

Моделирование привода системы ориентации солнечных батарей в условиях ветровых воздействий

А.В. Седов, М.С. Каплина, В.В. Попов, О.О. Пушкарева

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

Аннотация: Рассматривается вариант построения модели привода ориентации солнечных батарей на основе двигателя постоянного тока и ПИД управлением. Ориентация в пространстве осуществляется по двум осям: азимутальной и зенитальной. Модель используется для оптимальной настройки параметров ПИД-регулятора при отработке требуемых углов ориентации в условиях порывистых ветровых воздействий. В качестве основных критериев настройки используются: малое перерегулирование при отработке угла, апериодический (не колебательный) характер переходных процессов, минимальная динамическая ошибка компенсации ветровых воздействий при отработке угла, минимальное время установления при отработке воздействия. Оптимизация регулятора осуществлялась методом покоординатного спуска. Приводится вариант настройки регулятора для оптимального режима с приведением графиков процессов, подтверждающих его практическую оптимальность. Модель построена для солнечных панелей типа TopRay 180M TPS105S площадью около 1 м² и мощностью 180 Вт, закрепленных на двуосном приводе. Построенная модель привода может использоваться при реализации цифрового двойника системы контроля и управления приводом ориентации панелей солнечных батарей.

Ключевые слова: математическая модель привода, ПИД-регулятор, солнечная панель, порывистые ветровые воздействия, азимутальная и зенитальная ориентация, оптимизация по комплексному критерию.

Введение

Солнечная энергетика представляет собой одну из перспективных и быстроразвивающихся отраслей современной энергетики, поскольку обладает неоспоримым преимуществом в виде бесплатного и неисчерпаемого источника энергии, доступного практически повсеместно. Значимость преобразования солнечной энергии продолжает возрастать в контексте растущих экологических проблем, истощения запасов углеводородного сырья, обеспечения энергетической безопасности, реализации автономной генерации электроэнергии.

Увеличение солнечной энергетики в энергетическом балансе наблюдается в ряде стран мира. Так, в 2023 году доля солнечной энергии в

мировом энергопотреблении составила 12%, по сравнению с 2% в 2013 году. В лидерах Китай, США и Индия, на которые приходится более 60% мировых мощностей солнечной энергетики [1]. Таким образом, возрастает актуальность работ над усовершенствованием технологий в этой области. Повышение качества работы солнечных батарей и безаварийной работы в случае порывистых внешних ветровых воздействия является одним из направлений улучшения эффективности работы систем солнечных батарей, экономии ресурсов и безопасности работы.

Принципы построения привода солнечных панелей

Общая схема двух координатного привода панели солнечной батареи (ПСБ) [2,3] имеет вид рис.1.

