



## Контроль сопротивления изоляции в цепях питания электроавтоматики: сети с изолированной нейтралью

С.И. Малафеев (ВлГУ), С.С. Малафеев (Владимирский политехнический колледж)

*Представлен анализ современных методов и средств контроля сопротивления изоляции в электрических цепях электропитания с изолированной нейтралью. Выполнен анализ нормативных документов, регламентирующих правила контроля сопротивления изоляции в различных условиях. Показаны особенности непрерывного измерения сопротивления изоляции в сетях с переменного и двойного рода тока. Приведены примеры новых технических решений, обеспечивающих повышение эффективности контроля сопротивления изоляции электрооборудования и систем электроавтоматики горных машин.*

*Ключевые слова:* автоматика, электрическая сеть, изолированная нейтраль, изоляция, контроль, электробезопасность.

### Введение

Надежность и электробезопасность — основные требования к системам электроснабжения в промышленности [1]. Для выполнения этих требований используются различные способы организации системы электропитания и устройства защиты при риске неисправности. Высокий уровень бесперебойности электроснабжения обеспечивается в электрических сетях с изолированной нейтралью (ИТ), то есть с изолированным от земли источником питания.

Системы ИТ распределения электроэнергии используются преимущественно в медицинских учреждениях, на транспорте, в химической, металлургической, добывающей и других отраслях промышленности. В рудничных сетях правилами безопасности предписывается выполнять электроснабжение подземных выработок только с изолированной нейтралью, замыкания на корпус в которых не вызывают искрения и электрической дуги (в связи с малым значением токов замыкания на землю). Электроустановка в сети с изолированной нейтралью остается безопасной для персонала и оборудования при первом нарушении изоляции одной фазы. Однако в этом случае сеть считается аварийной, и неисправность следует устранить в кратчайшее время. Для этого требуется постоянный контроль сопротивления изоляции [2].

Повреждение изоляции может происходить по разным причинам [3]. Это могут быть необратимые процессы деградации, термическое старение, влага, пыль, агрессивные химические вещества, тепловые воздействия, различные механические повреждения, например, связанные с вибрацией, грызунами и др., неосторожные действия персонала. В некоторых случаях изоляционные свойства материалов могут быть восстановлены, например, сушкой при попадании влаги. При необратимых нарушениях требуется ремонт электрооборудования. Во всех случаях условием эффектив-

ного и безопасного использования электроустановок является контроль состояния изоляции [2, 4].

Для сетей постоянного, переменного и двойного рода тока в настоящее время разработано и используется большое число разных приборов [4–7]. Ведущие фирмы: АВВ (Швейцария), Schneider Electric (Франция), Nakel (Чехия), Amprobe (США), Contrel elettronica (Италия), W. Bender GmbH (Германия), Merlin Gerin (Франция), «Завод шахтной автоматики» (г. Прокопьевск), Мегометр (г. Умань, Украина), «Астра-УЗО», Компания «Объединенная Энергия» (Москва) и др., выпускают широкую номенклатуру специализированных устройств. При этом большинство из них не отвечает требованиям ГОСТ 31612-2012 для условий добывающей промышленности по быстродействию и условиям эксплуатации. Поэтому актуальными вопросами являются выбор устройств и разработка новых технических решений.

Рассмотрим особенности контроля сопротивления изоляции в сетях с изолированной нейтралью, ориентированные на использование в горной промышленности, и разработки, выполненные в Компании «Объединенная Энергия».

### Система заземления ИТ питания средств электроавтоматики

При системе заземления ИТ нейтраль вторичной обмотки трансформатора не заземлена, а корпус нагрузки соединен с землей. При пробое изоляции одной фазы не возникает замкнутого контура для протекания тока через нейтраль трансформатора. В месте неисправности протекает очень малый ток при условии небольшой емкости кабеля. При этой неисправности сеть сохраняет работоспособность. Поэтому система ИТ эффективна для всех приложений, в которых внезапные отключения электропитания приводят к серьезным последствиям или ущербу. Сопротивление изоляции в сети с ИТ может контролироваться

в рабочем режиме и непрерывно регистрироваться. Это дает возможность планировать отключения оборудования и ремонтные работы. Благодаря малой величине токов замыкания на землю вероятность пожаров в сети с изолированной нейтралью значительно ниже, чем в сетях с другими типами заземления. Важным достоинством системы IT является также отсутствие случайных токов, имеющих место в системах заземления.

