

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время асинхронные двигатели являются наиболее распространённым силовым элементом промышленного производства. Они часто работают в сложных эксплуатационных условиях, при низком качестве электроэнергии, в пыльных, влажных помещениях, в агрессивной среде, при резких колебаниях температуры. Несмотря на очень простую и надежную конструкцию, в асинхронных машинах могут произойти внезапные отказы, которые могут вызвать серьезные повреждения электрооборудования и привести к существенным денежным затратам из-за операций ремонта и простоя. В связи с этим задача повышения надежности работы асинхронных двигателей, теоретическое изучение, поиск новых методик и устройств по выявлению дефектов на первых этапах их развития являются актуальными.

В настоящее время в учебной литературе, в частности в лабораторных работах, вопросы, посвященные моделированию дефектов асинхронных машин в среде MATLAB/SIMULINK, рассмотрены недостаточно.

Основной целью пособия является помочь студентам в освоении принципов диагностирования дефектов асинхронных двигателей на основе компьютерного моделирования.

Пособие состоит из пяти глав. Первая глава посвящена описанию неисправностей асинхронных машин, их теоретическому анализу, а также содержит сведения, необходимые для визуального диагностирования их работы. Во второй главе приведены методы диагностирования асинхронных двигателей на основе годографов и спектров вектора Парка тока, а также мгновенной мощности. В третьей главе рассмотрена математическая модель двигателя, а также блоки библиотеки *SimPowerSystems*, необходимые для моделирования дефектов. В четвёртой главе описаны виртуальные лабораторные работы для моделирования дефектов асинхронных двигателей в среде MATLAB/SIMULINK.

# Глава 1

## АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ И ИХ НЕИСПРАВНОСТИ

### 1.1. Общие сведения

Асинхронная машина — это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна (а в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора. Асинхронные машины сегодня составляют большую часть электрических машин. В основном они используются как электродвигатели и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую.

Пуск и остановка таких двигателей при включении на напряжение сети осуществляются дистанционно при помощи магнитных пускателей [1]. Для того чтобы обеспечить вращение вала двигателя в обе стороны, часто используется схема с двумя пускателями (или с реверсивным пускателем) и тремя кнопками (рис. 1.1). Такая схема позволяет менять направление вращения вала двигателя «на ходу» без его предварительной остановки. В схеме (рис. 1.1) трехфазный автоматический выключатель *QF* предназначен для отключения схемы при коротком замыкании.

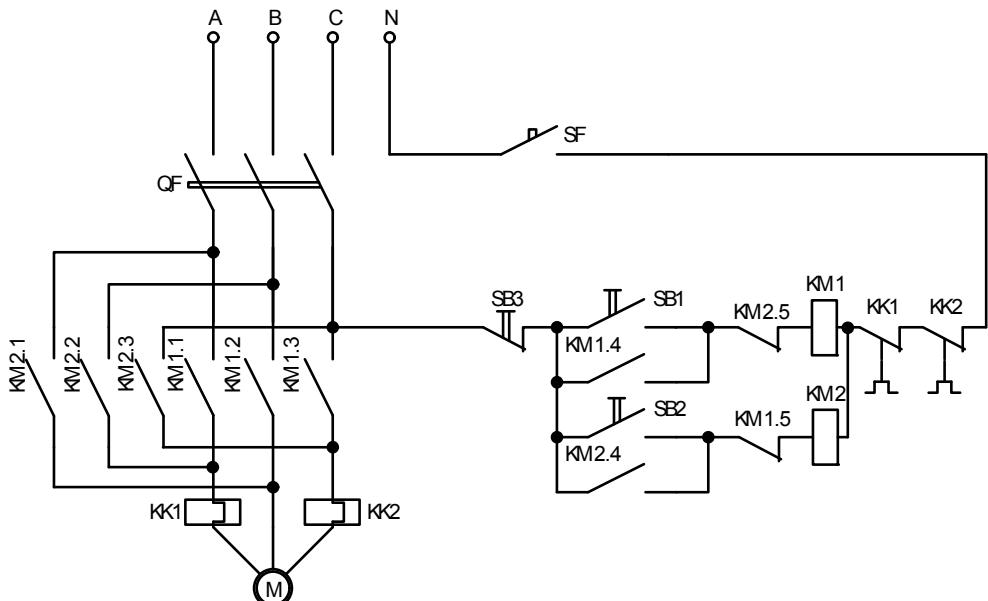


Рис. 1.1

Схема пуска двигателя с помощью реверсивного магнитного пускателя

Однофазный автоматический выключатель *SF* защищает цепи управления. Основным элементом магнитного пускателя является контактор (мощное реле для коммутации больших токов) *KM*. Его силовые контакты коммутируют три фазы, подходящие к электродвигателю. Контактор *KM1* и кнопка *SB1* с самоблокировкой предназначены для включения двигателя в режиме «вперед», а контактор *KM2* и кнопка *SB2* включают режим «назад». Для изменения направления вращения ротора трехфазного двигателя достаточно поменять местами любые две из трех фаз питающего напряжения, что и обеспечивается основными контактами контакторов. Кнопка *SB3* предназначена для остановки двигателя, контакты *KM1.5* и *KM2.5* осуществляют взаимоблокировку, а тепловые биметаллические реле *KK1* и *KK2* — защиту при превышении тока.