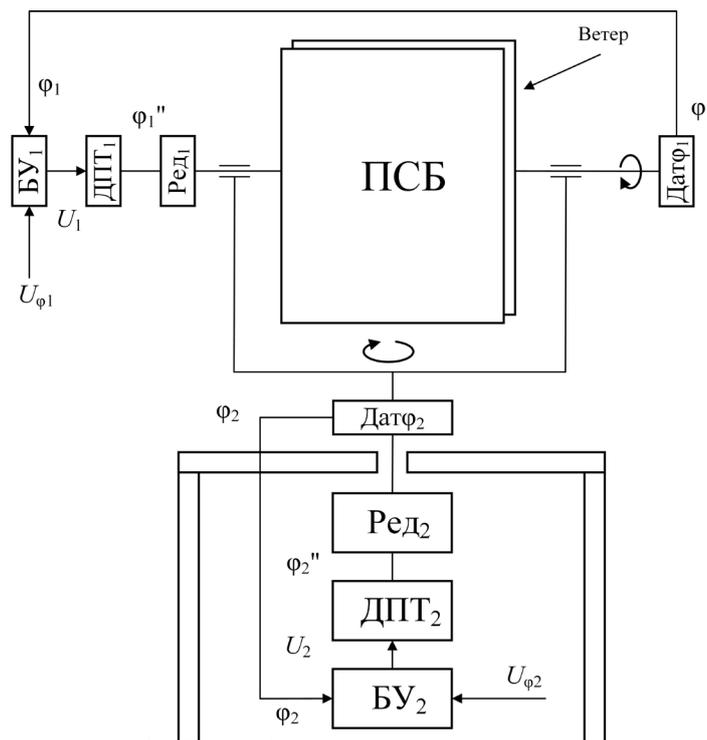


Рис.1. – Схема привода солнечной панели

ПСБ находится на подвижной платформе, регулируемой по двум осям углами φ_1 и φ_2 . Электродвигатели постоянного тока ДУТ₁ и ДУТ₂ с червячными редукторами Ред₁ и Ред₂ реализуют отработку углов ориентации, а измерение текущего положения панели по осям осуществляется при

помощи датчиков - энкодеров Дат φ_1 и Дат φ_2 . Блоки управления БУ $_1$ и БУ $_2$ производят расчёт оптимального положения панели и соотносят его с фактическим, после чего высчитывают рассогласование и подают управляющий сигнал через драйверы двигателей привода соответствующей оси.

На рис. 2 приведена упрощённая схема контура управления ориентацией по одной из осей [4,5], где U_φ , φ^* и ΔU_φ – сигналы напряжения пропорциональные заданному углу поворота, напряжения энкодера, пропорциональное фактическому углу поворота и сигнал рассогласования; U – напряжение, подаваемое на двигатель в соответствии с алгоритмом ПИД-управления, $k_{дпт}$ и $T_{дпт}$ – коэффициент передачи и постоянная времени двигателя. φ , φ' , φ'' – углы поворота платформы, вала редуктора и вала двигателя; k_p , $k_{пл}$ и $k_{дат}$ – коэффициенты передачи редуктора, платформы и датчика поворота оси.

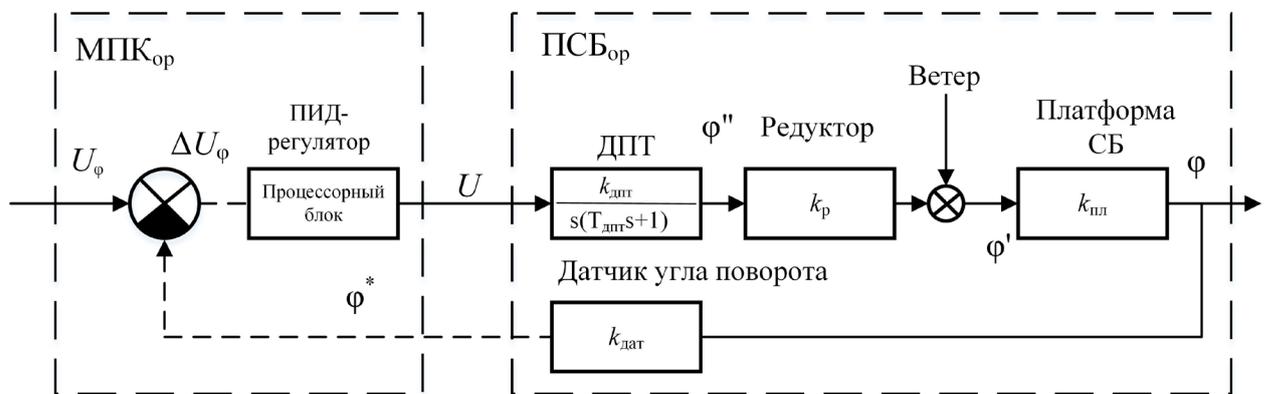


Рис.2. – Схема контура управления ориентацией по одной оси

МПК $_{ор}$ – микроконтроллер ориентации, реализует цифровой ПИД-регулятор, работающий в квазинепрерывном режиме управления; ПСБ $_{ор}$ – непрерывная часть управляющего контура. МПК $_{ор}$ производит расчёты и формирует управляющий сигнал U при этом реализует алгоритм ПИД-управления, обеспечивающий следующие показатели качества:

- отсутствие статической ошибки отработки угла $\Delta\varphi_{cm}=0$;

- перерегулирование при отработке угла $\sigma < 7\%$;
- апериодический (неколебательный) характер процессов;
- минимальная динамическая ошибка компенсации ветровых воздействий при отработке угла;
- минимальное время установления при отработке воздействий.