Вместе с тем система электроснабжения с изолированной нейтралью имеет и ряд недостатков.

1. Замыкание одной фазы на корпус не вызывает больших токов и изменение режима работы сети. Без специальных средств распознавания такого аварийного режима поврежденный участок может находиться в эксплуатации длительное время.

2. Увеличение напряжения исправных фазных проводников по отношению к потенциалу земли при дефекте изоляции одного проводника до линейного напряжения. Это создает повышенную опасность для персонала и электрооборудования. При повреждении изоляции одной из фаз напряжение неповрежденных фаз возрастает до линейного и в случае прикосновения человека к этой фазе его тело оказывается под линейным напряжением. Возросшее до линейного значения напряжение прикосновения при уменьшенном электрическом сопротивлении тела под воздействием внешних факторов может привести к большому току, протекающему через тело, и смертельному исходу. Поэтому изоляция всех электроустановок должна быть рассчитана на линейное напряжение, а неисправность быстро устранена. Увеличение напряжения можно избежать при включении вторичных обмоток питающего трансформатора в треугольник.

3. Токи утечки определяются как активным сопротивлением изоляции, так и емкостью проводов. При большой длине питающих линий сети с IT имеют большую емкость. Поэтому в сетях высокого напряжения ( $> 1000$  В) и в протяженных кабельных низковольтных сетях даже при условии хорошей изоляции прикосновение человека к токопроводящей поверхности может привести к смертельному исходу. При проектировании систем электроснабжения рекомендуется делить очень большие IT-системы на отдельные гальванически развязанные подсистемы.

4. Снижается срок службы изоляции из-за постепенного накопления дефектов в местах однофазного замыкания на землю.

Применение специальных устройств защиты, контролирующих изоляцию сети в автоматическом режиме, регламентировано стандартами и другими нормативными документами, в том числе:

— МЭК 61557-9. Сети электрические распределительные низковольтные до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока. Безопасность. Оборудование для испытания, измерения или контроля защитных средств. Часть 9. Оборудование для определения места пробоя изоляции в системах заземления IT;

— МЭК 61557-8. Устройства контроля сопротивления изоляции для систем заземления типа IT;

— МЭК 60364-7-10. Требования к специальным электроустановкам. Электроустановки медицинских помещений;

— МЭК 60364-4-41. Электроустановки зданий;

— ГОСТ 12.4.155-85. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования;

— ГОСТ 31612-2012. Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия;

— Нормы безопасности на электроустановки угольных разрезов и требования по их безопасной эксплуатации. РД 05-334-99.

В указанных документах регламентированы требования к устройствам контроля и защиты, в том числе значения сопротивления изоляции, вызывающие срабатывание защиты, и время отключения при аварии для сетей различного рода тока и напряжений. Для горных предприятий сопротивление срабатывания защиты от токов утечки в сетях, имеющих электрическую связь между сетью переменного и выпрямленного тока, должно быть:

1) при напряжении питающей сети 380 В:  
на стороне сети переменного тока — 10 кОм на фазу;

на стороне сети выпрямленного тока — 11 кОм на полюс;

2) при напряжении питающей сети 660 В:  
на стороне сети переменного тока — 30 кОм на фазу;

на стороне сети выпрямленного тока — 18 кОм на полюс;

3) при напряжении питающей сети 1140 В:  
на стороне сети переменного тока — 60 кОм на фазу;

на стороне сети выпрямленного тока — 32 кОм на полюс.

В указанных сетях с отключением без выдержки времени собственное время срабатывания защиты от токов утечки при сопротивлении однофазной утечки 1 кОм в сетях переменного тока должно быть  $\leq 0,1$  с при напряжении до 660 В и  $\leq 0,07$  с при напряжении 1140 В.

Общее время срабатывания аппаратов защиты от токов утечки и коммутационного аппарата, отключающего сеть, не должно превышать:

— для сети переменного тока с напряжением до 660 В, в том числе с тиристорными преобразователями — 0,2 с;

— для сети переменного тока с напряжением 660...1140 В, в том числе с тиристорными преобразователями — 0,12 с.

