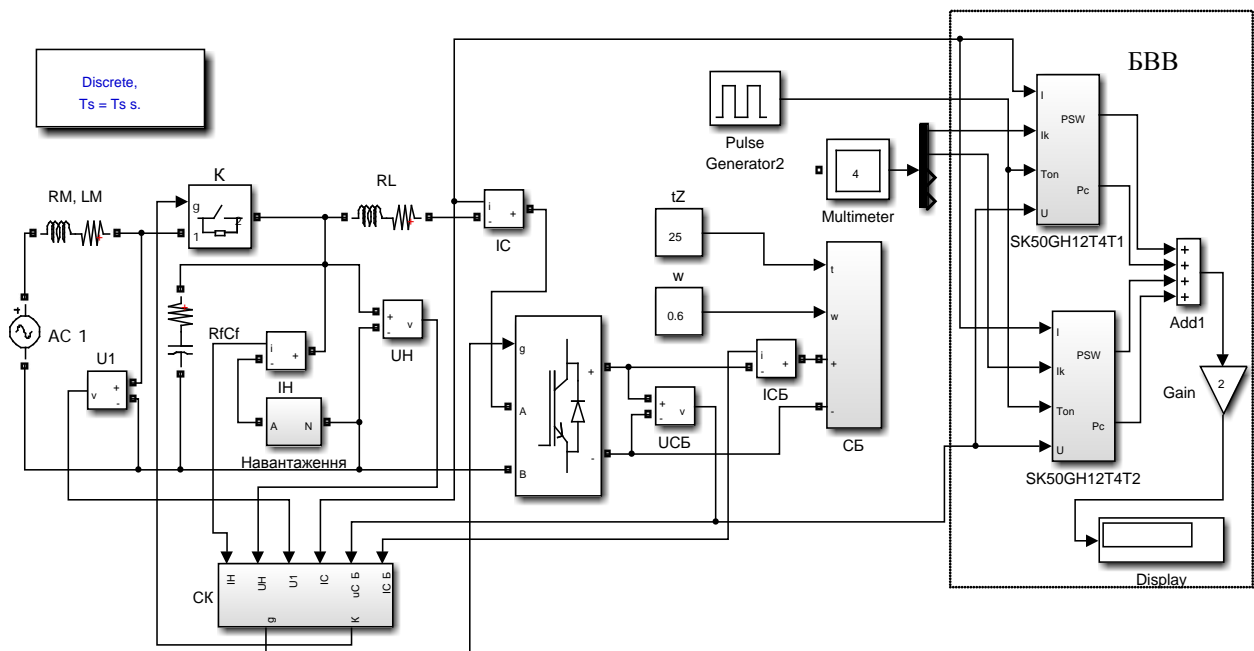


Рис. 1. Загальна структура моделі системи

Для відключення БПА від мережі передбачено контактор К. Для вимірювання струмів та напруги використовуються датчики струму та напруги.

Загальна структура моделі системи керування (рис.2) містить контур регулювання струму (КРС), блок завдання струму (БЗС), блок керування (БК), три пропорційно-інтегральні регулятори напруги (РН1÷РН3) та перемикачі S1, S2. Для спрощення в моделі відсутній контролер максимальної потужності МРРТ і завдання напруги СБ задається «вручну» як константа. Також відсутній блок фазового підстроювання частоти (ФАПЧ).

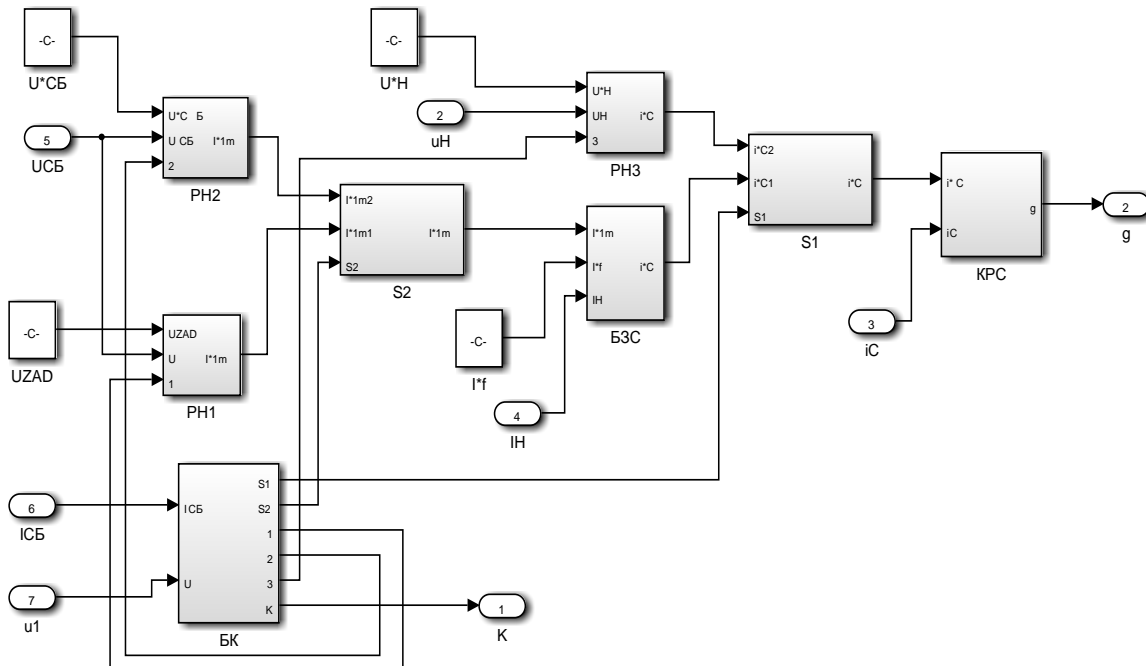


Рис. 2. Структура моделі системи керування

Структура та параметри КРС обрані згідно [3, 4] з використанням в каналі відхилення струму пропорційної, інтегрувальної ланок і ланки динамічної компенсації. Також КРС містить блок ШІМ з розподілювачем імпульсів керування ключами АІН. Структура КРС є незмінною і використовується в усіх режимах роботи БПА.

