

Оперативная диагностика и испытания электродвигателей переменного тока

Русов В.А., ООО Димрус

Электрические двигатели переменного тока различной мощности и рабочего напряжения являются базовыми в приводах промышленных установок. Трехфазные синхронные генераторы переменного тока являются базовыми для электрических станций различного типа. Поэтому оперативный контроль технического состояния всего парка электрических машин (ЭМ) переменного тока различного типа и назначения является важной задачей для персонала промышленных предприятий и электрических станций.

Все диагностические работы и испытания, выполняемые для определения текущего технического состояния ЭМ переменного тока и проведения достоверной оценки возможности их дальнейшей безаварийной эксплуатации, можно объединить в три группы:

- Испытания и диагностические работы, проводимые на неработающем оборудовании, которые обычно называются статическими. Такие работы проводятся на заводах-изготовителях ЭМ на завершающих этапах производства, на ремонтных предприятиях после выполнения всех работ и на месте эксплуатации перед вводом в работу или во время плановых и внеплановых остановов оборудования.
- Испытания и диагностические работы, проводимые на работающем оборудовании, которые называются динамическими испытаниями. В силу особенностей эксплуатации на работающей ЭМ возможно проведение ограниченного перечня диагностических работ. В основном это контроль параметров потребляемой из питающей сети энергии, а также вибрационные и температурные обследования.
- Специальные диагностические работы, целью которых является оценка соответствия параметров ЭМ технологическим требованиям приводного механизма. Чаще всего такие работы заключаются в исследовании пусковых процессов агрегата, а также в контроле и анализе переходных режимов работы ЭМ в составе конкретной промышленной установки в условиях реального технологического процесса.

Для проведения полного комплекса этих разноплановых диагностических работ используются несколько методов контроля и анализа, которые чаще всего реализованы в отдельных приборах как стационарного, так и переносного исполнения. По этой причине необходимый для диагностики ЭМ объем диагностического оборудования и его стоимость могут быть значительными.

Также следует отметить, что поскольку все необходимое диагностическое оборудование обычно всего производится различными фирмами, то практический диагност всегда имеет дело только с результатами контроля отдельных подсистем ЭМ. Формировать наиболее важное для эксплуатации полное диагностическое заключение о техническом состоянии ЭМ ему приходится «вручную», что на уровне тестового отчетного документа не всегда получается оперативно, корректно и достоверно.

Оптимальным решением приборного оснащения служб контроля технического состояния ЭМ переменного тока является использование комплексных приборов, в состав поставки которых входит набор измерительных средств и первичных датчиков, позволяющий проводить полный комплекс требуемых диагностических измерений и испытаний технического состояния ЭМ.

Программное обеспечение такого комплексного прибора должно включать в себя автоматизированную экспертную систему, позволяющую в рамках каждого диагностического метода определять состояние контролируемой подсистемы ЭМ. Финальным итогом работы экспертной системы является автоматизированное интегрирование локальных диагностических заключений о состоянии подсистем ЭМ в комплексное, описывающее интегральное состояние контролируемой ЭМ.

Примером такого комплексного оборудования для диагностики технического состояния ЭМ переменного тока является серия переносных приборов M-Tester, разработанных и производимых отечественной фирмой Димрус.

Серия состоит из трех приборов, предназначенных для диагностики дефектов, контроля технического состояния и испытаний асинхронных и синхронных ЭМ переменного тока (электродвигателей и генераторов) с различным рабочим напряжением:

- Прибор **M-Tester**, предназначен для диагностики и оценки технического состояния ЭМ с рабочим напряжением до 1 кВ.
- Прибор **M-Tester 20**, предназначенный для диагностики и оценки технического состояния ЭМ переменного тока с рабочим напряжением до 10 кВ.
- Прибор **M-Tester 40**, предназначенный для диагностики и оценки технического состояния высоковольтных генераторов и электродвигателей переменного тока с рабочим напряжением до 24 кВ.

