ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

СТБ МЭК 60034-4-2006

Машины электрические вращающиеся

Часть 4

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН

Машыны электрычныя, якія верцяцца

Частка 4

МЕТАДЫ ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНАГА ВЫЗНАЧЭННЯ ПАРАМЕТРАЎ СІНХРОННЫХ МАШЫН

(IEC 60034-4:1985, IDT)

Издание официальное

53 6-2006



Госстандарт

Минск

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.313.281(083.74)(476) МКС 29.160 КП 02 IDT

Ключевые слова: машины электрические, параметры синхронных машин, методы испытаний

ОКП 330000
ОКП РБ 31.10

Предисловие

Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».

1 ПОДГОТОВЛЕН научно-производственным республиканским унитарным предприятием «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации» (БелГИСС)

ВНЕСЕН Госстандартом Республики Беларусь

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 29 августа 2006 г. № 39

3 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту IEC 60034-4:1985 Rotating electrical machines. Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests (МЭК 60034-4:1985 «Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин».

Международный стандарт разработан подкомитетом МЭК 2G «Методы и процедуры испытаний» Комитета МЭК/ТК 2 «Вращающиеся машины».

Перевод с английского языка (en).

Официальный экземпляр международного стандарта, на основе которого подготовлен настоящий государственный стандарт, имеется в БелГИСС.

Степень соответствия – идентичная (IDT)

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Настоящий стандарт не может быть тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Госстандарта Республики Беларусь

Издан на русском языке

Содержание

Раздел 1. Область распространения и цель....1
1 Область распространения....1
2 Цель....1
Раздел 2. Общие положения....1
3 Общие положения....1
Раздел 3. Термины и методы определения их значений....3
Раздел 4. Описание методов испытаний и определение параметров машин с помощью этих методов....6
Приложение А Нестандартизованные методы испытаний для определения параметров синхронных машин при испытаниях....35

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Машины электрические вращающиеся
Часть 4
МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН

Машыны электрычныя, якія верцяцца
Частка 4
МЕТАДЫ ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНАГА ВЫЗНАЧЭННЯ ПАРАМЕТРАЎ СІНХРОННЫХ МАШЫН

Rotating electrical machines
Part 4
Methods for determining synchronous machine quantities from tests

Дата введения 2007-03-01

Раздел 1. Область распространения и цель

1 Область распространения

Настоящий стандарт распространяется на трехфазные синхронные машины мощностью от 1 кВ · А и выше при частоте переменного тока от 15 до 400 Гц.

Стандарт не распространяется на специальные машины, такие как машины с постоянными магнитами, асинхронные машины и т. д.

Методы испытаний, установленные настоящим стандартом, относятся к машинам без обмоток возбуждения, поэтому могут возникать некоторые варианты, требующие специальных мер.

2 Цель

Целью настоящего стандарта является установление экспериментальных методов определения параметров трехфазных синхронных машин.

Это не означает, что для определения параметров определенного типа вращающихся машин должны применяться только методы испытаний, установленные настоящим стандартом. Могут применяться другие дополнительные методы испытаний, которые должны быть согласованы в установленном порядке.

Раздел 2. Общие положения

3 Общие положения

Испытания с целью определения параметров синхронных машин должны проводиться на машинах, находящихся в отрегулированном рабочем состоянии, все устройства автоматического управления должны быть отключены.

Если не указано иное, то все испытания должны проводиться при номинальной частоте вращения.

3.1 Показывающие измерительные приборы и оборудование, такие как измерительные трансформаторы тока и напряжения, шунты и мосты, применяемые при испытаниях, если не указано иное, должны иметь класс точности не хуже 1,0 (Публикация 51 МЭК: Электрические аналоговые показывающие измерительные приборы и оборудование прямого действия). Измерительные приборы, применяемые для измерения сопротивления постоянному току, должны иметь класс точности не хуже 0,5.

Нет необходимости устанавливать требования к классу точности осциллографического измерительного оборудования. Однако такое оборудование должно выбираться с учетом номинальной частоты вращения испытуемой машины так, чтобы показания снимались в линейной части амплитудно-частотной характеристики.

Издание официальное

Измерение частоты вращения синхронных машин может проводиться посредством стробоскопического метода или тахометров (механического или электрического).

Частоту вращения допускается также измерять с помощью частотомера при условии, что машина вращается синхронно с любой другой машиной или управляется самостоятельно.

3.2 Измерение температуры обмоток должно проводиться при всех видах испытаний, когда измеряемые параметры зависят от температуры или величина температуры обмоток имеет значение с точки зрения безопасности при проведении испытаний. В случаях, когда существует риск того, что значение температуры может превысить безопасное, рекомендуется начинать испытания только после того, как машина отработает в режиме холостого хода с рабочим охлаждением или при условии, что машина находилась в выключенном состоянии в течение периода, достаточного для обеспечения низкой исходной температуры. Даже после проведения вышеуказанных мероприятий температура должна тщательно контролироваться или быть заранее рассчитана, чтобы испытание могло быть прекращено прежде, чем температура станет чрезмерно высокой.

3.3 Способ соединения обмоток машины при испытаниях, как правило, должен быть таким же что и при нормальном функционировании.

Определение всех параметров следует производить при соединении фаз якоря в звезду (если не требуется использование специальных соединений, например, открытый треугольник). Если обмотка якоря машины соединена в треугольник, то полученные значения параметров соответствуют эквивалентной обмотке, соединенной в звезду.

3.4 Все параметры и характеристики должны выражаться в относительных единицах, принимая в качестве основных номинальные значения линейного напряжения U_n и полной мощности S_n. В этом случае основное значение тока должно соответствовать:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}, A;$$

и основное значение полного сопротивления:

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = \left[\frac{S_n}{3I_n^2}\right], \text{Ом}.$$

Промежуточные вычисления допускается производить в единицах физических величин с последующим перерасчетом определяемого параметра в относительные единицы. Время рекомендуется выражать в секундах. За основное значение тока возбуждения при вычислении характеристик и построении диаграмм следует принимать ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению по характеристике холостого хода.

Если машина имеет несколько номинальных значений основных параметров, должны оговариваться значения, принимаемые за основные.

Если не указано иное, в настоящем стандарте применяется вышеприведенная система обозначения величин. Строчными буквами обозначены параметры, определяемые в относительных единицах, а прописными буквами – в единицах физических величин.