БЗС згідно сигналам завдання амплітуди струму  $I^*_{1m}$  в точці підключення локального об'єкту до РМ, струму навантаження  $i_H$ , завдання першої гармоніки струму фільтру  $I^*_f = \omega C_f U_{1m}$  формує сигнали  $i^*_1 = I^*_{1m} \sin \omega t$ ,  $i^*_f = I^*_f \cos \omega t$ . Відповідно  $i^*_1$ ,  $i^*_f$ ,  $i_H$  визначається завдання струму мережевого АІН  $i^*_C$ . Врахування ємнісного струму фільтру  $i_f$  забезпечує відсутність зсуву за фазою струму, що формується в РМ  $i_1$  відносно напруги мережі  $u_1$ .

«Денний» режим роботи БПА паралельно з мережею за наявності генерації енергії СБ. За цього використовується РН2 - регулятор напруги СБ, який забезпечує підтримання заданого значення її напруги  $U^*_{СБ}$  (для режиму максимальної потужності) і визначає значення  $I^*_{1m}$ . Підключення виходу РН2 до входу БЗС забезпечує перемикач S2, відповідно, перемикач S1 підключає вихід БЗС до входу КРС. Відповідні сигнали керування перемикачами і контактором К формує БК.

Із зменшенням потужності (струму  $I_{СБ}$ ), що генерується СБ здійснюється перемикачання в «нічний» режим роботи, коли БПА використовується в якості САФ, підтримуючи близький до 1 коефіцієнт потужності в точці підключення до РМ. За цього замість РН2 вмикається РН1 – регулятор напруги на вході АІН, що підтримує задане значення напруги.

**Автономний режим роботи.** У разі зникнення напруги РМ блок БК контактором К відключає локальний об'єкт від РМ і перемикачем S1 підключає регулятор РН3 до входу КРС. За цього БПА працює в АРР і РН3 забезпечує відпрацювання заданого значення

напруги навантаження  $u_H$ . Умовою перемикання в АРР є достатня для нормального функціонування навантаження спроможність СБ за потужністю ( $P_{СБМАХ}$ ) у поточних умовах. За цього відбирається потужність відповідно навантаженню об'єкта. Якщо значення  $P_{СБМАХ}$  буде недостатнім, напруга  $u_H$  зменшується у припустимих межах (до 10%), якщо і це не вирішує питання, частину навантаження слід вимкнути. Така можливість забезпечується у разі використання «інтелектуальних» систем керування енергоспоживанням локального об'єкта. Це є окремою задачею.

В АРР СБ працює на ділянці вольт-амперної характеристики (ВАХ) між режимом холостого ходу і максимальної потужності за відповідного зростання напруги (до 24%).

Напруга на вихідному реакторі АІН  $u_L = L \frac{di_C}{dt} = u_C - u_H$  ( $i_C$  – вихідний струм АІН,  $u_C$  –

вихідна напруга АІН, що за однополярної ШІМ приймає значення  $U, 0, -U$ ). Отже зростання  $U$  призводить к збільшенню швидкості змінювання струму і порушенню умови [3]

$\frac{di_C}{dt} \leq \frac{du_{TP}}{dt}$  ( $u_{TP}$  – модулююча напруга). Як наслідок, маємо додаткові (зайві) перемикання

ключів АІН. За відключення напруги РМ напруга навантаження не є ідеально згладженою внаслідок цього в завданні струму АІН  $i^*_C$  з'являються високочастотні пульсації за відповідного збільшення швидкості змінювання струму АІН. За підвищення напруги ключів і кількості їх перемикань отримуємо зростання втрат потужності на перемикання ключів АІН. Для виключення цього слід зменшити коефіцієнт  $k$  передавання пропорційної ланки [3, 4] в КРС. У разі збереження втрат потужності в ключах відносно режиму роботи АІН паралельно з мережею, коли БПА перетворює максимальне значення потужності СБ значення ККД БПА буде меншим. Зменшення втрат перемикання ключів можливо шляхом зниження частоти модуляції  $f_M$  в межах підтримання значення  $THDu_H \leq 8\%$ .

**Модель СБ.** ВАХ сонячної панелі (СП) типу LDK-245-20 [12] для різних значень інтенсивності сонячного випромінювання наведені на рис.3. Такі характеристики поряд зі значеннями напруги і струму в режимі холостого ходу ( $U_X$ ), максимальної потужності ( $U_M, I_M$ ), короткого замикання ( $I_K$ ) для температури  $25^\circ\text{C}$  і інтенсивності сонячного випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2$  надаються виготівником. Визначимо їх як паспортні ( $U_{XP}, U_{MP}, I_{KP}, I_{MP}$ ). Аналіз існуючих методів апроксимації характеристик СП [8÷11] показує, що достатньо зручним для використання є рівняння ВАХ, яке при заданій температурі і інтенсивності сонячного випромінювання має вигляд [10, 11]

$$I = I_K \left[ 1 - \left( 1 - \frac{I_M}{I_K} \right)^{\frac{U - U_X}{U_M - U_X}} \right]. \quad (1)$$

Відповідно паспортним значенням напруги і струму отримуємо ВАХ для температури  $25^\circ\text{C}$  і інтенсивності сонячного випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . Струм є пропорційним інтенсивності сонячного випромінювання  $W$  (надалі використовуємо відносно значення до паспортного значення  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ), тобто значення  $I_K$  і  $I_M$  визначаються згідно паспортним даним ( $I_{KP}, I_{MP}$ ), як  $I_K = W I_{KP}$   $I_M = W I_{MP}$ . Загально прийнято вважати, що значення напруги  $U_X$  та  $U_M$  від  $W$  практично не залежать [8, 9] і дорівнюють паспортним значенням. Разом з тим, характеристики на рис.3 за різних значень  $W$  показують, що значення  $U_X$  в певних межах змінюється. Нехтування цим призведе до значної похибки, особливо зі зменшенням  $W$

(показано на рис.3 для  $400 \text{ Вт/м}^2$ ). Цю залежність можна враховувати в табличній формі або відповідним апроксимуючим поліномом.