Важным свойством магнитного пускателя является то, что при случайном пропадании напряжения в сети двигатель отключается, но восстановление напряжения в сети не приводит к самопроизвольному запуску двигателя, так как при отключении напряжения отпускает контактор *KM1* и для повторного включения необходимо нажать кнопку *SB1*. При неисправности установки, например при заклинивании и остановке ротора двигателя, ток, потребляемый двигателем, возрастает в несколько раз, что приводит к срабатыванию тепловых реле, размыканию контактов *KK1*, *KK2* и отключению установки. Возврат контактов *KK* в замкнутое состояние производится вручную после устранения неисправности.

При эксплуатации электродвигателей в них по разным причинам возникают неисправности, которые могут привести к перерывам в работе станков и других производственных механизмов [2].

Неисправности асинхронного двигателя бывают внешние и внутренние.

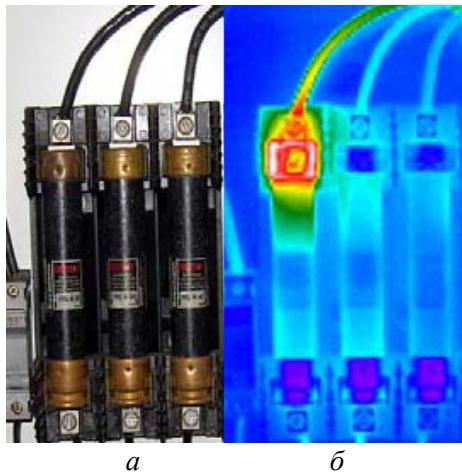
К *внешним неисправностям* относятся: обрыв одного или нескольких проводов, соединяющих асинхронный двигатель с сетью; неправильное подключение обмоток; перегорание плавкой вставки предохранителя; неисправности аппаратуры пуска или управления, пониженное или повышенное напряжение питающей сети; перегрузка асинхронного двигателя; плохая вентиляция (см. рис. 1.2).

*Внутренние неисправности* асинхронного двигателя могут быть механическими и электрическими. Механические повреждения — это нарушение работы подшипников; деформация или поломка вала ротора (якоря); разбалтывание пальцев щеткодержателей; образование глубоких выработок («дорожек») на поверхности контактных колец; ослабление крепления полюсов или сердечника статора к станине; обрыв или сползание проволочных бандажей роторов (якорей); трещины в подшипниковых щитах или в станине и др.

*Электрические повреждения* — это межвитковые замыкания; обрывы в обмотках; пробой изоляции на корпус; старение изоляции; распайка соединений обмотки; неправильная полярность полюсов; неправильные соединения в катушках и др. (рис. 1.2–1.3).



**Рис. 1.2**  
Межвитковое замыкание



**Рис. 1.3**

Дефект блока предохранителей  
в лобовых частях обмотки статора:  
а — блок предохранителей; б — снимок  
с тепловизира.

Как показано в работе [2], основными неисправностями асинхронных электродвигателей являются: перегрузка или перегрев статора электродвигателя (31% от всех дефектов); межвитковые замыкания (15%); повреждения подшипников (12%); повреждение обмоток статора или изоляции (11%); неравномерный воздушный зазор между статором и ротором (9%); работа электродвигателя на двух фазах (8%); обрыв или ослабление крепления стержней в беличьей клетке (5%); ослабление крепления обмоток статора (4%); дисбаланс ротора электродвигателя (3%) и несоосность валов (2%).

## 1.2. Описание неисправностей асинхронных машин

Рассмотрим описание некоторых неисправностей в электродвигателях, которые могут быть определены визуально, и возможные причины их возникновения.

### Двигатель при пуске не вращается или скорость его вращения ненормальная

Причинами указанной неисправности могут быть механические и электрические неполадки (дефекты). К электрическим неполадкам относятся: внутренние обрывы в обмотке статора или ротора, обрыв в питающей сети, нарушения нормальных соединений в пусковой аппаратуре [3]. При обрыве обмотки статора в ней не будет создаваться врачающееся магнитное поле, а при обрыве в двух фазах ротора в обмотке последнего не будет тока, взаимодействующего с вращающимся полем статора, и двигатель не сможет работать.

Если при обрыве в одной фазе сети или внутреннем обрыве в обмотке статора, соединенной звездой, произвести разворачивание электродвигателя от руки, то он будет работать толчками и ненормально гудеть.