Согласно ГОСТ 31612-2012 устройства контроля сопротивления изоляции должны иметь измерительный ток  $\leq 10$  мА, срабатывать при токе однофазной утечки  $\leq 25$  мА с учетом измерительного тока и наи-

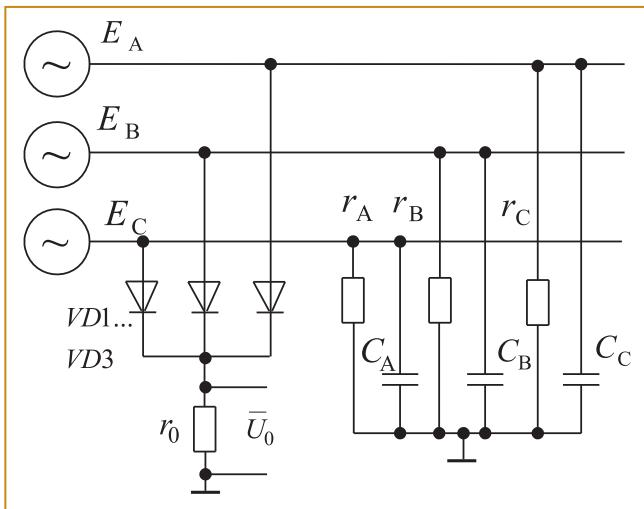


Рис. 1. Диодная схема измерения сопротивления изоляции сети:  $VD1, \dots, VD3$  – диоды;  $E_A, E_B, E_C$  – фазные напряжения;  $r_0$  – сопротивление измерительного резистора;  $r_A, r_B, r_C$  – сопротивления изоляции фаз сети;  $C_A, C_B, C_C$  – емкости фаз сети

больших емкости и напряжения сети и иметь напряжение источника измерительного тока не более напряжения контролируемой сети (предпочтительное значение измерительного напряжения 100 В).

Таким образом, в сетях электропитания с ИТ необходимо применение специальных защитных устройств, контролирующих изоляцию компонентов электрической системы и измеряющих токи утечки на землю, и при уменьшении сопротивления изоляции ниже требуемой, а также возрастания тока утечки выше установленной, отключающих поврежденный участок. При этом устройство должно запрещать включение поврежденного участка сети.

#### Способы и средства контроля сопротивления изоляции в сетях с заземлением ИТ

Практически все способы контроля сопротивления изоляции в сетях с ИТ основаны на создании в электрической цепи замкнутого контура с большим сопротивлением для протекания тока утечки при нарушении изоляции. Ток утечки в контуре регистрируется и обрабатывается измерительной системой. Контур может быть пассивным (без дополнительных источников питания) или активным с использованием специальных генераторов напряжения или тока.

Пассивные схемы с диодными выпрямителями, разработанные в 30-х гг. XX века в Германии В. Бендером, широко используются для контроля в цепях постоянного и переменного тока [4]. Их достоинства – простота, отсутствие постороннего источника, высокие быстродействие и точность, а также независимость результата измерения от емкостей сети. На рис. 1 показана упрощенная схема измерения сопротивления изоляции в трехфазной сети. Трехфазный нулевой выпрямитель через дополнительные резисторы подключен к контролируемой сети и шине

заземления. Сопротивление изоляции определяется по формуле [6]:

$$r_{\text{и}} = \left( \frac{\sqrt{2}(E_{AB} + E_{BC} + E_{CA})}{2\pi\bar{U}_0} - 1 \right) r_0,$$

где  $\bar{U}_0$  – среднее значение напряжения на измерительном резисторе,

$$\bar{U}_0 = \frac{\sqrt{2}(E_{AB} + E_{BC} + E_{CA})}{2\pi} \frac{r_0}{r_0 + r_{\text{и}}}$$

В работах [5–7] рассмотрены различные модификации диодных схем и примеры их применения в сетях постоянного и переменного тока. Однако эти технические решения имеют также недостатки, ограничивающие их использование. В частности, результат измерения зависит от линейного напряжения контролируемой сети [2, 4].

Схема с использованием тестового постоянного напряжения показана на рис. 2. Сопротивление изоляции вычисляется по формуле:

$$r_{\text{и}} = \frac{U}{\bar{U}_0} r_0 - (r_0 + r_{\text{тз}}),$$

где  $r_{\text{тз}}$  – эквивалентное сопротивление источника тестового напряжения.

Метод, использующий постоянное тестовое напряжение, обеспечивает высокое быстродействие, но не пригоден для сетей двойного рода тока [2, 4].

