

Математическое моделирование надежности системы горячего водоснабжения с использованием солнечных коллекторов в Республике Марий Эл

А.Д. Каменских, А.А. Медяков, А.П. Остащенко, К.А. Созонов

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация: представлены результаты математического моделирования надежности системы солнечного горячего водоснабжения для условий Республики Марий Эл. Рассмотрены причины отказов элементов систем горячего водоснабжения с солнечными коллекторами, проведен анализ схемы системы солнечного горячего водоснабжения четырехквартирного жилого дома. С использованием логико-вероятностного метода были составлены выражения для определения вероятности длительного простоя, кратковременного простоя, вероятности отказа по причине снижения инсоляции, суммарной вероятности отказов. Проведен расчет потребности в тепловой энергии на горячее водоснабжение для рассматриваемого объекта с числом жильцов равным 14, а также расчет доли тепловой нагрузки, покрываемой только за счет применения солнечных коллекторов. В результате подстановки значений показателей надежности элементов системы получено значение суммарной вероятности отказа в течение года $4,03 \cdot 10^{-5}$.

Ключевые слова: солнечное горячее водоснабжение, надежность, солнечный коллектор, причина отказа, моделирование надежности.

При работе систем солнечного горячего водоснабжения на базе солнечных коллекторов имеет место влияние большого количества внешних и внутренних факторов, которые оказывают влияние на работоспособность ее элементов, а также на систему горячего водоснабжения в целом [1]. При этом следует отметить значительное влияние инсоляции на возможные варианты выполнения задачи обеспечения горячего водоснабжения, поскольку при снижении инсоляции мощность солнечных коллекторов снижается. Данный аспект обуславливает необходимость оценки надежности систем солнечного горячего водоснабжения. Интерес к вопросу оценки надежности систем энергоснабжения подтверждается наличием большого количества работ. В работе [2] представлены результаты моделирования работы гибридной энергетической системы. Анализ надежности элементов систем электроснабжения посвящена работа [3]. Исследованиям надежности элементов фотоэлектрических систем посвящены работы [4, 5], надежности

систем с фотоэлектрическими преобразователями [6-8]. Однако в условиях регионов с относительно невысокой инсоляцией актуальной представляется задача исследования надежности системы горячего водоснабжения с учетом фактической интенсивности потока солнечной энергии.

Цель: провести математическое моделирование надежности системы солнечного горячего водоснабжения для условий Республики Марий Эл.

Объект исследования: система солнечного горячего водоснабжения.

Предмет исследования: надежность системы солнечного горячего водоснабжения.

Задачи:

- рассмотреть причины отказов систем горячего водоснабжения с солнечными коллекторами;
- провести анализ структурой схемы системы солнечного горячего водоснабжения.
- провести моделирование надежности системы солнечного горячего водоснабжения.

При исследовании надежности технических систем, в частности систем горячего водоснабжения с солнечными коллекторами, следует учитывать, что причины отказов элементов могут быть связаны с несовершенством или нарушением правил и норм проектирования и конструирования, несовершенством или нарушением процесса изготовления или ремонта, нарушением правил и условий эксплуатации.

Элементы систем горячего водоснабжения с солнечными коллекторами подвергаются воздействию большого количества факторов, оказывающих влияние на их работоспособность. Отказы элементов могут носить различный характер изменения параметров, характеризующих работоспособное состояние, до отказа [9]. При этом следует отметить, что для ряда элементов систем горячего водоснабжения, например, солнечных

коллекторов, характерным является явный отказ, который может быть обнаружен визуально или путем применения штатных методов и средств контроля и диагностирования.

Согласно данным [10] большой процент отказов солнечных водонагревательных систем приходится на клапаны, также на работоспособность систем значительное влияние оказывает состояние циркуляционных насосов, солнечных коллекторов. Возможные причины отказов некоторых элементов систем горячего водоснабжения с солнечными коллекторами приведены в таблице 1.

