

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОРИЕНТАЦИИ ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ SimInTech

Л. А. Михайленко, В. В. Устименко, А. В. Чубарь✉

Сибирский федеральный университет,  
г. Красноярск, Российская Федерация

*Энергетическая эффективность панелей солнечных батарей во многом определяется точностью их ориентации на Солнце. В статье представлены результаты разработки системы программного управления процессом ориентации панели солнечной батареи в зависимости от географического расположения и календарной даты. Модель системы реализована в среде динамического моделирования технических систем SimInTech и включает модель комплекса электромеханических устройств ориентации панели солнечной батареи, дискретный ПИД-регулятор и блок программного управления, которые реализованы на основе типовых блоков и субмоделей SimInTech. Система ориентации панели позволяет изменять координаты угла азимута и места, определяющие ориентацию панели в трехмерном пространстве и управлять ими по заданной программе. Система реализована как пакет проектов, взаимодействующих через общую базу сигналов, которая обеспечивает обмен информацией между проектами, делая модель системы гибкой и универсальной. Результат работы системы управления представлен в 3D модуле визуального редактора, который позволяет наглядно отследить результаты управления и эффективность использования оборудования. Для подтверждения показателей качества управления ориентацией панели солнечной батареи производится расчет процента получаемой энергетической мощности.*

*Ключевые слова: панель солнечной батареи, система управления, динамическое моделирование, SimInTech, 3D визуализация.*

### Введение

Космическая индустрия может показаться на первый взгляд чем-то отдаленным и недоступным, однако большая часть населения даже не предполагает как ежедневно встречает космические технологии, которые применяются в бытовых вещах и используются каждый день. Например, это выражается в использовании современных источников электроэнергии на основе солнечных батарей.

Актуальность использования современных источников электроэнергии связано со стремительной скоростью исчерпывания традиционных ресурсов и ужесточению требований экологии. Дефицит и ограниченность ресурсов постепенно приводят к переходу к альтернативным источникам энергии, которые возобновляемы, а главное экологичны.

✉ alexchub@mail.ru

Преобразование солнечной энергии является одним из перспективных и активно развиваемых направлений [1], так как солнечная энергия широко доступна, практически безгранична и не загрязняет окружающую среду. Важность такого перехода трактуется несколькими фундаментальными аспектами:

- Экология. Относительно продолжительное время основным фактором загрязнения окружающей среды является использование традиционных источников энергии. Их применение, с большей долей вероятности, может привести в будущем к необратимым последствиям и нанести колоссальный удар по экологии планеты.

- Экономика. Благодаря стремительному развитию энергетической отрасли в настоящее время наблюдается тенденция уравнивания стоимости энергии, производимой альтернативными источниками относительно энергии, производимой традиционными источниками [2].

- Политика. Стоит отметить, что альтернативные источники энергии обладают практически

неограниченным запасом, чего не скажешь о традиционных источниках. С данной точки зрения вполне справедливо полагать, что страны, которые в полной мере освоили или в ближайшее время освоят технологии добычи энергии альтернативным способом, в будущем будут являться лидерами «энергетической гонки», тем самым диктуя собственные условия и цены на мировом рынке.

Россия на данной стадии развития значительно отстает в этом направлении, но постепенно политика в области возобновляемых источников изменяется. За 2014–2016 годы введено более 130 МВт новой мощности возобновляемых источников энергии, где преимущество имеют солнечные электростанции. В 2017 году введено еще более 140 МВт – больше, чем за предыдущие два года, из них более 100 МВт приходится на солнечные, а 35 МВт – ветровые электростанции. Россия делает ставку не только на освоение передовых технологий, но и на развитие компетенций с целью дальнейшего экспорта высокотехнологичной продукции [3].

## 1. Постановка задачи

Повышение эффективности солнечной электроэнергетики связано, в частности, с автоматизацией процесса ориентации панелей солнечных батарей наземных геоелектростанций. В данной статье рассматривается именно эта цель.

