

Выбор протокола передачи данных для реализации системы удаленного мониторинга и управления водородными топливными элементами

Е.С. Денисов, Г.И. Егоров, Д.Р. Юртунбаев

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ*

Аннотация: В работе рассматривается вопрос выбора протокола передачи данных через телекоммуникационные сети для реализации распределенной системы контроля и диагностики водородных твердополимерных топливных элементов. Установлено, что потенциально организация подобных систем возможна на основе протоколов: HTTP, WebSocket и UDP, однако для обеспечения максимальной оперативности принятия диагностических решений предпочтительным оказывается использование протокола UDP. Экспериментальные оценки показывают, что максимальное время получения диагностического сообщения составит не более 250 мс, а среднее порядка 125 мс.

Ключевые слова: твердополимерный топливный элемент, контроль, диагностика, распределенная система, протоколы передачи данных, UDP, задержки сообщений, телекоммуникационные сети, водородная энергетика, удаленное управление.

Введение

Водородные твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) в настоящее время приобретают все более широкое применение в качестве основных или резервных источников питания [1] для стационарных энергетических установок, портативной электроники и электромобилей. Для коммерчески успешных продуктов предъявляются достаточно жесткие требования [2] к минимальному сроку службы 20000 ч и периодичности технического обслуживания более 6000 ч. Учитывая сложный характер внутренних физико-химических процессов в ТПТЭ и большого количества факторов способствующих их деградации, для обеспечения требуемых надежности характеристик необходимо использование систем мониторинга технического состояния и процессов деградации, позволяющих предоставлять диагностическую информации для обнаружения критических режимов работы на начальных этапах развития.

Для мониторинга технического состояния ТПТЭ в процессе его функционирования могут использоваться следующие высокоинформативные

методы: импедансная спектроскопия [3-5], анализ релаксационных процессов [6, 7] и флуктуационно-шумовых процессов [8-10]. Применение этих методов сопряжено с достаточно нагруженными вычислительными процессами такими как идентификация параметров моделей, и накоплением большого объема данных измерений. Эти факторы ограничивают применение указанных методов особенно в плане накопления статистических данных для отслеживания процессов деградации.

При этом следует отметить, что современный этап развития энергетических систем характеризуется широким применением распределенных систем управления [11], позволяющих обеспечить повышение эксплуатационных и надежности показателей за счет совместной согласованной работы различных элементов системы. Работы по построению удаленных систем измерения, контроля и управления [12, 13] показывают свою эффективность. В работе [14] показана, возможность использования организации удаленной системы контроля и диагностики ТПТЭ с использованием протокола HTTP. Не смотря на показанную возможность организации подобных систем, была установлена проблема возникновения больших задержек формирования диагностических сообщений из-за сетевых задержек. Основной целью настоящей работы является поиск альтернативных решений для повышения оперативности принятия диагностических решений удаленной системой контроля и диагностики ТПТЭ.

Выбор протоколов и методика оценки их эффективности

Строгие эксплуатационные требования к ТПТЭ обуславливают необходимость постоянного и высокоточного мониторинга их технического состояния. методики диагностики генерируют огромные объемы данных, требующих оперативной обработки и своевременной передачи для принятия диагностических решений. Несмотря на популярность протокола HTTP в

обеспечении удаленного контроля и диагностики, его применение зачастую сопровождается значительными задержками формирования диагностических сообщений, что может негативно сказываться на своевременности реагирования на критические состояния ТПТЭ. Именно поэтому поиск альтернативных решений и оптимизация параметров сетевого обмена становятся необходимыми для повышения оперативности управления. В связи с этим данное исследование направлено на анализ временных задержек распространённых сетевых протоколов, с целью выявления наиболее подходящих для обеспечения надежной и быстрой передачи диагностических данных в рамках систем мониторинга топливных элементов. В данной работе анализируются следующие протоколы передачи данных: HTTP, WebSocket и UDP.

HTTP (HyperText Transfer Protocol) и WebSocket – протоколы прикладного уровня, используемые для передачи данных в Интернете. HTTP обеспечивает взаимодействие между клиентом (например, веб-браузером) и сервером, используя запросы и ответы, при этом каждый запрос обрабатывается отдельно, без сохранения информации о предыдущих. WebSocket после первоначальной инициализации организует остающееся активным соединение, не требующее повторной инициализации.

Оба протокола HTTP и WebSocket используют TCP (Transmission Control Protocol) протокол транспортного уровня, обеспечивающий установку соединения между получателем и приемником, а также контроль доставки пакетов. Наиболее распространенной альтернативой такой организации на транспортном уровне является протокол UDP (User Datagram Protocol), обеспечивающий быструю и простую передачу данных без гарантии доставки или упорядочивания из-за отсутствия установления соединения перед передачей данных. Таким образом, UDP не предоставляет

механизмов подтверждения получения или повторной передачи утерянных пакетов, что может привести к потере данных в ненадежных сетях.