Таблица № 1

Причины отказов элементов системы горячего водоснабжения

Элемент системы горячего водоснабжения	Причины отказов
трубопровод	коррозия, течи, нарушение проходимости
теплообменник бака-аккумулятора	течь теплообменника, загрязнение теплообменных трубок
коллектор плоский	поломка стекла (как следствие коррозия и деградация элементов коллектора), нарушение соединения медных труб и пластин-поглотителей
вакуумный	потеря вакуума, поломка стеклянной трубки
насос	повреждение рабочего колеса, повреждение обмоток двигателя, ошибки установки

В рамках настоящего исследования объектом горячего водоснабжения являлся четырехквартирный жилой дом. На рисунке 1 представлена принципиальная схема системы теплоснабжения [11].

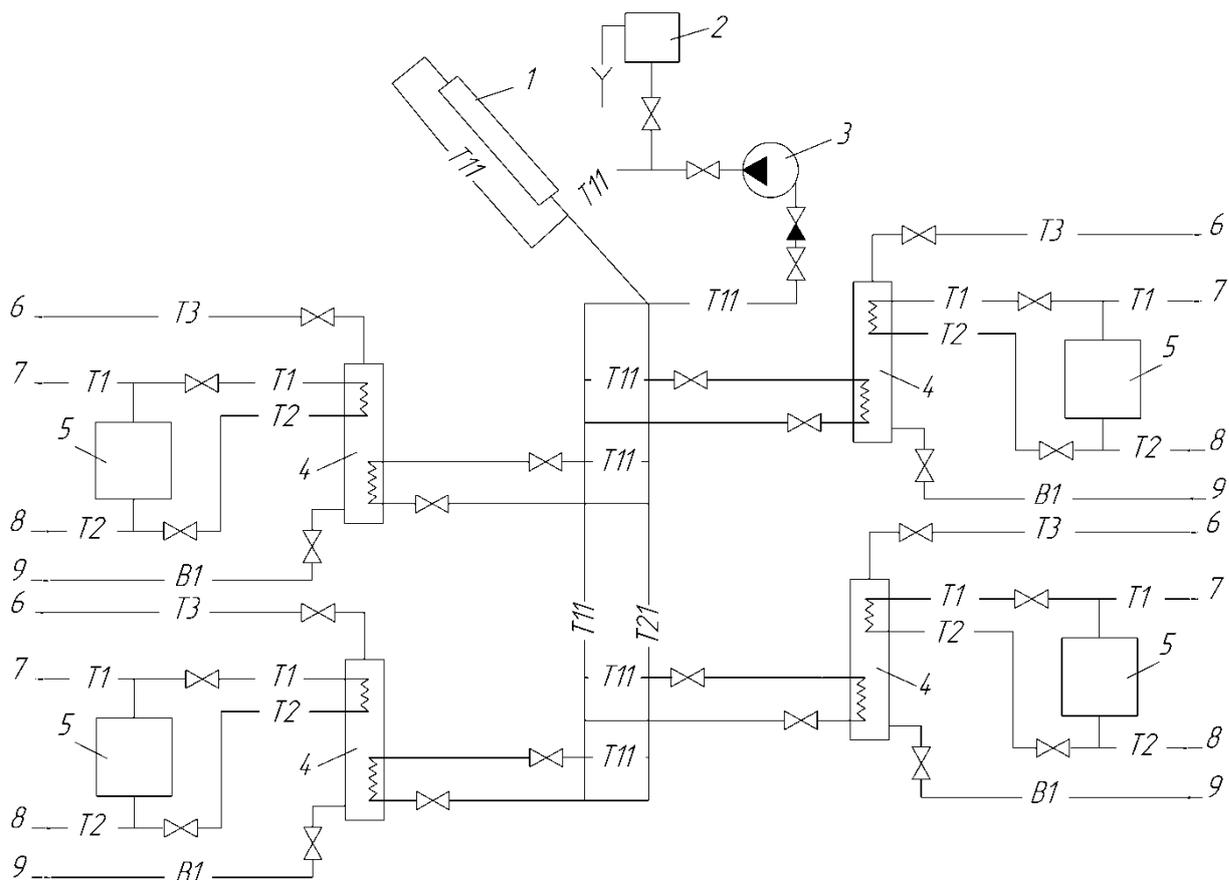


Рис. 1. –Принципиальная схема системы теплоснабжения

Обозначения на рисунке 1: 1 – солнечные коллекторы; 2 – расширительный бак; 3 – циркуляционный насос; 4 – бак-аккумулятор горячей воды; 5 – газовый котел; 6 – в систему горячего водоснабжения; 7 – в систему отопления; 8 – из системы отопления; 9 – из водопровода.