Из всех существующих программных комплексов для разработки системы управления ориентацией солнечной батареи выбор был сделан в пользу российского аналога зарубежных моделирующих программ – прикладного программного пакета *SimInTech*. По характеристикам данный вариант подобен иностранным программам, таким как *Simulink*, *SumSim* и др. Практичный редактор структурных схем, эффективные численные методы, встроенный язык программирования и широкая библиотека типовых блоков – позволяют осуществить модели практически любой степени сложности [4–7].

Моделирование в среде *SimInTech* процесса ориентации панели солнечной батареей реализуется на основе четырех моделей: модели управления положением Солнца, модели ориентации панели солнечной батареи, модели системы управления и модуля визуализации 3D, которые взаимодействуют друг с другом через единую базу сигналов (рис. 1). Каждая из моделей реализована в виде отдельного проекта *SimInTech*, объединенных в пакет (рис. 2). Такая организация дает возможность построения различных алгоритмов управления с учетом влияния параметров отдельных элементов системы и окружающей среды.



Рис. 1. Структура взаимодействия моделей

Панель солнечной батареи любой наземной геоелектростанции имеет определенные географические координаты по отношению к экватору, а, следовательно, по отношению к текущему положению Солнца на земном горизонте. Система ориентации панели, включающая комплекс электромеханических устройств, позволяет изменять азимут и координаты места, определяющие ориентацию панели в трехмерном пространстве в автоматическом режиме с целью наилучшей ее ориентации на Солнце [8; 9].

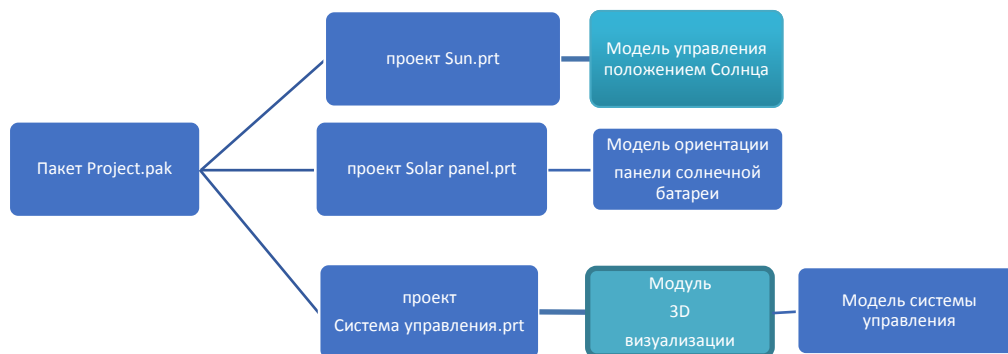


Рис. 2. Реализация пакета в системе динамического моделирования *SimInTech*

Регулируемыми выходными данными являются единицы измерения углов азимута (изменяющийся в диапазоне от  $-90$  до  $90$  градусов) и места (изменяющийся в диапазоне от  $0$  до  $90$  градусов). Управляющими координатами являются сигналы управления электроприводами в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Движение панели солнечной батареи осуществляется благодаря сигналам, которые проходят через субмодель «Контроль», далее на исполнительные электродвигатели, где и происходит изменение положения панели в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

## 2. Построение модели

Реализованная в среде *SimInTech* модель ориентации панели солнечной батареи состоит из опорно-поворотной системы (рис. 3), которая включает в себя три субмодели: «Контроль» и «Каналы ориентации» по осям  $X$  и  $Y$ .

Субмодель «Контроль» подразумевает получение выходного сигнала из суммирования положительного и отрицательного сигнала, которые проходят блок «Ограничитель», благодаря свойству устанавливается пороговый минимум и максимум сигнала.

Вторая и третья субмодель «Канал ориентации» обеспечивают подсистему наведения установки на Солнце (рис. 4) в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Для получения необходимой точности и качества изменения положения объекта необходимо включить на вход системы дискретный ПИД-регулятор. Цель использования регулятора – получение точного управляющего сигнала. Элемент

«дискретный ПИД-регулятор» является субмоделью, в которой используется стандартный блок *SimInTech* «Дискретный ПИД-регулятор». Период квантования задан равным  $1$  [10].

По получившемуся графику (рис. 6) можно сделать вывод, что переходный процесс исходной системы – колебательный с большим процентом перерегулирования. В связи с плохим качеством переходного процесса, а также с целью приведения графика к монотонности, был оптимизирован ПИД-регулятор (рис. 5).