Во всех трех приборах серии реализован одинаковый набор диагностических методов контроля технического состояния ЭМ переменного тока, все они имеют одинаковые измерительные цепи, микропроцессорную часть и внешние интерфейсы связи.

Основное различие между приборами серии заключается в величине выходного напряжения встроенного высоковольтного источника, соответственно и в параметрах используемых датчиков и высоковольтных соединительных кабелей. Именно по этой причине приборы имеют различные габаритные и весовые параметры.



Рис. 1. Переносные приборы серии M-Tester для комплексной диагностики электрических машин переменного тока с рабочим напряжением 0,1÷24 кВ.

Приборы серии M-Tester представляют собой переносные комплекты оборудования, предназначенные для оперативной оценки состояния электрических машин (ЭМ) переменного тока. В каждый комплект включены необходимые для работы встроенные в прибор источники испытательного напряжения и необходимые датчики.

При помощи технических и программных средств приборов M-Tester может производиться оперативная оценка текущего технического состояния различных подсистем (например, изоляционной, электромагнитной, электромеханической и т.д.) асинхронных и синхронных ЭМ переменного тока:

- Комплексная оценка технического состояния изоляции обмоток статора с использованием четырех различных взаимодополняющих диагностических методов.
- Контроль технического состояния и выявление различных дефектов в короткозамкнутой клетке ротора асинхронного электродвигателя.
- Определение фазной несимметрии электромагнитных параметров ротора и статора на основании расчета параметров схем замещения ЭМ.

- Определение технического состояния конструкции статора ЭМ и наличия дефектов в опорных подшипниках качения с использованием методов вибрационной диагностики.
- Возможность контролировать пусковые параметры ЭМ в реальных условиях в составе агрегата, включая приводной механизм.
- Измерение параметров потребляемой ЭМ мощности из питающей сети, контроль гармонического состава напряжений питающей сети.
- Возможность организации первичного мониторинга работы оборудования после его ввода в эксплуатацию или при работе ЭМ в условиях переменных технологических параметров приводного оборудования.

По итогам проведения испытаний локальных подсистем (всего при помощи приборов M-Tester типа можно провести до 18 различных испытаний) встроенной экспертной системой прибора автоматически может быть сформировано комплексное заключение о состоянии ЭМ с оценкой возможности ее дальнейшей эксплуатации.

Отличительной особенностью работы встроенной экспертной системы приборов марки M-Tester является возможность автоматического выявления изменения технического состояния ЭМ по итогам проведения двух комплексных испытаний. Практический эффект от использования этой аналитической функции возникает в двух случаях:

- При анализе изменения технического состояния ЭМ на временном интервале между двумя комплексными испытаниями при помощи прибора M-Tester.
- При оценке качества выполненного ремонта, проводимой сравнением результатов комплексных замеров, сделанных перед выводом ЭМ из эксплуатации и при включении ЭМ после проведенного ремонта.

Все реализованные в приборах M-Tester диагностические методы предназначены для использования в статическом, динамическом и переходном режимах работы контролируемой электрической машины.

Диагностические испытания ЭМ в статическом режиме



В статическом режиме, когда контролируемая ЭМ отключена от питающей сети, при помощи прибора серии M-Tester можно выполнить до девяти различных диагностических тестов и испытаний. Это:

- Измерение сопротивления изоляции обмотки статора при приложении повышенного постоянного напряжения от внутреннего источника DC.
- Контроль линейности величины сопротивления изоляции обмоток статора ЭМ при ступенчатом или линейном повышении напряжения внутреннего источника.
- Пороговая проверка технического состояния изоляции обмотки статора путем последовательного увеличения напряжения испытательного источника до уровня, когда

наступает пробой изоляции. Для обеспечения безопасности в этот момент источник автоматически отключается, и дополнительного разрушения изоляции не происходит.