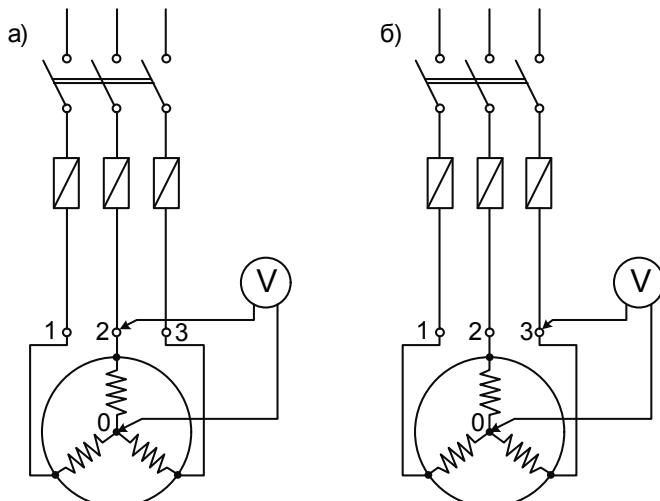
Если обрыв обмотки произошел во время работы, то двигатель может продолжать работать с номинальным вращающим моментом, но скорость вращения упадет, а ток увеличится настолько, что при отсутствии максимальной защиты может перегореть обмотка статора или ротора.

При обрыве одной фазы обмотки статора, соединенной в треугольник, двигатель начнет вращаться, так как его обмотки окажутся соединенными в открытый треугольник. При этом создается вращающееся магнитное поле, но ток в фазах будет неравномерным, а скорость вращения — ниже номинальной. Для этой неисправности ток в одной из фаз при номинальной нагрузке двигателя будет в 1,73 раза больше, чем в двух других. Когда у двигателя выведены все шесть концов его обмоток, то обрыв фазы определяют мегаомметром. Обмотку разъединяют и измеряют сопротивление каждой фазы.

В случае обрыва при соединении обмоток статора звездой признаком обрыва в цепи является отсутствие тока в питающих проводах. В случае обрыва в двух или трех фазах внешней цепи ротора величина тока во всех фазах статора (при его включении в сеть) примерно одинакова, а напряжения между кольцами фазного ротора, измеренные попарно при неподвижном роторе, будут также одинаковы. Следует учесть, что напряжение на кольцах разомкнутого ротора может оказаться опасным, и поэтому необходимо принять меры предосторожности.

Для выявления причины неисправности необходимо проверить целость предохранителей и проводки к статору и ротору электродвигателя, а также исправность включающей аппаратуры.

Наличие обрывов в цепи статора может быть определено при помощи вольтметра или мегомметра. При определении обрыва вольтметром производят включение двигателя в сеть и измеряют напряжение на зажимах статора. При доступной нулевой точке производят измерения фазных напряжений (рис. 1.4).



**Рис. 1.4**

Нахождение обрывов при помощи вольтметра:

*a* — в сети, *б* — в фазе обмоток статора.

В случае обрыва, например, в фазе 2 сети рисунка 1.4а напряжения между зажимами 1–0 и 3–0 будут одинаковы и равны половине линейного напряжения, а напряжение на зажимах 2–0 будет равно нулю.

При внутреннем обрыве в фазе обмотки статора, например, в фазе 2 рисунка 1.4б, напряжения между зажимами 1–0 и 3–0 по-прежнему будут равны половине линейного, а между зажимами 2–0 примерно 0,87 от линейного.

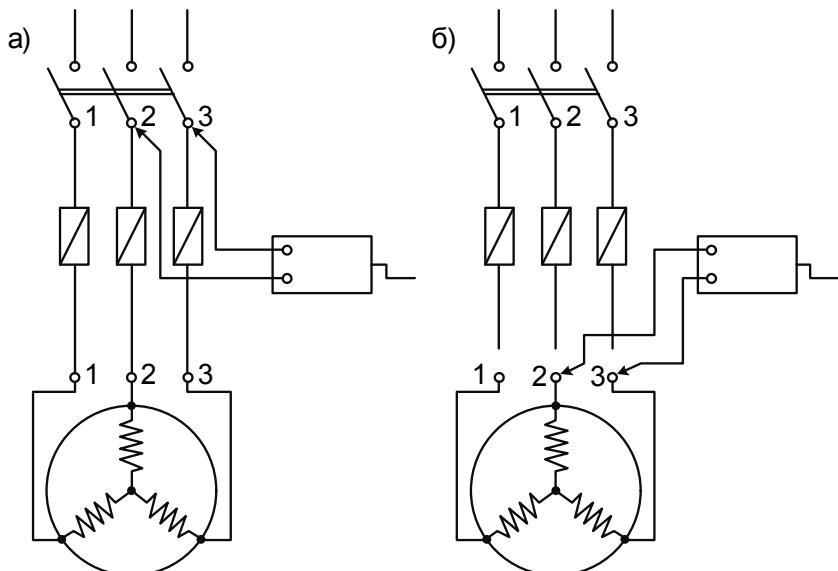
Если нулевая точка обмотки недоступна, то в случае обрыва в одной фазе сети, например в фазе 2 (рис. 1.4а), напряжение между зажимами окажется несимметричным: между зажимами 1–3 напряжение будет равно линейному, а между зажимами 1–2 или между зажимами 2–3 оно будет равно половине линейного.

