



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СЕТЕВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ РККТУ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Лысова Анна Сергеевна, ИГ-02м-18

Васьков Алексей Геннадьевич, доцент, к.т.н.

Тягунов Михаил Георгиевич, профессор, проф., д.т.н.

Москва, 21 мая 2020 г.



Основные задачи исследования

Актуальность и новизна проведенных исследований: в климатических условиях России одним из ключевых факторов являются воздействие низких температур на работу солнечных модулей, существующие математические модели зависимости эффективности солнечных модулей от температуры практически неприменимы к таким условиям, требуется разработка методики по определению максимальной энергетической эффективности в диапазоне отрицательных температур

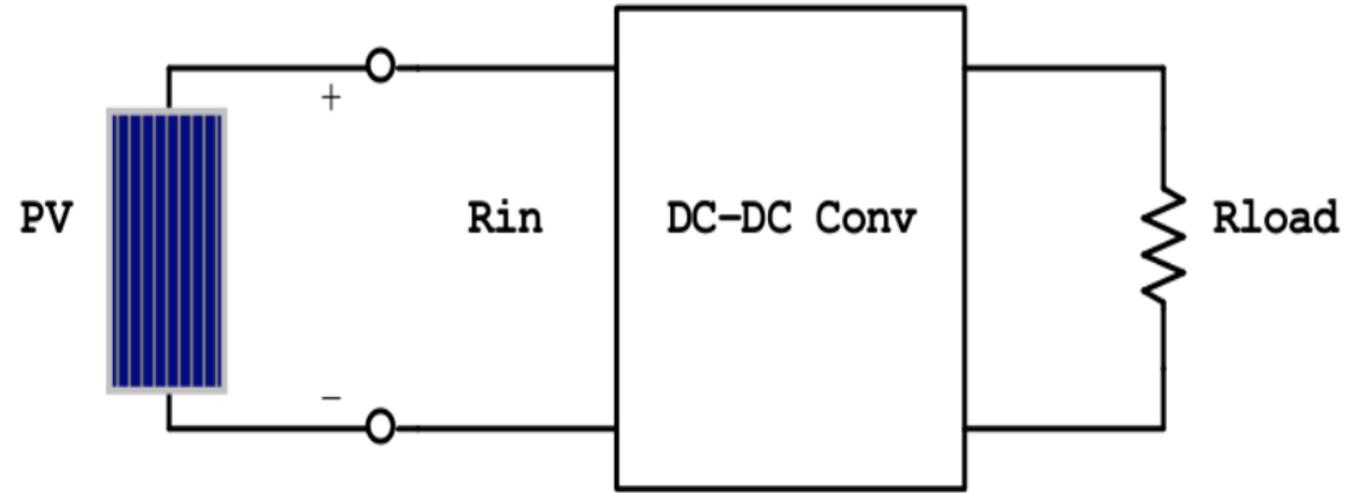
Цель исследования: построение математической модели зависимости максимальной энергетической эффективности солнечного модуля в отрицательных и положительных диапазонах температур

Основные задачи исследования:

- изучение влияния температуры окружающей среды на работу солнечных модулей;
- анализ энергетических характеристик солнечных модулей;
- разработка программной системы определения максимальной эффективности солнечного модуля;
- разработка алгоритма для исследования работы солнечных модулей в отрицательных и положительных диапазонах температур;
- автоматизация расчетов математической модели солнечного модуля при отрицательных и положительных температурах;
- визуализация изменения основных параметров солнечного модуля при различных температурах;
- разработка методики построения математической модели зависимости максимальной энергетической эффективности солнечного модуля в отрицательных и положительных диапазонах температур.



Объект исследования



В качестве объекта исследования рассматривается ТФЭС (тестовая фотоэлектрическая станция) «Nevel» в г. Новочебоксарск, работающая на электроэнергетическую систему и которая состоит из девяти солнечных модулей. За объект исследования выбирается один из данных солнечных модулей, параметры которого представлены в таблице:

Название модуля	Дата установки модуля	Номинальная мощность, Вт	Площадь, м ²	Номинальная эффективность, %
Avelar Стекло-Пленка	2016-08-01	235	1.67	14.07



Теоретическая предпосылка

Эффективность солнечного модуля рассчитывается по формуле:

$$\longrightarrow \boxed{Eff_{real} = \frac{U \cdot I}{E \cdot F}} \quad (1)$$

U – напряжение солнечного модуля, В;

I – ток солнечного модуля, А;

E – интенсивность солнечного излучения, Вт/м²;

F – суммарная площадь солнечных элементов фотоэлектрического модуля, м².

