

УДК 621.31

**СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ****Кузнецов Игорь Евгеньевич,**

магистрант,

E-mail: ig.kuznets@bk.ru

Куренщиков Александр Владимировичкандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, стандартизации и
сертификации, Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск

E-mail: akur@inbox.ru

Аннотация

В статье выполняется обзор проекта «Метрология для электроэнергетики», проведенного институтом RISE. Отмечаются все возрастающие требования к мощности и надежности крупных систем передачи энергии, что требует совершенствования практики определения метрологических характеристик средств измерений для испытаний высоковольтного электрооборудования. В статье обозначены цели проекта, раскрывается перечень проблем стоящих перед испытателями высоковольтного электрооборудования, приводятся результаты исследования.

Ключевые слова: электроэнергетика, метрология, средства измерений, калибровка, испытание, электрооборудование.

MODERN RESEARCH IN THE FIELD OF ELECTRIC POWER METROLOGY**Igor E. Kuznetsov,**

undergraduate

E-mail: ig.kuznets@bk.ru

Alexander V. KurenshchikovCandidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metrology,
Standardization and Certification, National Research Mordovia State University named after N. P.
Ogaryov, Saransk

E-mail: akur@inbox.ru

ABSTRACT

This article reviews the Metrology for the Electric Power Industry project conducted by the RISE Institute. There are increasing demands on the power and reliability of large power

transmission systems, which requires improving the practice of determining the metrological characteristics of measuring instruments for testing high-voltage electrical equipment. The article outlines the goals of the project, reveals a list of problems facing testers of high-voltage electrical equipment, and presents the results of the study.

Keywords: electrical power engineering, metrology, measuring instruments, calibration, testing, electrical equipment.

Испытания высоковольтного оборудования регулярно проводятся производителями, для проверки того, что оно выдержит высокие электрические нагрузки, которые могут возникнуть при эксплуатации. Возрастающие требования к мощности и надежности крупных систем передачи энергии привели к увеличению напряжений питания, в результате чего современная практика определения метрологических характеристик средств измерений для испытаний электрооборудования не может полностью покрыть необходимые потребности. Силовая электроника используется, например, при передаче высокого напряжения постоянного тока, при этом возникает необходимость в надежном измерении токов переходных процессов, и следовательно в новых процедурах калибровки. Необходимость снижения парникового эффекта привело к требованию отслеживаемого измерения потерь в оборудовании высокого напряжения, таком как силовые конденсаторы, стабилизаторы, кабели и силовые трансформаторы. В последнем случае Европейская директива по экодизайну [1] кодифицирована в правилах как конкретные требования к допустимым потерям. Однако современная метрологическая инфраструктура измерения электрических характеристик для выполнения этой директивы, находится в зачаточном состоянии, и не может удовлетворить современным потребностям.

Общая цель исследований по проекту «Метрология для электроэнергетики» [2] проведенным Исследовательским институтом Швеции RISE заключалась в обеспечении устойчивости электроэнергетических систем в соответствии с целями Европейского Союза. Цели планировалось достичь путем улучшения методик и средств измерений при испытаниях оборудования для высоковольтных сетей, как с точки зрения электрической стойкости, так и с точки зрения контроля электрических потерь.

Таким образом, для достижения цели проект должен был решить следующие задачи:

1. Разработать методы расширения диапазона измерения напряжений коммутационного импульса (КИ) до сверхвысокого уровня 3500 кВ с неопределенностью лучше 1 %.

2. Разработать оборудование и методы калибровки средств измерений импульсных напряжений с использованием комбинаций амплитуды и времени фронта, например, используемых при испытаниях на пробой изоляторов (500 кВ, 200 нс). А также разработать эталонные схемы калибровки для систем измерения импульсного тока со сверхбыстрым временем нарастания в субмикросекундном диапазоне и диапазоном пиковых значений от 50 А до нескольких кА, с погрешностью 0,5 %.

3. Создать средства измерения потерь в больших силовых трансформаторах, стабилизаторах, силовых конденсаторах и кабелях переменного тока. Что должно включать измерение активной мощности потерь при низких коэффициентах мощности в промышленных условиях с предельной точностью фазы 10 мкрад и целевой неопределенностью лучше 50 мкВт/ВА при напряжениях и токах до 150 кВ и 2000 А соответственно. Также должно быть изучено определение скин-эффекта для трехфазных кабелей с целью количественной оценки потерь.

4. Разработать измерительную систему для точного определения общих потерь высоковольтной преобразовательной станции постоянного тока путем одновременного измерения мощности переменного и постоянного тока. Цель состоит в том, чтобы измерить потерю в 1 % с относительной неопределенностью 3 %. Чтобы облегчить измерения, в составе измерительной системы должен быть разработан неинвазивный датчик тока с погрешностью менее 50 мкА/А по току и 50 мкрад по фазовому углу.