Вплив температури відносно робочої температури ( $t_p=45^\circ\text{C}$ ) визначається згідно температурним коефіцієнтам [12], що надаються для струму  $K_I$  ( $0.0006 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ) і для напруги  $K_V$  ( $0.0032 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ). Отже значення струмів і напруги становлять:

$$I_K = WI_{KP}[1 - K_I(t - t_p)], \quad I_M = WI_{MP}[1 - K_I(t - t_p)],$$
$$U_X = U_{XP}[1 - K_V(t - t_p)], \quad U_M = U_{MP}[1 - K_V(t - t_p)]. \quad (2)$$

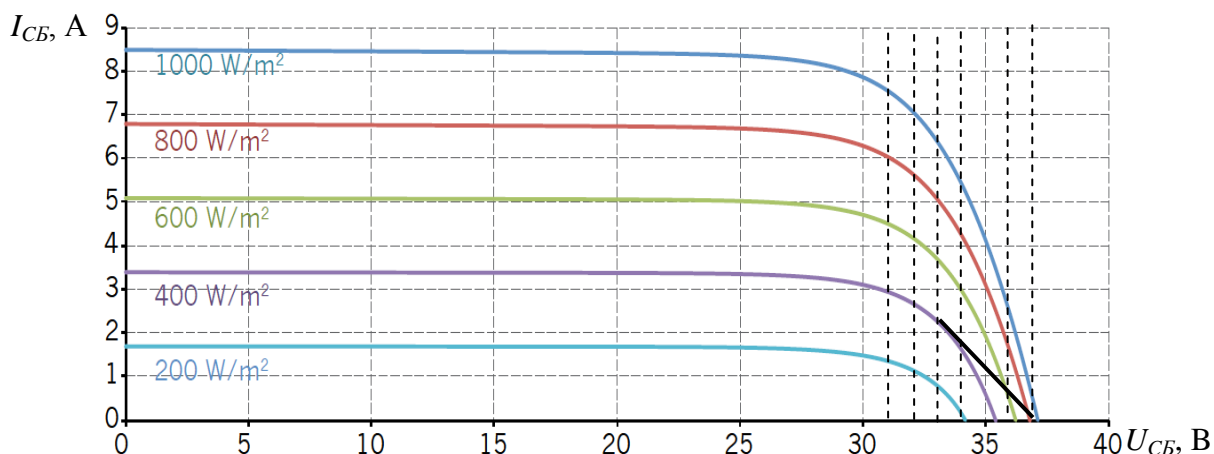


Рис. 3. ВАХ сонячної панелі типа LDK-245P-20

Розраховані згідно (1), (2) ВАХ достатньо близькі до тих, що надаються виготівником. Структура моделі окремої СП згідно (1), (2) наведена рис.4. СБ складається з певної кількості СП. В структурі моделі СБ (рис.5) використано кероване джерело струму і враховується активний і реактивний опори лінії зв'язку СБ та ПА. СБ містить дві гілки з 14 СП (типу LDK 250PA [12]).

**В якості нелінійного реактору** використано первинну обмотку трансформатору (стандартну модель) з нелінійною характеристикою магнітного кола (Saturable transformer), яка задається в табличному (кусочно-лінійному) вигляді відповідно значенню струму.

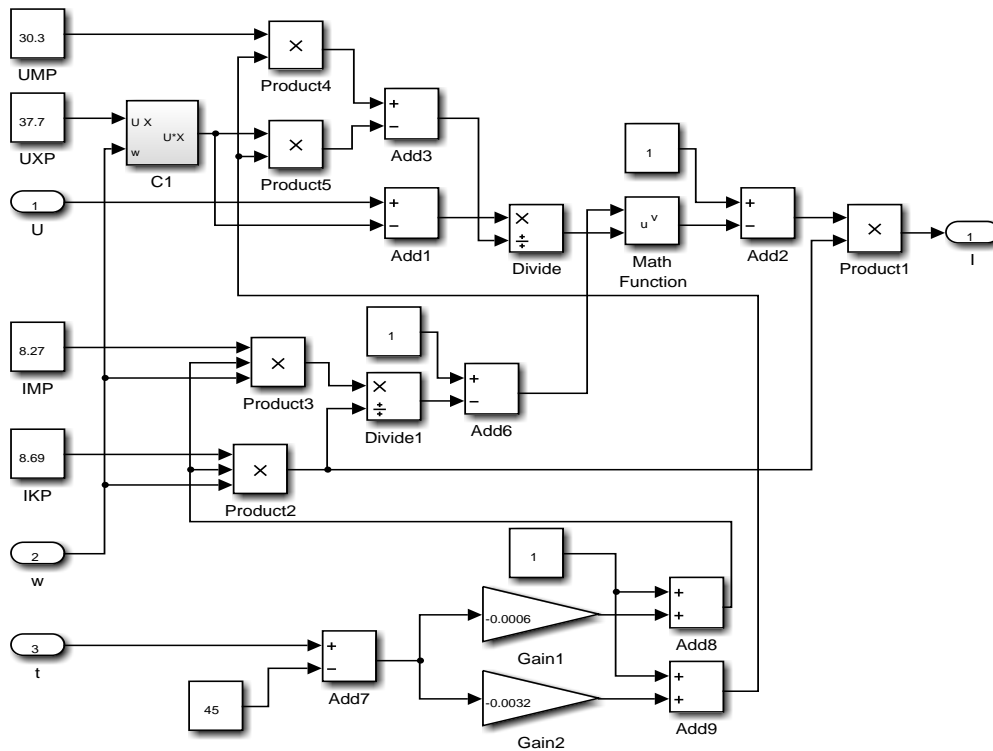


Рис. 4. Структура моделі СП

Заздалегідь, до використання в загальній моделі були виконані окремі дослідження щодо перевірки коректності отримання заданих значень індуктивності (від 0.0042 Гн до 0.00158 Гн) у робочому діапазоні струмів. За цього первинна обмотка підключалась до імпульсного джерела постійного струму і вимірювався її струм.