3.5 В формулах, приведенных в настоящем стандарте для определения индуктивных сопротивлений синхронных машин, активное сопротивление прямой последовательности обмотки якоря, если не указано иное, принимается как незначительное.

Если активное сопротивление прямой последовательности обмотки якоря составляет более 0,2 от измеренного индуктивного сопротивления, формулы нужно рассматривать как приблизительные.

3.6 Большинство параметров и экспериментальные методы их определения, приведенные в настоящем стандарте, соответствуют широко применяемой теории двух осей синхронных машин с аппроксимированным представлением всех контуров, включая обмотку возбуждения, и связанных контуров, которые представляют собой два эквивалентных контура, один из которых – по продольной оси, а другой – по поперечной оси машины, пренебрегая активным сопротивлением якоря или принимая его во внимание только приблизительно.

В связи с этим настоящий стандарт предусматривает методы определения трех индуктивных сопротивлений (синхронного, переходного и сверхпереходного) и двух постоянных времени (переходной и сверхпереходной) – по продольной оси, двух индуктивных сопротивлений (синхронного и сверхпереходного) и одной постоянной времени при короткозамкнутой обмотке якоря (сверхпереходной) – по поперечной оси.

Постоянные времени определяются из условия, что соответствующие переходные составляющие (токов, напряжений и т. д.) изменяются по экспоненциальному закону. Если кривая изменения рассматриваемой составляющей, полученная опытным путем, не является чисто экспоненциальной например, в случае машин со сплошным ротором, в качестве эквивалентной постоянной времени следует принимать время, в течение которого эта составляющая уменьшается до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения. Кривые экспоненциального затухания, соответствующие этим постоянным времени, должны рассматриваться как эквивалентные кривые, заменяющие действительные кривые, полученные по данным измерений.

3.7 Параметры синхронных машин изменяются с насыщением магнитных состояний. В расчетах используются как предельные, так и непредельные значения параметров.

В настоящем стандарте, если не указано иное, под «предельным» значением параметра следует понимать его значение при номинальном напряжении якоря, а под «непредельным» – значение при номинальном токе якоря.

Значения параметров при номинальном напряжении якоря должно соответствовать магнитному состоянию машины при внезапном коротком замыкании на выводах обмотки якоря, которому предшествует работа машины в режиме холостого хода с номинальным напряжением при номинальной частоте вращения.

Значение параметров при номинальном токе якоря должно соответствовать магнитному состоянию ненасыщенной машины при протекании в обмотке якоря тока основной гармонической составляющей с номинальным значением.

Раздел 3. Термины и методы определения их значений

4 Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси X_d (direct-axis synchronous reactance): Отношение установившегося значения основной гармоники электродвижущей силы, индуцируемой в обмотке якоря машины полным магнитным потоком, обусловленным составляющей тока в этой обмотке по продольной оси, к этой составляющей тока при синхронной частоте вращения.

4.1 Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси X_d определяют (см. 27) в зависимости от напряжения холостого хода (см. 25.1) и характеристики трехфазного короткого замыкания (см. 26.1). Полученное таким образом значение X_d является непредельным.

5 Отношение короткого замыкания K_c (short-circuit ratio): Отношение тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению по характеристике холостого хода, к току возбуждения, соответствующему номинальному току по характеристике установившегося трехфазного короткого замыкания при синхронном вращении машины.

5.1 Отношение короткого замыкания определяют (см. 27.1) в зависимости от напряжения холостого хода (см. 25.1) и характеристики трехфазного короткого замыкания (см. 26.1).

6 Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси X_q (quadrature-axis synchronous reactance): Отношение установившегося значения основной гармоники электродвижущей силы, индуцируемой в обмотке якоря машины полным магнитным потоком, обусловленным составляющей тока в этой обмотке по поперечной оси, к этой составляющей тока при синхронной частоте вращения.

6.1 Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси определяется следующими методами:

a) отрицательного возбуждения (см. 34 и 35);

b) малого скольжения (см. 36 и 37);

c) нагрузки с измерением угла нагрузки (см. 38 и 39).

Предпочтительными являются первые два метода.

7 Переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси X'_d (direct-axis transient reactance): Отношение начального значения основной гармоники электродвижущей силы, индуцируемой в обмотке якоря полным магнитным потоком, обусловленным составляющей тока в этой обмотке по продольной оси, к начальному значению этой составляющей тока при ее внезапном изменении, отсутствии успокоительных контуров, наличии замкнутой обмотки возбуждения по продольной оси и синхронной частоте вращения.

7.1 Переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси определяется следующими методами:

a) внезапного трехфазного короткого замыкания (см. 40 и 41);

b) восстановления напряжения (см. 42 и 43);

c) расчетным путем по известным X_d (см. 4), τ'_{do} (см. 17) и τ'_d (см. 18) по формуле, приведенной в 72.

Предпочтительным является метод внезапного трехфазного короткого замыкания. Этот метод позволяет получить предельные и непредельные значения X'_d.

8 Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси X''_d (direct-axis subtransient reactance): Отношение начального значения основной гармоники электродвижущей силы, индуцируемой в обмотке якоря полным магнитным потоком, обусловленным составляющей тока в этой обмотке по продольной оси, к начальному значению этой составляющей тока при ее внезапном изменении, наличии успокоительных контуров по продольной оси и синхронной частоте вращения.

8.1 Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси определяется следующими методами:

a) внезапного трехфазного короткого замыкания (см. 40 и 41.1);

b) восстановления напряжения (см. 42 и 43.1);

c) питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора (см. 44 и 45);

d) питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора (см. 46 и 47).

Предпочтительным является метод внезапного трехфазного короткого замыкания. Этот метод позволяет получить предельные и непредельные значения X''_d.

Методы определения X''_d питанием обмотки якоря от внешнего источника питания при двух положениях ротора и при произвольном положении ротора (c и d) используют для получения непредельного значения X''_d , но эти методы непригодны для определения предельного значения X''_d из-за больших номинальных токов и возможного перегрева твердых частей.

9 Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси X''_q (quadrature-axis subtransient reactance): Отношение начального значения основной гармоники электродвижущей силы, индуцируемой в обмотке якоря полным магнитным потоком, обусловленным составляющей тока в этой обмотке по поперечной оси, к начальному значению этой составляющей тока при ее внезапном изменении, наличии успокоительных контуров по поперечной оси и синхронной частоте вращения.