Необходимость решения задач проекта, определяется тем обстоятельством, что при производстве оборудования для сетей высокого напряжения проводятся диэлектрические испытания для проверки устойчивости оборудования к условиям эксплуатации, в том числе к высоким напряжениям и импульсам сильного тока. Методы и схемы калибровки определены главным образом в стандарте IEC 60060-2 «Методы испытаний высоким напряжением» [3]. Однако системные напряжения возросли до уровней, превышающих те, которые предусмотрены этим стандартом, и существует острая необходимость в расширении методов испытаний на диапазон сверхвысоких напряжений. В поддержку этой необходимости руководитель ответственного комитета ТК42 Международной электротехнической комиссии (МЭК) заявил, что есть ряд проблем, связанных с системами измерения высоких напряжений, и особенно импульсных напряжений, которые необходимо решать специалистам в области измерительной техники. С ростом испытательных напряжений возникают новые потребности в методах калибровки, например, необходимость получения надежного результата калибровки при 20 % фактического испытательного напряжения. Он сообщил также, что МЭК ТК42 будет приветствовать согласованные усилия национальных испытательных лабораторий по предоставлению решений в области измерений высокого напряжения. Такие решения неизбежно войдут в стандарты МЭК.

Прослеживаемость измерений при высоковольтных испытаниях является важным инструментом обеспечения высокого качества и надежности испытываемой продукции. Например, системы измерения импульсного напряжения освещения обычно калибруются на 500 кВ вместе с дополнительными мерами для экстраполяции линейности до 2500 кВ. Повышение уровня напряжения передачи требует испытаний при напряжении, превышающем 2500 кВ. Эти повышенные напряжения привели к новым требованиям к калибровке, которые невозможно было удовлетворить с помощью предыдущих методов.

Другой особенностью импульсных испытаний является применение очень быстрых переходных процессов при испытаниях на пробой изоляторов высоковольтных линий, где испытательное напряжение может достигать 500 кВ за 200 нс. До начала этого проекта возможности измерений не распространялись на длительность фронта ниже 0,84 мкс, и не существовало стандартов, регулирующих порядок проведения таких измерений. Кроме того, текущие тесты, указывают на необходимость дальнейших исследований в этой области.

Аналогичным образом, возможности испытаний были ограничены измерением импульсов тока, когда калибровка требует проверки характеристик в субмикросекундном диапазоне (например, тестирование трансформаторов). До этого проекта возможности испытаний не распространялись на генерацию субмикросекундных ступенчатых токов, превышающих 10 А. Кроме того, последнее поколение ламп преобразователей постоянного тока требовало точного измерения быстро меняющихся сигналов напряжения и тока для определения потерь. Такие потери при переключении влекут за собой измерение быстрых переходных процессов тока и напряжения для определения энергии, потребляемой в процессе переключения.

Измерение потерь в мощных трансформаторах и стабилизаторах выполняются производителями с использованием сложных коммерческих измерительных систем. Эти системы используют чрезвычайно точные датчики напряжения и тока, подключенные к

современным измерителям мощности. Для трансформаторов большой мощности необходимо измерять активную мощность с погрешностью лучше 3 % при коэффициенте мощности 0,01, что приводит к требованию точности 0,03 % от полной мощности. Поштучная калибровка компонентов коммерческой системы измерения потерь недостаточна для испытания таких систем, поскольку она не охватывает возможные систематические эффекты всей системы, и до этого проекта в Европе не было испытательных центров, которые обеспечивали бы калибровку системы с достаточной точностью (т. е. лучше, чем 0,01 % или 100 мрад по фазе).

В соответствии с Директивой об экодизайне и соответствующим регламентом Эвркомиссии № 548/2014 [4], МЭК создал рабочую группу, которой поручено пересмотреть «Правила определения неопределенностей при измерении потерь в силовых трансформаторах и стабилизаторах».

В результате реализации проекта «Метрология для электроэнергетики» были разработаны:

- Эталонные измерительные системы КИ до 1000 кВ с наилучшей погрешностью для значения испытательного напряжения 0,5 % и 1 % для временных параметров.

- Эталонная измерительная система для сверхбыстрых переходных процессов 500 кВ и 200 нс, спроектированная таким образом, что ее рекомендуется использовать в качестве стандартной установки для испытаний на пробой.

- Средства калибровки для переходных процессов в субмикросекундном режиме при токах до 100 А, которые теперь применяются в промышленности.

- Новые измерительные приборы для измерения потерь силовых конденсаторов, проверенные взаимными сличениями.