Придаточная функция реализуемого ПИД- регулятора имеет вид [6,7]:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_p + k_i/s + k_d N/(1 + N \frac{1}{s}),$$

где k_p , k_i , k_d – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального каналов, N – коэффициент фильтрации дифференциальной составляющей ($N=100$).

Для систем управления ориентацией солнечных систем характерны следующие особенности [8,9]:

- низкая частота колебаний в установке;
- небольшая скорость вращения и малая мощность двигателей;
- большое передаточное число редуктора;
- значимые колебания момента и угла от ветровых возмущений;
- нелинейная зависимость момента от углов вращения;
- изменение момента инерции при повороте рам с ПСБ.

Панель солнечных батарей жестко связана с платформой и опорно-поворотным устройством, то есть значение $k_{\text{пл}}=1$. Двигатель постоянного тока опишем передаточной функцией вида:

$$W_{\text{ДПТ}}(s) = k_{\text{ДПТ}} / (s(T_{\text{ДПТ}}s + 1)).$$

При моделировании задались типовым значением $T_{\text{ДПТ}} = 0,24$ с и $k_{\text{ДПТ}} = 185$ град/с/В для ДПТ типа СЛ-521 [5].

Среди условий внешней среды, существенно влияющих на работу системы выделим ветровые нагрузки, способные изменить момент нагрузки, угол поворота и даже вывести установку из строя.

Результаты моделирования привода солнечных панелей

Была реализована компьютерная модель привода солнечной батареи (рис.3) в соответствии со схемой рис.2, с использованием которой и производилось моделирование и оптимизация управления.

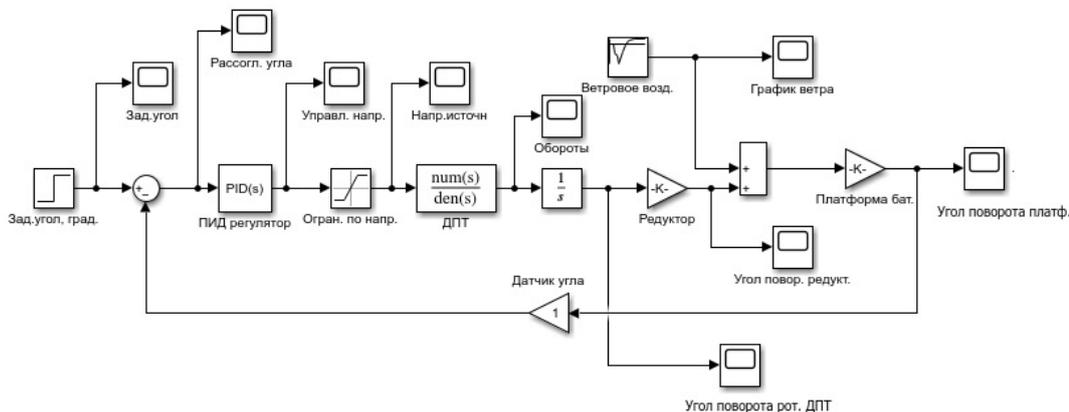


Рис.3. – Компьютерная модель контура управления ориентацией по одной оси

При моделировании воздействие ветровых нагрузок на процесс работы системы, задали следующие параметры модели из табл. 1. И результаты представили в виде графиков (рис. 5).

Таблица 1 – Параметры модели

$k_{ДПТ}$, град/с/В	$T_{ДПТ}$, с	k_r	$k_{пл}$	$k_{дат}$, В/град
185	0,24	0,00346	1,0	1,0

Моделирование осуществляли в Matlab Simulink. Установили максимальное ветровое воздействие в 5 м/с, воздействующее в течении 20 с. Оценили отклонение панели в виде графика рис.4. Максимальное отклонение от истинного значения составило 24 градуса.