9.1 Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси определяется следующими методами:

a) питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора (см. 44 и 45.1);

b) питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора (см. 46 и 47.1).

Эти методы эквивалентны для получения непредельного значения X''_q, но непригодны для определения предельного значения X''_q из-за больших номинальных токов и возможного перегрева твердых частей.

10 Индуктивное сопротивление обратной последовательности X_2 (negative-sequence reactance): Отношение реактивной составляющей основной гармоники напряжения обратной последовательности на обмотке якоря к току обратной последовательности той же частоты, в той же обмотке машины при номинальной частоте вращения.

Примечание – Могут быть получены различные значения индуктивного сопротивления обратной последовательности, если реактивная составляющая тока содержит гармонику. Наиболее достоверное значение X_2 – определенное при синусоидальном токе.

11 Активное сопротивление обратной последовательности R_2 (negative-sequence resistance): Отношение активной составляющей основной гармоники напряжения обратной последовательности на обмотке якоря, обусловленной синусоидальным током якоря обратной последовательности номинальной частоты, к этому току при номинальной частоте вращения.

Примечание – Могут быть получены различные значения активного сопротивления обратной последовательности, если реактивная составляющая тока содержит гармонику.

11.1 Активное сопротивление обратной последовательности определяется следующими методами:

a) продолжительного двухфазного короткого замыкания (см. 48, 49 и 49.1);

b) обратного чередования фаз (см. 50 и 51);

c) активное сопротивление обратной последовательности может быть также определено расчетом по известным значениям X''_d (см. 8) и X''_q (см. 9); расчет производится с помощью формулы, приведенной в 72.1.

Предпочтительным является метод установившегося двухфазного короткого замыкания.

12 Индуктивное сопротивление нулевой последовательности X_0 (zero-sequence reactance): Отношение реактивной составляющей основной гармоники напряжения нулевой последовательности на обмотке якоря к току нулевой последовательности той же частоты в той же обмотке машины при номинальной частоте вращения.

13 Активное сопротивление нулевой последовательности R_0 (zero-sequence resistance): Отношение активной составляющей основной гармоники напряжения нулевой последовательности на обмотке якоря, обусловленной основной гармоникой тока якоря нулевой последовательности номинальной частоты, к этой гармонике тока при номинальной частоте вращения.

13.1 Активное сопротивление нулевой последовательности определяется следующими методами:

a) однофазного питания трех фаз, соединенных последовательно (разомкнутый треугольник) или параллельно (см. 52 и 53);

b) установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль (см. 54, 55, 55.1).

Предпочтительным является метод однофазного питания трех фаз, соединенных последовательно.

14 Индуктивное сопротивление Потье X_p (Potier reactance): Индуктивное сопротивление, вычисляемое по реактивному треугольнику и используемое для определения тока возбуждения при работе с нагрузкой с помощью метода Потье. Этот метод учитывает дополнительные потери в обмотке возбуждения при нагрузке в зоне перевозбуждения; получаемое данным методом значение больше, чем эффективное значение потерь индуцируемого напряжения.

14.1 Индуктивное сопротивление Потье определяется в соответствии с 30.

15 Сопротивление постоянному току фазы якоря и сопротивление обмотки возбуждения R_a и R_f (armature and excitation winding direct-current resistance): Сопротивление обмотки возбуждения определяется следующими методами:

a) вольтметра и амперметра (см. 56 и 57);

b) одинарный и двойной мост (см. 56 и 57.1). Метод одинарного моста не применим для эталонных сопротивлений менее 1 Ом.

16 **Сопротивление обмотки якоря прямой последовательности R_1** (positive-sequence armature winding resistance): Отношение части активной составляющей основной гармоники напряжения обмотки якоря, соответствующей основным и добавочным потерям в этой обмотке, обусловленным основной гармоникой тока прямой последовательности в ней, к этой гармонике тока при номинальной частоте вращения.

16.1 Сопротивление обмотки якоря прямой последовательности определяется по 72.2.

17 Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря τ'_{do} (direct-axis transient open-circuit time constant): Время, в течение которого разность напряжения якоря и остаточного напряжения машины уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения при номинальной частоте вращения.

17.1 Переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря определяется следующими методами:

a) гашения поля при разомкнутой обмотке якоря (см. 58 и 59);

b) восстановления напряжения (см. 42 и 43.2);

c) расчетом по известным X_d (см. 4), X'_d (см. 7) и τ'_d (см. 18) по формуле в разделе 72.

Предпочтительным является метод гашения поля при разомкнутой обмотке якоря.

18 Переходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря (direct-axis transient short-circuit time constant) τ'_d: Время, в течение которого разность переходного тока якоря и тока, обусловленного остаточным напряжением машины, уменьшается до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения при номинальной частоте вращения.

18.1 Переходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря определяется следующими методами:

a) внезапного трехфазного короткого замыкания (см. 40 и 41.2);

b) гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря (см. 60 и 61);

c) расчетом по известным X_d (см. 4), X'_d (см. 7) и τ'_d (см. 17) по формуле в разделе 72.

Если испытание методом внезапного трехфазного короткого замыкания применяется для определения X'_d, то τ'_d должна определяться во время того же испытания. Во всех других случаях предпочтительным является метод гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря.

19 Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря τ''_d (direct-axis subtransient short-circuit time constant): Время, в течение которого сверхпереходная составляющая тока якоря уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения при номинальной частоте вращения.

19.1 Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря определяется методом внезапного трехфазного короткого замыкания (см. 40 и 41.3).

20 Постоянная времени апериодической составляющей тока якоря τ_a (armature short-circuit time constant): Время, в течение которого периодическая составляющая тока в цепи возбуждения уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения при номинальной частоте вращения.

20.1 Постоянная времени апериодической составляющей тока якоря следует определять из опыта внезапного трехфазного короткого замыкания следующими методами:

a) по затуханию периодической составляющей тока в цепи возбуждения (см. 40 и 41.4);

b) по затуханию апериодической составляющей тока в фазах обмотки якоря (см. 40 и 41.5);

c) расчетом по известным X_2 (см. 10) и R_2 (см. 15) с помощью формулы 72.3.