Следует также учесть, что неодинаковое напряжение между зажимами статора может иметь место и при целости всей цепи статора, начиная от вторичной обмотки трансформатора, питающего электродвигатель, но при обрыве в одной фазе первичной обмотки трансформатора.

При внутреннем обрыве в одной фазе обмотки статора (рис. 1.4б) напряжения между зажимами 1–2, 1–3, 2–3 будут одинаковы и равны линейному напряжению сети.

Таким образом, путем измерения вольтметром напряжения на зажимах включенного статора при недоступности нулевой точки обмотки установить обрыв внутри обмотки не представляется возможным.

Для определения обрыва в цепи статора при помощи мегомметра двигатель отключают от сети и измеряют сопротивление попарно между зажимами 1, 2, 3 отключенного рубильника (рис. 1.5).



**Рис. 1.5**

Нахождение обрывов при помощи мегомметра:

*a* — в сети, *б* — в фазе обмоток статора.

В случае обрыва в фазе 2 (рис. 1.5а) измерение на зажимах 1–3 покажет нуль («земля»), т. е. целостность цепи, а измерение на зажимах 1–2, 2–3 покажет большую величину, т. е. мегомметр покажет величину сопротивления изоляции участка сети (включая и обмотки электродвигателя). Чтобы установить место обрыва в сети или внутри обмотки, отсоединяют провода от зажимов электродвигателя и производят мегомметром измерения попарно на зажимах 1, 2 и 3 статора. При внутреннем обрыве, например в фазе 2 (рис. 1.5б), измерение на зажимах 1–3 дает нуль, а на зажимах 1–2 и 2–3 — большую величину (сопротивление изоляции между обмотками).

### **Электродвигатель с фазным ротором не достигает необходимого числа оборотов**

Причиной неисправности является обрыв в одной из фаз ротора электродвигателя. Обрыв может быть внутри обмотки, в одном из проводов, соединяющих щетки с пусковым сопротивлением, а также в самом пусковом сопротивлении.

Если электродвигатель при наличии обрыва в одной фазе ротора развернуть до номинальной скорости, то он будет продолжать работать с этой скоростью. Однако при повышении нагрузки скорость вновь падает до половины номинальной.

Скорость вращения двигателя при полной нагрузке может быть ниже номинальной из-за пониженного напряжения сети, плохих контактов в обмотке ротора, а также из-за большого сопротивления в цепи ротора у двигателя с фазным ротором. При большом сопротивлении в цепи ротора возрастает скольжение двигателя и уменьшается скорость его вращения. Сопротивление в цепи ротора увеличивают: плохие контакты в щеточном устройстве ротора, в пусковом реостате, в соединениях обмотки с контактными кольцами, в местах пайки лобовых частей обмотки, а также недостаточное сечение кабелей и проводов между контактными кольцами и пусковым реостатом. Плохие контакты в обмотке ротора можно выявить, если на статор двигатель подать напряжение, равное 20–25% от номинального. Заторможенный ротор медленно поворачивают вручную и проверяют силу тока во всех трех фазах статора. Если ротор исправен, то при всех его положениях ток в обмотках статора одинаков, а при обрыве или плохом контакте будет изменяться в зависимости от положения ротора.

Плохие контакты в местах пайки лобовых частей обмотки фазного ротора определяют методом падения напряжения. Метод основан на увеличении падения напряжения в местах недоброкачественной пайки. При этом замеряют величины падения напряжения во всех местах соединений, после чего результаты измерений сравнивают. Пайки удовлетворительные, если падение напряжения в них превышает падение напряжения в пайках с минимальными показателями не более чем на 10%.

У роторов асинхронных двигателей с глубокими пазами может также происходить разрыв стержней из-за механических перенапряжений материала. Разрыв стержней в пазовой части короткозамкнутого ротора определяют следующим образом. Ротор выдвигают из статора и в зазор между ними забивают несколько деревянных клиньев, чтобы ротор не мог повернуться. К статору

подводят пониженное напряжение не более  $0,25U_{\text{ном}}$ . На каждый паз выступающей части ротора поочередно накладывают стальную пластину, которая должна перекрывать два зубца ротора. Если стержни целые, пластина будет притягиваться к ротору и дребезжать. При наличии разрыва притяжение и дребезжание пластины исчезают.

