

А. А. Еремеев

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЙ 5G  
В АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

Поступила в редакцию 06.07.2021 г.

Рецензия от 14.07.2021 г.

*Рассмотрены особенности применения технологии 5G в электроэнергетическом комплексе – автоматизированных системах распределительных сетей, системах релейной защиты и мониторинга. Особое внимание уделено анализу возникающих при этом проблем, связанных с разработкой технических стандартов, вопросам обеспечения безопасности сетей и необходимых зон покрытия. Проанализированы перспективы интеграции технологии 5G и распределительных электросетей.*

*The paper considers the features of the application of 5G technology in the electric power complex – in automated systems of distribution networks, relay protection and monitoring systems. Special attention is paid to the analysis of the problems arising in this case in technical standards, network security issues, ensuring the necessary coverage areas. The prospects of integration of 5G technology and power distribution networks are analyzed.*

**Ключевые слова:** технология 5G, распределительная электросеть, облачная сеть радиодоступа (cRAN), контроль состояния сети, виртуальная сеть радиодоступа (vRAN)

**Keywords:** 5G technology, electrical distribution network, Cloud Radio Access Network (cRAN), monitoring the network status, Virtual Radio Access Network (vRAN)

Сеть связи электроэнергетики является ценным фундаментом, поддерживающим развитие электроэнергетических мощностей страны. Появление технологии 5G [1–5] позволит качественно улучшить все аспекты сетей связи, используемых в электроэнергетике [1–9]. Ожидается, что технология 5G будет играть роль «соединения всего» в сетях электросвязи [10]. По сравнению с технологией мобильной связи предыдущего поколения 5G обладает такими характеристиками, как большая пропускная способность, меньшая задержка, большая емкость и более обширные соединения [8]. Например, она стала ключевой технической основой для создания стратегии «три типа двух сетей» в Китае [11; 12]. Под влиянием стратегии «двух сетей» в будущем распределительная сеть будет глубоко интегрирована с технологией 5G, что позволит реализовать более высокие требования к экономичности, безопасности и надежности ее работы [7]. Создание повсеместного интернета вещей в энергетике проходит через все звенья энергосистемы и требует большого объема обнаружения и контроля для каждого узла распределительной сети [6]. Независимо от метода необходимо в реальном времени осуществлять обнаружение неисправностей и конт-



роль за состоянием работы распределительной сети, своевременно передавать управляющие сигналы, отправленные облачным сервером, каждому звену распределительной сети.

Дальнейшее расширение применения технологии 5G ускорит развитие автоматизации в распределительных сетях [13], что в значительной степени снимет проблемы нерационального использования электроэнергии и ее неравномерного распределения. В распределительной сети имеется большое количество объектов измерения и управления, таких как подстанции, подстанционные пункты, распределительные станции, распределительные трансформаторы и секционные выключатели. Обычно это сотни, тысячи или даже десятки тысяч объектов.

108

Поскольку значительная часть оборудования расположена в сложных географических условиях, зарытые волоконно-оптические линии и силовые беспроводные частные сети стали основными средствами передачи данных между терминалами. Из-за высокой стоимости оптической связи и отсутствия условий доступа к волоконно-оптическим линиям в некоторых районах, крупномасштабная подземная оптическая связь не может быть реализована в больших масштабах. В последние годы беспроводные частные сети 3G и 4G достигли выдающихся результатов в «последней миле» сети электросвязи, но некоторые показатели производительности 4G все еще не соответствуют стратегическим целевым требованиям, в отличие от технологии связи 5G [14]. Реализация автоматизации фидера (FA) постепенно перешла от некомуникационного метода, осуществляемого посредством регулировки времени автоматического повторного включения (АПВ), к централизованному интеллектуальному методу FA, который использует оконечное устройство фидера (FTU) или распределительное оконечное устройство (DTU) для обнаружения неисправностей и коммуникационную технологию для локализации неисправностей и восстановления электроснабжения на неисправных участках. Из-за недоверия к системе и оборудованию фидер является полуавтоматическим, ручным или не полностью автоматическим. В январе 2019 г. компания China Southern Power Grid взяла на себя инициативу по завершению испытания службы дифференциальной защиты в сети 5G в Шэньчжэне [11]. Этот тест показал, что технология 5G полностью соответствует различным услугам по управлению сетью в условиях сверхнизкой задержки. В мае того же года в Шэньчжэне завершился первый в мире синтез синхронного векторного измерения на основе распределительной сети 5G, что решило проблему абсолютной синхронизации времени и задержки между устройствами [13]. Исходя из этого можно заключить, что технология 5G будет играть ключевую роль в развитии распределительных электросетей в ближайшем будущем.