Предпочтительным является метод определения по затуханию периодической составляющей тока в цепи возбуждения.

21 Время ускорения τ_J (acceleration time): Время, необходимое для приведения вращающихся частей синхронной машины из состояния покоя до достижения номинальной частоты вращения под воздействием постоянного увеличивающегося вращающего момента, представляющего собой отношение расчетной активной мощности к расчетной угловой скорости.

Примечание 1 – Для синхронных компенсаторов, расчетная активная мощность заменяется расчетной полной мощностью.

Примечание 2 – Когда время ускорения определено для группы механически соединенных машин, увеличивающийся вращающий момент определяют для расчетной активной мощности и угловой скорости базовой синхронной машины.

22 Постоянная накопленной энергии ***H*** (stored energy constant): Отношение кинетической энергии, накопленной в роторе, вращающемся с номинальной частотой, к номинальной полной мощности.

22.1 Время ускорения машины или группы машин и постоянную накопленной энергии определяют следующими методами:

a) крутильных колебаний (см. 62 и 63);

b) вспомогательного маятника (см. 64 и 65);

c) самоторможения без нагрузки (см. 66 и 67);

d) самоторможения под нагрузкой в режиме двигателя (см. 68 и 69);

e) ускорения при снятии нагрузки с машины, работающей, как генератор (см. 70 и 71).

Все вышеуказанные методы практически эквивалентны. Применение того или иного метода зависит от конструкции и полной мощности машины при испытаниях.

23 Номинальный ток возбуждения I_{fn} (rated excitation current): Ток в обмотке возбуждения при работе машины при номинальном напряжении, токе, коэффициенте мощности и частоте вращения.

23.1 Номинальный ток возбуждения определяется следующими методами:

a) непосредственной нагрузки;

b) графического построения с помощью векторной диаграммы Потье (см. 31), с помощью диаграммы ASA (см. 32) или с помощью шведской диаграммы (см. 33).

Предпочтительным является метод непосредственной нагрузки, но метод графического построения является практически эквивалентным.

24 Номинальное изменение напряжения ΔU_n (rated voltage regulation): Изменение напряжения на зажимах генератора, когда номинальный режим заменяется режимом холостого хода при том же токе возбуждения и частоте вращения.

Номинальное изменение напряжения определяется следующими методами:

а) непосредственной нагрузки;

б) графического построения, используя характеристику холостого хода (см. 25.1) и номинальный ток возбуждения (см. 23 и 23.1), полученный при испытаниях.

Раздел 4. Описание методов испытаний и определение параметров машин с помощью этих методов

25 Характеристика холостого хода

Характеристику холостого хода следует определять:

a) в режиме генератора при помощи первичного двигателя;

b) в режиме ненагруженного двигателя при питании от источника симметричного трехфазного напряжения;

c) в режиме самоторможения испытуемой машины.

При определении характеристики холостого хода следует измерять ток возбуждения, линейное напряжение и частоту. Изменение тока возбуждения при снятии характеристики холостого хода следует производить плавно и только в одном направлении, начиная с наибольшего значения тока, равного, если возможно, номинальному току возбуждения, но не ниже значения, соответствующего 1,3 номинального напряжения испытуемой машины, уменьшая его до значения, равного 0,2 номинального напряжения, при условии, что это значение не превышает значения остаточного напряжения, при этом точки, по которым производят отсчеты, должны распределяться по характеристике по возможности равномерно.

При уменьшении значения тока возбуждения до нуля следует измерять остаточное напряжение генератора.

При определении характеристики холостого хода в режиме ненагруженного двигателя, кроме перечисленных выше параметров, необходимо измерять также ток якоря. Характеристика холостого хода должна определяться при коэффициенте мощности, равном единице, для чего при каждом значении напряжения измеряют ток возбуждения, соответствующий минимальному току в обмотке якоря.

Определение характеристики холостого хода производят при самоторможении машины, если снижение частоты вращения не превышает 0,04 номинальной частоты вращения в секунду.

При снижении частоты вращения испытуемой машины более чем на 0,02 от номинальной частоты вращения в секунду, возбуждение следует осуществлять от отдельного источника, обеспечивающего устойчивое возбуждение. Перед отключением машины от сети необходимо установить ток возбуждения, соответствующий номинальному, но не ниже значения тока, при котором напряжение испытуемой машины составляет 1,3 номинального напряжения. Ток возбуждения следует снижать ступенями, измеряя на каждой ступени одновременно напряжение обмотки якоря, частоту вращения и ток возбуждения. Определение характеристики холостого хода может быть проведено несколько раз в случае необходимости воспроизведения всех необходимых этапов.

25.1 Характеристика холостого хода – это зависимость напряжения обмотки якоря от тока возбуждения при номинальной частоте вращения, которая определяется в режиме холостого хода. Если при высоком остаточном напряжении характеристика холостого хода пересекает ось выше точки начала координат, то необходимо провести корректировку. Для этого прямолинейный участок кривой характеристики холостого хода продлевают до точки его пересечения с осью абсцисс. Длина оси абсцисс до этой точки пересечения представляет собой значение корректировки, которая должна быть внесена во все измеренные значения тока возбуждения (рисунок 1).

Если во время проведения испытаний частота отличается от номинальной, то напряжение холостого хода необходимо пересчитать по измеренным значениям напряжения при номинальной частоте.

26 Определение характеристики трехфазного короткого замыкания

Характеристику трехфазного короткого замыкания определяют:

a) в режиме генератора при помощи пускового двигателя;

b) в режиме самоторможения испытуемой машины.

Замыкание фаз накоротко должно производиться как можно ближе к выводам машины, а ток возбуждения прикладывается после короткого замыкания.

При определении характеристики трехфазного короткого замыкания линейный ток обмотки якоря и ток возбуждения измеряют одновременно. Одно из измерений должно быть произведено при токе в обмотке якоря, близком к номинальному. Частота вращения может отличаться от номинальной, но она не должна быть ниже чем 0,2 от номинальной.

Определение характеристики трехфазного короткого замыкания на выбеге может быть выполнено с достаточной точностью, если снижение частоты вращения в секунду не превышает 0,1 от номинальной. При снижении частоты вращения испытуемой машины более чем на 0,04 от номинальной в секунду возбуждение осуществляют от отдельного источника, обеспечивающего устойчивое возбуждение.

