



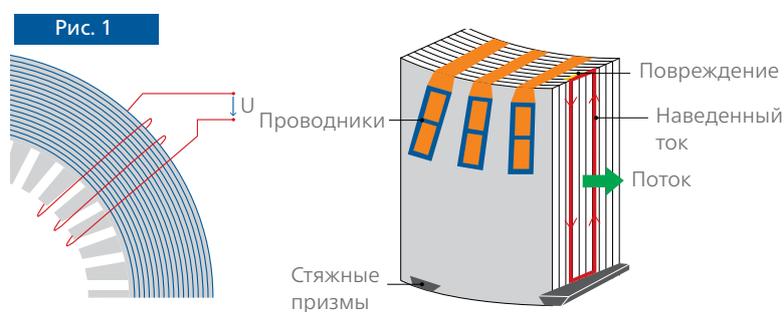
## Оценка состояния сердечника статора с помощью CPC 100

Для уменьшения потерь, связанных с вихревыми токами, сердечники статоров вращающихся машин набраны из множества пластин. Короткое замыкание между двумя и более пластинами приводит к усилению локальных вихревых токов. Это также может приводить к возникновению локальных точек нагрева, что при наиболее неблагоприятных условиях может привести к частичному расплавлению сердечника и, со временем, — выходу всей машины из строя. Измерение кольцевого потока, когда возбуждение машины осуществляется при номинальном значении потока, а потенциальные точки нагрева обнаруживают с помощью термографической камеры, требует большого количества энергии. Кроме того, использование такой установки сопряжено с большими затратами времени и ресурсов.

Надежная альтернатива — измерение потока рассеяния с помощью CPC 100, когда используют портативный источник мощности и измерительное устройство, которые питаются от обычной сетевой розетки. Помимо измерения при номинальной частоте, CPC 100 позволяет осуществлять возбуждение сердечника статора на более высоких частотах — до 400 Гц. В этой статье разъяснен эффект от подачи испытательного сигнала на разных частотах, описано обнаружение дефектов, расположенных «глубже» в сердечнике, а также выполнено сравнение со способом измерения кольцевого потока.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Для обнаружения слабых мест в изоляции сегментов сердечника статора, помимо других методов, может быть использовано измерение потока рассеяния. В этом случае на сердечник с помощью вспомогательной обмотки наводится лишь небольшая часть, в пределах 2–10%, номинального магнитного потока (рис. 1, слева) [1]. Если происходит короткое замыкание между слоями,



Слева: Вспомогательная обмотка, где синими линиями показан поток; Справа: увеличенный вихревой ток, обусловленный повреждением сердечника статора.

то увеличенный вихревой ток, вызванный наведенным напряжением от потока вспомогательных обмоток, становится причиной более высокого потока рассеяния, как показано на рис. 1 справа.

Такое повышение потока рассеяния можно обнаружить с помощью катушки Чаттока или Роговского, сканирующей поверхность статора, как показано на рис. 2. [3] Показания катушки в мА соотносят с определенным положением в сердечнике статора. Поскольку ширина измерительной катушки и количество витков датчика остаются неизменными для каждого измерения, перед каждой процедурой может быть выполнена калибровка.

Когда измерение проводят с подачей 4% номинального потока [1], мощность источника возбуждения обычно не должна превышать 2–3 кВА [2]. Для большинства машин достаточно даже меньшей мощности. Это основное преимущество по сравнению с другими методами, такими как измерение при потоке высокой интенсивности, поскольку источник питания и установка для проведения этого испытания просты и не требуют много времени для подготовки. Обычная величина реактивного тока, при которой следует выполнять обследования, — 100 мА, когда измерение осуществляется при 4 % номинального потока и при номинальной частоте [1, 2].

Рис. 2



Обнаружение тока короткого замыкания путем измерения потока рассеяния с помощью датчика. В ходе различных измерений разные пазы сканируются последовательно. Шаг катушки соответствует величине зубцов между пазами, что обеспечивает определенную область перекрытия.