Установим необходимые параметры:

- время расчета –  $100$  с;
- допустимое перерегулирование –  $11\%$ .

В результате оптимизации вектор из трех коэффициентов (составляющих) направляется в блок *Запись в список сигналов*, откуда вычисленные значения перенаправляются в дискретный ПИД-регулятор, изменяя его параметры. В блоке *Оптимизация* заданы следующие свойства: абсолютная точность подбора значений выходов –  $0,001$ , начальное приближение выходов блока –  $0$ , минимальное значение выходов блока –  $0$ .

В результате использования ПИД-регулятора и настройки его коэффициентов ( $K_p = 0,2$ ;  $K_i = 1,1243072 \cdot 10^{-289}$ ;  $K_d = 2.1219958 \cdot 10^{-314}$ ) переходный процесс (рис. 6) системы автоматического управления приобрел следующие характеристики: перерегулирование –  $0\%$ , ошибка –  $0\%$ , время переходного процесса –  $17$  с., колебательность отсутствует.

В качестве основных внешних возмущающих воздействий выступают текущие координаты Солнца, определяющие его текущее положение по отношению к панели солнечной батареи.

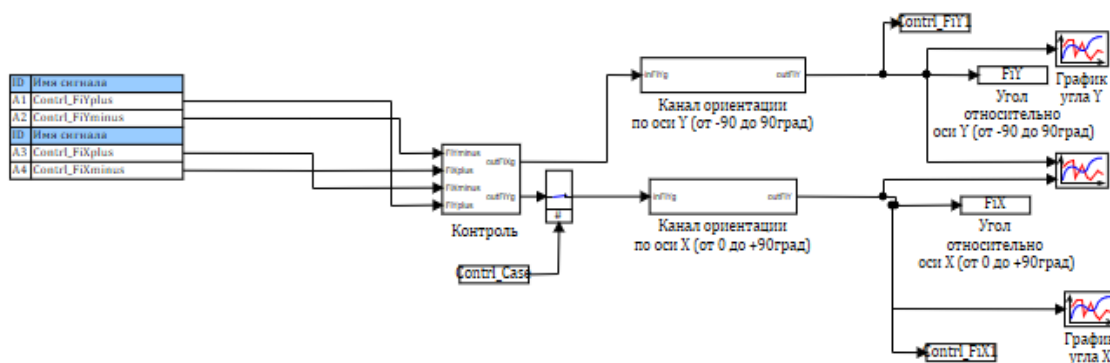


Рис. 3. Модель ориентации панели солнечной батареи

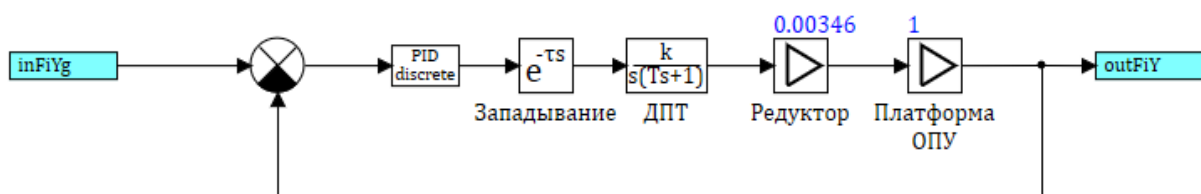


Рис. 4. Структурная схема механической подсистемы ориентации

Модель солнечного объекта отображает принцип перемещения объекта по заданной траектории (рис. 7). Схема определяет основные функциональные части изделия, их назначения и взаимосвязи между ними.

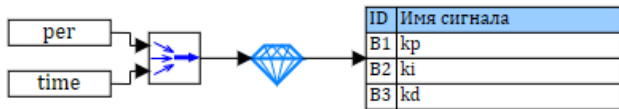


Рис. 5. Схема оптимизации параметров регулятора

Схема состоит из модулей:

- список сигналов, подаваемых на вход;
- имитатор движения Солнца;
- текущее положение Солнца.