- Контроль по параметрам токов абсорбции степени увлажнения и степени старения изоляции обмоток статора.
- Сравнительный анализ электромагнитных параметров фазных обмоток ЭМ, контролируемых при приложении к изоляции резонансного затухающего напряжения.
- Контроль разрядных процессов в изоляции при приложении колебательного затухающего напряжения. Особенно это важно для диагностики высоковольтных ЭМ (проводимой при помощи приборов марки M-Tester 20 и M-Tester 40), в которых возможно возникновение частичных разрядов в изоляции обмотки статора ЭМ.
- Определение активного сопротивления обмоток фаз статора постоянному току с использованием стандартного метода амперметра-вольтметра. Для проведения этого теста при помощи прибора M-Tester разборки трехфазной обмотки статора на отдельные фазы не требуется.
- Анализ параметров схем замещения Z_k фазных обмоток статора электрической машины, определенных в опыте короткого замыкания (без ротора и с ротором). Тест может быть дополнен измерениями при разных частотах испытательного напряжения.
- Выявление электромагнитной асимметрии в роторе. В этом тесте параметры Z_k фазных обмоток статора ЭМ определяются совместно с ротором, который последовательно поворачивается на фиксированный угол.

Полный набор всех статических испытаний может быть выполнен при помощи приборов марки M-Tester на заводах по производству ЭМ или на ремонтных предприятиях. В эксплуатационных условиях такие измерения в электрических машинах делаются выборочно, так как для некоторых из них требуется отсоединение ЭМ от приводного механизма и иногда даже выемка ротора из статора.

Для проведения всего набора статических испытаний ЭМ используются два комплекта универсальных соединительных сигнальных кабелей, входящих в состав поставки всех приборов марки M-Tester.

Испытания ЭМ переменного тока в динамическом режиме

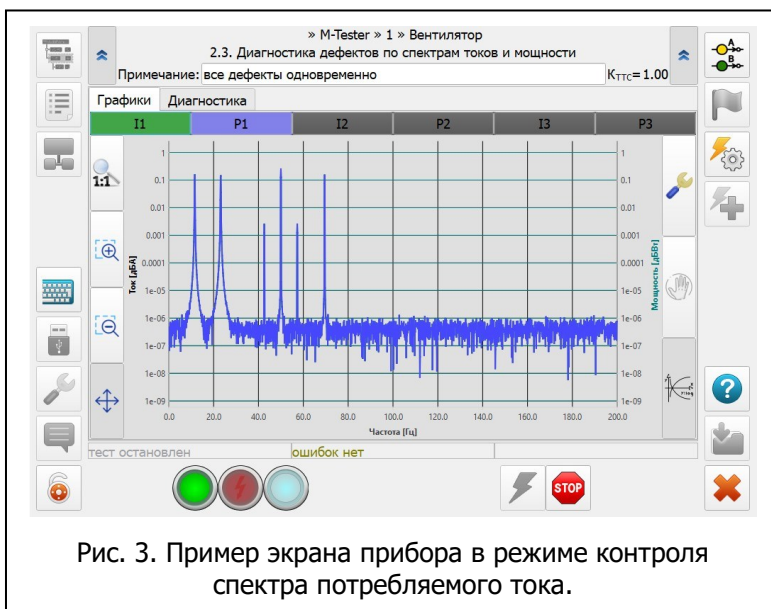


Рис. 3. Пример экрана прибора в режиме контроля спектра потребляемого тока.

При помощи технических средств переносных приборов марки M-Tester в режиме онлайн, на находящейся в работе ЭМ могут быть выполнены шесть диагностических испытаний:

- Анализ спектров потребляемой из сети мощности, выполняемый на основании зарегистрированных фазных токов и напряжений.
- Контроль высокочастотных гармоник в питающей сети и в потребляемой мощности. Оценка влияния контролируемой ЭМ на высшие гармоники в питающей сети.
- Контроль наличия электромагнитной асимметрии

статора и ротора ЭМ по спектру потребляемой мощности.

- Контроль дефектов в короткозамкнутой клетке ротора электродвигателя по характерным гармоникам на «частоте скольжения», выявленным в спектре потребляемых тока и мощности.
- Контроль вибрационных параметров статора ЭМ, проведение дополнительной диагностики электромеханических дефектов статора.