## II. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

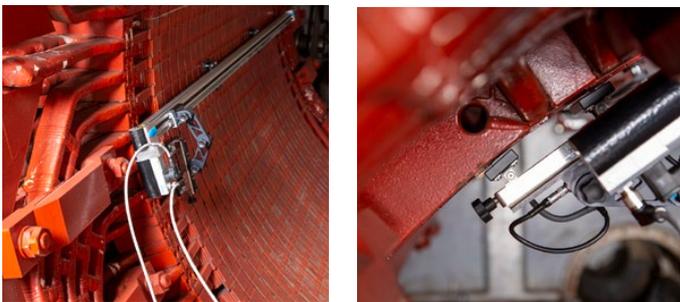
Параметры, описанные в разделе I, также действительны для решения с применением CPC 100. Кроме того, некоторые другие особенности этого решения обеспечивают быстрое и надежное измерение, в том числе за счет интуитивно понятного управления:

### A. Повышение степени удобства использования благодаря полуавтоматическому перемещению датчика

Зная о том, что выполнение измерений вручную может быть обременительным и трудоемким, мы стремились максимально повысить удобство эксплуатации. Поэтому в решении для измерения потока рассеяния мы предусмотрели перемещение датчика в полуавтоматическом режиме. Такое перемещение обеспечивает штанга (RAA1), которая крепится на сердечнике статора с помощью сильных магнитов. Дополнительный страховочный крепеж исключает вероятность падения штанги после установки и повреждения каких-либо устройств.

Датчик на ползуне перемещается на расстоянии 2–3 мм от поверхности статора, что обеспечивает точность

Рис. 3

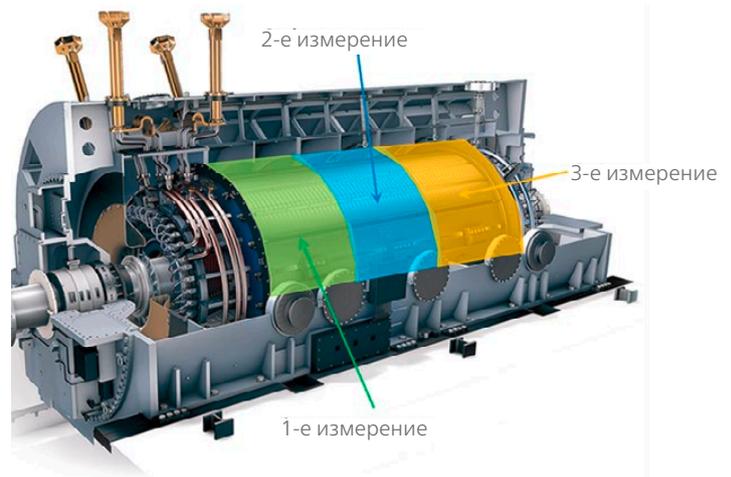


Штанга и опора катушки во время измерений

измерения. Кроме того, если опора катушки не касается поверхности, в результирующем сигнале не будет пиков, обусловленных наличием вентиляционных каналов или других неровностей.

Максимальная длина штанги составляет 1760 мм. Также возможно измерение более длинных статоров, поскольку результаты разных измерений можно объединить с помощью программного обеспечения. Оптимальный вариант в таком случае — это разделить статор на сегменты

Рис. 4



Способ измерений, когда требуется просканировать статор большой длины; источник изображения генератора: Siemens

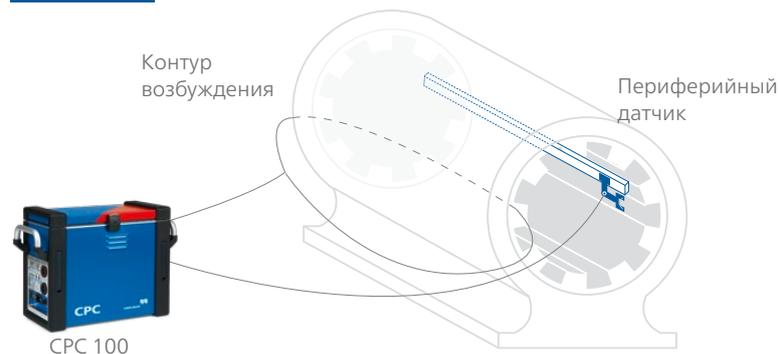
и измерить каждый из них отдельно, как показано на рис. 4.

Для локальной диагностики, а также в особых случаях, например для длинных ступенчатых концевых областей в больших турбогенераторах, можно проводить измерения в ручном режиме.