В принципиальной схеме, представленной на рисунке 1, бак-аккумулятор предназначен для компенсации изменения инсоляции в течение дня, газовый котел – для обеспечения отопления, а также для резервирования в системе горячего водоснабжения с солнечными коллекторами. При построении схемы надежности системы горячего водоснабжения (рисунок 2) были учтены следующие элементы: солнечные коллекторы (С), циркуляционный насос (Р), клапаны (Х, Y), газовый котел (G), бак-аккумулятор горячей воды (А).

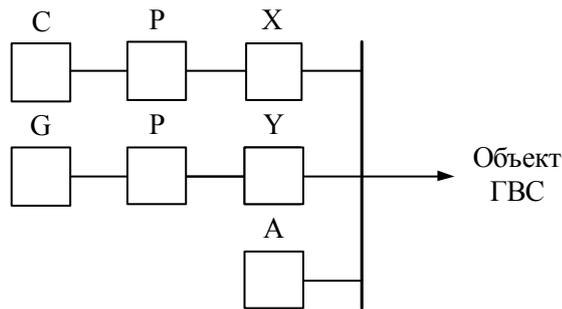


Рис. 2. –Принципиальная схема системы теплоснабжения

В рамках математического моделирования надежности системы горячего водоснабжения с солнечными коллекторами был использован логико-вероятностный метод. При этом были учтены события, при которых имеет место инсоляция, достаточная для покрытия затрат тепловой энергии на горячее водоснабжение (дерево отказов представлено на рисунке 3), а также события, когда функция горячего водоснабжения может быть обеспечена только путем использования резервных источников тепловой энергии (дерево отказов представлено на рисунке 4). Оценка безотказности системы солнечного горячего водоснабжения проводилась путем составления логической функции отказа.