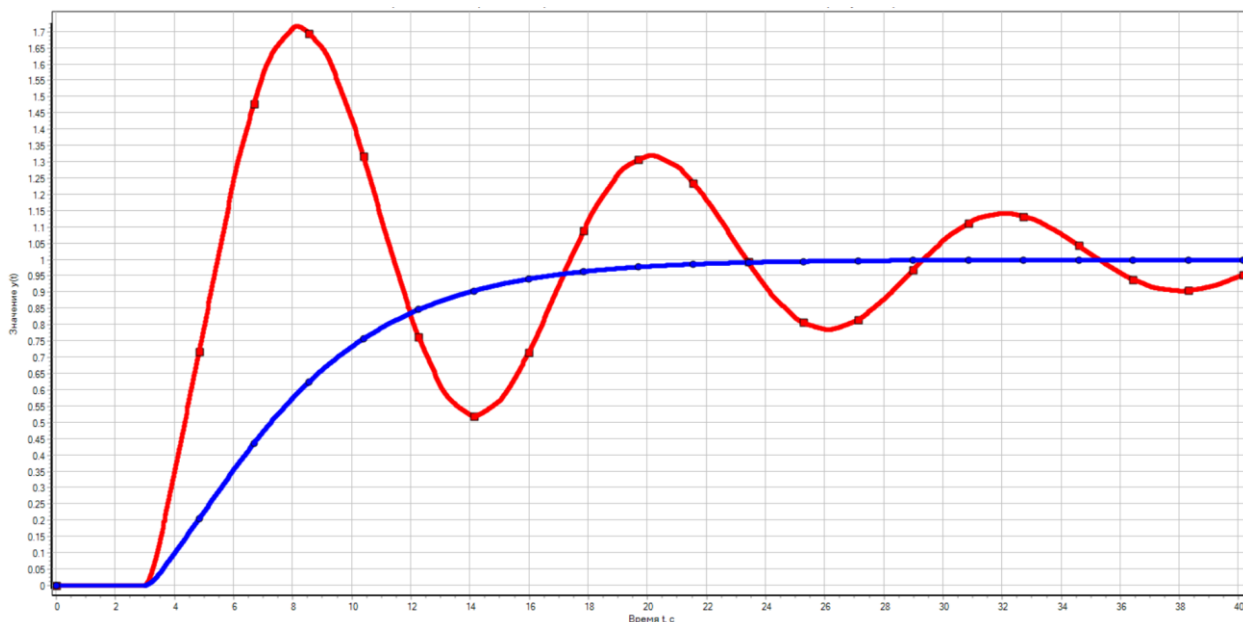


Рис. 6. График переходного процесса привода до/после оптимизации ПИД-регулятора

Данные загружаются в две переменные (точка восхода, точка захода), последующая загрузка приводит к перезаписи данных в переменной. Загрузка переменных позволяет регулировать работу ключей: подъем и спуск объекта. Завершающим шагом работы схемы является передача данных в модуль визуального 3D проектирования.

Основной задачей 3D-модуля является наглядная демонстрация ориентации панели солнечной батареи. Опираясь на основные функции, написанные в скрипте проекта (рис. 10) солнечная батарея, получая данные о траектории движения Солнца, производит своевременно необходимый поворот и угол наклона (рис. 11).

Для оценки эффективности управления в модели производится расчет процента получаемой энергетической мощности при текущем поло-

жении панели солнечной батареи. Расчет организован в блоке программирования, где выполнена формула расчета (рис. 12).  
 Субмодель «Управление положением Солнца» содержит в себе схему управления приводом движения (рис. 8). Аналогично предыдущей модели на вход поступают задающие сигналы управления, что приводит в действие необходимые ключи для продолжения пути сигналов. Поступающие сигналы объединяются в одну точку, которая создает необходимую траекторию движения.

При запуске проекта из стороннего файла осуществляется загрузка следующих данных: точка восхода и захода Солнца. В данной работе в качестве стороннего файла использовался файл *Excel*. Написанная программа в скрипте (рис. 9) позволяет читать и загружать в базу данных необходимые сведения (порядковый день) из указанной строки и столбца таблицы.