26.1 Характеристику трехфазного короткого замыкания – зависимость тока в обмотке якоря от тока возбуждения – следует определять при длительном трехфазном коротком замыкании.

27 Определение отношения короткого замыкания и синхронных индуктивных сопротивлений

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. 4 и 4.1) следует определять по характеристикам холостого хода и длительного трехфазного короткого замыкания как частное от деления напряжения холостого хода, взятого по прямолинейной части характеристики холостого хода при некотором токе возбуждения, на ток симметричного короткого замыкания, получаемый по характеристике короткого замыкания при том же токе возбуждения (рисунок 1)

$$X_d = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{BC}}; \quad \left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \right]$$

Полученное таким образом значение X_d является непредельным.

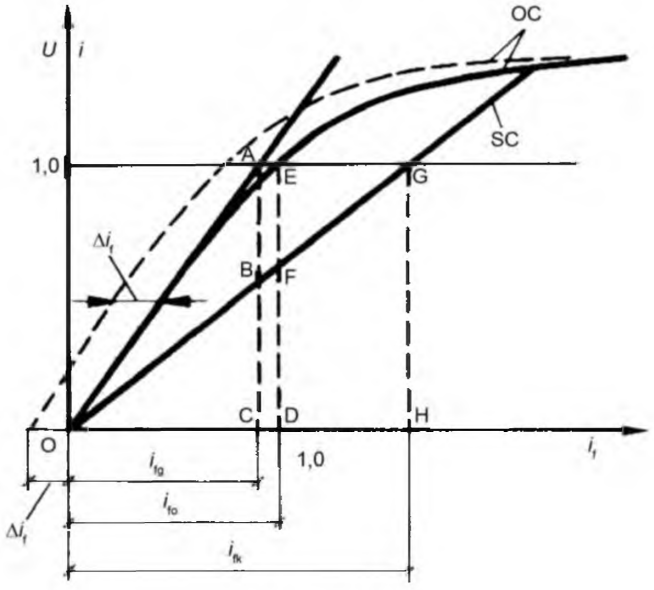


Рисунок 1

27.1 Отношение короткого замыкания (см. 5 и 5.1) определяют как частное от деления тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению по характеристике холостого хода, на ток возбуждения, соответствующий номинальному току по характеристике продолжительного трехфазного короткого замыкания (рисунок 1), по формуле

$$K_c = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{fo}}{i_{fk}}$$

28 Испытание в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности, равном нулю

Испытание в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности, равном нулю, следует проводить при работе машины в режиме генератора или двигателя. В режиме генератора активная мощность должна быть равна нулю. В режиме двигателя нагрузка на валу должна быть равна нулю.

Во время испытания следует определять ток возбуждения, соответствующий напряжению и току якоря, значения которых не должны отличаться более чем на ± 0,15 от номинальных, в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности, равном нулю.

29 Определение тока возбуждения при номинальном напряжении и номинальном токе якоря при коэффициенте мощности, равном нулю (в режиме перевозбуждения)

Если напряжение и ток при испытании в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности, равном нулю, отличаются от номинальных не более чем на ± 0,15, допускается применять графический метод определения тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению и номинальному току, используя результаты испытаний и определения характеристики холостого хода (см. 25.1) и характеристики трехфазного короткого замыкания (см. 26.1).

На график, на котором нанесена характеристика холостого хода испытуемой машины, необходимо нанести точку. Эта точка должна соответствовать измеренным значениям напряжения u и тока возбуждения i_f при коэффициенте мощности, равном нулю, и измеренном токе якоря i (точка C, рисунок 2).

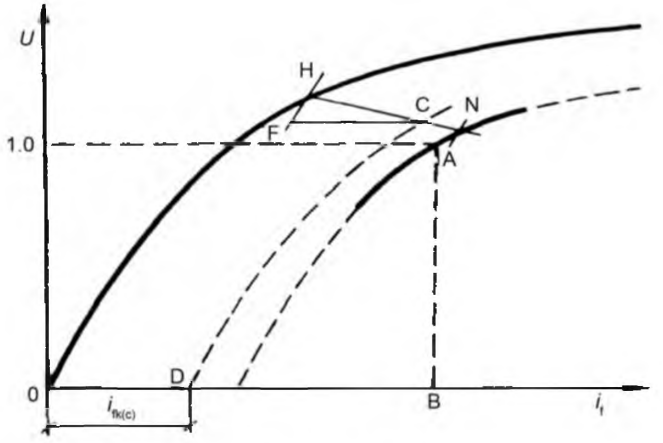


Рисунок 2

Отрезок OD, отложенный вдоль оси абсцисс, равен току возбуждения, соответствующему по характеристике короткого замыкания току якоря i. Из точки C параллельно оси абсцисс в сторону характеристики холостого хода откладывают отрезок CF, равный по длине отрезку OD. Через точку F проводят прямую параллельно начальной части характеристики холостого хода до пересечения с последней в точке H. После этого через точки H и C проводят прямую, на которой находят точку N, так что:

$$\frac{HN}{HC} = \frac{1}{i},$$

где i – ток, соответствующий точке C.

Характеристику холостого хода переносят параллельно самой себе вправо и вниз на расстояние HN.

На полученной кривой находят точку A, соответствующую номинальному напряжению. Координата этой точки по оси абсцисс (OB) определяет ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению и току якоря при коэффициенте мощности, равном нулю (в режиме перевозбуждения).

30 Определение индуктивного сопротивления Потье в зависимости от характеристики холостого хода, характеристики продолжительного трехфазного короткого замыкания и тока возбуждения при номинальном напряжении и номинальном токе якоря при коэффициенте мощности, равном нулю (в режиме перевозбуждения)

Индуктивное сопротивление Потье (см. 14) определяют графическим построением по характеристикам холостого хода, продолжительного трехфазного короткого замыкания и по точке нагрузочной характеристики (рисунок 3), соответствующей номинальным значениям напряжения (ордината) и тока возбуждения (абсцисса), измеренных в обмотке якоря в режиме перевозбуждения с коэффициентом мощности, близким к нулю (точка А).