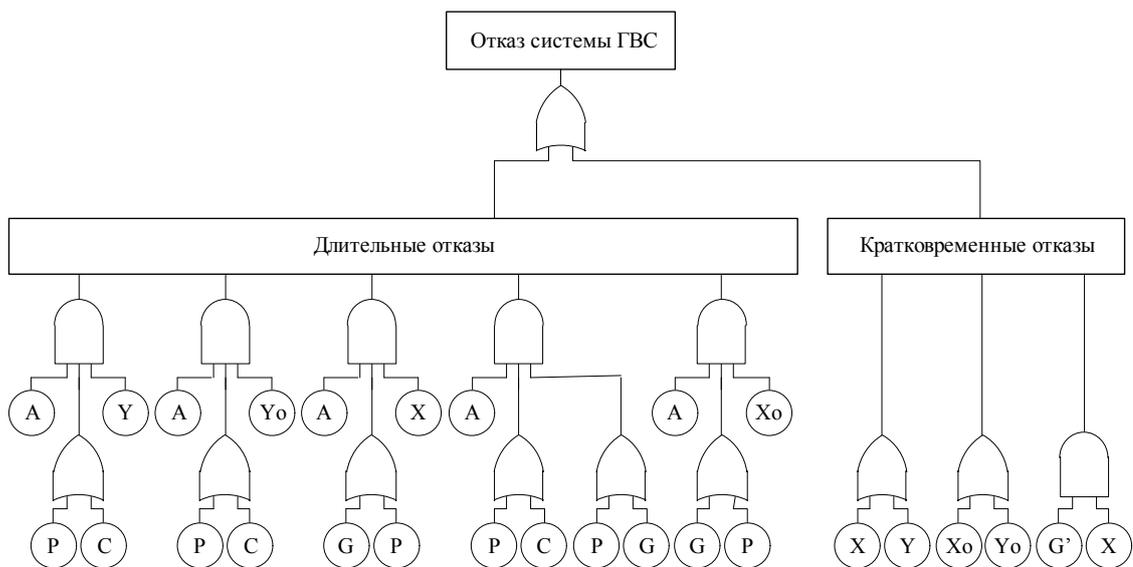


Рис. 3. –Дерево отказов (достаточная инсоляция)

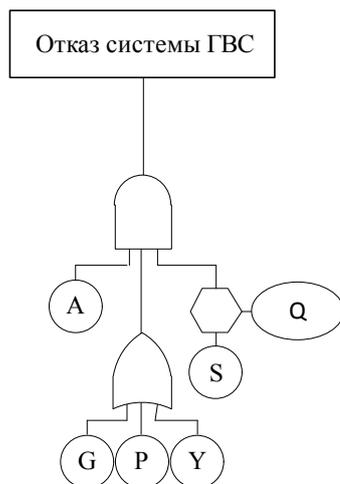


Рис. 4. –Дерево отказов (недостаточная инсоляция)

Обозначения на рисунках 3, 4: А, Р, С, Y, X, G – отказавшие элементы в соответствии с обозначениями, приведенными на рисунке 2; G' – элемент, на котором проводятся профилактические или восстановительные работы; X_о, Y_о – отказ при появлении заявки на срабатывание; S – отказ, произошедший по причине снижения инсоляции.

Для расчета вероятности длительного простоя q_{LT} , кратковременного простоя q_{ST} , вероятности отказа по причине снижения инсоляции q_{LI} , суммарной вероятности отказов q были составлены выражения:

$$q_{LT} = \lambda_Y \cdot \tau_Y \cdot (\lambda_P \cdot \tau_P + \lambda_C \cdot \tau_C) \cdot \lambda_A \cdot \tau_A + q_{o.Y} \cdot (\lambda_P \cdot \tau_P + \lambda_C \cdot \tau_C) \cdot \lambda_A \cdot \tau_A + \lambda_X \cdot \tau_X \cdot (\lambda_G \cdot \tau_G + \lambda_P \cdot \tau_P) \cdot \lambda_A \cdot \tau_A + \lambda_A \cdot \tau_A \cdot (\lambda_P \cdot \tau_P + \lambda_C \cdot \tau_C) \cdot (\lambda_G \cdot \tau_G + \lambda_P \cdot \tau_P) + q_{o.X} \cdot (\lambda_G \cdot \tau_G + \lambda_P \cdot \tau_P) \cdot \lambda_A \cdot \tau_A$$

$$q_{ST} = (\lambda_X \cdot \tau_X + \lambda_Y \cdot \tau_Y) + (q_{o.X} + q_{o.Y}) + q_G \cdot \lambda_X \cdot \tau_X$$

$$q_{LI} = \lambda_A \cdot \tau_A \cdot (\lambda_G \cdot \tau_G + \lambda_P \cdot \tau_P + \lambda_Y \cdot \tau_Y) \cdot q_S^*$$

$$q = q_{LT} + q_{ST} + q_{FV}$$

где $\lambda_Y, \lambda_P, \lambda_C, \lambda_A, \lambda_X, \lambda_G$ – интенсивности отказов элементов;

$q_{o.Y}, q_{o.X}$ – вероятности отказа при запросе на срабатывание клапанов;

q_G – вероятность простоя газового котла;