**Визначення втрат потужності в ключах.** Модель блока визначення втрат (БВВ) потужності в ключах (рис.6) базується на миттєвих значеннях струмів ключів (визначаються в загальній моделі ПА на рис.1 блоком Multimeter) і каталожних даних обраних приладів [13]. БВВ містить два модуля для ключів (транзистор зі зворотним діодом) одного плеча АІН. В якості входніх змінних використовуються миттєве значення вихідного струму ( $i$ ), струм ключа АІН ( $i_K$ ), час вимірювання ( $T_{on}$ ), напруга на вході АІН  $U$ , частота вихідної напруги  $f$ .

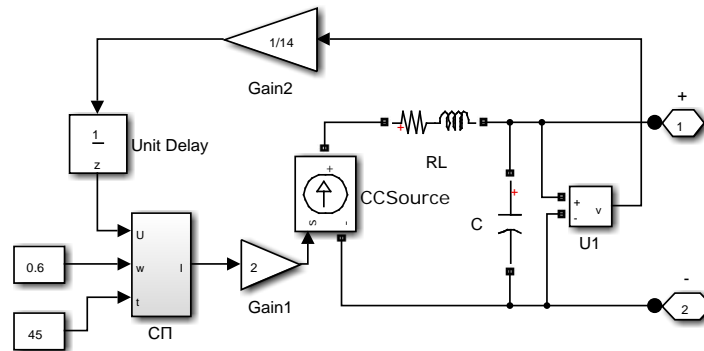


Рис. 5. Структура моделі СБ

Формування сигналів, відповідних моментам вмикання (on) і вимкнення (off) приладів в моделі здійснюється за допомогою блоків «Hit Crossing», «Edge Detector» згідно  $i_k$ .

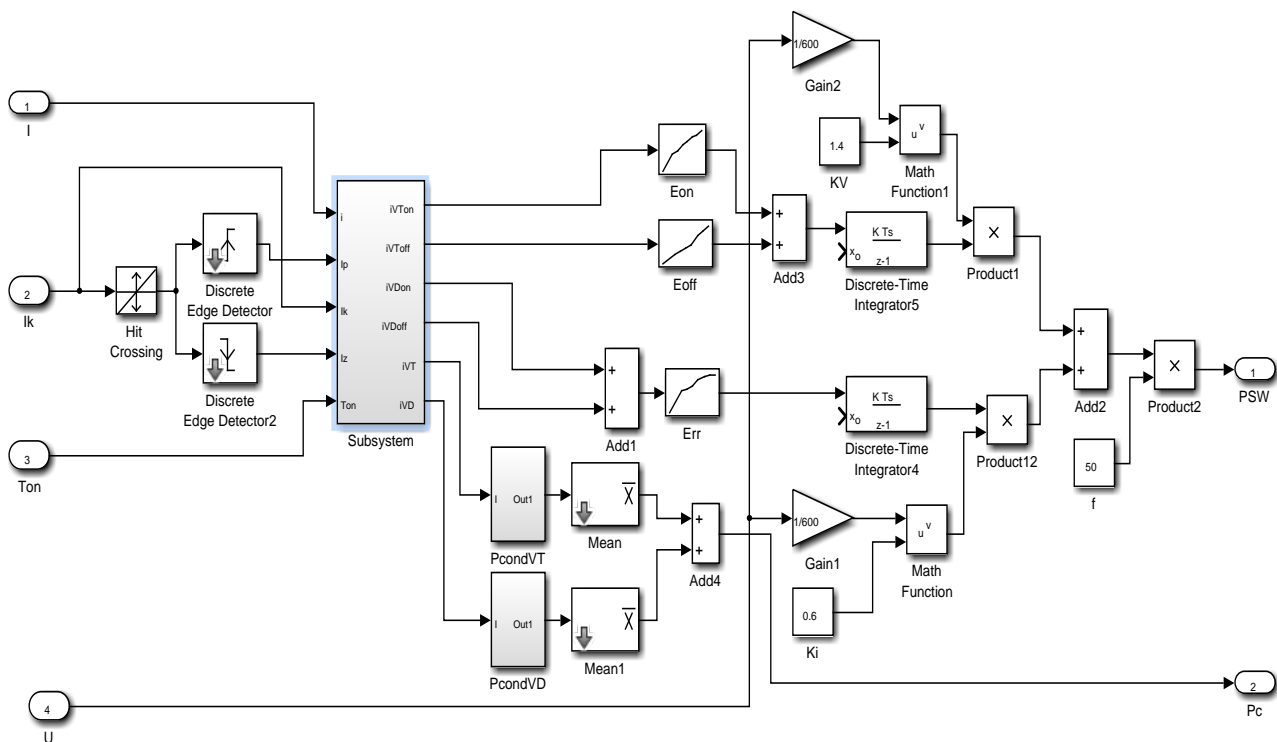


Рис.6. Структура моделі для визначення втрат потужності в ключі

За цього формуються імпульси, тривалість яких  $T_S$ , відповідно передньому  $I_P$  і задньому  $I_Z$  фронтам  $i_k$ . Блоком Subsystem відповідно до полярності струму  $i$  формуються сигнали  $P$  ( $i > 0$ ) і  $N$  ( $i \leq 0$ ). Ключ утворений зустрічно - паралельно з'єднаними IGBT і діодом. Струм транзистора  $i_{VT} = P i_k$ , діода  $i_{VD} = N i_k$ . Миттєві значення струмів ключів в момент перемикаються визначаються відповідно:  $i_{VToff} = P T_{on} i_{Iz}$ ,  $i_{VTon} = P T_{on} i_{Ip}$ ,  $i_{VDoff} = N T_{on} i_{Iz}$ ,  $i_{VDon} = N T_{on} i_{Ip}$ .