- Оценка технического состояния опорных подшипников качения ЭМ (и приводного механизма) по вибрационным параметрам.

Динамические испытания ЭМ при помощи приборов серии M-Tester производятся на работающем оборудовании и обычно не требуют проведения значительных подготовительных операций.

Проводимые при помощи приборов серии M-Tester измерительные тесты и испытания в динамическом режиме работы ЭМ подразделяются на две функционально разные группы:

- Контроль и анализ потребляемых электродвигателем из питающей сети токов и мощностей. Для проведения этого анализа необходимо проведение синхронной регистрации трех фазных токов при помощи измерительных клещей, входящих в состав поставки прибора, и трех фазных напряжений, измеряемых с использованием делителей напряжения или дополнительных измерительных трансформаторов напряжения.
- Контроль вибрационных параметров ротора и статора электродвигателя в рабочих режимах. Измерение вибрационных параметров статора проводится на его поверхности, а вибрация опорных подшипников измеряется в зоне подшипниковых узлов. Все вибрационные измерения производятся при помощи входящего в состав поставки приборов M-Tester компактного переносного виброметра марки ViPin.

Результаты диагностики ЭМ в динамических режимах (онлайн) максимально значимы для организации эффективной эксплуатации, так как могут быть проведены в реальных эксплуатационных условиях и с учетом параметров приводных механизмов.

Анализ пусковых и переходных режимов ЭМ

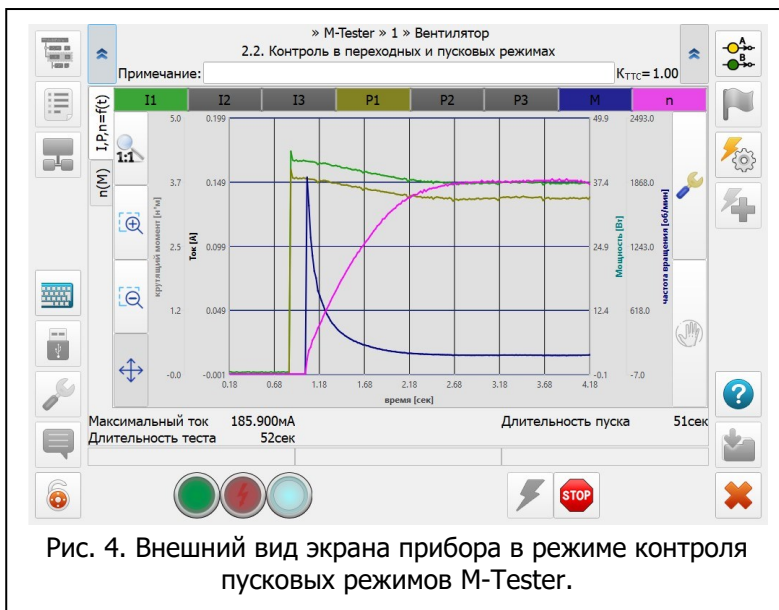


Рис. 4. Внешний вид экрана прибора в режиме контроля пусковых режимов M-Tester.

Для некоторых ЭМ переменного тока, особенно работающих в составе сложных технологических установок, критически важным является анализ их работы в переходных режимах работы. В основном это касается пусковых режимов ЭМ и так называемых нестационарных режимов работы.

Нестационарные режимы работы ЭМ обычно возникают в результате различного рода воздействий персонала на агрегат или изменений технологических параметров, выполняемых в автоматических режимах системой управления процессом.

Определенный процент нестационарных режимов работы ЭМ связан с возникновением непредвиденных и аномальных режимов работы оборудования.

При помощи переносных приборов серии M-Tester фирмы ДИМУС можно проводить исследования работы ЭМ в следующих нестационарных режимах работы:

- Контроль пусковых режимов ЭМ, проводимый с регистрацией токов и напряжений питающей сети, скорости вращения ротора и с определением расчетного момента на валу электродвигателя.
- Анализ переходных режимов работы ЭМ с возможностью анализа технологических особенностей регулирования нагрузки.
- Возможно использование M-Tester в качестве переносного регистратора параметров переходных режимов ЭМ в моменты изменения условий эксплуатации. Такой режим работы прибора (режим магнитофона) позволяет в ждущем (автоматическом) режиме регистрировать и анализировать возникновение переходных процессов работы ЭМ.