Математическая модель зависимости эффективности солнечного модуля от температуры определяется формулой:

$$\longrightarrow \boxed{Eff_{model} = Eff_0(1 - 0,0045(t_{sm} - 25^\circ\text{C}))} \quad (2)$$

Eff_{model} – эффективность солнечной панели, %;

Eff_0 – номинальная эффективность солнечной панели при температуре 25°C, %;

t_{sm} – температура поверхности солнечной панели, °С.

Температура поверхности солнечного модуля определяется согласно формуле:

$$\longrightarrow \boxed{t_{sm} = t_0 + \frac{E_n}{800}(t_{25} - 20^\circ\text{C})} \quad (3)$$

t_0 – температура окружающей среды, °С;

E_n – интенсивность солнечного излучения в данный момент времени, Вт/м²;

t_{25} – температура нормальной эксплуатации солнечной панели, которая равняется 25°C.

Сопротивление нагрузки солнечного модуля определяется по формуле:

$$\longrightarrow \boxed{R = \frac{U}{I}} \quad (4)$$



Расчет математической модели зависимости эффективности солнечного модуля (СМ) от температуры

Преобразование таблицы с исходными данными о параметрах солнечного модуля в таблицу для построения математической модели $Eff(t_{sm})$ с помощью языка программирования Python



Таблица 1. Исходная информация об основных параметрах солнечного модуля за 01.03.2017

Date	Time	U, В	I, А	E_n , Вт/м ²	t_0 , °С
01.03.17	7:34:54	19.66	0.426	107.3	-12.4
01.03.17	7:35:24	24.49	0.514	108.8	-12.3
01.03.17	7:35:54	29.68	0.6	107.3	-12.1



Таблица 2. Расчет математической модели зависимости эффективности солнечного модуля от температуры

Date	Time	U, В	I, А	E_n , Вт/м ²	t_0 , °С	t_{sm} , °С	Eff_{model} , %	Eff_{real} , %	R, Ом
01.03.17	07:34:54	19.66	0.426	107.3	-12.4	-11.73	16.40	4.67	46.15
01.03.17	07:35:24	24.49	0.514	108.8	-12.3	-11.62	16.39	6.93	47.65
01.03.17	07:35:54	29.68	0.6	107.3	-12.1	-11.43	16.38	9.94	49.47



```

if __name__ == "__main__":
    ## исходные параметры: #####
    # имя исходного файла
    filename = "Module3_100_2017-03-01.csv"
    # папка для сохранения результатов
    res_output = 'result_' + filename.split('.')[0] + '/'
    t_norm = 25
    efficiency = 0.1407 # 20%
    delta = 5
    F = 1.67
    marker = 'o'
    dpi_ = 100
    if not os.path.exists(res_output):
        os.makedirs(res_output)
    df = pd.read_csv(filename, sep=';')
    columns_name = list(df.columns)
    df = df.iloc[847:2072, :]
    df.rename(columns={'U(Volts)': 'U',
                      'I(Amps)': 'I',
                      'P(Wt)': 'P',
                      'L(Wt/m^2)': 'E',
                      'T(deg.Cels.)': 'T',
                      # 'Tsm(deg.Cels.)': 'T_sm',
                      # 'R(Ohm)': 'R'
                      },
              inplace=True)
    df['U'].astype(float)
    df['I'].astype(float)
    df['P'].astype(float)
    df['E'].astype(float)
    df['T'].astype(float)

    df['T_sm'] = df['T'] + df['E'] / 800 * (t_norm - 20)

    # определение КПД по формуле (2) при 14,07%
    df['Eff_fact'] = efficiency * (1 - 0.0045 * (df['T_sm'] - 25))

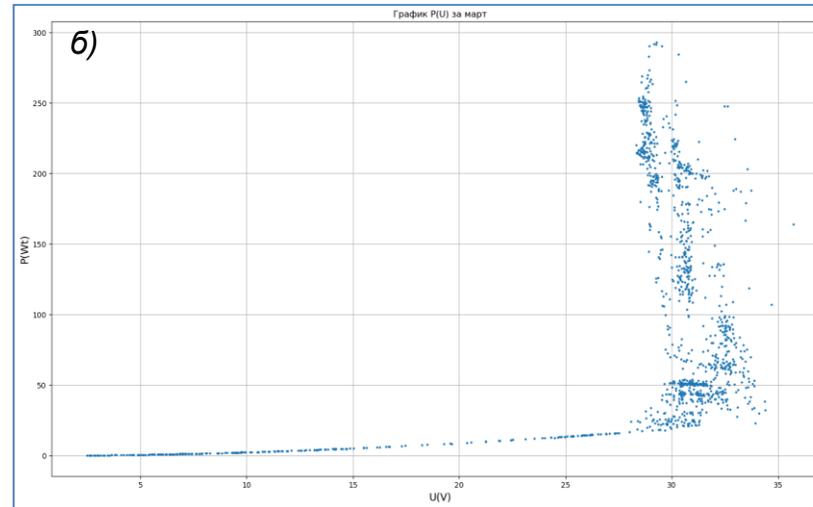
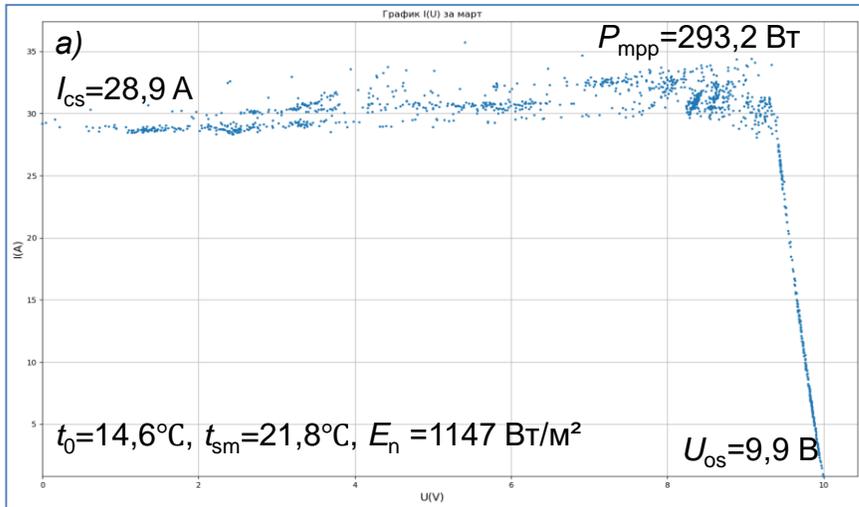
    # расчет реального кпд Eff(real)
    df['Eff_real'] = (df['U'] * df['I']) / (df['E'] * F)

    # расчет сопротивления R(Ohm)
    df['R'] = df['U'] / df['I']
    df['R'] = df['R'].replace(np.inf, 0)
    
```