Потужність втрат провідності  $P_c$  визначаються як середнє за період  $T$  вихідної частоти значення миттєвої потужності на приладі  $p = u_V i_V$  ( $u_V, i_V$  – миттєві значення напруги і струму (діоду та транзистору)). Визначення  $u_V$  (згідно  $i_V$  відповідно до вихідної вольт-амперної характеристики [13], яка задається в табличній формі) з наступним перемноженням



$u_V$ ,  $i_V$  здійснюється в блоці Pcond. Для визначення середнього значення потужності використовується блок Mean.

Значення потужності втрат на перемикання  $P_{SW}$  визначаються за залежностями енергії перемикання [13]  $E_{on}=f(i_{Von})$ ,  $E_{off}=f(i_{Voff})$  для транзистору і  $E_{rr}$  – для діоду згідно значенню  $i_V$  в момент перемикання ключів. Для них визначаються  $E_{on}$ ,  $E_{off}$ ,  $E_{rr}$ . Підсумовування значень енергії перемикання здійснюється за допомогою інтегратора, який використовується як пристрій вибірки - зберігання з накопиченням. При цьому приріст вихідної напруги інтегратора на інтервалі вибірки  $T_S$ :  $\Delta U = G \int E dt = G \cdot E \cdot T_S$ , відповідно для забезпечення рівності  $\Delta U = E$  його коефіцієнт  $G = 1/T_S$ . Значення енергії задаються при стандартному значенні напруги  $U_{CT}$  ( $U_{CT}=600$  В для IGBT класу за напругою 1200 В) і температури  $T_j=150^\circ\text{C}$ . Для значень температури  $< T_j$  втрати енергії зменшуються, тому для спрощення температура не враховувалась. Для перерахунку до фактичного значення напруги АІН  $U$  використано залежність  $E' = E \left(\frac{U}{U_{CT}}\right)^{K_V}$  ( $K_V=1.4$  для IGBT і  $K_V=0.6$  для діода).

Час вимірювання вибирається кратним кількості періодів напруги вихідної частоти  $f$ , наприклад,  $T_{on}=2T$ . Формується генератором імпульсів з затримкою  $T_o$ , що враховує тривалість перехідного процесу зміни струму.

**Результати моделювання.** Навантаження об'єкту комбіноване: некерований випрямляч з вихідним ємнісним фільтром та  $RL$  навантаження. Модель РМ (220 В,  $f=50$  Гц) містить опори  $R=0.02$  Ом,  $X_L=0.02$  Ом, фільтр  $R_f=0.3$  Ом,  $C_f=60$  мкФ. СБ містить дві гілки з 13 СП (LDK 250PA [12]). В блоці визначення втрат потужності використані параметри IGBT ключів типу SK50GH12T4T2 [13]. Розглядалось використання лінійного ( $R=0.1$  Ом,  $L=4.2$  мГн) та нелінійного реактору.

«Денний» режим роботи. Задається значення напруги  $U_{CB}=400$  В (за режиму максимальної потужності  $13 \cdot U_M=393.9$  В), змінюється значення  $W$  за постійного навантаження з  $I_{Hm(1)}=14$  А,  $\varphi_{(1)}=26.7^\circ$ . У разі змінювання  $W$  змінюється значення струму  $i_L$ , що формується в точці підключення до РМ. За частоти модуляції 6.8 кГц і  $I_{Im(1)}=2.68$  А значення  $\text{THDi}_I=3.43$  %. Із збільшенням  $I_{Im(1)}$   $\text{THDi}_I$  зменшується (за  $I_{Im(1)}=16.5$  А значення  $\text{THDi}_I=1.1$  %). Проте ККД (без урахування втрат потужності в реакторі)  $\eta \leq 0.972$ . Зменшення втрат потужності у разі великих значень струму  $I_{Im(1)}$  за припустимих значень  $\text{THDi}_I$  можливо у разі зменшення  $f_M$ . Так за значення  $f_M=5$  кГц і  $I_{Im(1)}=16.4$  А втрати потужності в ключах зменшуються на 29% і ККД  $\eta=0.977$ , проте за  $I_{Im(1)}=2.68$  А значення  $\text{THDi}_I=5.28$  % і діапазон значень струму з припустимим значенням  $\text{THDi}_I$  дещо зменшується.

Автономний режим роботи. Дослідження показали, що додатні показники якості відпрацьовування напруги навантаження і ККД забезпечуються у разі зниження коефіцієнта пропорційної ланки КРС  $k$  в 4 рази і зменшення частоти модуляції до 3.4 кГц. Так за  $I_{Hm(1)}=14$  А,  $\varphi_{(1)}=28^\circ$  значення  $U_{Hm(1)}=311.6$  В (задане значення 312 В),  $\text{THDi}_I=1.48$  %,  $\eta=0.981$ . У разі збільшення  $RL$  навантаження вдвічі, коли  $I_{Hm(1)}=25.5$  А,  $\varphi_{(1)}=31.49^\circ$  значення  $U_{Hm(1)}=309.4$  В,  $\text{THDi}_I=1.46$  %,  $\eta=0.978$ . Осцилограми напруги (мережі  $u_L$ , вхідної  $u$  та вихідної напруги АІН  $u_C$ ) і струмів (мережі  $i_L$ , навантаження  $i_H$ , АІН  $i_C$  і СБ  $i_{CB}$ ), що ілюструють початкове заряджання конденсатора в ланці постійного струму (з нульового значення  $U_{CB}$ ) з наступною роботою в АРР наведені на рис.7. На інтервалі часу 0 – 0.4 с АІН

відключено від РМ, система регулювання не працює. Спочатку СБ працює в режимі КЗ, по мірі заряджання конденсатору струм СБ зменшується. Надалі запускається система регулювання. В момент часу  $t=0.8$  с активно-індуктивне навантаження збільшується вдвічі.