### B. Возбуждение и измерение как готовое решение

Поскольку требуемая мощность составляет менее 3 кВА, CPC 100 можно использовать одновременно и как источник питания, и как измерительное устройство. Возможна и более высокая мощность возбуждения, в том числе при питании от обычной сетевой розетки, поскольку возбуждение активно только при перемещении штанги. При наличии штанги (RAA1), блока управления (SCU1) и умножителя витков (WMP1) у пользователей есть все

Рис. 5



Упрощенная схема одновременного использования CPC 100 как источника возбуждения и измерительного устройства

необходимое для проведения измерений.

Кабель возбуждения уже входит в комплект и может быть удлинен, если измерения проводятся для машин большого размера. В зависимости от типа машины, в которой осуществляют измерения, можно подключить два разных кабеля возбуждения, например двухжильный и восьмизильный.

### С. Поддержка ПО Primary Test manager

Операционное программное обеспечение Primary Test Manager (PTM) обеспечивает руководство процессом на протяжении всего испытания, включая схемы подключения и автоматический расчет возбуждения обмотки в зависимости от ее схемы (если таковая имеется) или, в противном случае, с учетом размеров статора.

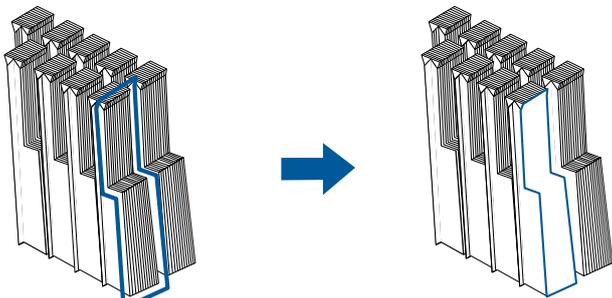
Интуитивно понятное отображение сигналов в реальном времени и сводка измерений, представляемая с помощью тепловой карты (см. рис. 14), также являются частью этого программного обеспечения, как и функция формирования протокола нажатием одной кнопки. Функция формирования протокола включает в себя и другие испытания объекта, которые возможны с использованием CPC 100.

### III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования, касающиеся воспроизводимости и измерений на различных частотах, были выполнены на небольшом выведенном из эксплуатации гидрогенераторе с номинальным напряжением 6,4 кВ и 156 пазами статора. Обмотка статора представляет собой катушечную обмотку с 2 витками на катушку. Все остальные эксперименты, описанные в разделах VI и VII, были проведены на разных машинах. Установка описана в соответствующих разделах.

Для лучшей видимости влияния различных частот возбуждения на воспроизводимость эксперименты с измерениями на небольшом гидрогенераторе были проведены с введением искусственного повреждения. Сегмент статора закорочен проводом, как показано на рис. 6. Причина этой модификации заключается в том, что гораздо проще имитировать замыкание с помощью провода в двух вентиляционных каналах, чем повреждать сердечник статора. В разделе IV использовали другой искусственный дефект, отличающийся от того, который применяли в разделе V.

Рис. 6



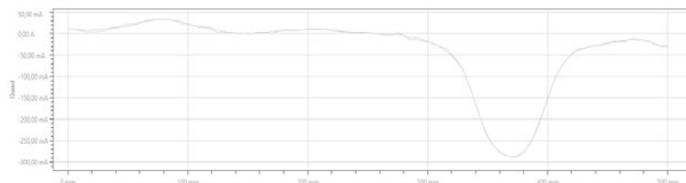
Пояснение к выполнению искусственного замыкания

### IV. ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ

Чтобы быть уверенным, что часто используемый предел интерпретации не зависит от измерительной установки, были проведены исследования воспроизводимости. Это еще более важно в случае, если пользователь хочет отслеживать динамику изменения состояния с течением времени, чтобы оценивать критичность существующих потенциальных слабых мест.

Первая кривая сравнения на рис. 7 показывает два измерения, выполненные на одном и том же пазе с замыканием, без изменения каких-либо настроек.