### **Короткое замыкание в обмотке двигателя**

При замыканиях в обмотках двигателя вращающее магнитное поле в короткозамкнутом контуре наводит ЭДС, и в этом контуре протекает большой ток, зависящий от сопротивления контура. Поврежденная обмотка может быть найдена по величине измеренного сопротивления. При этом сопротивление поврежденной фазы будет меньше, чем исправной. Сопротивление измеряют мостом или методом амперметра — вольтметра. Поврежденную фазу можно также определить методом измерения тока в фазе, если к двигателю подвести пониженное напряжение.

При соединении обмоток статора в звезду ток в поврежденной фазе будет больше, чем в других. Если обмотки соединены в треугольник, то линейные токи в двух проводах, к которым присоединена поврежденная фаза, будут больше, чем в третьем проводе. При определении указанного повреждения двигатель с короткозамкнутым ротором может быть заторможенным или вращаться, а в двигателе с фазным ротором обмотка ротора может быть разомкнута. Поврежденные катушки определяют по величине напряжения: напряжения на этих катушках будут меньше, чем на исправных.

### **Двигатель вращается при разомкнутой цепи фазного ротора**

Причина неисправности — короткое замыкание в обмотке ротора. При включении двигатель медленно вращается, а его обмотки сильно нагреваются, так как в замкнутых накоротко витках вращающимся полем статора наводится ток большой величины. Короткие замыкания возникают между хомутиками лобовых частей, а также между стержнями при пробое или ослаблении изоляции в обмотке ротора. Это повреждение определяют тщательным внешним осмотром и измерением сопротивления изоляции обмотки ротора. Если при осмотре не удается обнаружить повреждение, то его определяют по неравномерному нагреву обмотки ротора на ощупь, для чего ротор затормаживают, а к статору подводят пониженное напряжение.

### **Короткое замыкание в обмотке фазного ротора**

Причина этого дефекта — короткое замыкание в обмотке ротора.

Иногда электродвигатель с фазным ротором разворачивается и при исправной обмотке ротора от вращающего усилия, создаваемого за счет гистерезиса и вихревых токов, индуцируемых вращающимся полем в активной стали ротора. Происхождение их то же самое, что и токов в обмотке ротора. Поэтому от взаимодействия их с вращающимся полем статора получается некоторое усилие. Оно незначительно, так как вихревые токи в активной стали ротора, состоящей из отдельных листов, также незначительны. Однако они могут оказаться достаточными для того, чтобы заставить ротор электродвигателя вращаться на холостых оборотах. Вполне понятно, что если неисправность является следствием только указанной причины, то она не представляет никакой опасности.

Основными признаками, по которым может быть установлено наличие этой причины, являются: остановка двигателя при легком торможении и отсутствие каких-либо ненормальных явлений в электродвигателе при включении статора в сеть.

Если же причиной неисправности является короткое замыкание в обмотке ротора, то при пуске электродвигателя с нагрузкой он медленно разворачивается и обмотка фазного ротора сильно нагревается. Нагрев обмотки объясняется тем, что в замкнутых накоротко витках вращающимся полем статора наводится ток большой величины.

Короткие замыкания могут быть между хомутиками лобовых частей обмотки, между отдельными стержнями или фазами в случае пробоя изоляции или в случае заземления обмотки ротора в двух местах.

Чтобы установить, что причиной неисправности является короткое замыкание в обмотке, необходимо тщательно обследовать ротор и проверить, не каиваются ли друг друга соседние хомутики лобовых соединений, нет ли соединения между хомутиками от припоя, оставшегося после пайки обмотки, измерить сопротивление изоляции мегомметром.

Если внешний осмотр и измерение сопротивления изоляции не дают удовлетворительного результата, то наличие замыкания в обмотке может быть установлено по неравномерному нагреванию обмотки ротора, определяемому на ощупь при питании током обмотки статора и заторможенном роторе.

Ощупывание следует производить только при отключенном статоре, так как в роторе даже низковольтного электродвигателя может появиться высокое напряжение, опасное для жизни.

### **Равномерный нагрев всего двигателя выше допустимой температуры**

Равномерный нагрев всего двигателя выше допустимой нормы может произойти из-за длительной перегрузки и ухудшения условий охлаждения. Повышенный нагрев вызывает преждевременный износ изоляции обмоток.

Причины равномерного нагрева:

— напряжение на зажимах электродвигателя ниже номинального, поэтому при номинальной мощности электродвигатель перегружен током; для устранения нагрева необходимо повысить напряжение до номинального или уменьшить нагрузку до номинальной;

— обмотка статора соединена не звездой, а треугольником; чтобы устранить эту неисправность, нужно соединить обмотку статора звездой.

### **Местный нагрев обмотки статора**

Местный нагрев обмотки статора, который обычно сопровождается сильным гудением, уменьшением скорости вращения и крутящего момента двигателя, неравномерными токами в его фазах, а также запахом перегретой изоляции. Эта неисправность может возникнуть при неправильном соединении между собой катушек в одной из фаз, замыкании обмотки на корпус в двух местах, замыкании между двумя фазами, при коротком замыкании между витками в одной из фаз обмотки статора. Для устранения находят при помощи мегомметра или контрольной лампы место замыкания обмотки и ликвидируют его, в случае необходимости перематывают поврежденные катушки.