Одним из главных параметров работы распределенных систем контроля и диагностики ТПТЭ является время формирования отклика системы, который может использоваться для предотвращения развития критических режимов работы объекта контроля и снижения его эксплуатационных характеристик. Время отклика будет определяться задержкой передачи сообщения через телекоммуникационную сеть и временем обработки данных сервером. Поскольку данная статья посвящена выбору протокола передачи данных, далее будем анализировать только задержку передачи данных.

Для оценки статистических параметров временных задержек телекоммуникационной сети использовалась следующая методика: 1. Клиент формирует типовое диагностическое сообщение и уникальным идентификатором; 2. Клиент передает сообщение на сервер с меткой времени отправки τ_1 ; 3. Сервер обрабатывает сообщение и отправляет его назад клиенту с добавлением информации о моменте приема τ_2 и отправки τ_3 сообщения; 4. Клиент принимает сообщение с добавляет в него время приема сообщения τ_4 ; 5. Время задержки передачи данных вычислялось согласно следующей формуле:

$$\Delta t_z = (\tau_4 - \tau_1) - (\tau_3 - \tau_2).$$

Полученная таким образом оценка задержки позволяет устранить влияние рассинхронизации часов сервера и клиента.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассмотрим экспериментальные оценки временных задержек для трёх ключевых протоколов: HTTP, WebSocket и UDP. Для каждого протокола передачи данных проводилось 10000 повторных измерений задержки

передачи данных, по которым строилась гистограмма задержек (рис.1) и вычислялись следующие статистические характеристики: минимальная, максимальная, средняя и медианная задержка, 90й процентиль задержки и доля потерянных пакетов. Сводные результаты оценки статистических характеристик для трех рассматриваемых протоколов представлены в таблице 1.

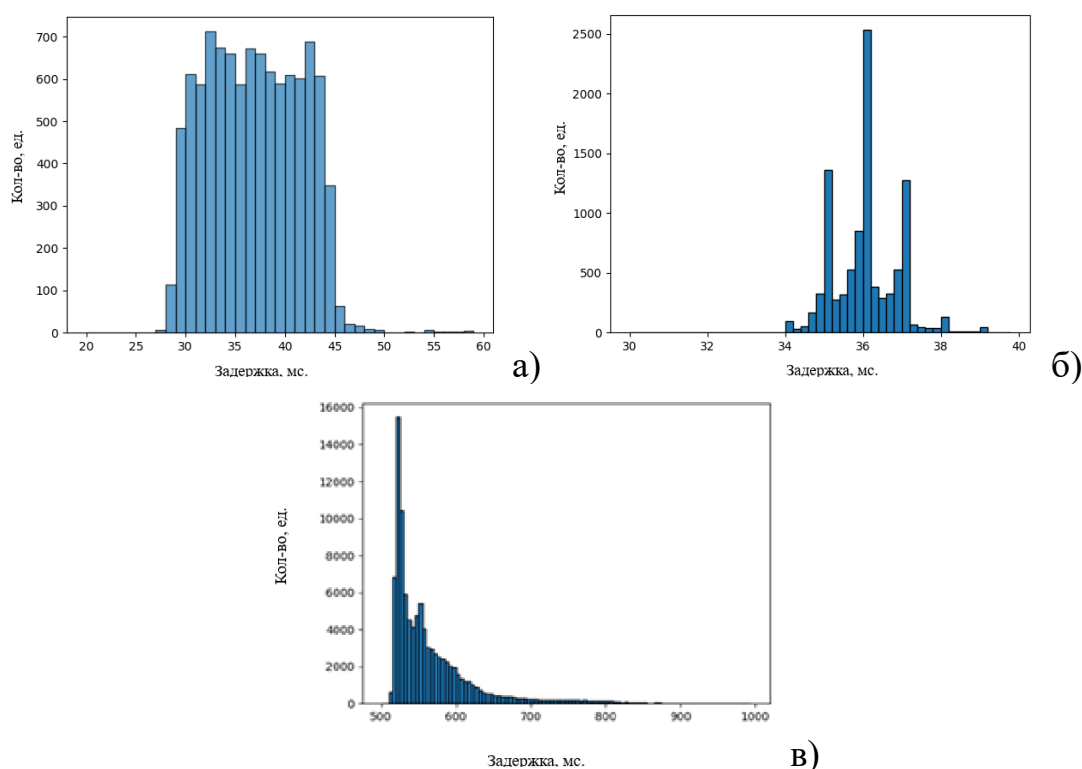


Рис. 1. – Гистограмма задержек передачи сообщений для протоколов: WebSocket (а), UDP (б), HTTP (в)