В настоящее время выделенная беспроводная связь 5G в основном используется для низковольтных распределительных шкафов в распределительных сетях, а небольшое количество распределительных станций применяют оптическую связь. Автоматическая диагностика и изоляция неисправностей в распределительной сети среднего напряжения не может быть гарантирована. Низковольтная распределительная сеть имеет низкую степень автоматизации и требует существенной рабочей силы и материальных ресурсов для обслуживания.



Традиционная технология определения места повреждения в основном делится на два метода: первый определяет место повреждения с использованием дополнительного оборудования, а второй — на основе измерительной информации распределительной линии. С помощью дополнительного оборудования место повреждения выявляется в основном методом секционирования и АПВ и методом индикации повреждения. Во втором методе точность определения места повреждения основана на измерительной информации распределительной линии. Решающим фактором является необходимость наличия достоверной измерительной информации для анализа с целью точного определения места повреждения. Современные технологии определения места повреждения достигают точного его определения путем оптимизации алгоритма или прогнозирования прохождения аварийных коллекторов.

На рисунке представлена упрощенная структурная схема системы связи 5G. Наиболее важная особенность централизованной системы заключается в том, что при возникновении постоянной неисправности ей необходимо загружать информацию об измерениях на главную станцию. Терминал мониторинга фидера каждого коммутатора или шкафа кольцевой сети должен взаимодействовать с главной станцией распределения электроэнергии, которая управляется базовой станцией. После этого диспетчер изолирует неисправность и применяет схемы самовосстановления для различных ситуаций. В работе [14] представлена централизованная интеллектуальная система автоматизации фидера на основе IEC61850 и подробно описана схема информационной последовательности изолирования и обнаружения неисправностей для этой системы. Непрерывный обмен информацией — очень сложный процесс. В таком решении непрерывной изоляции, требующем загрузки и выгрузки, только сеть 5G с большой пропускной способностью, низкой задержкой и высокой надежностью может обеспечить поддержку технологии связи и повысить эффективность изоляции неисправностей на первоначальной основе.

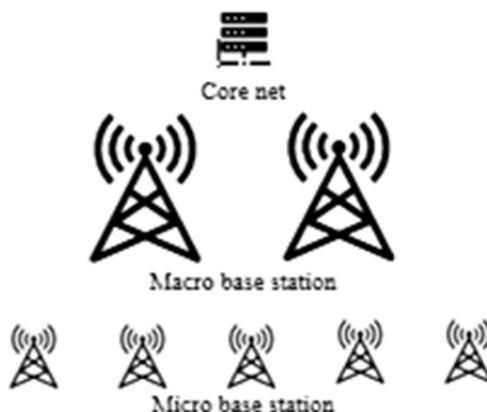


Рис. Упрощенная структурная схема системы связи 5G



Благодаря своей селективности и эффективности дифференциальная защита стала надежным селективным методом основной защиты оборудования энергосистемы. Дифференциальная защита основана на законе тока Кирхо (KCL) [11], который сравнивает входящие и выходящие токи реле на обоих концах защитной секции для определения внутренних и внешних неисправностей и принятия мер. Надежность дифференциальной защиты полностью зависит от системы связи на обоих концах линии. Наибольшее ограничение ранних систем дифференциальной защиты с заглубленными кабелями и воздушными линиями, используемыми в качестве средств связи, заключается в том, что длина защиты ограничена и реле на обоих концах теряют свои первоначальные функции при отключении линии. После этого появилась и до сих пор применяется дифференциальная защита, использующая оптические кабели и цифровые сети связи в качестве среды передачи данных, которая компенсирует предыдущее поколение дифференциальной защиты и в значительной степени устраняет недостатки потери функций реле из-за отключения линии. В то же время реле могут игнорировать изменения параметров системы. Соответственно, авторы [12] предлагают построить схему защиты от перепадов на расстоянии 30 км, соединив защитные реле на передающем и принимающем концах при помощи беспроводной сети передачи данных. Благодаря большой емкости и широкому покрытию технология 5G позволит в этом случае увеличить число используемых релейных соединений, а низкая временная задержка даст возможность передавать информацию и данные максимально точно и быстро.

Еще одной первоочередной задачей является обеспечение безопасности и стабильности климатических параметров внутри помещений распределения электроэнергии. С использованием датчиков, установленных в распределительных помещениях, и технологии связи 5G информация о температуре, влажности и наличии опасных газов в помещениях может быть передана дежурному персоналу в режиме реального времени.