Если при сильном местном перегреве обмотки электродвигатель идет в ход при разомкнутой обмотке фазного ротора, а при пуске с нагрузкой медленно разворачивается, то причиной неисправности является короткое замыкание в обмотке фазного ротора.

### **Местный нагрев активной стали**

Местный нагрев активной стали магнитопровода статора происходит из-за выгорания и оплавления стали при коротких замыканиях в обмотке статора, а также при замыкании листов стали вследствие задевания ротора о статор во время работы двигателя или вследствие разрушения изоляции между отдельными листами стали. Признаками задевания ротора о статор являются дым, искры и запах гари; активная сталь в местах задевания приобретает вид полированной поверхности; появляется гудение, сопровождающееся вибрацией двигателя. Причины задевания — нарушение нормального зазора между ротором и статором. Зазор меняется из-за износа подшипников, неправильной их установки, вследствие большого изгиба вала, деформации стали статора или ротора. Одностороннее притяжение ротора к статору возникает из-за витковых замыканий в обмотке статора, сильной вибрации ротора и может быть определено измерительным щупом.

### **Ненормальный шум в двигателе**

Нормально работающий двигатель издает равномерное гудение, которое характерно для всех машин переменного тока. Возрастание гудения и появление в двигателе ненормальных шумов является следствием ослабления запрессовки активной стали, пакеты которой будут периодически сжиматься и ослабляться под действием магнитного потока. Для устранения дефекта необходимо перепрессовать пакеты стали. Сильное гудение и шумы в машине могут быть также результатом неравномерности зазора между ротором и статором.

### **Дефекты обмоток**

Повреждение изоляции обмоток может произойти от длительного перегрева двигателя, увлажнения и загрязнения обмоток, попадания на них металлической пыли, стружек, а также в результате естественного старения изоляции. Повреждение изоляции может вызвать замыкание между фазами и витками отдельных катушек обмоток, а также замыкание обмоток на корпус двигателя.

Увлажнение обмоток возникает при длительных перерывах в работе двигателя, при непосредственном попадании в него воды или пара в результате хранения двигателя в сыром и неотапливаемом помещении и т. д.

Загрязнение обмоток электродвигателя происходит от попадания загрязненного воздуха, а также угольной и металлической пыли внутрь электродвигателя, а у двигателей с фазным ротором дополнительно из-за чрезмерного износа щеток и контактных колец. Пыль в рабочих помещениях настолько мелкая и легкая, что осаждается не только на наружных частях обмотки, но и проникает внутрь машины. Эта пыль образует токопроводящие мостики, которые могут вызвать перекрытие или замыкание обмотки на корпус.

Агрессивная среда, содержащая охлаждающий воздух с кислотными или щелочными парами или газами, также постепенно разрушает изоляцию обмо-

ток. Поэтому при работе в таких условиях следует устанавливать только закрытые машины с химически стойкой изоляцией и проточной вентиляцией, с подводом чистого воздуха извне или с внешним обдувом.

Длительный перегрев машины приводит к тому, что изоляция обмоток становится хрупкой и гигроскопичной.

При этом электродинамические силы, развивающиеся при коротких замыканиях, а также перенапряжения, возникающие в питающей сети и при выключении обмоток возбуждения, могут вызвать перекрытие обмоток электрической дугой и пробой на корпус.

### **Естественный износ и старение изоляции**

Для увеличения срока службы изоляции рекомендуется вести тщательное наблюдение за ее состоянием и периодически измерять сопротивление изоляции обмоток по отношению к корпусу, а также между электрически не связанными обмотками с тем, чтобы в необходимых случаях можно было произвести мелкий профилактический ремонт изоляции или покрыть ее лаком.

Сопротивление изоляции обмоток двигателя при напряжении до 1000 В не нормируется. Изоляция считается удовлетворительной при сопротивлении 1000 Ом на 1 В номинального напряжения, но не менее 0,5 МОм при рабочей температуре обмоток.

### **Замыкание обмотки на корпус двигателя**

Такое замыкание обнаруживают мегомметром, а место замыкания — способом «прожигания» обмотки или методом питания ее постоянным током. Способ «прожигания» заключается в том, что один конец поврежденной фазы обмотки присоединяют к сети, а другой — к корпусу. При прохождении тока в месте замыкания обмотки на корпус образуется «прожог», появляются дым и запах горелой изоляции.

### **Двигатель не идет в ход**

Двигатель не идет в ход из-за перегорания предохранителей в обмотке якоря (рис. 1.3), обрыва обмотки сопротивления в пусковом реостате или нарушения контакта в подводящих проводах. Обрыв обмотки сопротивления в пусковом реостате обнаруживают контрольной лампой или мегомметром.