Визуализация энергетических характеристик солнечного модуля

Выбранный день для построения графиков - 01.03.2017: диапазон температур окружающей среды [-13,2°C;25°C], температура поверхности солнечного модуля [-13,2°C;30°C]



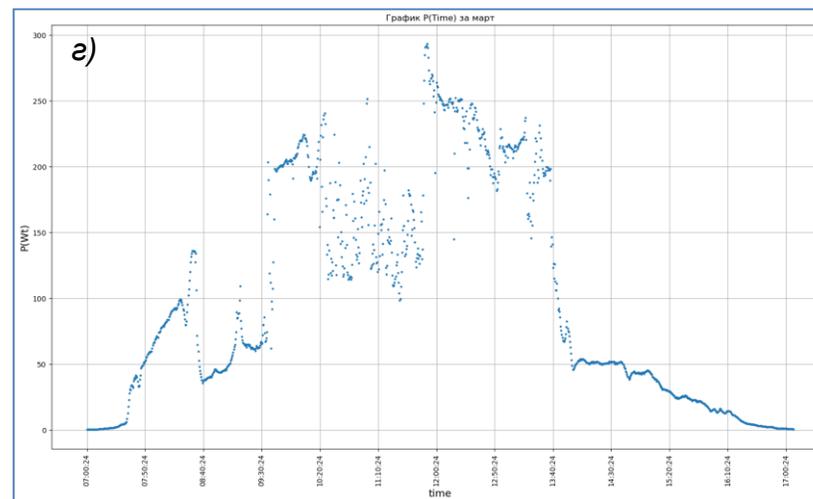
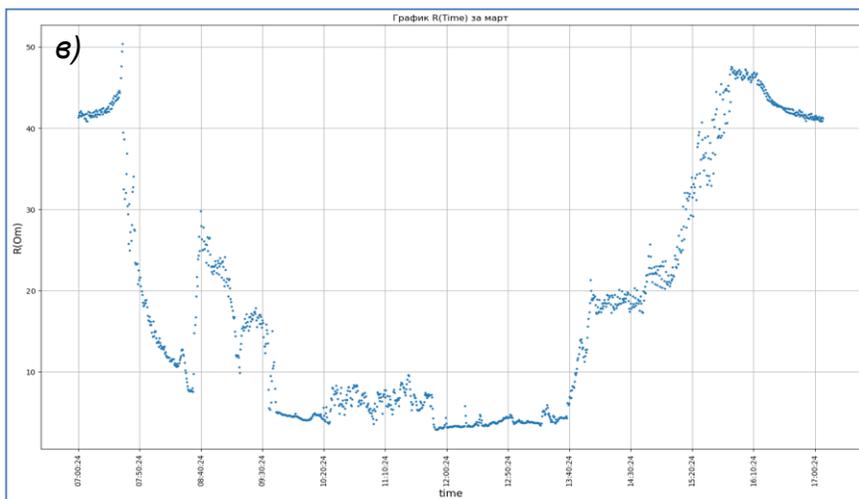
Энергетические характеристики солнечного модуля:

а) $I(U)$ – вольт-амперная характеристика;

б) $P(U)$ – мощностная характеристика ($P = U \cdot I$);

в) $R(time)$ – изменение сопротивления нагрузки в течение рассматриваемого дня;

г) $P(time)$ – изменение мощности в течение рассматриваемого дня.



По результатам построенных характеристик получены следующие параметры солнечного модуля:

- 1) Ток короткого замыкания $I_{cs}=28,9 \text{ A}$
- 2) Напряжение холостого хода солнечного модуля: $U_{os}=9,9 \text{ В}$.
- 3) Точка максимальной мощности $P_{mpp}=293,2 \text{ Вт}$ при $U_{mpp}=29,3 \text{ В}$, $I_{mpp}=10,01 \text{ A}$ при $t_0=14,6^\circ\text{C}$, $t_{sm}=21,8^\circ\text{C}$ и интенсивности солнечного излучения $E_n=1147 \text{ Вт/м}^2$



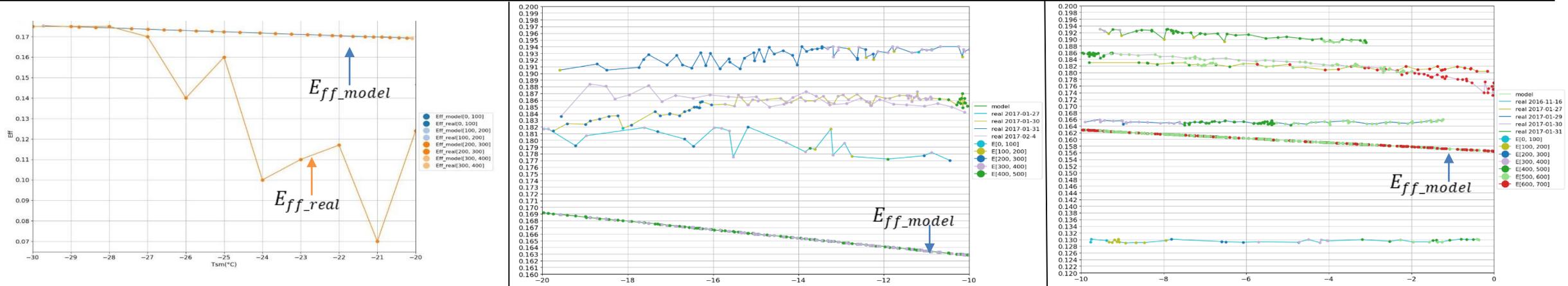
Построение зависимости $\eta(tsm)$ при $(-30 < tsm < 0)^\circ\text{C}$