Входными данными для определения процента получаемой мощности является сигнал

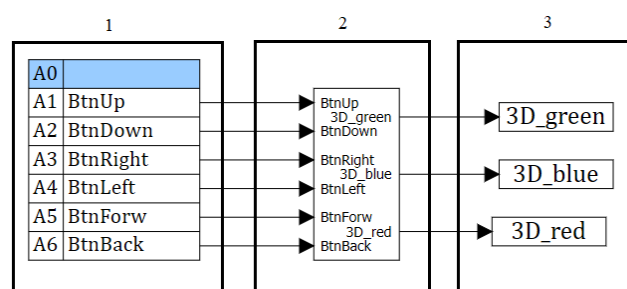


Рис. 7. Модель управления положением Солнца

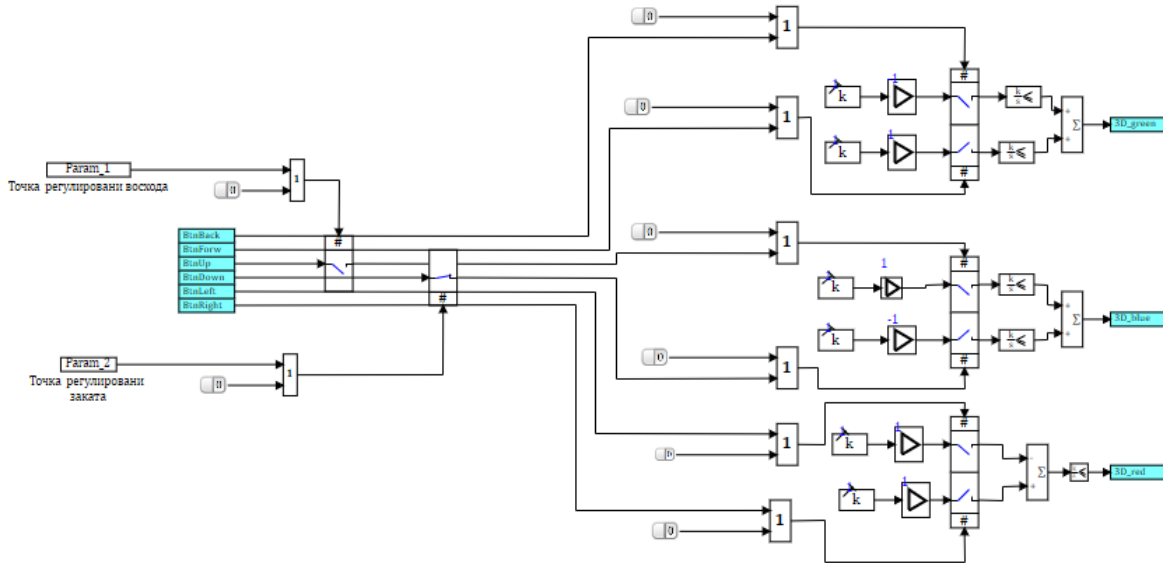


Рис. 8. Модель движения Солнца

```

initialization
id = excelcreateobject;
filename = expandfilename( "data.xlsx" );
excelopendocument(id, filename);
row_count = excelgetrowcount(id, 1);
col_count = excelgetcolcount(id, 1);
Param_Sunrise = excelgettext(id, 1, Param_Num, 1);
Param_Sunset = excelgettext(id, 1, Param_Num, 2);
excelquit(id, True);
end;

```

|    | A    | B     | C | D       | E |
|----|------|-------|---|---------|---|
| 1  | 8.53 | 16.2  |   | Декабрь |   |
| 2  | 8.55 | 16.19 |   |         |   |
| 3  | 8.57 | 16.18 |   |         |   |
| 4  | 8.58 | 16.17 |   |         |   |
| 5  | 9    | 16.17 |   |         |   |
| 6  | 9.1  | 16.16 |   |         |   |
| 7  | 9.3  | 16.15 |   |         |   |
| 8  | 9.4  | 16.15 |   |         |   |
| 9  | 9.6  | 16.14 |   |         |   |
| 10 | 9.7  | 16.14 |   |         |   |
| 11 | 9.8  | 16.14 |   |         |   |
| 12 | 9.9  | 16.13 |   |         |   |
| 13 | 9.10 | 16.13 |   |         |   |
| 14 | 9.11 | 16.13 |   |         |   |
| 15 | 9.12 | 16.13 |   |         |   |
| 16 | 9.13 | 16.13 |   |         |   |