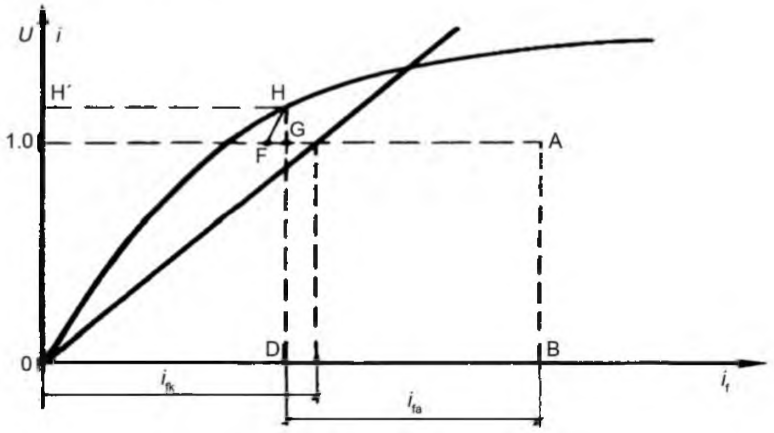


Рисунок 3

Влево от точки А, параллельно оси абсцисс откладывают отрезок AF, равный току возбуждения (i_{fk}) при номинальном токе якоря по характеристике установившегося трехфазного короткого замыкания. Из точки F проводят линию, параллельно начальной части характеристики холостого хода, до пересечения с последней в точке Н. Перпендикуляр HG из точки Н на линию AF представляет падение напряжения на индуктивном сопротивлении x_p при номинальном токе якоря. В относительных единицах x_p = HG.

31 Определение номинального тока возбуждения с помощью диаграммы Потье

Номинальный ток возбуждения (см. 23) с помощью диаграммы Потье определяют с использованием характеристик холостого хода (см. 25.1), установившегося трехфазного короткого замыкания (см. 26.1) и индуктивного сопротивления Потье x_p (см. 14 и 30).

По оси абсцисс откладывают вектор номинального тока якоря (i_n) испытуемой машины. Под углом φ_n (который, как полагают, является положительным для возбужденного генератора) к вектору тока – вектор номинального напряжения (u_n) (рисунок 4).

Из конца вектора напряжения перпендикулярно к вектору тока якоря следует отложить вектор падения напряжения ($i_n x_p$) в индуктивном сопротивлении Потье при номинальном токе якоря. Падением напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря можно пренебречь. При необходимости его учитывают, отложив вектор падения напряжения в активном сопротивлении прямой последовательности обмотки якоря (см. 16) из конца вектора напряжения параллельно вектору тока якоря.

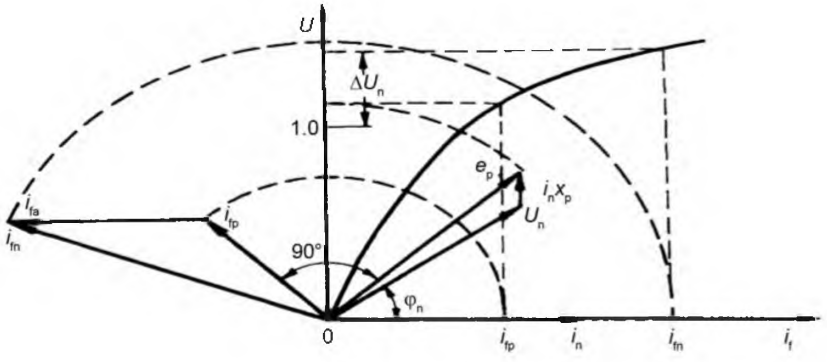


Рисунок 4

На диаграмме (рисунок 4) этот вектор следует откладывать для генераторов – по направлению вектора тока, для двигателей – в обратном направлении.

Геометрическая сумма векторов номинального напряжения и падения напряжения в индуктивном сопротивлении x_p дает вектор электродвижущей силы (э.д.с.) e_p. Вектор тока возбуждения i_{fp}, создающего эту э.д.с., необходимо определять по характеристике холостого хода и откладывать из начала координат под углом 90° к вектору э.д.с.

Составляющую тока возбуждения (i_{fa}), компенсирующую реакцию якоря при токе короткого замыкания, равном номинальному, следует вычислять как разность между током возбуждения, соответствующего номинальному току якоря, определенному по характеристике устойчивого трехфазного короткого замыкания, и током возбуждения, соответствующего падению напряжения в индуктивном сопротивлении x_p при номинальном токе якоря, определенном по характеристике холостого хода (рисунок 3). Вектор I_{fa} откладывают из конца вектора i_{fp} параллельно к вектору тока якоря. Номинальный ток возбуждения i_{fn} – геометрическая сумма векторов i_{fp} и i_{fa}.

Если индуктивное сопротивление Потье x_p неизвестно, то на рисунке 4 его можно заменить (ax_a), где x_a – индуктивное сопротивление якоря, измеренное без ротора (см. 31.2), a – коэффициент, принятый равным 1,0 – для машин с явно выраженными полюсами (явнополюсных машин) и 0,6 (0,65) – для машин с неявно выраженными полюсами (если нет более точных значений, полученных в ходе предшествующих испытаний машин сходного конструктивного исполнения).

31.1 Испытание без ротора следует проводить при питании трех фаз обмотки якоря от постороннего источника напряжения номинальной частоты. Прилагаемое напряжение должно быть выбрано таким образом, чтобы ток якоря был близок к номинальному. Во время испытания измеряют напряжение на зажимах (U), линейный ток (I) и подводимую активную мощность (P).

31.2 Индуктивное сопротивление фазы якоря без ротора (X_a) вычисляют по формулам:

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2}, \text{Ом},$$

где

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3}I}, \text{Ом}; \qquad R = \frac{P}{3I^2}, \text{Ом};$$

$$\left[x_a = \sqrt{z^2 - r^2}; \quad z = \frac{u}{i}; \quad r = \frac{p}{i^2} \right].$$

32 Определение номинального тока возбуждения с помощью диаграммы ASA

Номинальный ток возбуждения машины (см. 23) с помощью векторной диаграммы ASA (рисунок 5), определяют с использованием характеристик холостого хода (см. 25.1), установившегося трехфазного короткого замыкания (см. 26.1)и индуктивного сопротивления Потье x_p (см. 14).

