

© А.В. Ужеловський<sup>1</sup>, В.О. Ужеловський<sup>1</sup>, В.С. Ткачов<sup>1</sup>, Г.В. Кравець<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Дніпровський технікум зварювання та електроніки імені Є.О. Патона, Дніпро, Україна

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ОРІЄНТАЦІЇ В ПРОСТОРІ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ

© A. Uzhelovsky<sup>1</sup>, V. Uzhelovsky<sup>1</sup>, V. Tkachov<sup>1</sup>, G. Kravets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Dnipro Technical School of Welding and Electronics named after E.O. Paton, Dnipro, Ukraine

### SIMULATION MODEL OF DEVICE FOR AUTOMATIC ORIENTATION OPTIMIZATION IN SOLAR BATTERY SPACE

**Мета.** Розробка імітаційної моделі автоматичної системи оптимального регулювання положення сонячних панелей у просторі, що забезпечує, за рахунок стеження за Сонцем, підвищення рівня енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії, врахування збурюючих впливів та здешевлення вартості виробництва електроенергії у порівнянні з використовуваними зараз альтернативними методами.

**Методика досліджень.** Нехтуючи незначною інерційністю перетворювача і сонячної панелі у даній роботі застосована методика поліноміальної апроксимації другого порядку що відображає обернену параболу.

**Результати досліджень.** У зв'язку з значною інерційністю об'єктів технологічного процесу, який прив'язаний до регіональних умов руху сонця протягом доби та пори року, в імітаційній моделі прийняті допущення, що в загальному випадку не виплавають на отримані результати дослідження. В зв'язку з цим була розроблена і досліджена, з використанням програмно-технічних можливостей прикладного програмного комплексу Matlab-Simulink, працездатність імітаційної моделі системи оптимального керування положенням в просторі сонячної батареї, у склад якої введено екстремальний контур регулювання і враховуються збурюючі впливи.

**Наукова новизна.** У статті запропоновано шляхом використання програмно-технічних можливостей прикладного програмного комплексу Matlab-Simulink створення імітаційної моделі системи оптимального керування положенням в просторі сонячної батареї, що включає екстремальний регулятор та враховує збурюючі впливи навколишнього середовища.

**Практична значимість.** Розроблена у середовищі програмного комплексу Matlab - Simulink імітаційна модель здатна до адаптування і може бути рекомендована для використання (на стадії проектування) попереднього знаходження параметрів контролера, налагодження екстремального регулятора системи, отримання прогнозованого перехідного процесу і підвищення продуктивності роботи сонячної електростанції (СЕС). Запропонована модель може бути використана також в учбовому процесі при дослідженні та демонстрації роботи подібних технологічних процесів.

**Ключові слова:** сонячні електростанції, системи оптимального керування, сонячний трекер, актуатор, імітаційна модель, дослідження

**Вступ.** Науково-технічний прогрес в галузі розвитку технічних систем передбачає можливості підвищення енергоефективності цих систем за допомогою вироблення енергії з нетрадиційних джерел.

Згідно проекту Енергетичної стратегії України до 2030 року і подальшої перспективи, основними напрямками розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) для виробництва електроенергії в нашій країні є: використання енергії вітру, гідроенергії сонячної і геотермальної енергії.

Одним із найперспективніших напрямків отримання чистої електричної енергії для електропостачання споживачів є сонячна енергетика. Це одна з галузей альтернативної (відновлюваної) енергії, що розвивається найбільш динамічно. Вона заснована на перетворенні енергії, що випромінюється Сонцем, в інші види енергії, наприклад, в електричну або теплову. Її розвиток стимулюється як чисто економічними факторами (до таких можна віднести постійно зростаючі ціни на традиційні (вугілля, нафта, торф, газ) джерела енергії, зниження вартості обладнання для станцій, що працюють на поновлюваних (альтернативних) джерелах енергетики. В цілому це призводить до збільшення їх продуктивності та зниження собівартості виробленої електроенергії. У 2016 році «сонячна» енергетика стала найдешевшою в порівнянні з іншими альтернативними способами електрогенерації, наприклад, хвильовими або вітровими станціями [1, 2].