При традиционном управлении распределительными помещениями необходимо выделить персонал для регулярного осмотра и мониторинга электрооборудования. В нашем случае технология 5G может быть интегрирована с существующими датчиками. Например, вокруг трансформатора устанавливаются датчики для получения данных о рабочей температуре трансформатора, ускорении его бака и электрической мощности трансформатора, а затем проводится мониторинг и анализ этих данных. После этого данные в режиме реального времени загружаются персоналу мониторинга через сеть связи 5G. При возникновении аномалии сигнал тревоги из помещения распределения электроэнергии может быть получен в кратчайшие сроки, в результате будет автоматически сгенерирован и рассчитан набор подходящих решений по устранению неисправности. Таким образом будет в наибольшей степени обеспечена нормальная работа оборудования в помещении распределения электроэнергии. Эффективность контроля и обслуживания помещения распределения электроэнергии также может быть улучшена, а стоимость контроля — снижена.



Благодаря своим небольшим размерам, удобству установки и низкой стоимости фазоизмерительные устройства (PMU) распределительных сетей среднего напряжения привнесут качественное улучшение в технологию диагностики и локализации неисправностей в этих сетях. Сочетание PMU и технологии 5G будет постепенно развиваться в направлении визуализации работы распределительной сети, что зависит от основных характеристик и технологий 5G. Помещения распределения электроэнергии могут построить сотовую сеть 5G и полагаться на большую пропускную способность, низкую задержку и большую емкость технологии 5G. Комнаты распределения электроэнергии могут не только контролировать работу распределительной сети в режиме реального времени, но и получать большое количество точных данных о терминалах и шинах, а также о рабочем состоянии оборудования. Большой объем визуализированных данных передается клиенту для мониторинга и управления в режиме реального времени. Технология 5G может обеспечить более высокую скорость загрузки и выгрузки данных для поддержки передачи видео и изображений высокого разрешения во время ремонтных процессов; в то же время эти данные будут возвращаться в центр в режиме реального времени. Технология связи 5G не только дает возможность визуализации распределительной сети, но и повышает эффективность ее ежедневного осмотра, снижает затраты и повышает эффективность работы.

Важной составной частью и ключевым звеном в автоматизированной системе распределительной сети является кольцевой главный блок, поэтому большое значение имеет интеграция с ним системы автоматического мониторинга и обнаружения. Традиционный кольцевой главный блок в основном рассчитан на подключение электрических или оптических кабелей для реализации многоточечного обнаружения и контроля. Проводная передача данных увеличивает сложность линии внутри конструкции и повышает угрозы ее безопасности. Стандарт реального времени для онлайн-мониторинга кольцевого главного блока очень строгий. Благодаря своим основным характеристикам технология 5G может заменить существующую передачу данных в проводных и беспроводных сетях общего пользования, обеспечить мониторинг в реальном времени и снизить стоимость без увеличения сложности основного блока кольца. Несколько блоков в главном кольцевом устройстве также будут лучше выполнять свои функции благодаря интеграции технологии связи 5G. Например, блок обработки сигналов внутри основного блока кольца должен управлять возвращаемым телеметрическим сигналом, удаленным сигналом и другими устройствами управления, одновременно осуществляя визуальное онлайн-обнаружение в режиме реального времени для основного блока кольца.

Технология 5G закладывает основу для будущего применения технологии онлайн-мониторинга в интеллектуальных сетях. Распределительный трансформатор представляет собой важное базовое оборудование для работы распределительной сети, поэтому мониторинг его данных необходим. При этом в режиме реального времени можно своевременно обнаружить и устранить аномальное рабочее состояние распределительных трансформаторов.



В первой половине 2020 г. завершилось техническое замораживание стандарта релиза R16 для технологии 5G и началось создание стандартов сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC) [15]. В релизе 18 (R18) 3GPP, который является первым определением сквозной стандартной архитектуры 5G+ интеллектуальных сетей, были созданы интеллектуальные сети. Исследования того, как технология 5G может поддерживать бизнес-потребности распределительных и даже электрических сетей, все еще находятся на начальной стадии, и потребуются много времени, чтобы заморозить технический стандарт R18.

В будущем все распределительные терминалы будут интегрированы с технологией 5G: например, коммуникационный модуль технологии 5G будет встроено в распределительный терминал. В настоящее время продолжают соответствующие исследования коммуникационных терминалов 5G, при том что рынок интеллектуальных коммуникационных терминалов уже насыщен. Хотя появление технологии 5G даст коммуникационным терминалам возможность вновь выйти на рынок, но отрасли, поддерживающие данную технологию, не в состоянии обеспечить развитие коммуникационных терминалов 5G и их массовое производство.