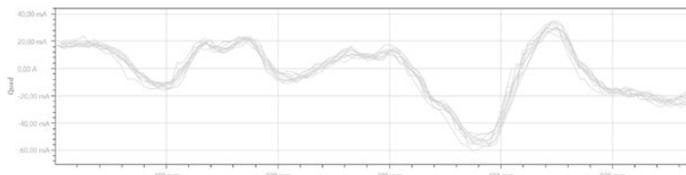
Рис. 7



Два измерения на одном и том же пазе

Поскольку в высокой степени воспроизводимости нет ничего неожиданного, для следующего сравнения, показанного на рис. 8, в начале каждого измерения выполняли механическую настройку и регулировку. В этом случае сканировали один и тот же «исправный» паз, поэтому эти измерения не выявили никаких дефектов. После повторной механической настройки в начале каждого измерения фиксировали кривую результатов измерения. Разброс результатов больше, чем показан на рис. 7, но все же крайне незначителен и не может считаться помехой надежности измерений.

Рис. 8



Пояснение к выполнению искусственного замыкания

## V. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ

Эффект измерения при повышенных частотах поясняется с помощью двух сравнительных измерений при 50 и 400 Гц. Оба были выполнены на одном и том же пазе с одним и тем же искусственным замыканием. Между процедурами различных измерений не вносили никаких изменений или модификаций; изменения были сделаны лишь в параметрах возбуждения. Измерения проводили на небольшом гидрогенераторе с 24 обмотками возбуждения, который описан в разделе III.

Как известно, поток обратно пропорционален частоте, но пропорционален напряжению. Для сравнения двух измерений с разными частотами в первом эксперименте напряжение возбуждения оставалось неизменным. Следовательно, при восьмикратном увеличении частоты измерения коэффициент уменьшился в 8 раз. И наоборот, во время второй попытки коэффициент оставался одинаковым для обоих измерений, поэтому необходимо было соответствующим образом адаптировать напряжение возбуждения. В таблицах 1 и 2 приведен обзор двух различных настроек.

Таблица 1

Частота (Гц)	Напряжение возбуждения (В)	Поток (% от ф)	Коэффициент калибровки (мВ/А)
50	18,6	4	36,6
400	18,6	0,5	336,7

Измерение при одном и том же напряжении возбуждения для обеих частот

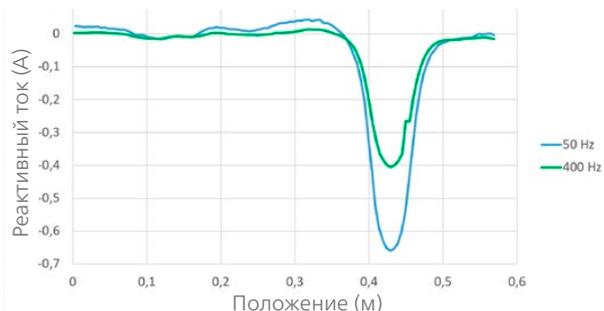
Таблица 2

Частота (Гц)	Напряжение возбуждения (В)	Поток (% от ф)	Коэффициент калибровки (мВ/А)
50	18,6	4	36,6
400	148,3	4	336,7

Измерение при одном и том же потоке для обеих частот

Если проводить измерения при потоке 0,5 % номинального и частоте 400 Гц, самый высокий пик при обнаружении дефекта будет иметь абсолютное значение амплитуды около 400 мА, в то время как для измерения с потоком 4 % и частотой 50 Гц этот пик достигнет около 650 мА (рис. 9). Хотя соответствующий показатель и заметно ниже, коэффициент при этом был меньше в 8(!) раз.

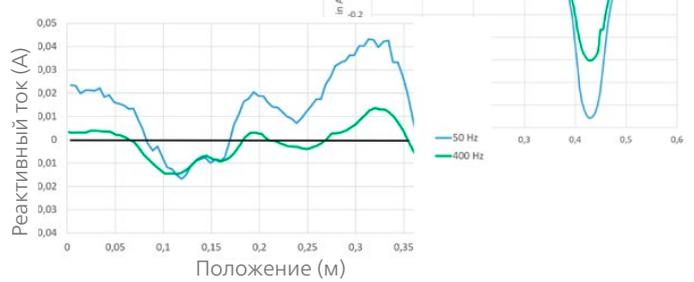
Рис. 9



Измерение при одинаковом напряжении возбуждения

Кроме того, если обратить внимание на «исправную» часть паза, мы увидим меньшие колебания относительно нулевой линии при измерении на частоте 400 Гц (рис. 10).