При использовании гармонического тестового напряжения схема измерения аналогична схеме, изображенной на рис. 3, но в качестве источника тестового

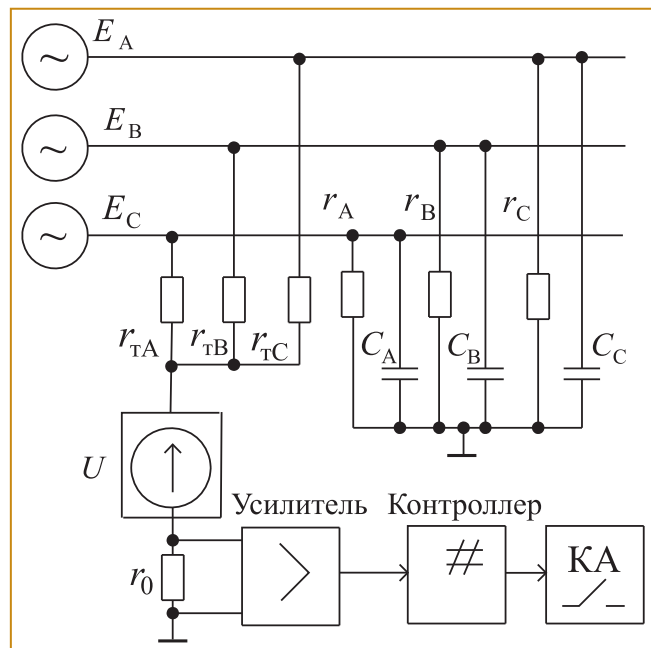


Рис. 2. Схема измерения сопротивления изоляции сети с тестовым постоянным напряжением:  $r_0$  – сопротивление измерительного резистора;  $r_{\text{тА}}, r_{\text{тВ}}, r_{\text{тС}}$  – дополнительные резисторы;  $КА$  – коммутационный аппарат

сигнала используется генератор переменного напряжения. Ток, протекающий в контуре измерения, содержит емкостную составляющую, величина которой зависит от емкости сети. Контроллер выделяет синфазную составляющую тока утечки и по ней вычисляет сопротивление изоляции. Чувствительность метода зависит от величины емкости сети и частоты измерительного напряжения, которая обычно ниже частоты сети. При большой емкости обеспечение точности измерения достигается уменьшением частоты тестового напряжения (до нескольких Гц). Минимальное время измерения при этом равно периоду тестового напряжения. Для оценивания активного сопротивления могут использоваться изменения частотной характеристики цепи, определяемые по нескольким гармоникам тока при тестовом напряжении в виде суммы гармоник напряжения [4].

Метод, использующий импульсное напряжение, обеспечивает высокую эффективность применительно к сетям постоянного, переменного и двойного рода тока [2, 4, 8]. Схема, иллюстрирующая этот метод, приведена на рис. 3, форма импульсного напряжения показана на рис. 4. Период измерительного напряжения  $T$  выбирается равным:

$$T \geq 2(T_0 + \tau),$$

где  $T_0$  — период напряжения контролируемой сети;  $\tau$  — время форсированного заряда емкости сети.

Устройство выполняет измерение тока утечки  $I_1$  в течение первого полупериода измерительного напряжения и тока утечки  $I_2$  в течение второго полупериода измерительного напряжения путем интегрирования падения напряжения на эталонном сопротивлении за период питающей сети  $T_0$  и вычисление сопротивления изоляции по формуле:

$$r_{и} = \frac{2U_2}{I_1 - I_2} - r_{тз}.$$

Контроллер выполняет сравнение полученного значения с тремя пороговыми значениями  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  и формирование сигналов предупреждения и для отключения сети при недопустимом снижении сопротивления изоляции.

Измерение токов  $I_1$  и  $I_2$  выполняется в установившемся режиме путем интегрирования падения напряжения на сопротивлении  $r_0$  за период питающего напряжения с целью снижения влияния на результаты измерения переменной составляющей, обусловленной протеканием через измерительный резистор  $r_0$  токов, вызванных напряжением питающей сети. Метод обеспечивает эффективный контроль сопротивления изоляции в цепях как переменного, так и двойного рода тока.