Рис. 9. Программный код чтения из файла/содержимое файла

```

Ysol = 1;
Zsol = 1;
Rsol=0.5;
Xpos=10;
Ypos=0;
Zpos=0;
Xpos1 = 0;
Ypos1 = 1.5;
Zpos1 = 0;
wid = 0.2;
len = 8;
hei = 3;
Obj2 = viewer3dplotsphere(WinID, Rsol, Xsol, Ysol, Zsol);
Viewer3DSetTexture(WinID, Obj2, "VKR/1.jpg");
Viewer3DSetWindowSize(WinID, 1000, 600);
Viewer3DSetWindowPosition(WinID, 600, 130);
Viewer3DSetCameraTarget(WinID, Obj2);
viewer3dsetcameraposition(WinID, -5, 5, 5);
viewer3dsetcolor(WinID, Obj2, 65535);
Obj1 = viewer3dplotparallelpiped(WinID, len, hei, wid, Xpos, Ypos, Zpos);
Viewer3DSetTexture(WinID, Obj1, "VKR/2.jpg");
Viewer3DSetCameraTarget(WinID, Obj1);
Viewer3dsetcolor(WinID, Obj1, 12632256);
end;
Viewer3dsetposition(WinID,Obj1, Xpos1, Ypos1, Zpos1);
Viewer3dsetreturn(WinID, Obj1, Contrl_FiY1);
Viewer3dsetroll(WinID, Obj1, Contrl_FiZ1);
Viewer3dsetpitch(WinID, Obj1, Contrl_FiX1);
Viewer3dsetposition(WinID, Obj2, -Xpos+3D_red, 3D_blue, 3D_green);
Viewer3DSetEulerAngles(WinID, Obj2, 0, 0, time*10);

```

Рис. 10. Скрипт проекта

о состоянии угла наклона панели солнечной батареи (рис. 13).

### Заключение

В программной среде *SimInTech* из типовых блоков реализована модель системы управления процессом ориентации панели солнечной батареи, построенная на основе моделей комплекса электромеханических устройств с оптимизирован-

ными настройками ПИД-регуляторов и траектории движения Солнца. Система автоматического управления обеспечивает программное управление углами азимута и места панели в автоматическом режиме с целью наилучшей ее ориентации на Солнце в зависимости от географического положения и календарной даты. Подключен модуль 3D визуализации текущей ориентации панели относительно Солнца и контроль эффективности использования солнечной энергии.

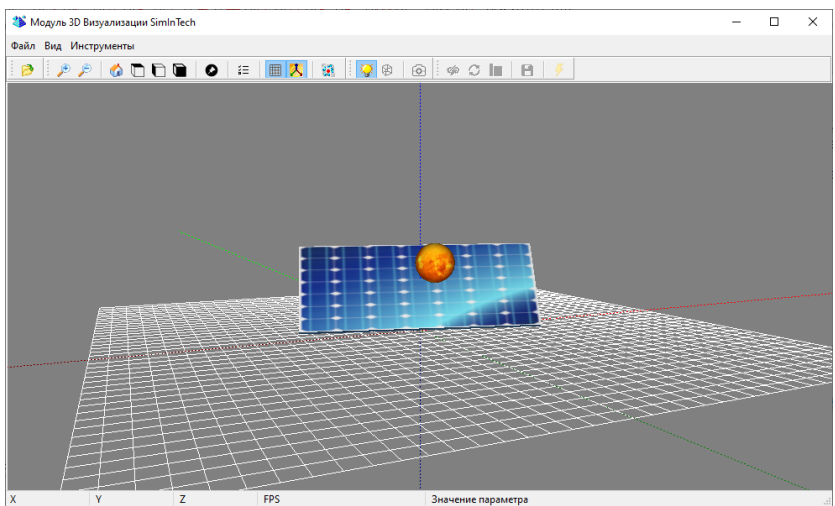


Рис. 11. Создание объекта «Солнце»