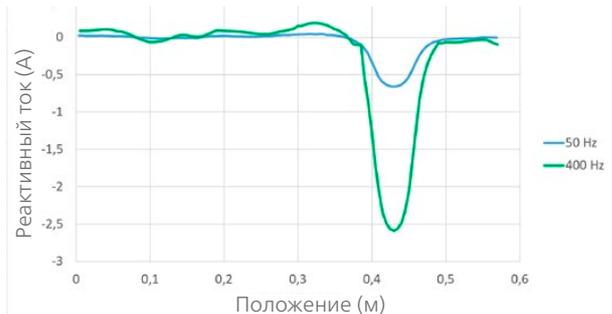
Рис. 10



Увеличенное изображение для части паза, не имеющей замыкания

По результатам первого эксперимента напрашивается предположение, что при сохранении одинакового потока для обеих частот картина полностью меняется, как показано на рис. 11. В этом случае амплитуда сигнала при измерении на частоте 400 Гц намного выше, чем амплитуда сигнала при измерении на частоте 50 Гц. Сравнивая это с измерением на рис. 10, обратите внимание на разное масштабирование по вертикальной оси.

Рис. 11



Измерение с одинаковым потоком; при сравнении с рис. 9 обратите внимание на разное масштабирование по вертикальной оси.

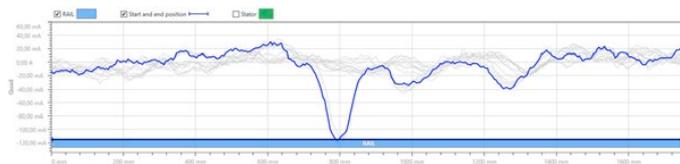
исследований в будущем. Хотя никаких ограничений не существует, измерение при более высоких частотах может давать некоторые преимущества. Поскольку измерение потока рассеяния также является сравнительным методом, при визуализации оказывается, что пики измерений в местах поврежденных более отчетливо видны на повышенных частотах.

## VI. ОБНАРУЖЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ГЛУБОКО В СЕРДЕЧНИКЕ СТАТОРА

Повреждения изоляции между пластинами можно обнаружить, даже если они расположены глубоко в сердечнике статора. Это продемонстрировано на. Абсолютного предела частот, отличающихся от номинальной, не существует, и это может стать предметом примера из практики, когда электродвигатель находился в ремонтной мастерской из-за однофазного замыкания на землю.

В этом случае защита сработала штатно и сразу же обеспечила отключение, поэтому повреждения машины из-за замыкания были сравнительно небольшими и не видимыми снаружи. Эндоскопическая проверка каждого вентиляционного канала позволила локализовать проблему. По результатам этого исследования стало известно, что неисправность находится на нижней стороне нижнего стержня. Руководитель проекта, ответственный за ремонт, хотел узнать, не поврежден ли сердечник статора и не нуждается ли он в ремонте. Кроме того, оператор убедился, что проблема в сердечнике статора существовала еще до проведения работ по техническому обслуживанию и что повреждение произошло не во время замены катушки.

Рис. 12



Результат измерения, выполненного на двигателе в условиях ремонтной мастерской, где отчетливо заметно место повреждения сердечника статора на расстоянии около 800 мм.

## VII. СРАВНЕНИЕ С ИЗМЕРЕНИЯМИ ПРИ КОЛЬЦЕВОМ ПОТОКЕ

Для заключения относительно сравнения результатов измерения потока рассеяния и реальной ситуации во время работы машины было проведено сравнительное измерение. Испытываемая машина была полностью обновлена, поэтому появилась возможность выявить дефекты и сравнить их с испытанием при полном потоке и данными термографической камеры.

На рис. 13 показано выявление дефектов на примере двух точек. Были опробованы разные способы обнаружения.