$(-30; -20)^\circ\text{C}$

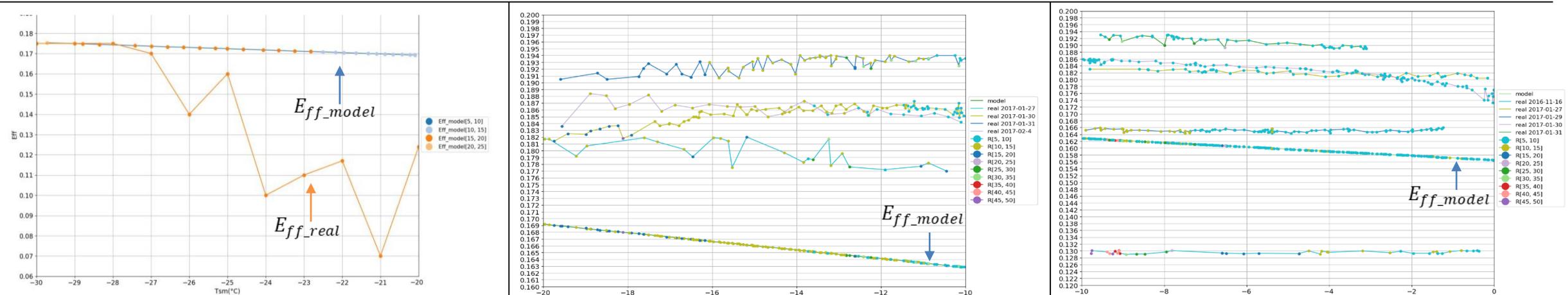
$(-20; -10)^\circ\text{C}$

$(-10; 0)^\circ\text{C}$

Построение $\eta(tsm)$ с разделением на диапазоны освещенности E



Построение $\eta(tsm)$ с разделением на диапазоны сопротивления нагрузки R



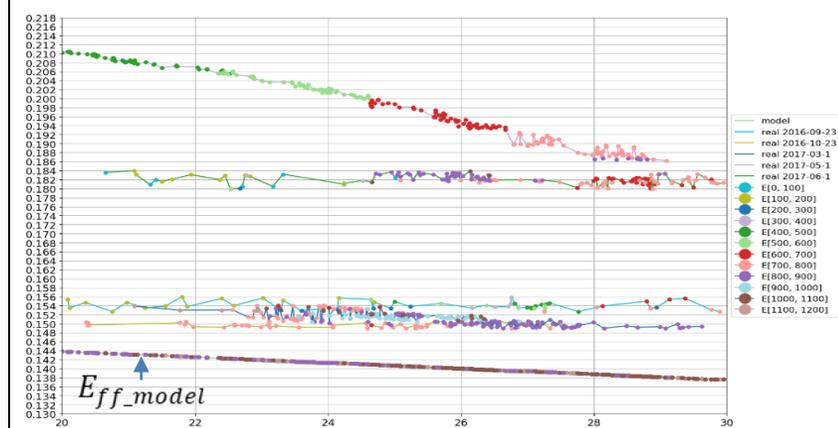
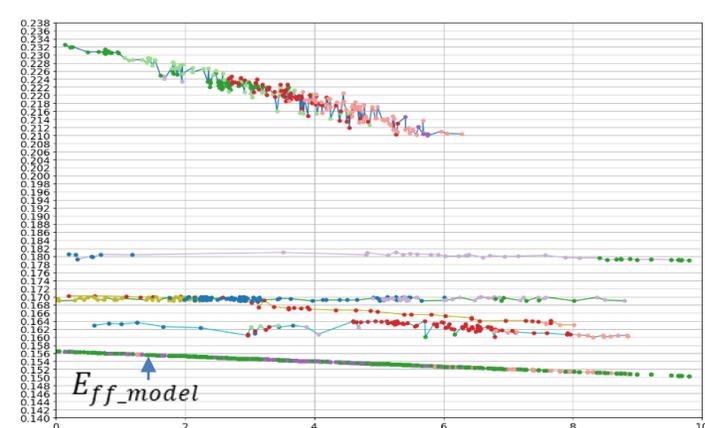
Построение зависимости $\eta(tsm)$ при $(0 < tsm < 30)^\circ\text{C}$

$(0;10)^\circ\text{C}$

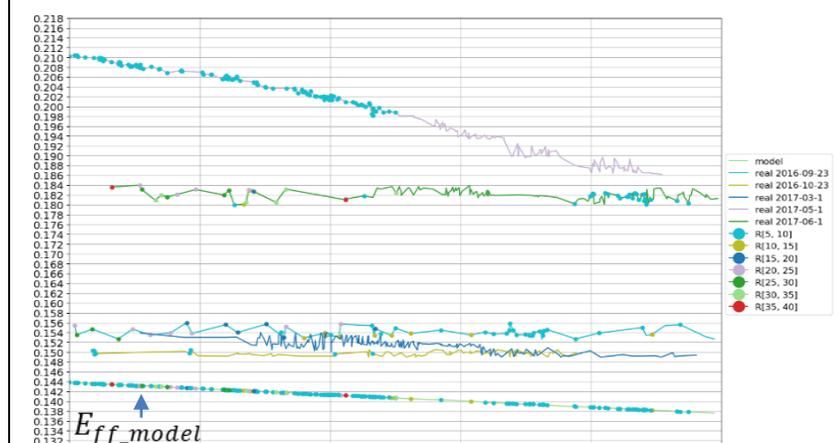
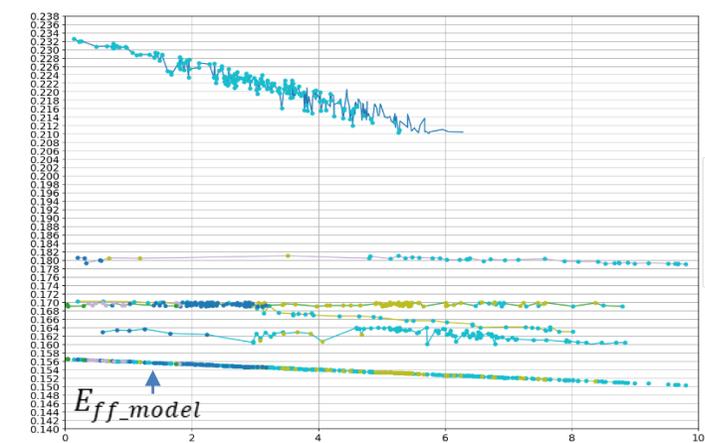
$(10;20)^\circ\text{C}$

