Заключение. Анализ несимметричных режимов работы электрических сетей с тяговой нагрузкой показал нарушение требований, регламентированных ГОСТом 32144-2013. Случаи несимметрии напряжения наиболее распространены и значительны по величине в летний период, а в зимний период несимметрия практически соответствует требованиям ГОСТа. Одной из причин этого можно считать высокий грузопоток в летний период. Из этого можно сделать вывод, что при реализации Распоряжения Правительства [3] произойдет увеличение несимметрии как по количеству случаев, так и по амплитуде. К мерам по снижению несимметрии можно отнести применение симметрирующих трансформаторов, уменьшение сопротивлений трансформаторов, фазных и нулевых проводов нулевой последовательности, а также использование устройств уравнивания мощности [4].

1. Дед А.В. К вопросу о классификации несимметричных режимов в электрических сетях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 10-2. – С. 183-185; URL: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10312> [дата обращения: 23.04.2020].
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/54/54884.htm> [дата обращения 15.03.2020]
3. Распоряжение Правительства РФ от 30 сентября 2018 г. № 2101-р «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г.» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71975292/> [дата обращения 15.03.2020].
4. Манусов В.З., Морозов П.В. Исследование методов снижения несимметрии загрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока // Научно-технический журнал «Известия Транссиба». – 2012. – № 2(10). – С. 87-93; URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-metodov-snizheniya-nesimmetrii-zagruzki-trehfaznoy-seti-na-tyagovyh-podstantsiyah-skorostnyh-zheleznyh-dorog-peremennogo> [дата обращения: 26.04.2020].

Панченко В.А.^{1,2}, Чирский С.П.³

Визуализация теплового состояния фотоприёмника с турбулизаторами потока теплоносителя

¹Российский университет транспорта МИИТ

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

³МГТУ им. Н.Э. Баумана

(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-05-2020-32

idsp: ljjournal-05-2020-32

Аннотация

В статье рассмотрено моделирование теплового состояния фотоприёмника концентраторного теплофотоэлектрического солнечного модуля. Рассмотрены несколько вариантов моделей фотоприёмников с различными турбулизаторами в конструкции, которые обеспечивают более эффективный теплосъём с радиатора, на котором располагаются фотоэлектрические преобразователи, таким образом увеличивая эффективность солнечного модуля.

Ключевые слова: солнечная энергетика, концентратор, система конечно-элементного анализа, фотоэлектрические преобразователи, тепловое состояние.

Abstract

The article discusses the simulation of the thermal state of a photoreceiver of a concentrator photovoltaic thermal solar module. Several variants of photoreceiver models with various turbulators in the design are considered, which provide a more efficient heat removal from the radiator on which the photoelectric converters are located, thereby increasing the efficiency of the solar module.

Keywords: solar energy, concentrator, finite element analysis system, photovoltaic converters, thermal state.

Преобразователи солнечной энергии активно развиваются и совершенствуются. Наряду с планарными фотоэлектрическим солнечными модулями [1, 2], большой интерес представляют теплофотоэлектрические солнечные модули планарной [3, 4] и концентраторной конструкций [5, 6]. Концентратор обеспечивает большой нагрев теплоносителя и экономию фотоэлектрических преобразователей. Точность проектирования и изготовления концентраторов параболического типа должны быть очень высокой [7 – 9]. Также большое внимание следует уделять тепловому расчёту фотоприёмников концентраторных солнечных модулей. В качестве примера такого расчёта ниже приведён расчёт в системе конечно-элементного анализа радиатора теплофотоэлектрического приёмника водяного охлаждения солнечного концентраторного модуля. На радиаторе водяного охлаждения располагаются фотоэлектрические преобразователи, которые эффективно работают при низкой температуре, поэтому необходимо их охлаждение и съём тепла через радиатор теплоносителю.

В качестве фотоприёмника с фотоэлектрическими преобразователями целесообразно использование водяного радиатора с турбулизаторами для лучшего перемешивания теплоносителя (рисунок 1).

Рис. 1 – Радиатор водяного охлаждения фотозадающих элементов с турбулизаторами

Для моделирования теплового состояния радиатора фотоприёмника приняты следующие теплофизические параметры конструктивных элементов: *алюминиевый сплав АМг*: теплопроводность 140 Вт/м·К, теплоемкость 920 Дж/кг·К, плотность 2700 кг/м³; *кремний*: теплопроводность 120 Вт/м·К, теплоемкость 800 Дж/кг·К, плотность 2300 кг/м³; *изолятор*: теплопроводность 2 Вт/м·К, теплоемкость 1000 Дж/кг·К, плотность 1900 кг/м³; *охлаждающая жидкость*: антифриз — вода-этиленгликоль. Для охлаждения применяется антифриз с температурой замерзания -20 °С. При рабочей температуре 20 °С: теплопроводность 0,470 Вт/м·К, теплоемкость 3620 Дж/кг·К, плотность 1055 кг/м³, динамическая вязкость 0,00232 Па·с.