Сонце відносно горизонту не стоїть на місці. Кожного дня воно сходить і заходить, а впродовж дня знаходиться у різних точках на небі. В залежності від пори року його положення також є різним. Взимку сонце встає нижче, а влітку – вище. Цей факт доволі сильно впливає на генерацію сонячної електроенергії, адже якщо кут, під яким встановлюють сонячні панелі не є оптимальним, показники виробітку будуть на порядок нижчими [2].

Для найкращого положення сонячних панелей не лише під час сезону, а й на протязі дня використовують сонячні трекери – рухому конструкцію, котра автоматично визначає найкраще положення для сонячних панелей і самостійно встановлює його. Перевагою сонячних трекерів є автоматичне встановлення положення, яке дозволить отримати максимально можливі показники виробітку електроенергії. Крім того, під час несприятливої погоди (град, сніг), трекер встановлює панелі в такому положенні, щоб несприятливі погодні умови не пошкодили їх [3, 4].

У промисловому застосуванні використовують наземні сонячні електростанції (СЕС) з двовісними трекерами (рухомі пристрої для управління по двом вісям, які змінюють кут нахилу та азимут) для того, щоб підібрати оптимальний кут нахилу панелі з досягненням найвищого ККД СЕС на даний час [1, 2, 4, 5].

Перелічені вище фактори дозволяють зробити висновок, що для отримання максимальної генерації електроенергії необхідно обов'язково: підтримувати оптимальний кут нахилу панелі СЕС до сонця, розташовувати панелі СЕС за сонцем у продовж дня (від сходу до заходу), ставити панелі у горизонтальне положення для захисту від зовнішніх чинників та для технічного обслуговування. Покращити якісні та економічні показники СЕС представляється можливим шляхом застосування оптимальної системи керування орієнтацією сонячної батареї.

При цьому, параметри системи попередньо можуть бути визначені з її імітаційної моделі [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні СЕС в своєму складі можуть містити такі типи сонячних батарей: монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові, аморфні тонкоплівкові. В свою чергу СЕС діляться на види: мережеві, автономні та гібридні та типи: баштові; тарілчасті, СЕС на фотоелектричних модулях; СЕС з параболоциліндричними концентраторами; комбіновані; аеростатні; сонячні космічні електростанції; сонячно-вакуумні електростанції; електростанції на двигуні Стірлінга [3,5].

СЕС можуть застосовуватися для різних потреб і при різних умовах. Особливу увагу слід приділити гібридним СЕС, оскільки вони вміщують в собі мережеву та автономну системи і використовують загальну та внутрішню енергію. Вони складаються з лічильника, акумулятора та гібридного інвертора. Останній перетворює струм на змінний. Протягом дня модулі працюють, потім акумулятори заряджаються. Ввечері батареї зберігають енергію. При додаванні модулів відбувається збільшення показника потужності акумуляторів. Використання гібридних СЕС доцільно, при цьому, для умов, де майже відсутній стільниковий зв'язок і немає інших джерел електропостачання, оскільки значно допоможе не тільки заощадити на електроенергії, а й прослужити довгі роки в цілісності.

Вирішення поставленої проблеми приведено в різноманітних літературних джерелах: підручниках, посібниках, статтях, патентах, авторських свідоцтвах і з появою сучасної елементної бази дає можливість і потребу удосконалення роботи СЕС [6, 7].

**Постановка задачі дослідження.** Розробка імітаційної моделі гібридної автоматичної системи оптимального регулювання положення сонячних панелей у просторі, що забезпечує, за рахунок стеження за Сонцем, підвищення рівня енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії, врахування збурюючих впливів та здешевлення вартості виробництва електроенергії у порівнянні з використовуваними зараз альтернативними методами.

**Рішення задачі.** При встановленні сонячних панелей на нерухому конструкцію, використовують так званий «унікальний кут», котрий фіксується в одному положенні на протязі цілого року. Цей кут визначається для кожного регіону окремо і залежить від того, під яким кутом генерація сонячної електроенергії буде максимальною. Якщо кут не змінюється в залежності від положення сонця, то невелика частина виробленої електроенергії втрачатиметься.