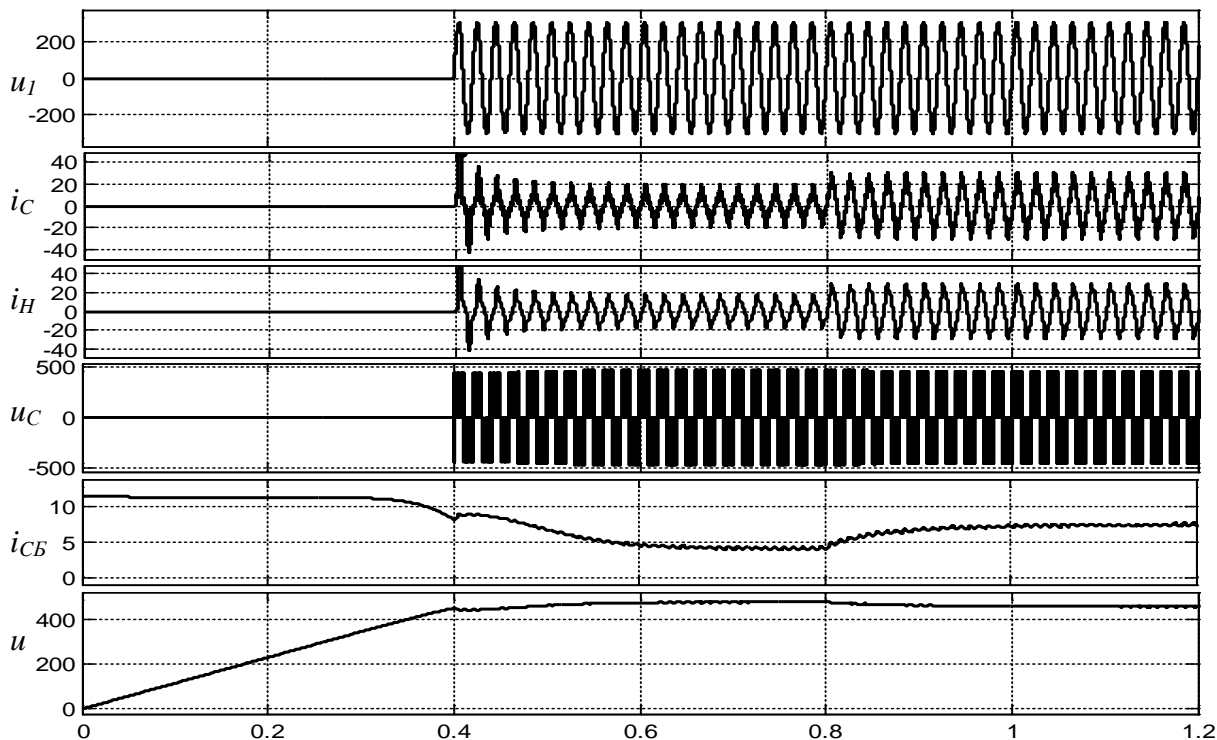


Рис. 7. Осцилограми напруги та струмів у разі вмикання і роботи БПА в АРР

На рис. 8 наведені осцилограми у разі перемикання з АРР до роботи паралельно з мережею. За цього маємо достатньо тривалий перехідний процес щодо відпрацювання заданого значення напруги, коли напруга СБ знижується до 400 В і енергія віддається в РМ. Це пов'язано з обмеженням струму – РН працює «під відсічку».

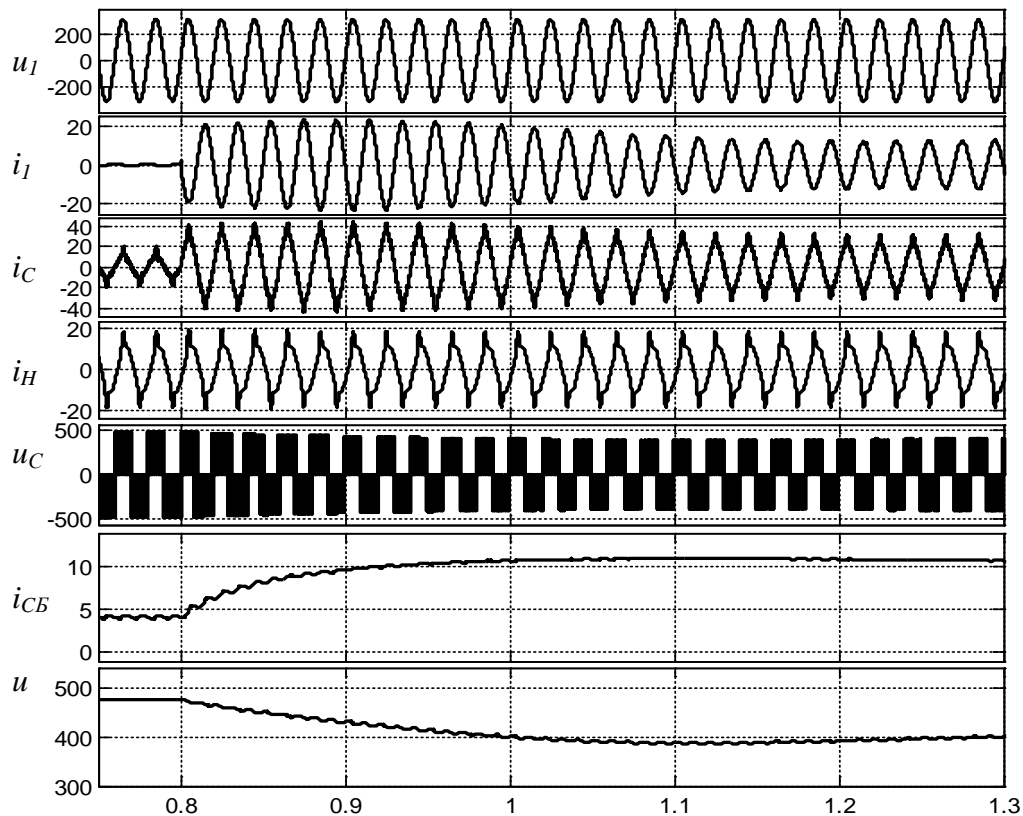


Рис.8. Осцилограми напруги та струмів у разі перемикання з АРР до роботи паралельно з РМ