На рисунке 2 представлены 4 расчётные схемы радиаторов водяного охлаждения с турбулизаторами.

Рис. 2 – Схемы радиаторов водяного охлаждения для тепловых расчётов

Трёхмерные расчётные схемы различных радиаторов с турбулизаторами представлены на рисунке 3.

Рис. 3 – Трёхмерные расчётные схемы различных радиаторов

Основным отличием моделей является шаг турбулизаторов и расстояние между ними.

В таблице 1 представлены основные параметры раствора этиленгликоль – вода в зависимости от состава и температуры.

Таблица 1.

Основные параметры раствора этиленгликоль – вода в зависимости от состава и температуры

Объемная доля в смеси %	Мин. рабочая темп. (замерзания), °C	Темп. раствора, °C	Плотность, кг/м	Теплоемкость, кДж/(кг·K)	Теплопров., Вт/(м·K)	Дин. вязкость 10^{-3} , (Н·с/м ²)	Кин. вязкость, 10^{-6} м ² /с
20	-10	-10	1038	3,85	0,498	5,19	5,0
		0	1036	3,87	0,500	3,11	3,0
		20	1030	3,90	0,512	1,65	1,6
		40	1022	3,93	0,521	1,02	1,0
		60	1014	3,96	0,531	0,71	0,7
		80	1006	3,99	0,540	0,523	0,52
		100	997	4,02	0,550	0,409	0,41
34	-20	-20	1069	3,51	0,462	11,76	11,0
		0	1063	3,56	0,466	4,89	4,6
		20	1055	3,62	0,470	2,32	2,2
		40	1044	3,68	0,473	1,57	1,5
		60	1033	3,73	0,475	1,01	0,98
		80	1022	3,78	0,478	0,695	0,68
		100	1010	3,84	0,480	0,515	0,51
52	-40	-40	1108	3,04	0,416	110,8	100
		-20	1100	3,11	0,409	27,50	25
		0	1092	3,19	0,405	10,37	9,5
		20	1082	3,26	0,402	4,87	4,5
		40	1069	3,34	0,398	2,57	2,4
		60	1057	3,41	0,394	1,59	1,5
		80	1045	3,49	0,390	1,05	1,0
		100	1032	3,56	0,385	0,722	0,7

Для определения и визуализации теплового состояния радиатора с турбулизаторами в системе конечно-элементного анализа рассмотрен Вариант 1 радиатора (рисунок 4). Приняты следующие параметры: удельное тепловыделение на фотоэлектрическом преобразователе $1,5 \text{ Вт/см}^2$, температура охлаждающей жидкости

на входе 20 °С, скорость жидкости на входе 0,06 м/с. Расход жидкости: массовый 0,063 кг/с, объемный – 0,06 л/с. На рисунке 4 представлены распределения тепловых полей модели фотоэлектрических преобразователей при принятых условиях.

Рис. 4 – Распределения температур модели фотоэлектрических преобразователей (Вариант 1 радиатора)

Температура фотоэлектрических преобразователей варьируется от 33 °С до 52 °С, что является приемлемой температурой для работы фотоэлектрических преобразователей. На рисунке 5 представлены потоки теплоносителя в начале и конце радиатора.

Рис. 5 – Распределения скоростей охлаждающей жидкости в начале и конце радиатора (Вариант 1 радиатора)

Заметны завихрения и турбулизация потока, что способствует лучшему перемешиванию теплоносителя и эффективному отводу тепла от фотоэлектрических преобразователей.

Для визуализации и оценки теплового состояния Варианта 2 радиатора приняты следующие изменённые параметры: шаг турбулизаторов 33,6 мм, удельное тепловыделение на фотоэлектрических преобразователях $3,5 \text{ Вт/см}^2$, скорость жидкости на входе 0,17 м/с, расход жидкости: массовый 0,154 кг/с, объемный – 0,146 л/с, противодавление в канале 1580 Па. На рисунке 6 слева представлено распределение температур модели фотоэлектрических преобразователей и распределение скоростей охлаждающей жидкости в модели радиатора (справа) (Вариант 2 радиатора).

Рис. 6 – Распределение температур модели фотоэлектрических преобразователей (слева) и распределение скоростей охлаждающей жидкости в модели радиатора (справа) (Вариант 2 радиатора)

В рассмотренной модели температура фотоэлектрических преобразователей варьируется от 37 °С до 54 °С, что незначительно выше распределения температур модели Варианта 1, но также является приемлемым. Повышение температуры вызвано увеличением концентрированного потока солнечного излучения ($3,5 \text{ Вт/см}^2$). Скорость теплоносителя также увеличена (0,17 м/с), а турбулизация потока уменьшена, что скажется на эффективности отвода теплоты от фотоэлектрических преобразователей.