Для того, щоб не втрачати цю генерацію, в залежності від пори року цей кут «підправляють»: в теплу пору року сонячні панелі опускають, в холодну – піднімають. Взимку це також актуальне і тим, що при високому куті, в якому розміщені сонячні панелі, легше спадати снігу котрий часто падає на неї [6, 7].

Для збільшення енерговіддачі сонячних панелей максимально не лише під час сезону, а й на протязі дня, як вказано вище, використовують рухомі конструкції, сонячні пристрої стеження (трекери, актуатори), які дозволяють автоматично визначати положення сонячних панелей і самостійно встановлювати його.

Перевагою сонячних трекерів є можливість автоматичного встановлення положення, яке дозволить отримати бажані показники виробітку електроенергії. Крім того, під час несприятливої погоди (град, сніг), трекер встановлює панелі в такому положенні, щоб несприятливі погодні умови не пошкодили їх. Вибір оптимального місця для встановлення сонячних фотомодулів є дуже важливим аспектом при встановленні СЕС [8-10]. Дуже часто саме від того, де стоятимуть сонячні фотомодулі залежить і те, з якою ефективністю вона працюватиме.

У зв'язку з цим у промисловому застосуванні використовують наземні СЕС з двовісними трекерами (управління по двом вісям – зміною кут нахилу та повороту) для того, щоб підібрати оптимальний кут нахилу панелі з досягненням найвищого ККД СЕС на даний час [8, 9].

Характер зниження продуктивності панелей в залежності від кута нахилу (для Київської області) приведено на графіку рис. 1 [9].



Рис.1. Рівень генерації електроенергії від кута нахилу панелей СЕС відносно положення сонця

Із рис.1 видно, що залежність носить характер зворотної параболи, дає можливість простежити і визначити найвищий можливий показник виробництва енергії, установити, що діапазон його екстремального значення знаходиться при встановленні сонячних панелей під кутом 35-45 градусів. В [9] допускають можливість використання приведеної залежності при проектуванні СЕС на більшості території України.

На основі викладеної вище інформації та допущень запропонована і розроблена імітаційна модель комбінованої автоматичної системи керування положенням сонячних панелей у просторі. Особливістю системи є те, що вона містить вузли визначення екстремального значення регулюємих величин та враховує вплив на її роботу можливих збурень.

Система складається з двох ідентичних замкнутих контурів автоматичного регулювання заданого положення сонячних панелей у просторі. Контури послідовно відслідковують та регулюють азимутальний та зенітний кути повороту і нахилу панелей. На рис.2 представлена імітаційна модель, що передбачає відслідковування та регулювання спочатку оптимального положення азимутального кута (нижній контур) сонячних панелей, а після завершення азимутального орієнтування подачу сигналу на початок роботи другого (верхнього контуру), для орієнтування зенітного кута.

Кожен контур містить елементи САР. Для першого контуру (нижнього на схемі): ПІД-контролер (PID Controller1); підсилювально-перетворювальний елемент, безконтактний реверсивний пускач (Gain3); виконавчий пристрій, вихідний вал якого жорстко з'єднаний з сонячною панеллю (Transfer Fcn1, Integrator2); датчик положення (Gain4), нормуючий перетворювач (Gain5); вузол визначення екстремального значення регулюємої величини, що включає два блоки диференціювання, блок ділення, блок, що нівелює ділення на нуль (Derivative2, Derivative3, Divide2, Constant1); імітаційну модель зовнішнього впливу, (зміна пори року, положення Сонця протягом доби, захмарення), яка здійснена в моделі за допомогою блоків SineWave1, що відтворюють синусоїду з параметрами: (амплітуда 10, частота 0.001, фаза 616 рад) та блоки Step3, Transport Delay5.

В кожному замкнутому контурі регулювання задіяні зворотні зв'язки – по положенню вихідних валів актуаторів і, ті, що надходять від вузла екстремального регулятора до елемента порівняння (рис.2).

Складові другого контуру (верхній на рисунку) аналогічні першому контуру.

В імітаційній моделі за об'єкт оптимізації прийнято сукупність складових елементів СЕС, який включає сонячну панель та гібридний інвертор (перетворювач постійного струму в змінний).