Використання нелінійного реактору. Дослідження роботи схеми з нелінійним реактором показали, що збільшення амплітуди пульсацій струму АІН внаслідок зменшення індуктивності призводить до погіршення якості струму  $i_l$  і збільшення  $\text{THDi}_1$ . За незмінного налаштування КРС також маємо суттєве (в рази) зростання втрат потужності в ключах АІН. Проте в разі налаштування  $k=0.5k^*$  ( $k^*$  - визначено для максимального значення  $L=0.0042$  Гн) припустимі значення  $\text{THDi}_1 \leq 5\%$  досягаються при  $I_{lm(1)} > 3$  А з урахуванням зміни  $L$  в  $2.5 \div 2.65$  разів відносно початкового (максимального) значення.

**Висновки.** Розроблена математична модель дозволяє здійснювати комплексне дослідження процесів в системі, що містить джерело змінного струму, перетворювальний агрегат з фотоелектричною батареєю та навантаження локального об'єкту. За цього здійснено уточнення налаштування системи керування ПА згідно обраним параметрам та забезпечення  $\text{THDi}_1 \leq 5\%$  у максимальному діапазоні змінювання струму РМ для «денного» режиму та забезпечення придатного ККД у автономному режимі. Досліджено процеси в системі у разі перемикання режимів роботи БПА.

Напрямок подальших досліджень є розробка методу оцінювання спроможності СБ за потужністю у поточних умовах в автономному режимі роботи для систем з «інтелектуальним» керуванням енергоспоживанням локальних об'єктів.

### Література

1. Zheng Zeng. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review/ Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng// *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24.- 2013. - P.223–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>.
2. Шавєлкін А. А. Структури однофазних преобразовательних агрегатів для комбінованих систем електропостачання з фотоелектричними сонячними батареями / А. А. Шавєлкін // «Технічна електродинаміка» ІЕД НАН України № 2. – 2018. - С. 39 – 46. DOI:<https://doi.org/10.15407/techmed2018.02.039>.
3. Шавьолкін О.О. Удосконалення структури контура регулювання струму з використанням ШІМ для мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення/ О.О.Шавьолкін // Технічна електродинаміка ІЕД НАН України № 3.- 2019.- С.37–45, DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.03.037>
4. Шавьолкін О.О. Усунення похибки контуру регулювання струму багатофункціонального однофазного мережевого інвертора/ О.О. Шавьолкін, В.В. Каплун, І.О. Шведчикова// Електротехніка і Електромеханіка. 2019. №4.- С.35-40. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.05.
5. IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.
6. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Date of Publication: 6 April 2018. Electronic ISBN: 978-1-5044-4639-6. DOI: [10.1109/IEEESTD.2018.8332112](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112).
7. Chih-Lung Shen. Grid-Connection Single-Stage Photovoltaic Inverter System with Double-Linear-Approximation MPPT/ Chih-Lung Shen and Jye-Chau Su// *Applied Mathematics & Information Sciences*. 9, No. 1L, pp.205-211 (2015). <http://dx.doi.org/10.12785/amis/091L26>.
8. Liying Huang. Modeling and Stability Analysis of a Single-Phase Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System/ Liying Huang,

### References

1. Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng (2013). Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 223–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>.
2. Shavelkin A. A. (2018) Struktury odnofaznykh peretvoryuval'nykh ahreativ dlya kombinovanykh system elektropostachannya z fotoelektrychnymy sonyachnymy batareyamy [Structures of single-phase converter units for combined power supply systems with photovoltaic solar batteries] *Tekhnichna elektrodinamika IED NAN Ukrayiny - Technical electrodynamicity IED of NAS of Ukraine*, 2, 39 – 46 [in Russian]. DOI:<https://doi.org/10.15407/techmed2018.02.039>.
3. Shavolkin O.O. (2019) Udoskonalennya struktury kontura rehulyuvannya strumu z vykorystannyam SHIM dlya merezhevoho invertora kombinovanoi systemy elektrozhyvlennya [Improvement of the structure of the current control loop using PWM for the network inverter of the combined power supply system] *Tekhnichna elektrodinamika IED NAN Ukrayiny - Technical electrodynamicity IED of NAS of Ukraine*, 3, 37–45 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.03.037>
4. Shavolkin O.O., Kaplun V.V., Shvedchykova I.O. (2019) Usunennya pokhybky konturu rehulyuvannya strumu bahatofunktsional'noho odnofaznoho merezhevoho invertora [Elimination of the error of the current control circuit of the multipurpose single-phase network inverter]. *Elektrotekhnika i Elektromekhanik - Electrical Engineering and Electromechanics*, 4, 35-40. [in Ukrainian] DOI: 10.20998/2074-272X.2019.4.05.
5. IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.
6. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Date of Publication: 6 April 2018. Electronic ISBN: 978-1-5044-4639-6. DOI: [10.1109/IEEESTD.2018.8332112](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112).
7. Chih-Lung Shen and Jye-Chau Su. (2015) Grid-Connection Single-Stage Photovoltaic Inverter System with Double-Linear-Approximation MPPT. *Applied Mathematics & Information Sciences*. 9, No. 1L, pp.205-211. <http://dx.doi.org/10.12785/amis/091L26>.
8. Liying Huang, Dongyuan Qiu, Fan Xie, Yanfeng Chen and Bo Zhang. (2017) Modeling and Stability Analysis of a Single-Phase Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System. *Energies*, 10, 2176; doi:10.3390/en10122176. p.14.

Dongyuan Qiu, Fan Xie, Yanfeng Chen and Bo Zhang// Energies 2017, 10, 2176; doi:10.3390/en10122176. p.14.