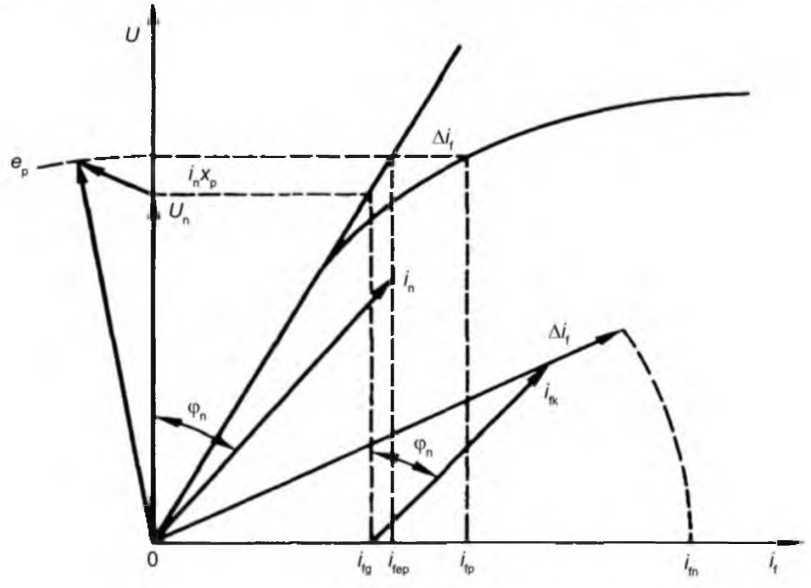


Рисунок 5

Э.д.с. e_p определяют в соответствии с 31. Определение тока возбуждения, соответствующего прямолинейному участку характеристики номинального напряжения якоря (i_{fg}) следует производить с использованием характеристик холостого хода. Вектор тока i_{fg} следует откладывать из начала координат по оси абсцисс. Из его конца, справа от вертикали под углом φ_n, соответствующим коэффициенту номинальной мощности (который, как полагают, является положительным для возбужденного генератора), откладывают вектор тока возбуждения i_{fk}, соответствующий номинальному току якоря по характеристике устойчивого трехфазного короткого замыкания (см. 30).

По длине вектора, представляющего собой геометрическую сумму токов возбуждения, откладывают вектор тока, соответствующий разности (Δi_f) между токами возбуждения по характеристике холостого хода (i_{fp}) и прямолинейному участку этой характеристики (i_{fep}), оба по напряжению e_p (см. рисунок 5). Сумма этих трех векторов соответствует номинальному току возбуждения.

Номинальный ток возбуждения может также быть определен с помощью следующей формулы (в относительных единицах или в единицах физических величин):

$$i_{fn} = \Delta i_{fn} + \sqrt{(i_{fg} + i_{fk} \sin\varphi_n)^2 + (i_{fk} \cos\varphi_n)^2} \ .$$

Если индуктивное сопротивление Потье x_p неизвестно, то на рисунке 5 его можно заменить ax_a (см. раздел 31).

33 Определение номинального тока возбуждения с помощью шведской диаграммы

Номинальный ток возбуждения машины (см. 23) с помощью шведской диаграммы определяют с использованием характеристик холостого хода (см. 25.1), установившегося трехфазного короткого замыкания (см. 26.1) и тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению и току якоря при коэффициенте мощности, равном нулю (в режиме перевозбуждения) (см. 29).

Три значения тока возбуждения откладывают по оси абсцисс (рисунок 6):

OD соответствует номинальному напряжению по характеристике холостого хода;

OB соответствует номинальному напряжению и току якоря при коэффициенте мощности, равном нулю;

OC соответствует номинальному току якоря по характеристике продолжительного короткого замыкания.

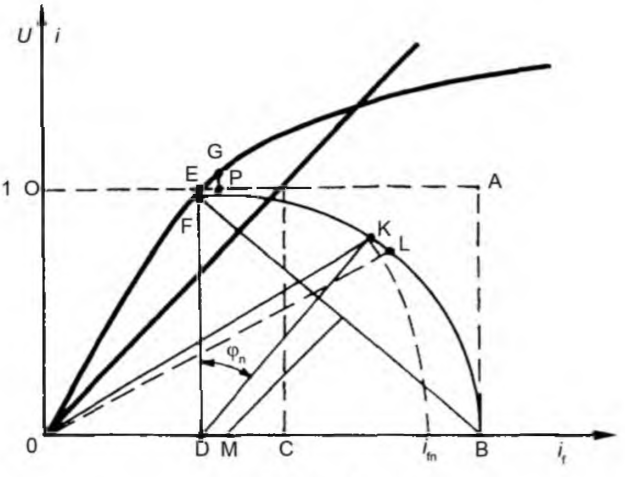


Рисунок 6

Из точки D откладывают перпендикуляр к оси абсцисс, длина которого FD равна 1,05 OC. Через точки F и B проводят прямую линию, а затем проводят перпендикуляр из центра этой линии вниз к пересечению с осью абсцисс в точке M. Из центра окружности, за который принимают точку M, проводят дугу окружности, соединяющую точки F и B.

От точки D под углом φ_n, соответствующим коэффициенту номинальной мощности (который, как полагают, является положительным для возбужденного генератора), к FD проводят линию до пересечения с дугой FB в точке K. Длина OK соответствует номинальному току возбуждения машины.

При необходимости падение напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря может быть учтено следующим образом.

По дуге FKB откладывают отрезок KL. Длина этого отрезка равна составляющей тока возбуждения EP, необходимой для увеличения напряжения холостого хода, на величину PG, представляющую собой падение напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря прямой последовательности (см. 16 и 72.2) при номинальном токе. Длина отрезка OL представляет собой искомое значение тока возбуждения.

При работе машины в режиме двигателя падение напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря прямой последовательности откладывают вниз от точки E и точки L, слева от точки K.

Если ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению и номинальному току при коэффициенте мощности, равном нулю, неизвестен, для его определения с помощью шведской диаграммы может использоваться следующий метод.

По оси ординат к номинальному напряжению якоря добавляют падение напряжения на ax_a (см. 31) при номинальном токе якоря (точка H′ – см. рисунок 3).

Через точку H′ параллельно оси абсцисс проводят линию до ее пересечения с характеристикой холостого хода в точке H. От этой точки откладывают перпендикуляр до пересечения с осью абсцисс (точка D – см. рисунок 3). Справа от точки D по оси абсцисс откладывают вектор DB, равный i_{fa} (см. 31).