Об'єкт регулювання в моделі (нехтуючи незначною інерційністю перетворювача і сонячної панелі) представлений, підсилювачем та поліномом другого порядку, що відображають обернену параболу. В імітаційній моделі це блоки Polynomial, Polynomial 1 (коефіцієнти рівняння поліному прийнято: [-1,+13,+0.1]) та блоки Gain7, Gain8.

Для уявлення початку і наслідків зовнішнього впливу на роботу системи використані блоки затримки, блоки Transport Delay5, Transport Delay6.

Робота системи починається після надходження сигналу завдання на вхід першого контуру від блоку Step1. Значення завдання визначається бажаним положенням сонячної панелі і слугує початком роботи замкнутої САР, яка забезпечує також раціональну кутову швидкість руху виконавчого двигуна та бажаний перехідний процес. В свою чергу налагодження системи на бажаний перехідний процес здійснюється із врахуванням динамічних параметрів елементів системи та знаходженням коефіцієнтів ПІД-контролера.

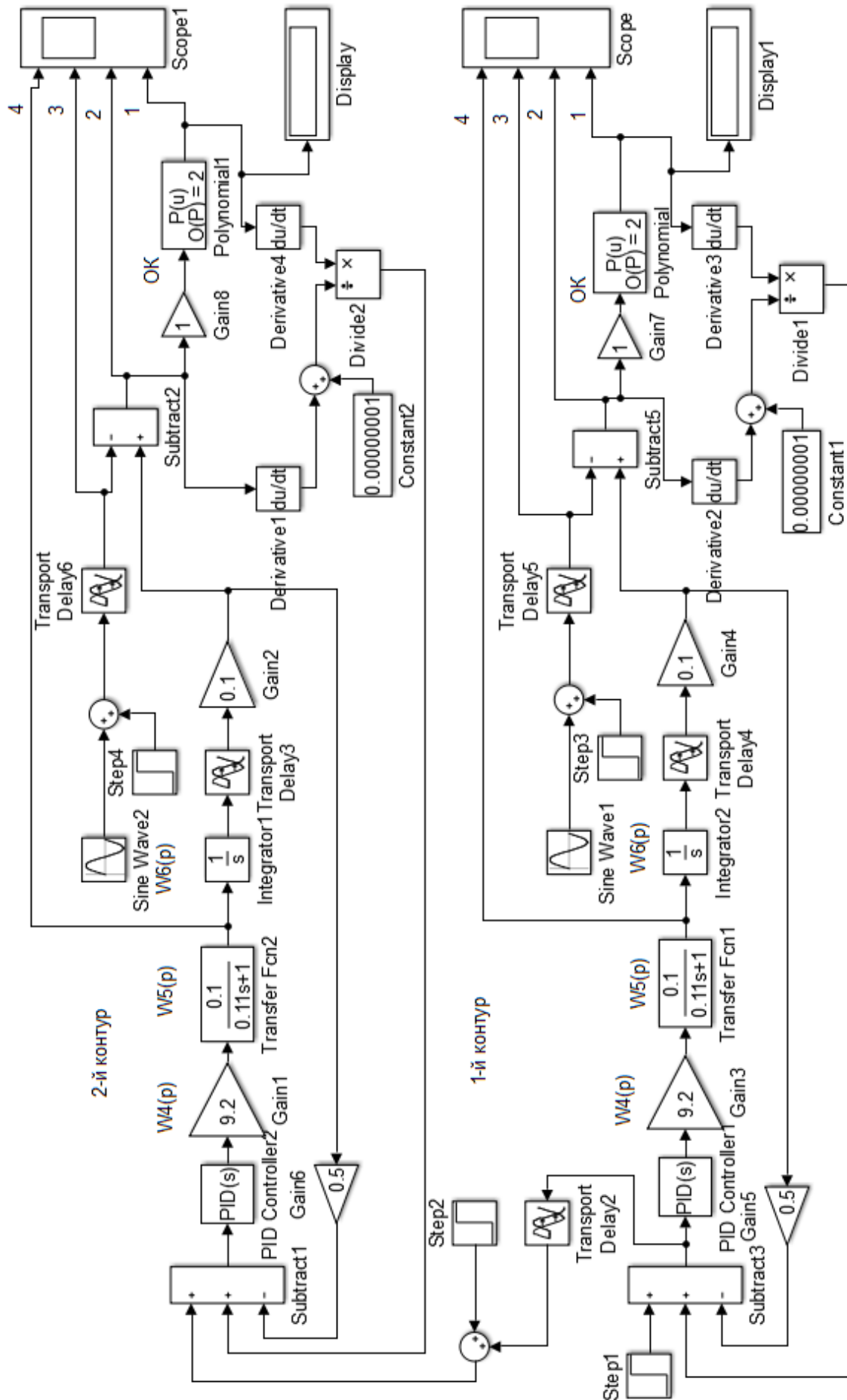


Рис.2. Імітаційна модель оптимальної системи автоматичного регулювання положення сонячних панелей у просторі