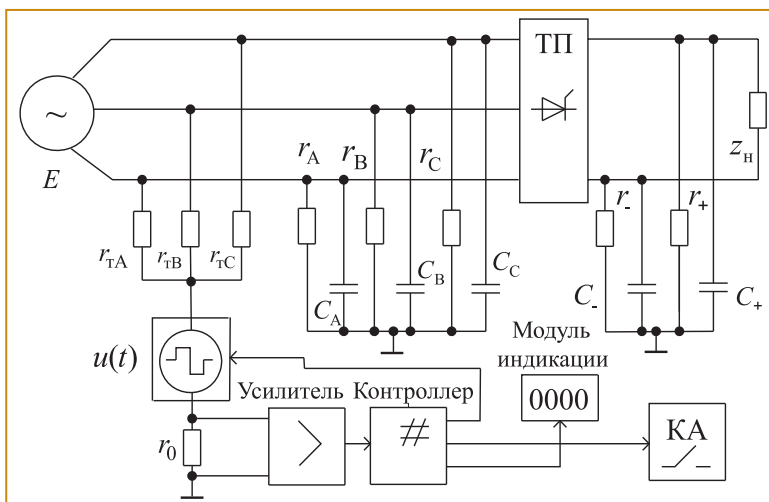


Рис. 3. Схема измерения сопротивления изоляции сети с тестовым импульсным напряжением:  $E$  — напряжение питающей сети;  $u(t)$  — напряжение источника тестового сигнала; ТП — тиристорный преобразователь;  $r_+$ ,  $r_-$ , — сопротивления изоляции шин постоянного тока соответственно с положительным и отрицательным потенциалами;  $C_+$ ,  $C_-$  — емкости шин постоянного тока

Рассмотренный метод контроля сопротивления изоляции реализовано в устройстве Аргус. Разработчик и изготовитель — Компания «Объединенная Энергия». Устройство предназначено для применения в электроустановках и системах автоматики горных предприятий и полностью отвечает всем требованиям нормативных документов.

#### Повышение надежности электроавтоматики на основе контроля сопротивления изоляции

Применение средств непрерывного контроля сопротивления изоляции сетей с ИТ обеспечивает качественное повышение надежности работы электрооборудования. К важным вопросам повышения эффективности контроля можно отнести следующие.

1. Интеграция устройств контроля в информационную систему автоматизированного комплекса. Пофидерный контроль сопротивления изоляции всех цепей электропитания, сбор и обработка данных позволяют определить повреждение на ранних стадиях развития неисправности и выявить и локализовать

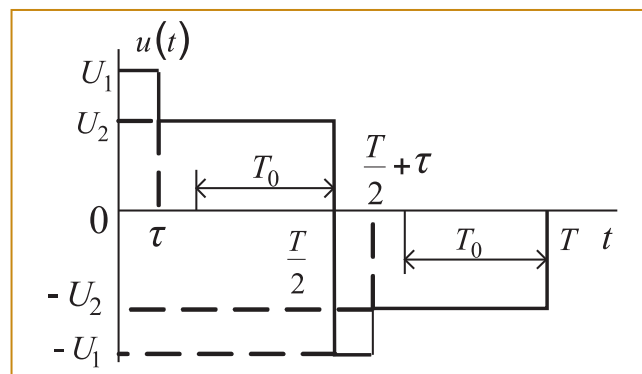


Рис. 4. Форма тестового импульсного напряжения

конкретное место нарушения изоляции. Расширенный контроль снижает риск ложных отключений.

2. Прогнозирование сопротивления изоляции в процессе работы. Современные устройства контроля имеют функцию хранения данных. Графическое отображение сопротивления в функции времени позволяет выявить медленные процессы деградации изоляции. Прогнозирование на основе автоматического анализа данных дает возможность предупреждения аварий.

Применение в алгоритмах измерения сопротивления изоляции, использующих гармонические и импульсные тестовые сигналы, прогнозных значений сопротивления, вычисляемых на текущем и последующем интервалах измерения, и повторение измерений в случае несовпадения измеренного и прогнозного значений, обеспечивает повышенные быстродействие измерений и надежность защиты. В работе [9] рассмотрен алгоритм, использующий математический аппарат нечеткой логики. Устройства контроля сопротивления изоляции с использованием прогнозов выпускаются фирмой АВВ.

3. Интеллектуальный анализ накопленных данных и определение причин нарушения изоляции. В работе [10] предложен алгоритм идентификации повреждающих факторов для изоляции электрических машин: влаги, масла и температуры с помощью нейронной сети, на основе анализа активного сопротивления, емкости и эквивалентного коэффициента диссипации.