Ниже мы подробнее рассмотрим следующие электрические неисправности асинхронного двигателя:

- межфазное короткое замыкание в обмотке статора или в обмотке фазного ротора;
- обрывы обмоток статора или обмоток фазного ротора;
- несимметричность обмоток фазного ротора;
- короткие замыкания на землю обмоток статора.

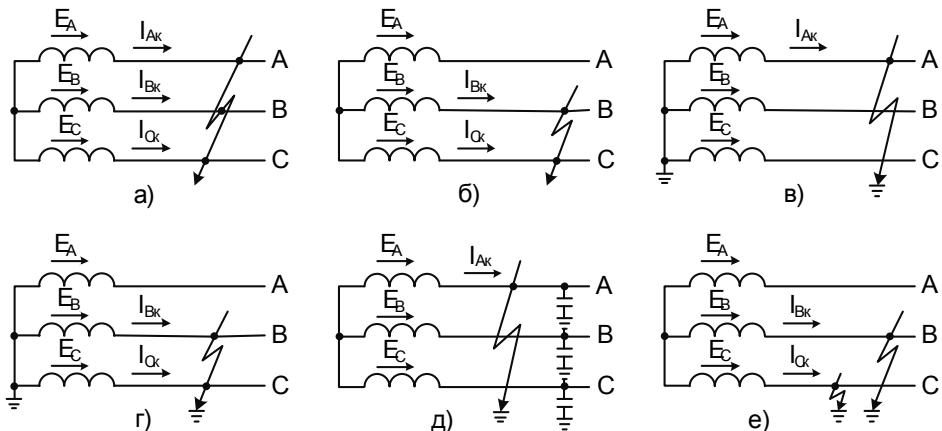
Эти неисправности возникают в результате следующих видов аварий:

- сетевые аварии (аварии по напряжению), связанные с авариями в электросети;
- токовые аварии, связанные с обрывом проводников в обмотках статора, ротора или кабеля, витков и фазными замыканиями обмоток, нарушением контактов и разрушением соединений;

- аварии, связанные со снижением сопротивления изоляции вследствие ее старения, разрушения и т. п.

### 1.3. Общие сведения о теоретическом анализе повреждений в электрических машинах

Большинство повреждений в электрических машинах приводят к коротким замыканиям (КЗ) между собой или на землю (рис. 1.6). В обмотках электрических машин и трансформаторов могут также возникать КЗ между витками одной фазы. Основными причинами повреждений являются: нарушения изоляции токоведущих частей, вызванные ее старением, перенапряжениями, механическими повреждениями; повреждения кабелей, а также ошибки персонала при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой или включение их на ошибочно оставленное заземление и др.). Основные виды повреждений приведены на рисунке 1.6. Возможны и более сложные случаи, представляющие сочетание некоторых из перечисленных случаев [4].



**Рис. 1.6**

Виды коротких замыканий в электрических установках:

а — трехфазное; б — двухфазное; в — однофазное; г — двухфазное КЗ на землю; д, е — короткие замыкания одной или двух фаз в сети с изолированной нейтралью.

При анализе режимов работы в результате КЗ необходимо рассматривать переходные сопротивления  $R_p$  в месте повреждения. В общем случае, их величины определяются сопротивлениями электрических дуг, посторонних предметов в месте повреждения и их заземлений, а также сопротивлениями между проводами фаз и землей (например, при замыкании фазы на землю).

При замыканиях между фазами переходные сопротивления часто определяются сопротивлениями дуг. Вольт-амперная характеристика дуги резко нелинейная. В течение каждого полупериода сопротивление дуги значительно изменяется; при этом форма тока в ней обычно остается близкой к синусоидальной, так как ток в основном определяется сопротивлениями элементов сис-

темы. Напряжение на дуге, в отличие от тока, сильно искажается. Наличие переходных сопротивлений  $R_{\Pi}$ , особенно при КЗ на землю на линиях, может существенно отражаться на работе защит и должно учитываться при их выполнении. В частности, это осуществляется при установлении для защит минимально допустимых коэффициентов чувствительности.

При коротких замыканиях на землю, в отличие от КЗ между фазами, определяющими обычно являются другие слагающие переходные сопротивлений. Согласно ПУЭ (правил установки электрооборудования), в случае КЗ на землю в электроустановках сопротивление их заземляющих устройств при глухоземленной нейтрали не должно превосходить 0,5 Ом.

### Короткие замыкания в одной точке

В общем случае КЗ в одной точке  $K$  трехфазной системы через переходные сопротивления  $R_{\Pi}$  неодинаковых значений может быть представлено схемой на рисунке 1.7.