Для визуализации и оценки теплового состояния Варианта 3 радиатора приняты следующие изменённые параметры в отличие от предыдущих: шаг турбулизаторов 25,2 мм, противодавление в канале 2080 Па. На рисунке 7 слева представлено распределение температур модели фотоэлектрических преобразователей и распределение скоростей охлаждающей жидкости в модели радиатора (справа) (Вариант 3 радиатора).

Рис. 7 – Распределение температур модели фотоэлектрических преобразователей (слева) и распределение скоростей охлаждающей жидкости в модели радиатора (справа) (Вариант 3 радиатора)

В рассмотренной модели температура фотоэлектрических преобразователей варьируется от 37 °С до 45 °С, что говорит о более равномерном прогреве фотоэлектрических преобразователей без значительных перепадов температур, что обусловлено турбулизированным потоком теплоносителя благодаря уменьшенному шагу турбулизаторов.

Для визуализации и оценки теплового состояния Варианта 4 радиатора приняты следующие изменённые параметры в отличие предыдущих: шаг турбулизаторов 21 мм, противодавление в канале 3200 Па. На рисунке 8 слева представлено распределение температур модели фотоэлектрических преобразователей и распределение скоростей охлаждающей жидкости в модели радиатора (справа) (Вариант 4 радиатора).

Рис. 8 – Распределение температур модели фотоэлектрических преобразователей (слева) и распределение скоростей охлаждающей жидкости в модели радиатора (справа) (Вариант 4 радиатора)

В рассмотренной модели температура фотоэлектрических преобразователей варьируется от 31 °С до 44 °С, что говорит о более эффективном охлаждении фотоэлектрических преобразователей без значительных перепадов температур, когда поток теплоносителя становится ещё более турбулизированным.

Благодаря представленному моделированию в системе конечно-элементного анализа проектировщик может детально задать режим номинальной работы модуля и подобрать оптимальные конструктивные параметры модуля.

Солнечные концентраторные теплофотоэлектрические модуля позволяют экономить фотоэлектрические преобразователи и получать на выходе модуля наряду с электроэнергией и тепловую энергию, что значительно увеличивает общую эффективность солнечного модуля.

1. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), с. 20 – 29
2. Панченко В.А. Солнечные модули различной конструкции агроинженерного центра ВИМ // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики, 2017, с. 116 – 121.
3. Стребков Д.С., Панченко В.А., Филиппченкова Н.С. Обзор различных конструкций солнечных теплофотоэлектрических модулей (гибридных коллекторов) // Инновации в сельском хозяйстве, № 3 (13), 2015, с. 199 – 203.
4. Панченко В.А., Филиппченкова Н.С.. Теплофотоэлектрические бесконцентраторные солнечные модули (гибридные солнечные коллекторы) // Инновации в сельском хозяйстве, № 5 (15), 2015, с. 128 – 133.
5. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Исследование концентраторной установки с матричными солнечными элементами // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2012, № 2, с. 14-16.
6. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечный тепло-фотоэлектрический модуль с параболоторическим концентратором // Альтернативная энергетика и экология, 2013, № 1-2 (118), с. 35-39.
7. Синецын С.А., Стребков Д.С., Панченко В.А. Паркетирование поверхности параболического концентратора солнечного теплофотоэлектрического модуля по заданным дифференциально-геометрическим требованиям // Геометрия и графика, 2019, Т. 7, № 3, с. 15-27.
8. Синецын С.А. Моделирование линейных погрешностей при конструировании поверхности концентратора солнечного модуля // Научный электронный журнал Меридиан, 2020, № 4 (38), с. 219-221.
9. Синецын С.А. Информационная методика управления качеством поверхности солнечного концентратора, заданной дискретным множеством точек // E-Scio, 2020, № 1 (40), с. 421-427.

Панченко В.А.^{1,2}

**Испытания концентраторной солнечной установки с двигателем Стирлинга в
натурных условиях**

¹*Российский университет транспорта МИИТ*

²*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-05-2020-33

idsp: ljjournal-05-2020-33

Аннотация

В статье рассмотрено исследование тепловых режимов работы солнечной концентраторной установки с термодинамическим преобразователем в виде двигателя Стирлинга. Равномерную освещенность в фокальной области горячего цилиндра двигателя обеспечивают два концентратора параболического типа. При подключении электрического генератора потребитель получает не только электроэнергию на выходе из модуля, но и тепловую энергию в виде нагретого теплоносителя.

Ключевые слова: солнечная энергетика, концентратор, двигатель Стирлинга, тепловые режимы, равномерность освещения.