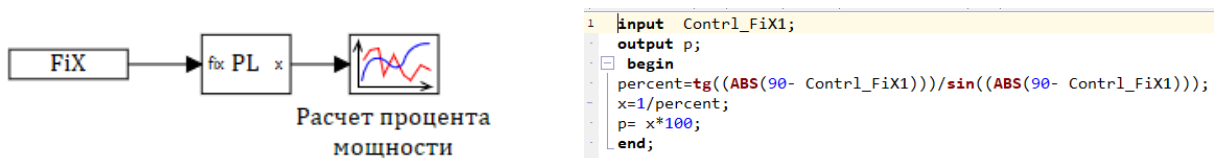


Рис. 12. Субмодель реализации расчета процента мощности от угла наклона панели солнечной батареи в среде моделирования *SimInTech*

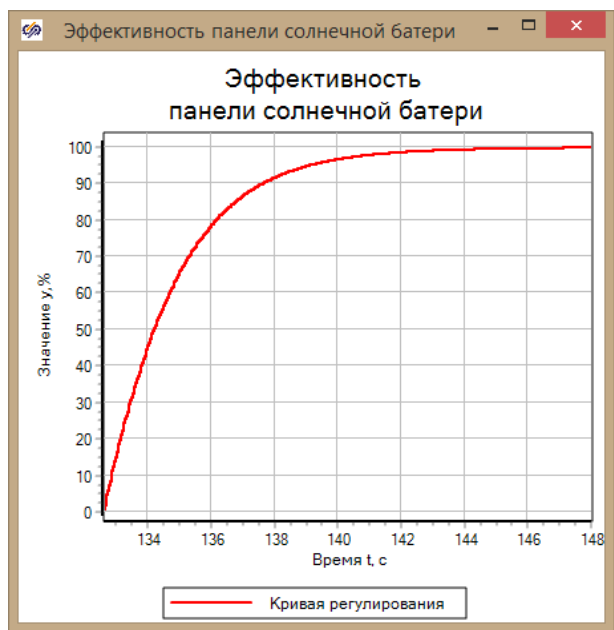


Рис. 13. Эффективность панели солнечной батареи

## Список литературы

- [1] Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 07.09.2020).
- [2] Солодков М. В., Елфимова Ю. В. Развитие солнечной энергетики как фактор экономической безопасности России [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-solnechnoy-energetiki-kak-faktor-ekonomicheskoy-bezopasnosti-rossii/viewer> (дата обращения: 25.04.2020).
- [3] Ратнер С. В. Стоимостной анализ развития солнечной энергетики в мире и ее перспективы для России // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2014. № 3 (197). С. 90–97.
- [4] Карташов Б. А., Щекатуров А. М., Шабаев Е. А., Козлов О. С. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.
- [5] Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. URL: [https://help.simintech.ru/#o\\_simintech/o\\_simintech.html](https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html) (дата обращения: 15.02.2020).
- [6] Мызникова В. А., Устименко В. В., Чубарь А. В. Построение нечетких регуляторов для систем управления автономных объектов в среде SimInTech // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 1. С. 22–27. doi: 10.26732/2618-7957-2019-1-22-27.
- [7] Чубарь А. В., Пожаркова И. Н., Устименко В. В. Построение алгоритмов управления термовакuumными испытаниями в среде SimInTech // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 3. С. 149–154. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-149-154.
- [8] Аржанов К. В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 4. С. 139–146.
- [9] Китаева М. В., Юрченко А. В., Охорзина А. В., Скороходов А. В. Автономная система слежения за солнцем для солнечной энергосистемы // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 196–199.
- [10] Пид регулирование пид регулятор на практических примерах [Электронный ресурс]. URL: <https://trubymaster.ru/pid-regulirovanie-pid-reguljator-na-prakticheskikh> (дата обращения: 18.05.2020).