Необходимо решить проблему безопасности технологии сетевого среза в технологии связи 5G. В настоящее время существует множество новых угроз безопасности в технологии нарезки, специально адаптированной к распределительной сети. Для новой сетевой атаки это означает ответ на вопрос, сможет ли сеть противостоять атаке извне при внедрении сетевого слайсинга. Поскольку сетевой срез формируется несколькими виртуальными сетями, разделенными физическими сетями, возможно достичь максимального уменьшения взаимного влияния. Только обеспечив эксплуатационную безопасность распределительной сети, мы можем продолжать продвигать и применять технологию нарезки сетей в ней.

Еще одной проблемой, которую необходимо решить при применении технологии 5G, является экономическая эффективность сети, то есть выбор сети общего пользования или частной сети. По сравнению с публичными сетями частные имеют преимущества в безопасности сети, скорости передачи информационных данных, относительно плавном переключении и перевыборе сигнала, но стоимость их строительства несопоставима со стоимостью публичных сетей. Технология 5G обеспечивает высокую скорость передачи данных, и передача данных посредством нее также стоит дороже. Проблема строительства сети заключается в том, что она должна быть разумно организована в диапазоне приемлемых затрат. Поэтому при условии, что операторы смогут в будущем открыть систему архитектуры сети и совместно обсудить набор подходящих схем выбора сети, оптимальная схема также может быть использована для разумного проектирования различных требований к распределительной сети. Для обеспечения безопасности, гибкости и надежности распределительная сеть и технология 5G могут быть интегрированы на глубоком уровне.



На основании вышеизложенного можно заключить, что внедрение технологии 5G изменит архитектуру традиционной мобильной связи и ее безопасность. Для некоторых распределительных сетей можно объединить технологии связи 5G и совместно с операторами разработать набор сетевых структур, объединяющих частные сети и сети общего пользования, чтобы подготовить почву для перехода — например, представить недорогую, ориентированную на данные беспроводную сеть следующего поколения и технологию гигабитной беспроводной локальной сети на основе оптической беспроводной сети для удовлетворения требований сети связи 5G. Кроме того, необходимо учитывать расположение построенных базовых станций 5G, вопросы сигнала, безопасности и защиты от помех. Необходимы дальнейшие исследовательские программы по интеграции технологии 5G в распределительную сеть.

#### Список литературы

1. Risteska-Stojkoska B. L., Trivodaliev K. V. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 140. P. 1454–1464.
2. Wang S., Zhu L., Zhang Z., Zhang S. Research on single phase grounding fault detection technology of distribution grid based on intelligent variable terminal // *Power System Technology*. 2019. Vol. 43, №12. P. 4291–4298.
3. Liu J., Chen L., Zhang Z. Estimation of static parameters testability for distribution grid considering the effect of measurement errors // *Power System Technology*. 2020. Vol. 44, №4. P. 1481–1487.
4. Hu S., Chen X., Ni W. et al. Modeling and analysis of energy harvesting and smart grid-powered wireless communication networks: a contemporary survey // *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2020. Vol. 4, №2. P. 461–496.
5. Tao W., Dou K., Chen F. et al. Comparison and technical analysis of phasor data access modes in distribution grid // *Power System Technology*. 2019. Vol. 43, №3. P. 784–792.
6. Liu J., Ni J., Xu L. Management of distribution automation system (DAS) // *Power System Technology*. 1998. Vol. 8. P. 3–5.
7. Wu Y., Gao H., Xu B. et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution grid // *Automation of Electric Power Systems*. 2019. Vol. 43, №9. P. 140–155.
8. Lin L., Qi B., Li B. et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric Internet of Things // *Power System Technology*. 2020. Vol. 44, №8. P. 3114–3130.
9. Zhu Z., Xu B., Yip T. et al. IEC 61850 based models for distributed feeder automation system // *Automation of Electric Power Systems*. 2018. Vol. 42, №23. P. 148–156.
10. Ghosh A., Maeder A., Baker M., Chandramouli D. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 127639–127651.
11. Shafi M., Molisch A. F., Smith P. J. et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. Vol. 35, №6. P. 1201–1221.



12. Parvez I., Rahmati A., Guvenc I. et al. A survey on low latency towards 5G: RAN, core network and caching solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, №4. P. 3098–3130.

13. Andrews J.G., Buzzi S., Choi W. et al. What will 5G be // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32, №6. P. 1065–1082.

14. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wire-less networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, №3. P. 1617–1655.

15. Zhu T., Qian A., He X. et al. An overview of data-driven electricity consumption behavior analysis method and application // Power System Technology. 2020. Vol. 44, №9. P. 3497–3507.

**Об авторах**

Александр Алексеевич Еремеев — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AAEmeev@stud.kantiana.ru

**The author**

Aleksandr A. Eremeev, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AAEmeev@stud.kantiana.ru