$(20;30)^\circ\text{C}$

Построение $\eta(tsm)$ с разделением на диапазоны освещенности E



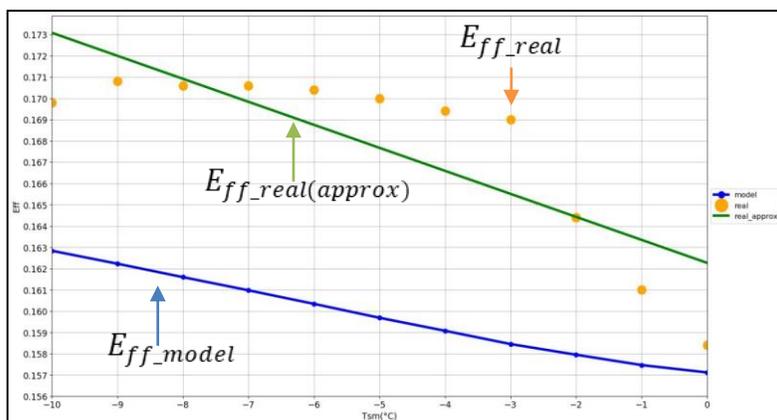
Построение $\eta(tsm)$ с разделением на диапазоны сопротивления нагрузки R





Этапы моделирования зависимости эффективности солнечного модуля от температуры

1) Аппроксимация точек $Eff_real(t_{sm})$

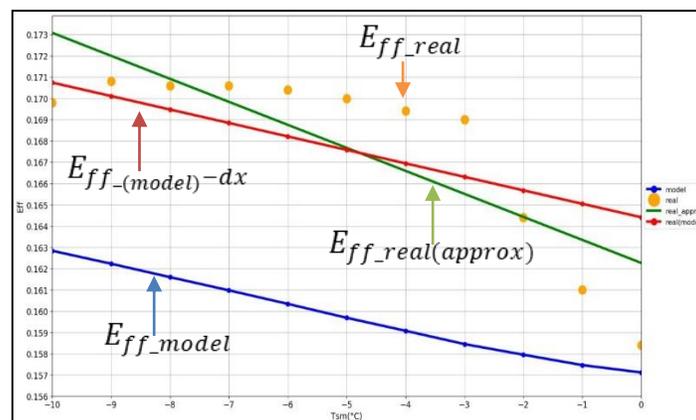


задается диапазон температур $(-10;0)^\circ\text{C}$,
 Данная температура наблюдалась 16/11/16;
 27/01/17; 29/01/17; 30/01/17; 31/01/17;
 Определяется среднее КПД реальное путем
 осреднения точек КПД реального за разные
 исследуемые дни



$$Eff_{real}(t_{sm}) = \frac{Eff_{real1}(t_1) + Eff_{real2}(t_1) + Eff_{real3}(t_1) + Eff_{real4}(t_1) + Eff_{real5}(t_1)}{5}$$

2) Построение $Eff_real(model)$ с dx

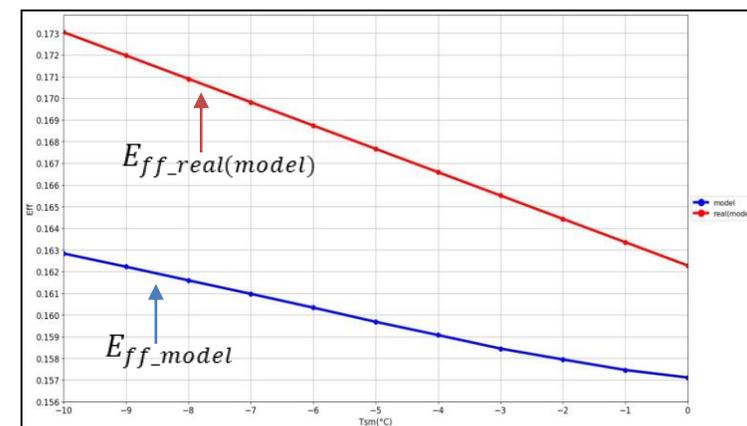


Введение поправки dx в формулу:

$$Eff = Eff_o(1 - k(t_{sm} - 25)) - dx$$

$dx = -0.0085$ – разница между средними значениями Eff_model и Eff_real

3) Построение $Eff_real(model)$ с a, dx, b



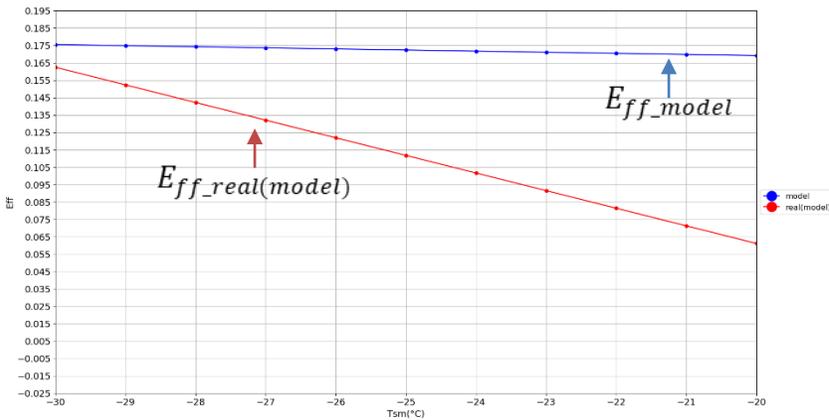
Введение поправки dx и
 коэффициентов a, b в формулу:
 $Eff = aEff_o(1 - k(t_{sm} - 25)) - dx + b$,
 где $a = 1.3$ – коэффициент, отвечающий
 за угол наклона прямой;
 $dx = -0.0085$;
 $b = -0.048$ – коэффициент,
 моделирующий положение прямой в
 системе координат



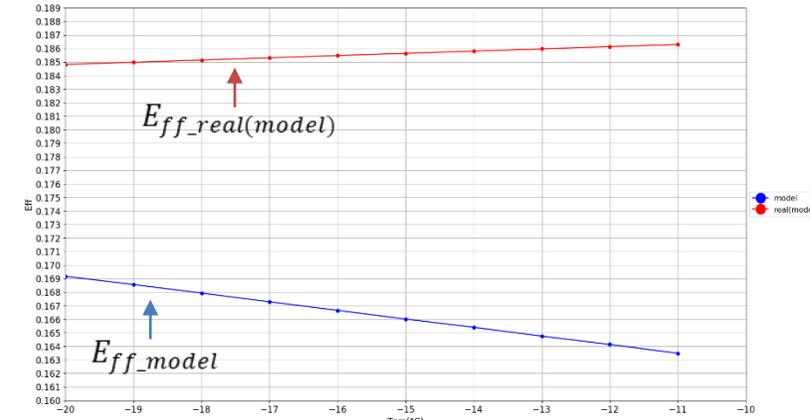
Полученные результаты

В таблице приведено построение математических моделей с применением формулы $Eff = aEff_o(1 - k(t_{sm} - 25)) - dx + b$ с различными коэффициентами dx , a , b для разных диапазонов температур

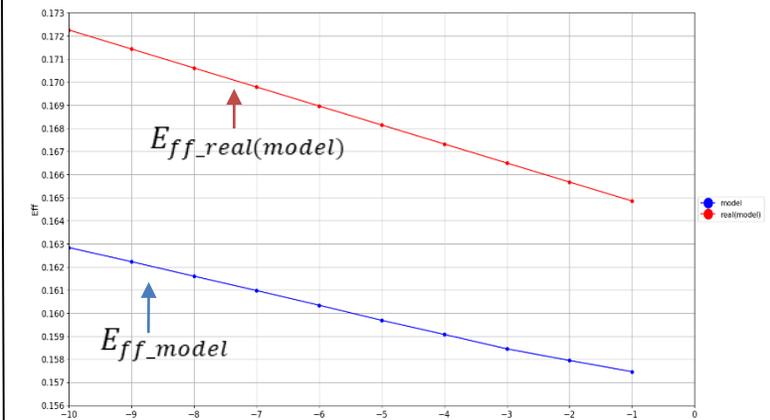
$(-30; -20)^\circ\text{C}$ $a = 16; dx = 0.06; b = -2.5852$