$\tau_Y, \tau_P, \tau_C, \tau_A, \tau_X, \tau_G$ – средние времена восстановления функционирования элементов;

$$q_S^* = q_S \cdot k_S;$$

q_S – вероятность появления недостаточной инсоляции, при которой солнечные коллекторы не обеспечивают горячее водоснабжение потребителей;

k_S – коэффициент простоя системы солнечного горячего водоснабжения, определяемый по выражению:

$$k_S = \frac{\lambda_S}{\lambda_S + \mu_S} (1 - e^{-(\lambda_S + \mu_S)t}),$$

где $\lambda_S = 1/T_{0S}$ – интенсивность появления недостаточной инсоляции, год⁻¹;

$\mu_S = 1/T_S$ – интенсивность восстановления достаточной инсоляции, год⁻¹;

T_{0S} – продолжительность периода с недостаточной инсоляцией;

T_S – продолжительность периода с достаточной инсоляцией.

Для определения продолжительности периода с достаточной инсоляцией был проведен расчет потребности в тепловой энергии на горячее водоснабжение для рассматриваемого объекта с числом жильцов равным 14, а также расчет доли тепловой нагрузки, покрываемой только за счет применения солнечных коллекторов. Расчет доли тепловой нагрузки был проведен с использованием f-метода [12].

Таблица № 2

Результаты расчета доли тепловой нагрузки

Месяцы	Q _{гв} , МДж	Доля тепловой нагрузки (f)	f·Q _{гв} , МДж
Январь	17729,985	0,199	3527,383
Февраль	16014,180	0,371	5935,979
Март	17729,985	0,707	12535,528
Апрель	17158,050	1,047	17966,207
Май	17729,985	1,278	22656,198
Июнь	17158,050	1,353	23210,950
Июль	17729,985	1,362	24152,682
Август	17729,985	1,297	22996,652
Сентябрь	17158,050	1,119	19201,548
Октябрь	17729,985	0,835	14797,063

Продолжение таблицы № 2

Месяцы	Q _{гв} , МДж	Доля тепловой нагрузки (f)	f·Q _{гв} , МДж
Ноябрь	17158,050	0,476	8165,644
Декабрь	17729,985	0,224	3971,229

С использованием полученных данных о продолжительности периода с достаточной инсоляцией для покрытия затрат тепловой энергии на горячее водоснабжение ($f \geq 1$), а также значений параметров, характеризующих надежность элементов системы горячего водоснабжения (таблица 3), были получены значения $q_{LT} = 7,63 \cdot 10^{-15}$, $q_{ST} = 4,03 \cdot 10^{-5}$, $q_{LI} = 7,58 \cdot 10^{-14}$, $q = 4,03 \cdot 10^{-5}$.

Таблица № 3

Значения параметров, характеризующих надежность элементов системы

Элемент системы	Параметр	Значение
Солнечные коллекторы	λ_C , 1/год	0,5
	τ_C , год	0,0006
Газовый котел	λ_G , 1/год	0,002
	τ_G , год	0,0004
	q_G	0,00002
Клапаны Y, Z	$\lambda_Y = \lambda_X$, 1/год	0,005
	$\tau_Y = \tau_X$, год	0,0000375
	$Q_{o,X}$	0,00002
	$Q_{o,Y}$	0,00002
Циркуляционный насос	λ_P , 1/год	0,002
	τ_P , год	0,00015

Таким образом, в результате проведенного моделирования надежности системы горячего водоснабжения с солнечными коллекторами на примере четырехквартирного жилого дома с числом жильцов равным 14, была определена суммарная вероятность отказа системы $4,03 \cdot 10^{-5}$.