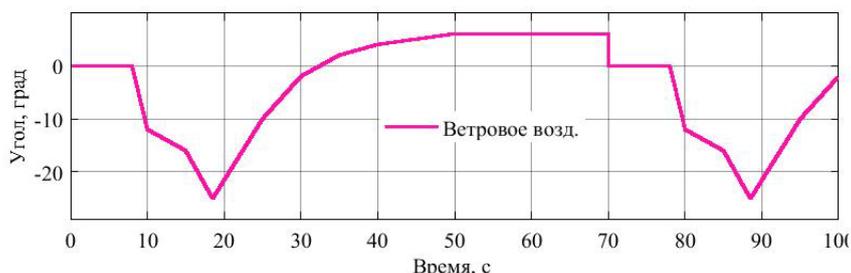
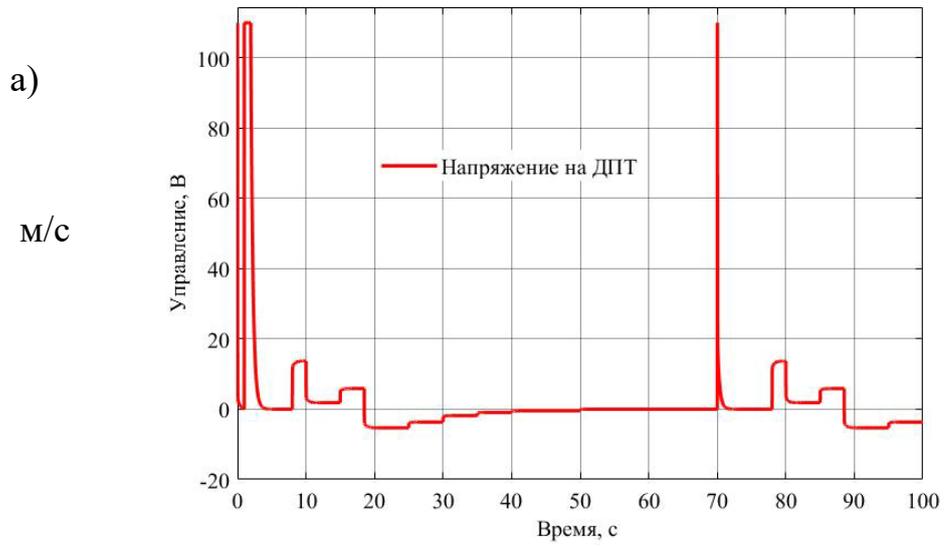