## DESIGNING A CONTROL SYSTEM FOR THE ORIENTATION OF SOLAR PANELS IN THE DYNAMIC SIMULATION ENVIRONMENT OF SIMINTECH TECHNICAL SYSTEMS

**L. A. Mikhaylenko, V. V. Ustimenko, A. V. Chubar**

*Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*The energy efficiency of solar panels is largely determined by the accuracy of their orientation to the Sun. The article presents the results of the development of a software control system for the orientation of the solar panel, depending on the geographical location and calendar date. The system model is implemented in the environment of dynamic modeling of SimInTech technical systems and includes a model of a complex of electromechanical devices for solar panel orientation, a discrete PID controller and a software control unit, which are implemented on the basis of standard SimInTech blocks and submodels. The panel orientation system allows to change the coordinates of the azimuth angle and location that determine the orientation of the panel in three-dimensional space and control them according to a given program. The system is implemented as a package of projects that interact through a common signal base, which provides information exchange between projects, making the system model flexible and universal. The result of the control system is presented in the 3D module of the visual editor, which allows you to visually track the results of management and the efficiency of equipment use. To confirm the quality indicators of the orientation control of the solar panel the percentage of the received energy capacity is calculated.*

*Keywords: solar panel, control system, dynamic modeling, SimInTech, 3D visualization.*

## References

- [1] *Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda* [Energy Strategy of the Russian Federation until 2035]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 07.09.2020). (In Russian)
- [2] Solodkov M. V., Elfimova Yu. V. *Razvitie solnechnoj energetiki kak faktor ekonomicheskoy bezopasnosti Rossii* [Development of solar energy as a factor of economic security of Russia]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-solnechnoy-energetiki-kak-faktor-ekonomicheskoy-bezopasnosti-rossii/viewer> (accessed 25.04.2020). (In Russian)
- [3] Ratner S. V. *Stoimostnoj analiz razvitiya solnechnoj energetiki v mire i ee perspektivy dlya Rossii* [Cost analysis of solar energy development in the world and its prospects for Russia] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 2014, no. 3 (197), pp. 90–97. (In Russian)
- [4] Kartashov B. A., Shchekaturov A. M., Shabaev E. A., Kozlov O. S. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* [Environment for dynamic modeling of technical systems SimInTech]. Moscow, DMK Press, 2017, 424 p. (In Russian)
- [5] *Spravochnaya sistema SimInTech* [SimInTech help system]. Available at: [https://help.simintech.ru/#o\\_simintech/o\\_simintech.html](https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html) (accessed 15.02.2020). (In Russian)
- [6] Myznikova V. A., Ustimenko V. V., Chubar A. V. Fuzzy controllers construction in the SimInTech environment // *Spacecrafts & Technologies*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 22–27. doi: 10.26732/2618-7957-2019-1-22-27.
- [7] Chubar A. V., Pozharkova I. N., Ustimenko V. V. Creation of control algorithms thermal vacuum tests in the SimInTech environment // *Spacecrafts & Technologies*, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 149–154. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-149-154.
- [8] Arzhanov K. V. *Dvuhkoordinatnaya sistema navedeniya solnechnyh batarej na Solnce* [Two-coordinate system for pointing solar panels at the Sun] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 139–146. (In Russian)
- [9] Kitaeva M. V., Yurchenko A. V., Okhorzina A. V., Skorokhodov A. V. *Avtonomnaya sistema slezheniya za solncem dlya solnechnoj energosistemy* [Autonomous system of tracking the sun for the solar power system] // *Polzunovsky vestnik*, 2011, no. 3/1, pp. 196–199. (In Russian)
- [10] *Pid regulirovanie pid reguljator na prakticheskikh primerah* [PID regulation PID controller on practical examples]. Available at: <https://trubymaster.ru/pid-regulirovanie-pid-reguljator-na-prakticheskikh> (accessed 18.05.2020). (In Russian)

## Сведения об авторах

*Михайленко Людмила Андреевна* – магистрант Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский федеральный университет в 2020 году. Область научных интересов: моделирование систем и процессов в различных средах проектирования.

*Устименко Валерия Владимировна* – магистрант Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский федеральный университет в 2020 году. Область научных интересов: моделирование систем и процессов в различных средах проектирования.

*Чубарь Алексей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, руководитель научно-учебной лаборатории АСУТП Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский политехнический институт в 1980 году. Область научных интересов. Автоматизация управления техническими системами и технологическими процессами.