- Системы калибровки для систем измерения потерь силовых трансформаторов, проверенные взаимными сличениями.

- Новые методы надежного измерения сопротивления кабелей переменному току с чрезвычайно низкими потерями. Это связано с тем, что сопротивление силовых кабелей переменному току может быть на 30-40 % выше, чем сопротивление постоянному току.

- Преобразовательные станции для высоковольтных сетей постоянного тока, потери в которых раньше можно было оценить только на основе испытаний и оценки компонентов. Были определены метод и подходящее оборудование, позволяющие напрямую измерять потери как разницу между входной и выходной мощностью.

Возможности средств калибровки КИ [5], разработанные в рамках проекта, применимы минимум до 2700 кВ, и теперь доступны для калибровки на месте в лабораториях производителей. Представлены новые и пересмотренные записи в таблице Международного бюро мер и весов для расширения возможностей калибровочных измерений. Результаты проекта были объявлены в соответствующем техническом комитете Международной электротехнической комиссии ТК42. Разработаны, и проверены средства калибровки для быстрых переходных процессов.

Разработаны две эталонные измерительные установки для калибровки систем измерения потерь в трансформаторах. Одна из установок была проверена на предприятии крупного производителя трансформаторов (Smit Transformatoren, Нидерланды) в ходе полномасштабных испытаний. Была дана обратная связь по результатам этой работы в МЭК ТК14.

На основе методов выборки были разработаны новые системы измерения потерь силовых конденсаторов. Таким образом были созданы легкие, но точные измерительные системы.

Исследование потерь в силовых кабелях позволило проводить измерения для так называемых кабелей с малыми потерями с индивидуально изолированными жилами.

Результаты будут использованы в работе Международного совета по большим электрическим системам (CIGRE).

Оценка мощности потерь высоковольтной преобразовательной подстанции постоянного тока изучалась в рамках проекта EMRP. Сейчас разработан более общий метод, при котором мощность переменного и постоянного тока измеряется напрямую с такой точностью, что можно рассчитать потери. Для поддержки измерения потерь на станциях был разработан неинвазивный трансформатор тока, позволяющий проводить калибровку существующих трансформаторов тока на месте.

В заключение нужно отметить, что проект явился ответом на использование промышленностью все более высоких напряжений передачи энергии, настолько высоких, что возник вопрос, можно ли надежно выполнить калибровку измерительных систем для самого высокого испытательного напряжения, используемого в настоящее время. В результате выполнения проекта ответ на этот вопрос был получен: были разработаны, и испытаны средства и методы калибровки в испытательных лабораториях сверхвысокого напряжения.

Список литературы:

1. Ecodesign Directive. Текст : электронный // EUR-Lex : [сайт]. 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:en:PDF> (дата обращения: 13.05.2024).
2. Metrology for the electrical power industry. Текст : электронный // Euramet : [сайт]. 2024. URL: [https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_euramettcp_project\[project\]=1321](https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_euramettcp_project[project]=1321) (дата обращения: 13.05.2024).
3. IEC 60060-2 (2010) Методы испытаний высоким напряжением. Часть 2. Измерительные системы. Текст : электронный // Российский институт стандартизации : [сайт]. 2024. URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4576212> (дата обращения: 13.05.2024).
4. Commission Regulation (EU) No 548/2014. Текст : электронный // EUR-Lex : [сайт]. 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_152_R_0001&rid=1 (дата обращения: 13.05.2024).
5. Bergman A., Elg A-P., Hällström J., Meisner J. Evaluation of step response of transient recorders for lightning impulse. Текст : электронный // E-Cigre : [сайт]. 2024. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/ish2017-488-evaluation-of-step-response-of-transient-recorders-for-lightning-impulse.html>

References:

1. Ecodesign Directive. Text : electronic // EUR-Lex : [website]. 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:en:PDF> (access date: 05/13/2024).
2. Metrology for the electrical power industry. Text : electronic // Euramet : [website]. 2024. URL: [https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_euramettcp_project\[project\]=1321](https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_euramettcp_project[project]=1321) (access date: 05/13/2024).

3. IEC 60060-2 (2010) High voltage test methods. Part 2. Measuring systems. Text : electronic // Russian Institute of Standardization : [website]. 2024. URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4576212> (access date: 05/13/2024).
4. Commission Regulation (EU) No 548/2014. Text : electronic // EUR-Lex : [website]. 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_152_R_0001&rid=1 (access date: 05.13.2024).
5. Bergman A., Elg A-P., Hällström J., Meisner J. Evaluation of step response of transient recorders for lightning impulse. Text : electronic // E-Cigre : [website]. 2024. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/ish2017-488-evaluation-of-step-response-of-transient-recorders-for-lightning-impulse.html> (access date: 05.13.2024).