Рис.4. –



Отклонение
панели при
ветровом
воздействии 5

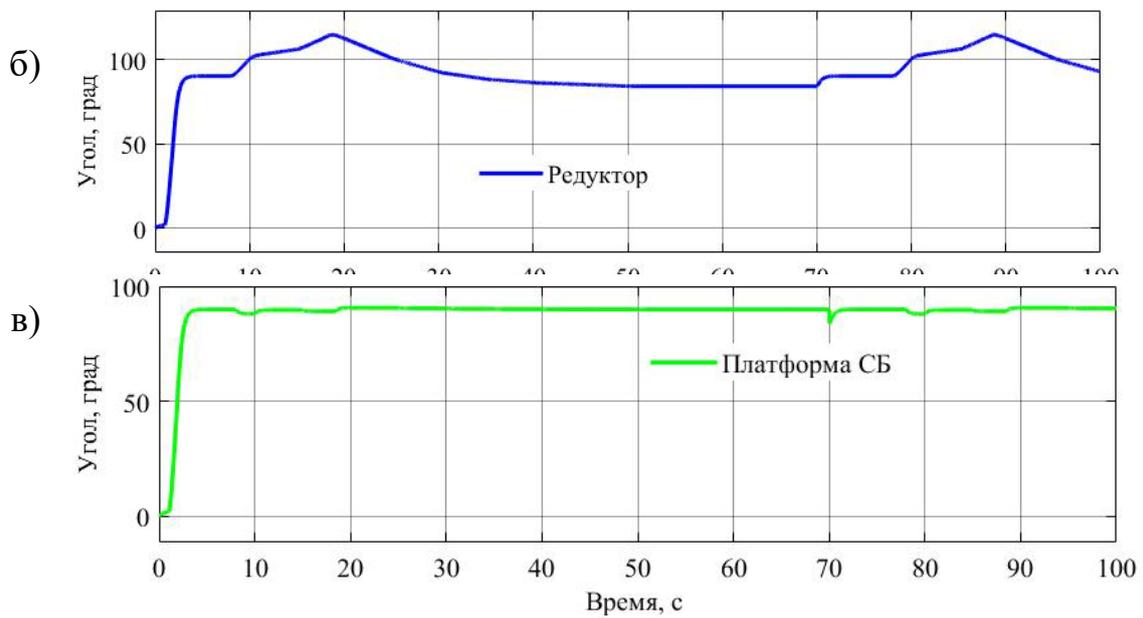


Рис.5. – Результаты моделирования работы привода при ветровом возмущении

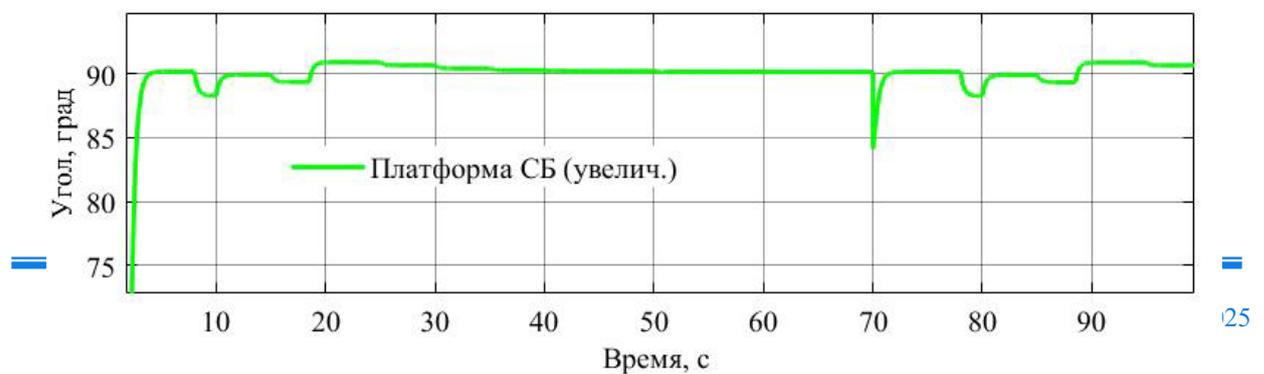


Рис.6. – График изменения угла ориентации платформы в увеличенном масштабе

На рис.5 показаны результаты моделирования одновременной отработки поворота панели на угол 90 градусов из нулевого положения, начиная с момента $t=1$ с и компенсации ветровых возмущений, действующих на панель, график изменения которых приведен на рис.4.

Приведены следующие графики на рис.5: а) изменения управляющего напряжения ДПТ в соответствии с ПИД-законом регулирования; б) изменения угла, обрабатываемого редуктором; в) изменения угла ориентации платформы. На рис. 6 приведено изменения угла ориентации платформы в увеличенном масштабе.

Параметры ПИД-регулятора изначально выбирались по методике Зиглера-Николса [10], но затем уточнялись итерационно методом покоординатного спуска. Уточнение проводилось из-за неудовлетворительных результатов по ряду выдвинутых критериев, например, перерегулирование достигало 35%.

Окончательно подобранные, оптимальные по комплексному критерию параметры ПИД-регулятора следующие: $k_p = 5$, $k_i = 0.01$, $k_d = 1.2$. При этих параметрах показатели качества управления следующие: отсутствует статическая ошибка; перерегулирование при отработке угла σ около 6%; аperiodический характер процессов; динамическая ошибка компенсации ветровых воздействий при отработке угла около 6° при отклонениях 24°; время установления при отработке воздействий – 3 с.