9. Mohammed Amine Fares. Photovoltaic panels characterization and experimental testing/ Mohammed Amine Fares, Lotfi Atik, Ghalem Bachir, Michel Aillerie// International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon. Article in Energy Procedia · July 2017.-pp.945-952. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.127.

10. Шавьолкін О.О. Однофазний інвертор комбінованої системи електроживлення з прямим підключенням фотоелектричної сонячної батареї/ О.О. Шавьолкін, О.В. Жила // Вісник КНУТД «Технічні науки» №5 (114), 2017, с. 106-116.

11. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок/ Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Арбатова// Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), - Томск, 2010. – № 2 (22), Ч.2. - С.102-107. 12. Multicrystalline modules LDK-245-20 Professional series. [www.ldksolar.com](http://www.ldksolar.com).

13. SEMIKRON IGBT modules. <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>

9. Mohammed Amine Fares, Lotfi Atik, Ghalem Bachir, Michel Aillerie. (2017) Photovoltaic panels characterization and experimental testing. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon. Article in Energy Procedia · July 2017.-pp.945-952. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.127

10. Shavolkin O.O., Zhila O.V. (2017) Odnofaznyy invertor kombinovanoi systemy elektrozhyvleniya z pryamym pidklyuchenniam fotoelektrychnoyi sonyachnoyi batareyi [Single-phase inverter of combined power supply system with direct connection of photoelectric solar battery] *Visnyk KNUTD - Bulletin of KNUTD*, 5(114), 106-116 [in Ukrainian].

11. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., & Arkatova O.E. (2010) Povysheniye energeticheskoy effektivnosti avtonomnykh fotoelektricheskikh energeticheskikh ustanovok [Increase of power efficiency of independent photo-electric power installations]. *Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2 (22), 102-107 [in Russian].

12. Multicrystalline modules LDK-245-20 Professional series. Retrieved from [www.ldksolar.com](http://www.ldksolar.com).

13. SEMIKRON IGBT modules. Retrieved from: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>.

SHAVOLKIN OLEXANDER

[shavolkin@gmail.com](mailto:shavolkin@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3914-0812>

Researcher ID: T-2652-2018

Kiev National University of Technologies & Design

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБЪЕКТА С МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ АГРЕГАТОМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ ШАВЁЛКИН А. А., СТАНОВСКИЙ Е. Ю., ПИДГАЙНЫЙ Н. О.

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

**Цель.** Разработка детализированной математической модели системы «сеть - многофункциональный преобразовательный агрегат с фотоэлектрической батареей - нагрузка», которая позволит осуществить комплексное исследование процессов в системе с оценкой эффективности агрегата.

**Методика.** Синтез структуры модели и системы управления агрегатом на базе анализа процессов в электрических цепях с использованием компьютерного моделирования.

**Результаты.** Зависимости для аппроксимации вольтамперной характеристики фотоэлектрической батареи. Предложено использование в качестве нелинейного реактора стандартной модели трансформатора с насыщением магнитной цепи. Модель для определения потерь мощности в полупроводниковых ключах по мгновенным значениям токов и напряжений и их каталожным данным.

**Научная новизна.** Усовершенствована математическая модель фотоэлектрической батареи по паспортным данным с введением зависимости напряжения холостого хода от интенсивности солнечного излучения. Усовершенствована структура системы управления с внутренним контуром регулирования тока и переключением внешних регуляторов согласно режимам работы: при работе с сетью в «дневном» режиме это регулятор напряжения фотоэлектрической батареи, в «ночном» - регулятор входного напряжения инвертора; в автономном режиме - регулятор напряжения нагрузки. Обосновано изменение настройки контура регулирования тока и частоты модуляции в автономном режиме, что исключает рост потерь мощности в ключах.

**Практическое значение.** Полученные решения являются основой для проектирования и анализа показателей многофункциональных преобразовательных агрегатов для систем с возобновляемыми источниками электроэнергии с улучшенной энергоэффективностью.

**Ключевые слова:** многофункциональный преобразовательный агрегат, ШИМ, потери мощности в ключах, фотоэлектрическая батарея, переключение режимов работы агрегата, коэффициент гармоник, моделирование.

## MODELING OF THE COMBINED ELECTRIC POWER SYSTEM OF A LOCAL OBJECT WITH MULTIFUNCTIONAL CONVERTER UNIT OF PHOTOVOLTAIC BATTERY SHAVOLKIN O. O., STANOVSKYI YE. YU., PIDHAINYI M. O.

Kiev National University of Technologies and Design

**Purpose.** The development of a detailed mathematical model of the system "network - multifunctional converter unit with a photovoltaic battery - load", which will allow for a comprehensive study of the processes in the system with an assessment of the efficiency of the unit.

**Methodology.** Synthesis of the structure of the model and the control system of the unit based on the analysis of processes in electrical circuits using computer simulation.

**Findings.** Dependencies for approximating the current-voltage characteristics of a photovoltaic battery. The use of a standard model of a transformer with magnetic circuit saturation as a nonlinear reactor is proposed. A model for determining power losses in semiconductor switches by the instantaneous values of currents and voltages and their catalog data.

**Originality.** The mathematical model of the photovoltaic battery is improved according to the passport data with the introduction of the dependence of the open circuit voltage on the intensity of solar radiation. The structure of the control system with an internal current control loop and switching external controllers according to the operating modes has been improved: when working with the network in the "day" mode, it is the voltage controller of the photoelectric battery, in the "night" mode it is the inverter input voltage controller; in standalone mode - load voltage controller. There is a justified change in the settings of the current control loop and the modulation frequency in the standalone mode to eliminate the growth of power losses in the switches.

**Practical value.** The obtained solutions are the basis for the design and analysis of indicators of multifunctional converting units for systems with renewable energy sources with improved energy efficiency.

**Keywords:** multifunctional converting unit, PWM, power loss in the keys, photovoltaic battery, switching operation modes of the unit, THD, modeling.