Исследования ЭМ в составе единого агрегата с приводным механизмом выполняются достаточно редко. Причиной этого является нестандартность целевой функции проведения таких работ, и, как следствие, сложность подготовки к испытаниям.

В тестах, когда предполагается анализировать переходные процессы, приборы марки M-Tester являются только инструментом, позволяющим проводить такие исследования. Программа проведения исследований и анализ получаемых результатов определяется самим диагностом исходя из существующей эксплуатационной проблемы.

Диагностические заключения о техническом состоянии подсистем, формирование комплексного заключения о состоянии ЭМ

1. По итогам проведения каждого теста или испытания встроенная в прибор диагностическая программа производит оценку технического состояния контролируемой подсистемы ЭМ на основании параметрического и экспертного анализов полученной от датчиков первичной информации.

Для удобства работы с экспертной системой пользователь при предварительной настройке конфигурации проведения каждого теста видит на экране прибора пороговые значения первичных и расчетных параметров, при помощи которых производится оценка технического состояния ЭМ.

Эти пороговые значения параметров предлагаются «по умолчанию» на основании имеющихся нормирующих документов или же на основании собственных наработок разработчиков прибора M-Tester. При необходимости каждый пользователь, имеющий практический опыт и свои наработки для контролируемого типа оборудования, может самостоятельно изменить пороговые значения параметров.

Итогом работы программы экспертной оценки технического состояния контролируемой подсистемы ЭМ является тестовый отчет, автоматически формируемый встроенной в прибор экспертной системой. При необходимости подготовленный пользователь прибора M-Tester, имеющий большой практический опыт, может корректировать содержание отчета перед его печатью на стандартном принтере.

2. По итогам проведения комплекса тестов, определяющих техническое состояние отдельных подсистем ЭМ, в программном обеспечении прибора может быть сформировано итоговое заключение о техническом состоянии всей ЭМ.

Для этого пользователь должен выбрать из базы данных замеров, хранящихся в памяти прибора набора замеров подсистем ЭМ, по одному для каждого практически реализованного диагностического метода в данном комплексном испытании ЭМ. Количество выбранных замеров может быть любым, от 2 до 15.

Далее экспертная система сначала определяет техническое состояние каждой подсистемы по алгоритму, описанному выше в пункте 1.

Получив диагностические заключения по каждому методу, программа начинает формировать итоговое заключение о техническом состоянии всей ЭМ. При этом используются два важных экспертных правила: каждая подсистема имеет свой весовой коэффициент влияния на итоговое состояние; величина этого весового коэффициента не постоянна и зависит от технического состояния подсистемы: чем хуже ее состояние, тем выше весовой коэффициент этой подсистемы.

По итогам проведения всех экспертных расчетов системой формируется текстовое заключение о техническом состоянии ЭМ, которое может быть полным или кратким, по выбору пользователя. Как и предыдущие частные заключения, итоговое заключение о состоянии ЭМ также может корректироваться пользователем.

3. Верхним уровнем оценки технического состояния ЭМ является экспертное (автоматическое программное) выявление изменений технического состояния за какой-либо период эксплуатации или при проведении ремонтных работ.

В приборе M-Tester это производится следующим образом: стандартно определяются итоговые технические состояния ЭМ в два момента времени (как это указано выше в пункте

2), которые затем сравниваются между собой экспертной системой. Полученные различия технического состояния (как отдельных подсистем, так и на итоговом уровне), отражаются в текстовом отчете, формируемом экспертной программой прибора.