Выводы

Предложенная математическая и компьютерная модели контура управления приводом панели солнечной батареи позволили:

- реализовать эффективное управление ориентацией панели солнечных батарей в условиях умеренных ветровых нагрузок с использованием адаптивно настроенного ПИД-регулятора;
- построенную модель и принцип настройки регулятора возможно использовать при реализации обучаемых систем с цифровым двойником для контроля и управления ориентацией батарей.

Литература

1. Чаплыгин И.С. Искусственный интеллект и солнечная энергетика: перспективы мирового рынка. М.: Litres, 2025. 128 с.

2. Аржанов К.В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 4. С. 139-146.

3. Селиванов К.В. Автоматическое позиционирование панели солнечных батарей и слежение за направлением максимального потока света // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2021. № 2(135). С. 115-132.

4. Пученкин А.В., Титов В.Г., Ходыкина И.В. Анализ алгоритмов управления регулятором точки максимальной мощности для солнечных батарей // Инженерный вестник Дона, 2013, №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2020

5. Положенцев Д.С., Джукич Д.Й., Захаров Д.Н. Система управления исполнительного электропривода устройства поворотной солнечной батареи космического аппарата // Омский научный вестник. 2019. №5 (167). С. 72-76.

6. Латынцев С.В., Меус С.В., Овчинников А.В., Бабанов А.А. Оценка эффективности алгоритма управления приводом солнечных батарей космического аппарата с целью создания моментов для разгрузки электромеханического исполнительного органа системы ориентации и

стабилизации // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7. № 2 (55). С. 348-352.

7. Деменкова Т.А., Финенко А.А. Аппаратная реализация алгоритмов для систем управления солнечными батареями // Вестник МГТУ МИРЭА, 2015. № 2 (7). С.20-29.

8. Almukhtar A.H. Design of phase compensation for solar panel systems for tracking sun // Energy procedia. 2013. Vol. 36. Pp. 9-23.

9. Седов А.В., Пушкарева О.О., Жариков К.О., Вербин Н.В. Особенности функциональных взаимосвязей параметров изменяющегося во времени диагностического сигнала при моделировании, распознавании состояний и мониторинге систем // Инженерный вестник Дона, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9583

10. Ощепков А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB. М.: Лань, 2013. 208 с.

References

1. Chaplygin I.S. Iskusstvennyy intellekt i solnechnaya energetika: perspektivy mirovogo rynka [Artificial intelligence and solar energy: Global Market prospects]. Moscow: Liters, 2025. 128 p.

2. Arzhanov K. V. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2014. Vol. 324, № 4. Pp.139-146.

3. Selivanov K.V. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroyeniye. 2021. № 2(135). Pp. 115-132

4. Puchenkin A.V., Titov V.G., Khodykina I.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2020

5. Polozhentsev D.S., Dzhukich D.Y., Zakharov D.N. Omskiy nauchnyy vestnik. 2019. №5 (167). Pp. 72-76



6. Latyntsev S.V., Meus S.V., Ovchinnikov A.V., Babanov A.A. Mekhanika, upravleniye i informatika. 2015. Vol. 7. № 2 (55). Pp. 348-352
7. Demenkova T.A., Finenko A.A. Vestnik MGTU MIREA, 2015. № 2(7). Pp. 20-29
8. Almukhtar A.H. Energy procedia. 2013. Vol. 36. Pp. 9-23.
9. Sedov A.V., Pushkareva O.O., Zharikov K.O., Verbin N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9583
10. Oshchepkov A.YU. Sistemy elektronnoy upravleniya: teoriya, primeneniye, modelirovaniye v MATLAB [Automatic control systems: theory, application, modeling in MATLAB]. Moskva. Lan', 2013. 208 p.

Дата поступления: 18.03.2025

Дата публикации: 24.05.2025