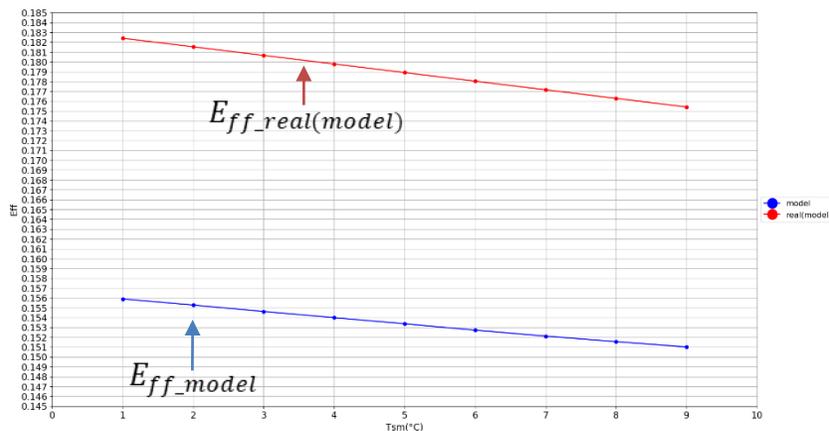
$(-20; -10)^\circ\text{C}$ $a = -0.43; dx = -0.193; b = 0.2095$



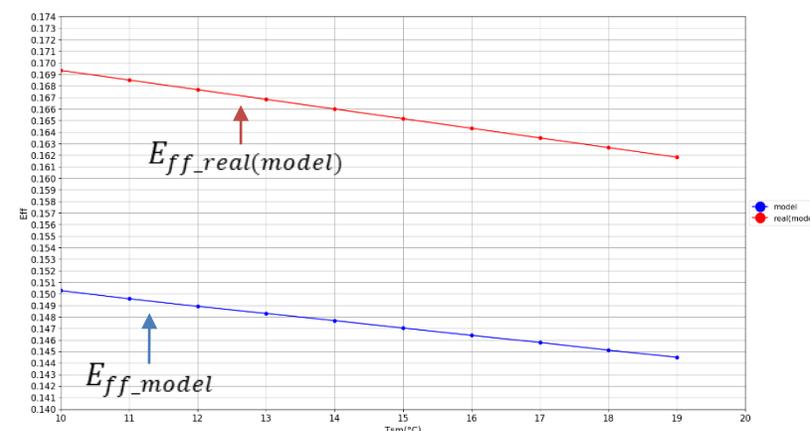
$(-10; 0)^\circ\text{C}$ $a = 1.3; dx = -0.0085; b = -0.048$



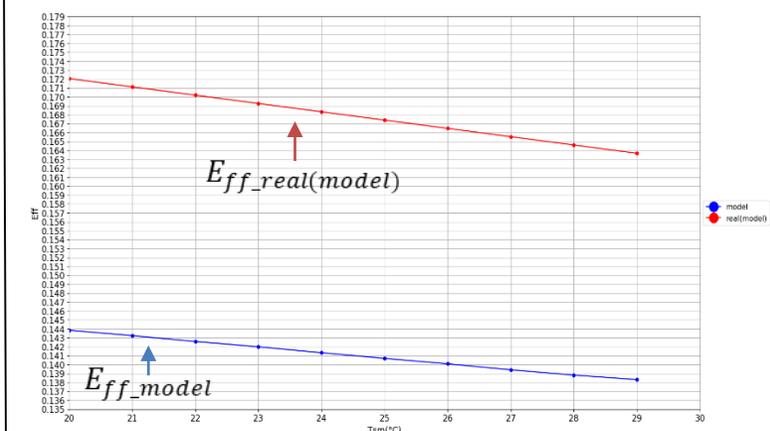
$(0; 10)^\circ\text{C}$ $a = 1.38; dx = -0.0254; b = -0.0582$



$(10; 20)^\circ\text{C}$ $a = 1.32; dx = -0.0182; b = -0.0472$



$(20; 30)^\circ\text{C}$ $a = 1.47; dx = -0.0267; b = -0.06619$





Результаты исследования

В результате исследования влияния температуры на КПД солнечных модулей выполнены задачи:

- Создание методики по изучению влияния положительных и отрицательных температур на эффективность солнечных модулей;
- Применение методики по исследованию работы солнечного модуля при отрицательных и положительных температурах для солнечной электростанции;
- Применение алгоритмов построения энергетических характеристик солнечного модуля для изучения работы солнечной электростанции;
- Разработка методики построения математической модели работы солнечного модуля в отрицательных и положительных диапазонах температур;

Дальнейшая задача: оценка максимальной выработки электроэнергии, полученная по предложенным математическим моделям для отрицательных и положительных диапазонов температур, с целью сравнения ее с максимальной выработкой электроэнергии, полученное по существующей математической модели, для оценки технико-экономической эффективности проекта



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!