Таблица № 1

Результаты измерений задержек сообщений

№ п/п	Характеристика	Протокол передачи данных		
		HTTP	WebSocket	UDP
1	Средняя задержка, мс	569,25	37,15	27,96
2	Минимальная задержка, мс	547,38	36,87	35,00
3	Медианная задержка, мс	507,50	24,08	12,05
4	Максимальная задержка, мс	4299,17	470,72	130,42
5	90-й процентиль, мс	635,45	43,12	36,39
6	Потери пакетов, %	0,00	0,00	0,90

Анализ полученных результатов показывает, что протокол HTTP демонстрирует большие задержки, что связано с особенностями использования им протокола TCP транспортного уровня. Средняя задержка, составляющая 569,25 мс, значительно превышает этот показатель для других протоколов. Максимальная задержка (4299,17 мс) свидетельствует о статистическом распределении с «тяжелым хвостом», что подтверждается гистограммой (рис. 1, в). Особенности данного протокола говорят о больших величинах задержки, затрудняющим обеспечения высокой оперативности получения диагностической информации.

Протокол WebSocket обеспечивает значительно меньшие задержки. Средняя задержка составляет 37,15 мс, что делает этот протокол подходящим для реализации приложений с быстрым откликом. Максимальная задержка (470,72 мс) наблюдается достаточно резко, поскольку 90-й перцентиль задержки соответствует только 43,12 мс. Анализ общей структуры распределения (рис. 1, а) показывает высокую эффективность протокола.

Протокол UDP обеспечивает минимальные задержки среди всех протоколов, например, средняя задержка составляет всего 27,96 мс. Медианная задержка в 35,00 мс указывает на стабильность работы протокола. Однако стоит отметить потерю 0.9% передаваемых пакетов, что является недостатком данного протокола. При этом для организации системы контроля и диагностики ТПТЭ в процессе эксплуатации, потери данных менее 1% можно считать приемлемыми.

Измерения показали, что увеличение числа подключённых устройств и объёмов передаваемых данных приводит к росту временных задержек для всех протоколов. Однако реакция каждого протокола различается: 1. HTTP наиболее чувствителен к сетевой загрузке, что проявляется в значительном увеличении максимальной задержки; 2. WebSocket сохраняет относительную

стабильность, но максимальная задержка возрастает при высокой нагрузке; Протокол UDP демонстрирует минимальное влияние сетевой загрузки на среднюю задержку, но вероятность потери пакетов существенно возрастает.

Заключение

В данной работе рассмотрен вопрос использования различных протоколов передачи данных для организации удаленной системы контроля и диагностики ТПТЭ. Показано, что потенциально организация подобных систем возможна на каждом из рассматриваемых протоколов: HTTP, WebSocket и UDP. При этом характеристики связи оказываются различными. Для исследования был специально выбран предельный случай, когда сервер для обработки данных установлен на другом континенте. HTTP обеспечивает стабильную связь, но обеспечивает при этом самые большие задержки передачи данных с медианным значением 547 мс. При этом распределение сетевых задержек для этого протокола имеет «тяжелый хвост» и в отдельных случаях задержка может достигать величины свыше 4 с. Существенно снизить медианное значение задержки до времени порядка 35 мс позволяют протоколы WebSocket и UDP. При этом максимальная задержка протокола UDP составила 130 мс, что почти в 4 раза меньше WebSocket. По этой причине для обеспечения максимальной оперативности принятия диагностических решений предпочтительным оказывается использование протокола UDP. Однако, следует отметить, что при использовании этого протокола возможны потери пакетов. В проведенных исследованиях доля потерянных пакетов в самых неблагоприятных условиях не превышала 1%. Такой уровень потерь данных достаточен для обеспечения стабильной системы контроля и диагностики ТПТЭ в режиме реального времени. Учитывая, что задержка обработки измерительных данных сервером составляет величину меньшую 100мс, максимальное время получения диагностического сообщения составит не более 250 мс, а среднее – 125 мс.

Таким образом, для построения систем онлайн контроля и диагностики ТПТЭ можно рекомендовать использования протокола UDP.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение от 16.12.2024 № 139/2024-ПД).