4. Повышение надежности работы в цепях электроавтоматики с полупроводниковыми преобразователями сложной структуры.

5. Контроль и ограничение повреждающих изоляцию факторов в процессе работы.

#### Заключение

Эффективная и безопасная работа электроавтоматики в сетях с изолированной нейтралью обеспечивается при непрерывном контроле сопротивления изоляции. Современные средства on-line мониторинга обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок, снижение рисков аварий, позволяют на основе

данных о состоянии изоляции планировать отключения и ремонты. В сетях с транзисторными и тиристорными преобразователями и гальванической связью цепей постоянного и переменного тока адекватный контроль осуществляется приборами, реализующими метод тестового импульсного напряжения.

#### Список литературы

1. Малафеев С.И. Надежность электроснабжения. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 368 с.
2. Малафеев С.И., Серебренников Н.А., Фролкин В.Г. Анализ электрической сети с преобразователем рода тока при нарушении сопротивления изоляции // Электротехника. 2004. № 12. с. 11 - 14.
3. Huang Z. Modeling and Testing of Insulation Degradation due to Dynamic Thermal Loading of Electrical Machines. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. Lund University. Lund, 2017. 160 p.
4. Иванов Е.А., Галка В.Л., Малаян К.Р. Безопасность электроустановок и систем автоматизации. СПб., ЭЛМОП, 2003. 384 с.
5. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2014. 182 p. doi: 10.1007/978-3-642-29755-7.
6. Olszowiec P. Modifications of diode rectifier circuits for continuous insulation measurement in live AC IT networks. Electrical engineering & electromechanics, 2016, no. 2, pp. 43-46.
7. Малафеев С.И., Анучин А.В. Контроль сопротивления изоляции электрооборудования главных приводов карьерных экскаваторов // Горный журнал, 2017, № 10. — С. 45 - 47. Doi: 10.17580/gzh.2017.10.
8. Wang Q., Li Y., Qin J. The method for Cable Insulation On-line Monitoring in MV Distribution Network // 2018 International Conference on Power System Technology, 6-8 November 2018, Guangzhou, China, POWERCON2018 Paper NO. 201804270000574, pp. 3586 - 3591.
9. Малафеев С.И., Малафеев С.С., Серебренников Н.А. Применение прогнозирующей модели для непрерывного контроля сопротивления изоляции и защиты электрической сети // Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 57 - 60.
10. Guedes A.S., Silva S.M. Insulation Protection and Online Stress Agent Identification for Electric Machines using Artificial Intelligence // IET Electric Power Applications. Vol. 13, Issue 4, 2019, pp. 559 - 570.

**Малафеев Сергей Иванович** — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник ООО Компания «Объединенная Энергия», профессор Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,  
**Малафеев Сергей Сергеевич** — канд. техн. наук, преподаватель Владимирского политехнического колледжа.  
 Контактный телефон (495) 558-88-18.  
 E-mail: simalafeev@gmail.com

#### Анализатор износа инструмента всегда под рукой

Компания Sandvik Coromant выпустила приложение для анализа износа инструмента Tool Wear Inspection.

Приложение Tool Wear Inspection устанавливается на смартфон пользователя. Для анализа износа инструмента нужно сфотографировать поврежденные участки на режущем инструменте, просмотреть сохраненные изображения, сравнить их и найти схожие типы износа. Когда тип износа будет определен, программа выдаст точные рекомендации, чтобы избежать его при дальнейших операциях обработки.

Например, при выявлении проточин приложение выдаст список причин, по которым они могут возникать: вязкий и/или склонный к деформационному упрочнению материал заготовки, использование инструмента с углом в плане около 90° или использование слишком отрицательной геометрии.

С учетом выявленных причин приложение самостоятельно дает рекомендации, такие как подбор более острой режущей кромки, уменьшение угла в плане или изменение глубины резания. В числе прочих возможных рекомендаций - применение сплава с покрытием CVD (для повышения износостойкости) или PVD (для повышения стойкости к отслаиванию и адгезионному износу).

Новое приложение способствует снижению степени износа инструмента, увеличению стойкости и, как следствие, сокращению затрат. Кроме того, через это простое в использовании приложение пользователям открывается доступ к экспертным знаниям.

[Http://www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com)