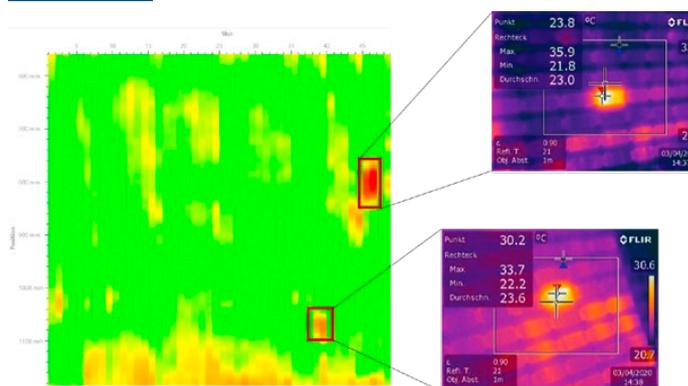
Рис. 13



Пример выявления дефекта и его закрашивание черной краской во избежание отражения во время термографического измерения.

В зависимости от методики выявления изменений во время испытания при полном потоке или измерения потока рассеяния не на всех пятнах фиксируется значительное повышение (например, температуры). Две модификации показали повышение температуры более чем на 10 °C, что считается критическим [1]. Эти точки также могут быть точно обнаружены с помощью измерения потока рассеяния, поскольку их амплитуда сигнала превышает 100 мА. Тепловая карта с результатами исследования всего статора, а также термографическая картина двух критических точек показаны на рис. 14. Остальные пятна показали меньшее повышение температуры по сравнению с окружающей средой. Они также выявлены при измерении потока рассеяния, однако в точках с повышенным потоком рассеяния сигнал был ниже предельного значения 100 мА.

Рис. 14



Тепловая карта измерения потока рассеяния, включая термографические снимки сравнительного измерения с полным потоком. Здесь также могут быть локализованы две точки с более заметным повышением температуры, которые при измерении потока рассеяния показали амплитуду сигнала, превышающую 100 мА.

## VIII. ВЫВОДЫ

Как показано в статье, измерение потока рассеяния с помощью установки CPC 100 — это надежный способ обнаружения слабых мест в изоляции между пластинами сердечника статора. Благодаря компактности оборудования и простоте настройки это решение является оптимальным для выполнения измерений на месте эксплуатации, а также в ремонтных мастерских. Кроме того, значительное удобство в использовании обеспечивается за счет полуавтоматического перемещения датчика и поддержки программного обеспечения PTM.

Была подтверждена возможность обнаружения неисправностей, находящихся глубоко в сердечнике статора. Более того, сравнение с измерениями при полном потоке показало аналогичные результаты.

## Литература

1. IEEE Std 56-2016 "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines," Annex D (informative), сентябрь 2016 г.
2. Cigre brochure 257, "EL CID (ELECTROMAGNETIC – CORE IMPERFECTION DETECTOR) TESTING OF LARGE STEAM-TURBINEDRIVEN GENERATORS", Working group A1.01.06, октябрь 2004 г.
3. [3] Bertenshaw, David Ronald: "STATOR CORE INTERLAMINATION FAULTS AND THEIR DETECTION BY ELECTROMAGNETIC MEANS". Manchester, 2014

## Авторы

**Фабиан Эттль (Fabian Öttl)** — менеджер по продукции компании OMICRON Technologies (Италия). На своей должности он отвечает за испытания вращающихся машин и диагностическое оборудование. До прихода в компанию OMICRON Фабиан работал в отделе исследований и разработок производителя больших генераторов в качестве специалиста по высоковольтной изоляции. В 2011 г. он получил степень магистра в Технологическом университете г. Грац.

Фабиан является автором многочисленных научных статей и технических документов, а также участником различных рабочих групп в рамках Cigre и IEC.

fabian.oettl@omicronenergy.com



OMICRON — ведущий мировой производитель высокотехнологичного испытательного и диагностического оборудования для предприятий электроэнергетической отрасли. Устройства OMICRON позволяют с высокой точностью оценивать состояние первичного и вторичного оборудования энергосистем. Компания также предоставляет услуги по вводу в эксплуатацию, тестированию и диагностике оборудования, консультированию и обучению персонала.

Клиенты из более чем 160 стран доверяют опыту компании OMICRON, используя высококачественное передовое оборудование нашего производства. Сервисные центры компании расположены по всему миру, что позволило нам создать обширную базу знаний и обеспечить всестороннюю поддержку клиентов. Благодаря всем этим преимуществам, а также развитой дистрибьюторской сети компания прочно занимает лидирующие позиции в области электроэнергетики.

Более подробную информацию, дополнительную литературу и контактные данные региональных офисов по всему миру вы можете найти на нашем веб-сайте.