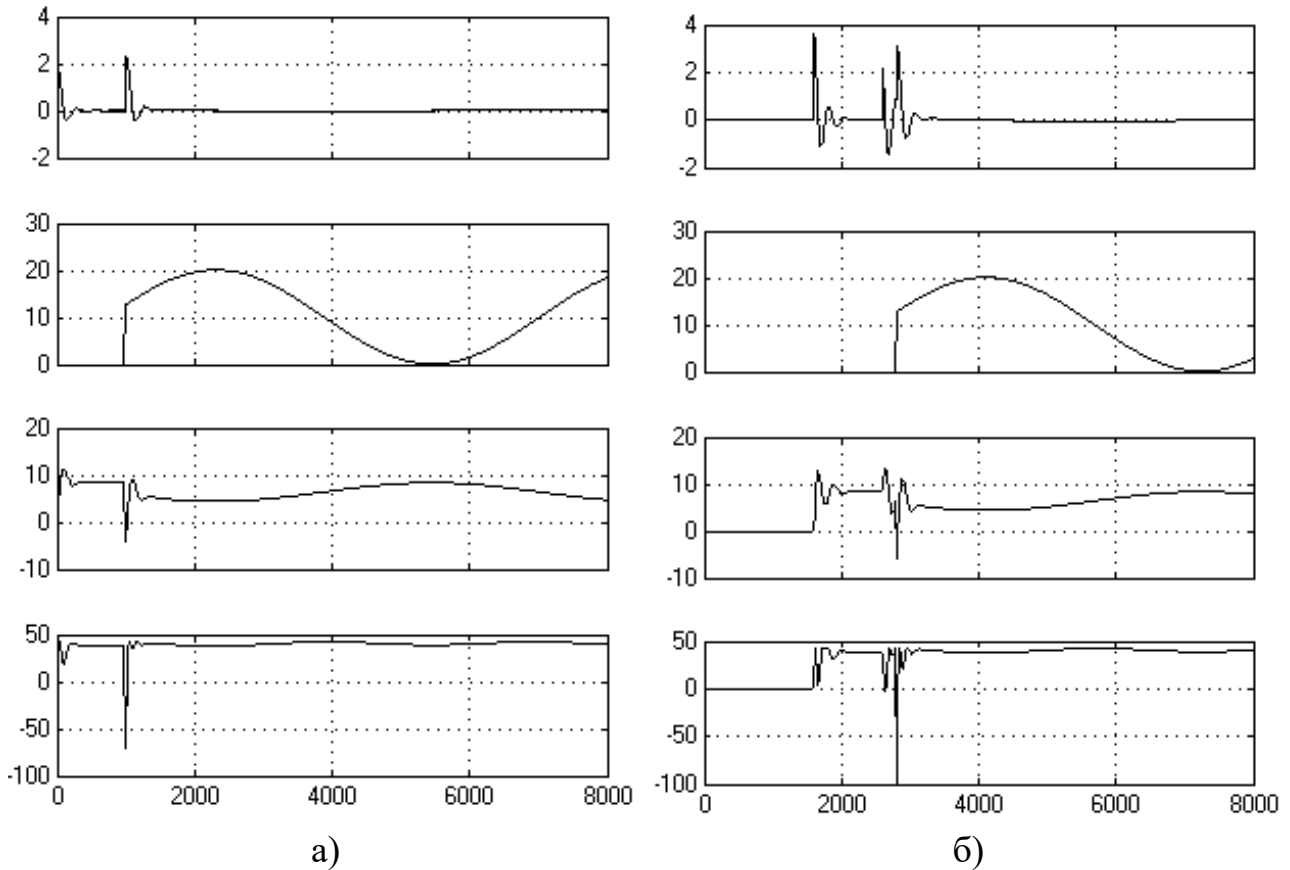


Рис.3. Перехідні процеси регулювання положення сонячних панелей у просторі контурів: азимутального (рис. 3а) та зенітного (рис.3б)