Литература

1. Duff, W. and J. Daosukho, 2007. A Performance and Reliability Study of a Novel ICPC Solar Collector Installation. Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V), pp. 656-660.
2. Щербаков М.В., Набиуллин А.С., Камаев В.А. Мультиагентная система моделирования производства и потребления электроэнергии в гибридных энергетических системах // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/775/.
3. Таранов М.А., Корчагин П.Т. Системный анализ надежности и перспективы её повышения для систем электроснабжения потребителей// Инженерный вестник Дона, 2018, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5084/.
4. Baschel, S., E. Koubli, J. Royand R. Gottschalg, 2018. Impact of Component Reliability on Large Scale Photovoltaic Systems' Performance. Energies, 11(6), pp. 15-16.
5. Colli, A., 2015. Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, pp. 804-809.
6. Zini, G., C. Mangeantand J. Merten, 2011. Reliability of large-scale-grid-connected photovoltaic systems. RenewableEnergy, 36(9), pp. 2334-2340.
7. Mahdia, I., S. Chalahaand B. Nadjia, 2017. Reliability study of a system dedicated to renewable energies by usings to chastic petrinets: application top hotovoltaic (PV) system. Energy Procedia, 136, pp. 513-520.
8. Olalla, C., D. Maksimovic, C. Delineand L. Martinez-Salamero, 2017. Impact of distributed power electronics on the lifetime and reliability of PV systems. Progressin Photovoltaics: Research and Applications, pp. 8-11.
9. He, H., D. Menicucci, T.P. Caudelland A.A. Mammoli, 2011. Real-Time Fault Detection for Solar Hot Water Systems Using Adaptive Resonance Theory



Neural Networks. ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, pp. 6-12.

10. Caudell, T.P., H. He, D.F. Menicucci, A.A. Mammoliand J. Burch, 2019. Final report: testing and evaluation for solar hot water reliability, pp. 24-25.

11. Амерханов Р.А., Бутузов В.А., Гарькавый К.А. Вопросы теории и инновационных решений при использовании гелиоэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 2009. 504 с.

12. Duffie J.A. and W.A. Beckman. 2013. Solar engineering of thermal processes. Wiley, pp 40-44.

References

1. Duff, W. and J. Daosukho, 2007. A Performance and Reliability Study of a Novel ICPC Solar Collector Installation. Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V), pp. 656-660.

2. Shcherbakov M. V., Nabiullin A. S., Kamaev V. A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/775/.

3. Taranov M. A., Korchagin P. T. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5084/.

4. Baschel, S., E. Koubli, J. Royand R. Gottschalg, 2018. Impact of Component Reliability on Large Scale Photovoltaic Systems' Performance. Energies, 11(6), pp. 15-16.

5. Colli, A., 2015. Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, pp. 804-809.

6. Zini, G., C. Mangeantand J. Merten, 2011. Reliability of large-scale grid-connected photovoltaic systems. Renewable Energy, 36(9), pp. 2334-2340.

7. Mahdia, I., S. Chalahaand B. Nadjia, 2017. Reliability study of a system dedicated to renewable energies by usings to chastic petrinets: application top hotovoltaic (PV) system. Energy Procedia, 136, pp. 513-520.



8. Olalla, C., D. Maksimovic, C. Delineand L. Martinez-Salamero, 2017. Impact of distributed power electronics on the lifetime and reliability of PV systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, pp. 8-11.

9. He, H., D. Menicucci, T.P. Caudelland A.A. Mammoli, 2011. Real-Time Fault Detection for Solar Hot Water Systems Using Adaptive Resonance Theory Neural Networks. ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, pp. 6-12.

10. Caudell, T.P., H. He, D.F. Menicucci, A.A. Mammoliand J. Burch, 2019. Final report: testing and evaluation for solar hot water reliability, pp. 24-25.

11. Amerkhanov R.A., Butuzov V.A., Gar'kavyi K.A. Voprosy teorii i innovatsionnykh resheniy pri ispol'zovanii gelioenergeticheskikh system [Questions of theory and innovative solutions in the using of solar energy systems]. M.: Energoatomizdat, 2009. 504 p.

12. Duffie J.A. and W.A. Beckman. 2013. Solar engineering of thermal processes. Wiley, pp 40-44.