Литература

1. Яковлев В.А., Таранов А.И., Ильин Е.А. Перспективы развития водородной энергетики в Российской Федерации // Инженерный вестник Дона. 2022. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7518/.
2. Smit M. Towards 40 000 hours of operation for Nedstack's FCS XXL PEM fuel cell stacks // Fuel Cells Bulletin. 2014. №8. pp. 12-15.
3. Asghari S., Mokmeli A., Samavati M. Study of PEM fuel cell performance by electrochemical impedance spectroscopy // International Journal of Hydrogen energy. 2010. Vol.35. №17. pp. 9283-9290.
4. Tang Z., Huang Q.A., Wang Y.J., et al. Recent progress in the use of electrochemical impedance spectroscopy for the measurement, monitoring, diagnosis and optimization of proton exchange membrane fuel cell performance // Journal of Power Sources. 2020. Vol.468 URL: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228361.
5. Mitzel J., Sanchez-Monreal J., Garcia-Sanchez D., et al. Fault Diagnostics in PEMFC Stacks by Evaluation of Local Performance and Cell Impedance Analysis // Fuel Cells. 2020. Vol.20. №4. pp. 403-412.

6. Денисов Е.С., Никишина Г.В., Енилиев Р.Р., Никишин Т.П. Особенности реализации метода контроля технического состояния литиевых источников тока на основе анализа релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. № 7. С. 36-43.

7. Pahon E., Steiner N.Y., Jemei S., et al. A signal-based method for fast PEMFC diagnosis // Applied Energy. 2016. Vol.165. pp. 748-758.

8. Астафьев Е.А. Сравнение различных подходов в анализе электрохимических шумов на примере водородно-воздушного топливного элемента // Электрохимия. 2020. Т.56. № 2. С. 167-174.

9. Астафьев Е.А. Измерение электрохимических шумов твердополимерного топливного элемента под нагрузкой // Электрохимия. 2018. Т.54. №6. С. 638-645.

10. Denisov E.S., Evdokimov Y.K., Adiutantov N., et al. Electrochemical Noise as a Diagnostic Tool for PEMFC // Fuel Cells. 2017. Vol.17. №2. pp. 225-237.

11. Прутчиков И.О., Камлюк В.В., Гречушкин И.В. Распределённое управление критически важных объектов городской инфраструктуры на принципах автономности // Инженерный вестник Дона. 2024. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9137/.

12. Чечин Г.В. Выбор и обоснование параметров сети обмена интернет-трафиком // Вопросы радиоэлектроники. 2020. №5. С. 10-16.

13. Евдокимов Ю.К., Салахова А.Ш. Экспериментальное исследование и имитационная модель динамики системы дистанционного управления экспериментом в многопользовательском режиме // Нелинейный мир. 2011. Т.9. №8. С. 507-514.

14. Денисов Е.С., Енилиев Р.Р., Гайсин Н.Р., Шафигуллин И.Д. Оценка возможности реализации распределенных систем диагностики водородных топливных элементов с использованием локальных и глобальных



телекоммуникационных сетей // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22. № 1. С. 4-10.

References

- 1.Yakovlev V.A., Taranov A.I., Il'in E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7518/
- 2.Smit M. Fuel Cells Bulletin, 2014, №8, pp.12-15.
- 3.Asghari S., Mokmeli A., Samavati M. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, Vol. 35, №17, pp. 9283-9290.
- 4.Tang Z., Huang Q.A., Wang Y.J., et al. Journal of Power Sources, 2020, Vol.468 URL: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228361.
- 5.Mitzel J., Sanchez-Monreal J., Garcia-Sanchez D., et al. Fuel Cells. 2020. Vol. 20, No. 4. pp. 403-412.
- 6.Denisov E.S., Nikishina G.V., Eniliev R.R., Nikishin T.P. Kontrol'. Diagnostika. 2023. № 7. pp. 36-43.
- 7.Pahon E., Steiner N.Y., Jemei S., et al. Applied Energy. 2016. Vol.165. pp. 748-758.
- 8.Astaf'ev E.A. E'lektroximiya. 2020. Vol.56. №2. pp. 167-174.
- 9.Astaf'ev E.A. E'lektroximiya. 2018. Vol.54. №6. pp. 638-645.
- 10.Denisov E.S., Evdokimov Y.K., Adiutantov N., et al. Fuel Cells. 2017. Vol.17. №2. pp. 225-237.
- 11.Prutchikov I.O., Kamlyuk V.V., Grechushkin I.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9137/.
- 12.Chechin G.V. Voprosy' radioe'lektroniki. 2020. № 5. pp. 10-16.
- 13.Evdokimov Yu.K., Salaxova A.Sh. Nelinejny'j mir. 2011. Vol.9. №8. pp. 507-514.
- 14.Denisov E.S., Eniliev R.R., Gajsin N.R., Shafigullin I.D. Intellektual'ny'e sistemy' v proizvodstve. 2024. Vol.22. № 1. pp. 4-10.

Дата поступления: 12.05.2025

Дата публикации: 26.06.2025