Початок роботи другого контуру визначається величиною різниці сигналів, що надходять від зворотного зв'язку першого контуру і блоків Step1, Step2. Оскільки, сигнали від Step1, Step2 прийняті однаковими за величиною, то коли різниця сигналів від Step1 і зворотного зв'язку першого контуру дорівнюватиме мінімальному значенню ( або нулю), на вхід контуру 2 надійде сигнал лише від Step2. Дія останнього, в свою чергу, почнеться лише через інтервал часу, встановлений у блоці запізнення. Послідовність роботи другого контуру ідентична роботі першого контуру. Таким чином забезпечується бажана циклічність роботи системи в цілому.

На рис.3а і 3б приведені перехідні процеси динамічного режиму, що протікають в обох контурах.

Приведені залежності відповідають наступним параметрам: 1 – регулюєма величина (кути нахилу, повороту); 2 – сигнал розузгодження між дійсним значенням кута і сигналом зовнішнього збурення; 3 – сигнал від зовнішнього збурення; 4 – кутова швидкість виконавчого пристрою.

Залежності відображають процеси поведінки системи при пуску, регулюванні, реакції на зовнішні збурення, взаємодію між контурами.

Реакція на зовнішнє збурення на осцилограмах показана при надходженні зовнішнього збурення на систему для першого контуру через 1000 с, а для другого контуру через 2800 с., тобто після досягнення усталеного значення роботи

першого і другого контурів.

Числові значення, при цьому, відповідно для азимутального кута (вихідний сигнал першого контуру) становить 39,28 рад, а зенітного кута (вихідний сигнал другого контуру) - 40,5 рад, тобто знаходяться в бажаному інтервалі і відповідають оптимальним значенням електрогенерації сонячних панелей при зміні амплітуди та фази зовнішньої збурюючої дії.

### **Висновки.**

1. Розроблена і досліджена, з використанням програмно-технічних можливостей прикладного програмного комплексу Matlab-Simulink, працездатна імітаційна модель системи оптимального керування положенням в просторі сонячної батареї у склад якої введено екстремальний контур регулювання і враховуються збурюючі впливи.

2. Імітаційна модель здатна до адаптування і може бути рекомендована для використання (на стадії проектування) попереднього знаходження параметрів контролера, налагодження екстремального регулятора системи, отримання прогнозованого перехідного процесу і підвищення продуктивності роботи СЕС.

### **Перелік посилань**

1. Титко, Р., & Калініченко, В. М. (2010). *Відновлювані джерела енергії (досвід Польщі для України)*.
2. Виссарионов, В. И., Дерюгина, Г. В., Кузнецова, В. А., & Малинин, Н. К. (2008). *Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов* (под ред. В. И. Виссарионова).
3. Ильин, Р.А., & Ильин А.К. (1999). *Солнечная энергетическая установка. кая установка*. (Авторское свидетельство РФ № 9901). Роспатент.
4. Султанов, В.В. (2016). *Устройство для автоматической ориентации солнечной батареи*. (Авторское свидетельство РФ №171448U1). Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный авиационный технический университет".
5. Палкин, Г.А., Терешкова, Л.К., Горбунов, Р.В., Волошинский, С.А., & Кискин, Д.А. (2019). *Устройство ориентирования солнечной батареи*. (Авторское свидетельство РФ № 2723786С1). Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Забайкальский государственный университет".
6. Голубев, М.Н., Захаров, И.С., Дубяга, А.П., & Шевченко, О.У. (2002). *Концентратор солнечной энергии*. (Авторское свидетельство РФ № 1442960). Курский государственный технический университет.
7. Стребков, Д.С., Осьмаков, М.И., & Плохих, С.А. (2011). *Солнечная электростанция*. (Авторское свидетельство РФ № 2431787). Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства.
8. Сабірзянов, Т.Г., Кубкін, М.В., Солдатенко, В.П., & Козловський, О.А. (2012). Математична модель фотобатареї як джерела електричної енергії. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*, 25 (1), 331-335.
9. Плешков, П.Г., & Солдатенко, В.П. (2018). Моделювання роботи системи оптимального керування режимом електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2018): Матеріали 185 Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 15-16 листопада 2018 р., 103-104.*