Конструктивные особенности и состав поставки приборов M-Tester

Все испытания ЭМ в статическом режиме приборами M-Tester производятся с использованием двух встроенных в прибор многофункциональных источников напряжения:

- Регулируемый высоковольтный источник постоянного тока с выходным напряжением, соответствующим марке прибора (4, 20 или 40 кВ). С помощью этого источника определяется сопротивление изоляции обмоток статора и проводится измерение абсорбционных параметров.
- Однофазный источник переменного тока с регулируемой амплитудой выходного напряжения (до 15 В) и частотой (0-600 Гц). При помощи этого универсального источника проводятся измерения активного сопротивления фазных обмоток и определение параметров схем замещения обмоток фаз статора при изменении частоты питающего напряжения.

Все комплекты технического оборудования переносных приборов серии M-Tester поставляются Заказчикам в двух (M-Tester) или трех (M-Tester 20 и M-Tester 40) транспортных пластиковых кейсах.

В кейсе с прибором располагаются:

- Встроенный в прибор миникомпьютер, предназначенный для регистрации, обработки и хранения информации с цветным активным экраном размером 10" для отображения информации и управления всеми функциями прибора M-Tester.
- Два встроенных источника напряжения: регулируемый высоковольтный источник постоянного тока и источник переменного тока с регулируемой амплитудой выходного напряжения и частотой.
- Требуемые для обработки сигналов усилители и преобразователи входных сигналов, необходимые для проведения корректных измерений.



Рис. 5. Кейс с датчиками, проводами и дополнительными принадлежностями.

Все необходимые для работы приборов M-Tester дополнительные принадлежности поставляются во втором транспортном кейсе, внешний вид которого приведен на рисунке 5.

Здесь находятся токовые клещи, пирометр, угломер, лазерный отметчик фазы и переносной виброметр марки ViPin, при помощи которого контролируется техническое состояние опорных подшипников качения ЭМ.

Также этот кейс используется для хранения соединительных низковольтных проводов, используемых при проведении измерений параметров ЭМ.

Этот кейс является универсальным, он подходит для использования со всеми приборами серии M-Tester.

Третий транспортный кейс предназначается для хранения и перевозки

высоковольтных кабелей, используемых в приборах M-Tester 20 и M-Tester 40.

В конце 2025 года были успешно завершены метрологические испытания всех приборов серии M-Tester с целью утверждения типа средств измерения. Получение необходимого сертификата ожидается в первом квартале 2026 года.

Основные технические параметры приборов серии M-Tester

Параметр	M-Tester	M-Tester 20	M-Tester 40
Выходное напряжение источника DC, кВ	4	20	40
Выходной ток источника DC, mA	10	10	8
Выходное напряжение источника AC, В	15	15	15
Выходной ток источника AC, А	5	5	5
Выходная частота источника AC, Гц	0...1000	0...1000	0...1000
Температура эксплуатации прибора, град	0...+50	0...+50	0...+50
Размеры прибора M-Tester в кейсе, мм	420*340*220	728*510*350	680*670*370
Масса прибора M-Tester, кг	6	20	32
Размеры кейса с принадлежностями, мм	560*330*210	560*330*210	560*330*210
Масса кейса с принадлежностями, кг	9,0	9,0	9,0

Стандартный комплект поставки датчиков и принадлежностей M-Tester

Наименование позиции в поставке	M-Tester	M-Tester 20	M-Tester 40
Прибор M-Tester в транспортном кейсе	1	1	1
Кабель для подключения питания к прибору	1	1	1
Кабель высоковольтный для контроля изоляции, 6 м	4	3	1
Токоизмерительные клещи Кельвина с кабелем 3 м	3	3	3
Пирометр для измерения температуры статора ЭМ	1	1	1
Коробка К-3/ТТ для подключения токовых клещей и отметчика частоты вращения ротора	1	1	1
Клещи токоизмерительные	3	3	3
Переносный виброметр ViPin для контроля вибрации	1	1	1
Зарядный блок для переносного виброметра ViPin	1	1	1
Лазерный отметчик для контроля частоты вращения	1	1	1
Измеритель угла положения ротора	1	1	1
Транспортный кейс для датчиков и дополнительных принадлежностей	1	1	1
Транспортный кейс для высоковольтных кабелей	-	1	1