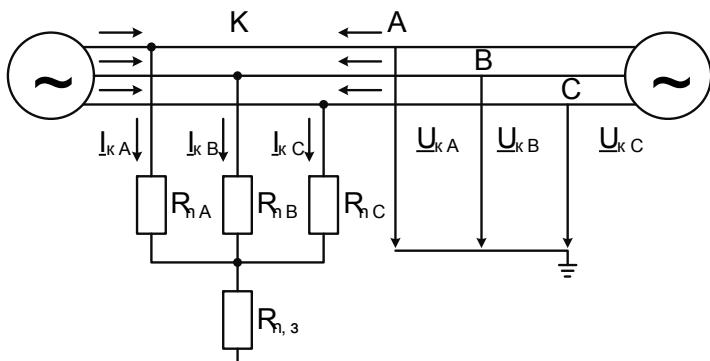


Рис. 1.7

Общий случай КЗ в одной точке через переходные сопротивления

Здесь и дальше за условные положительные направления токов КЗ принимаются направления токов в фазах линии к месту повреждения, в ответвлении токов КЗ — от фаз к земле, а фазных напряжений — также от фаз к земле [5].

Возникшее КЗ характеризуется уравнениями:

$$U_{kA} = R_{\Pi A} I_{kA} + 3 R_{\Pi 3} I_{k0},$$

$$U_{kB} = R_{\Pi B} I_{kB} + 3 R_{\Pi 3} I_{k0},$$

$$U_{kC} = R_{\Pi C} I_{kC} + 3 R_{\Pi 3} I_{k0}.$$

Фазные напряжения  $U_k$  в точке КЗ и токи  $I_k$ , проходящие через  $R_{\Pi}$ , могут быть выражены через симметричные составляющие. Обычно на практике пользуются упрощенными выражениями для напряжений, в которых, в зависимости от вида повреждения, отдельные сопротивления  $R_{\Pi}$  принимают равными нулю, бесконечности или равными между собой. Примеры типичных упрощенных представлений повреждений через  $R_{\Pi}$  приведены на рисунке 1.8. При этом появляется возможность учитывать фазные  $R_{\Pi}$  как симметричные элементы системы.

Короткие замыкания называются металлическими, если переходные сопротивления малы, т. е.  $R_{\Pi} = 0$ .

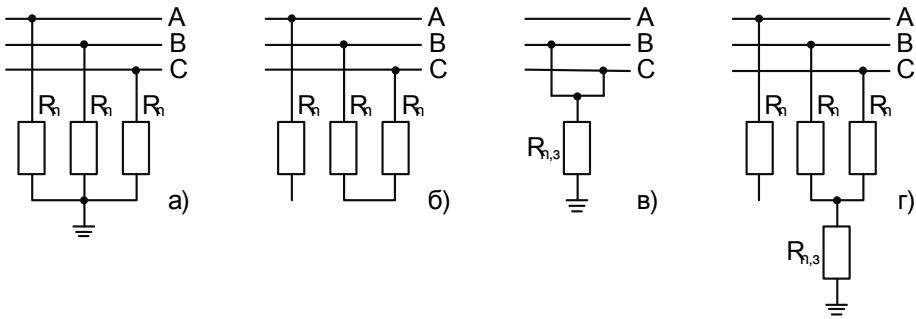


Рис. 1.8

Примеры упрощенного учета переходных сопротивлений в месте КЗ

При рассмотрении конкретных случаев КЗ необходимо учитывать наличие или отсутствие нейтрали. Различают глухозаземленную и изолированную нейтраль.

*Глухозаземлённая нейтраль* — это нейтраль трансформатора или генератора, присоединённая непосредственно к заземляющему устройству.

*Изолированная нейтраль* не присоединена к заземляющему устройству или присоединена к нему через большое сопротивление приборов сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных устройств.

Работа электрических машин может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор. От режима работы нейтралей зависят в значительной степени уровень изоляции электроустановок, выбор коммутационной аппаратуры, величины перенапряжений и способы их ограничения, величины токов однофазных коротких замыканий на землю (корпус), условия работы релейной защиты и т. п.

*Замыканием на землю* называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с конструктивными частями, не изолированными от земли, или непосредственно с землей.

*Замыканием на корпус* называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с их конструктивными частями, нормально не находящимися под напряжением.

При возникновении замыкания одной из фаз на землю земля получает потенциал поврежденной фазы, а между исправными фазами и землей будет линейное напряжение. Под действием этого линейного напряжения через место замыкания и через землю будут протекать токи утечки и емкостные токи двух исправных фаз. Ток замыкания на землю возрастает в 3 раза и имеет, как правило, емкостной характер  $I_c = 3I_{co}$ .

Если замыкание на землю неметаллическое, то в месте замыкания может возникать так называемая перемежающаяся дуга. Эта дуга периодически гаснет и загорается при токах  $I_c$  более 5–10 А. При этом могут возникать опасные для изоляции электрооборудования перенапряжения относительно земли, достигающие величины, равной (3–4)  $U_\phi$  сети, что может привести к пробою изоляции и возникновению 2-фазных коротких замыканий.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)