10. Ужеловський, В. О., Ужеловський, А. В., Ткачов, В. С., & Сатановський, Д. С. (2021). Імітаційна модель автоматизованої слідкуючої системи підвищення ефективності використання систем сонячних батарей. *Матеріали Третьої науково-практичної конференції студентів ПДАБА, 26 квітня 2021 р.*

### АННОТАЦІЯ

**Цель.** Разработка имитационной модели автоматической системы оптимального регулирования положения солнечных панелей в пространстве, обеспечивающем, за счет слежки за Солнцем, повышение уровня энергетической эффективности технологического процесса производства электрической энергии, учет возмущающих воздействий и удешевление стоимости производства электроэнергии в сравнении с используемыми сейчас альтернативными методами.

**Методика исследований.** Пренебрегая незначительной инерционностью преобразователя и солнечной панели в данной работе применена методика полиномиальной аппроксимации второго порядка отражающей обратную параболу.

**Результаты исследований.** В связи со значительной инерционностью объектов технологического процесса, привязанного к региональным условиям движения солнца в течение суток и времени года, в имитационной модели приняты допущения, которые в общем случае не выплавляются на полученные результаты исследования. В этой связи была разработана и исследована, с использованием программно-технических возможностей прикладного программного комплекса Matlab-Simulink, работоспособность имитационной модели системы оптимального управления положением в пространстве солнечной батареи, в состав которой введен экстремальный контур регулирования и учитываются возмущающие воздействия.

**Научная новизна.** В статье предложено путем использования программно-технических возможностей прикладного программного комплекса Matlab-Simulink создания имитационной модели системы оптимального управления положением в пространстве солнечной батареи, включающей экстремальный регулятор и учитывающий возмущающие воздействия окружающей среды.

**Практическая значимость.** Разработанная в среде программного комплекса Matlab - Simulink имитационная модель способна к адаптивному и может быть рекомендована для использования (на стадии проектирования) предварительного нахождения параметров контроллера, налаживания экстремального регулятора системы, получения прогнозируемого переходного процесса и повышения производительности работы солнечной электростанции. (СЭС). Предложенная модель может быть использована также в учебном процессе при исследовании и демонстрации работы подобных технологических процессов.

**Ключевые слова:** солнечные электростанции, системы оптимального управления, солнечный трекер, актуатор, имитационная модель

### ABSTRACT

**Goal.** Development of a simulation model of an automatic system for optimal regulation of the position of solar panels in space, which provides, at the expense of tracking the Sun, increasing the energy efficiency of the technological process of electricity production, taking into account disruptive effects and reducing the cost of electricity production with currently used alternative methods.

**The research methodology.** Neglecting the insignificant inertia of the transducer and the solar panel in this paper used the method of polynomial approximation of the second line that reflects the inverse parabola.

**Results of the research.** Due to the significant inertia of the objects of the technological process, which is tied to the regional conditions of the sun during the day and season, the simulation model adopted assumptions that generally do not pay off on the results of the study. In this regard, the efficiency of the simulation model of the system of optimal control of the position in the space of the solar battery, which includes an extreme control circuit and takes into account the disturbing effects, was developed and studied using the software and hardware capabilities of the Matlab-Simulink application software.

**Scientific novelty.** The article proposes to use the software and hardware capabilities of the Matlab-Simulink application software to create a simulation model of the optimal position control system in the solar cell space, which includes an extreme regulator and takes into account the disturbing environmental influences.

**Practical significance.** Developed in the Matlab - Simulink software package, the simulation model is adaptable and can be recommended for use (at the design stage) of pre-finding the controller parameters, setting up an extreme system controller, obtaining a predicted transition process and increasing solar power plant productivity. (SES). The proposed model can also be used in the educational process in the study and demonstration of similar technological processes.

**Keywords:** *solar power plants, optimal control systems, solar tracker, actuator, simulation model, research*