Ток возбуждения, равный длине вектора ОВ представляет собой искомое значение тока, полученное с помощью шведской диаграммы.

34 Метод отрицательного возбуждения

Испытание методом отрицательного возбуждения следует производить на машине, работающей в режиме холостого хода параллельно с сетью. Ток возбуждения следует уменьшать до нуля, изменяя направление тока, и плавно увеличивать его до момента выпадения машины из синхронизма. Во время испытания следует измерять напряжение, ток якоря и ток возбуждения вплоть до момента нарушения синхронизма.

35 Определение X_q методом отрицательного возбуждения

X_q (см. 6) методом отрицательного возбуждения определяют по формулам (в относительных единицах или единицах физических величин):

$$x_q = (x_d) \cdot \frac{u_r}{u_r + (e)},$$

где (e) – э.д.с. холостого хода, соответствующая току возбуждения i_{fr} непосредственно перед моментом нарушения синхронизма; определяемая по спрямленной характеристике холостого хода, проведенной через точку, соответствующую напряжению в момент выпадения машины из синхронизма (см. рисунок 7);

u_r – напряжение якоря непосредственно перед моментом нарушением синхронизма;

(x_d) – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси, определенное по той же спрямленной характеристике холостого хода.

Если при проведении испытания ток якоря непосредственно перед нарушением синхронизма известен, то (i_r) x_q подсчитывают по формуле

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3} I_r}; \left[x_q = \frac{u_r}{i_r} \right].$$

Значение x_q, полученное в результате такого испытания, в зависимости от величины u_r может быть насыщенным. Для того чтобы получить ненасыщенное значение x_q, подаваемое напряжение должно быть ниже или равно 0,6 номинального.

36 Метод малого скольжения

Метод малого скольжения следует применять при питании обмотки якоря машины, работающей с малым скольжением, от источника симметричного напряжения (от $0{,}01U_n$ до $0{,}2U_n$), которое прикладывается к клеммам обмотки якоря машины во время испытания. При этом напряжение должно быть таким, чтобы машина не втягивалась в синхронизм. Обмотка возбуждения должна быть разомкнута, ротор необходимо вращать пусковым двигателем со скольжением не более 0,01, а для машин с массивным ротором – много меньше этой величины с тем, чтобы практически исключить влияние на полученный результат токов, наведенных при асинхронном режиме в успокоительных контурах. В момент включения или отключения источника питания обмотки якоря обмотка возбуждения должна замыкаться накоротко или на сопротивление во избежание ее возможного повреждения. При проведении испытания с помощью осциллографа или других приборов измеряют ток и напряжение якоря, напряжение на обмотке возбуждения и скольжение. Если остаточное напряжение машины, измеренное перед проведением испытания, больше 0,3 напряжения, приложенного во время испытания, то ротор перед проведением испытания должен быть размагничен. Размагничивание может быть сделано, например, при присоединении обмотки возбуждения к низкочастотному источнику с током, составляющим примерно 0,5 номинального напряжения испытуемой машины при токе возбуждения на холостом ходу, постепенно уменьшая амплитуду и частоту (последнюю – если это возможно).

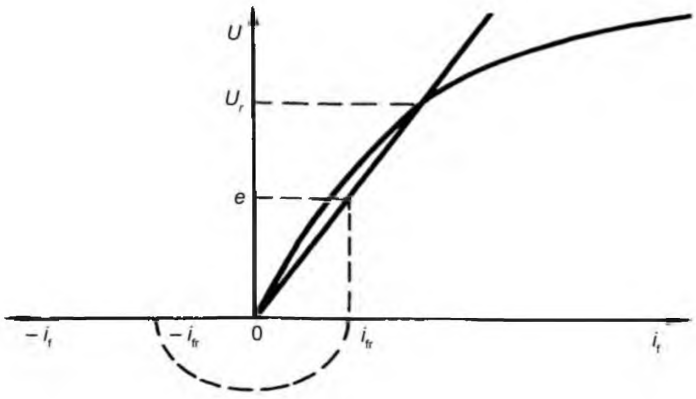


Рисунок 7

37 Определение X_q методом малого скольжения

X_q (см. 6) определяют методом малого скольжения по измеренным во время испытания току и напряжению якоря при максимальном напряжении (U_{fo}) на обмотке возбуждения по формуле

$$X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3} I_{max}} \text{ Ом}; \left[x_q = \frac{u_{min}}{i_{max}} \right],$$

Примечание – Если I_{max} не совпадает с U_{min}, то при расчете следует брать за основу I_{max} и напряжение при этом токе.

Если во время испытания остаточное напряжение машины (U_{res}) находится в пределах 0,1 – 0,3 приложенного напряжения, то значение тока должно быть определено по формуле

$$I_{max} = \sqrt{I_{av}{}^2 - \left(\frac{U_{res}}{\sqrt{3} X_d} \right)^2} \text{ Ом}; \left[i_{max} = \sqrt{i_{av}^2 - \left(\frac{U_{res}}{x_d} \right)^2} \right],$$

где I_{av} – полусумма двух последовательных максимумов огибающей кривой тока (рисунок 8).

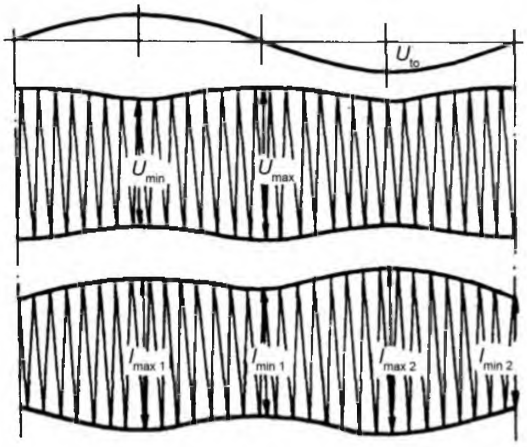


Рисунок 8

В целях контроля полученных результатов одновременно во время этого же испытания следует определять X_d по результатам измерения напряжения и тока в момент, когда напряжение на разомкнутой обмотке возбуждения равно нулю. Тогда

$$X_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3} I_{min}} \text{ Ом}; \left[x_d = \frac{u_{max}}{i_{min}} \right].$$

При значении остаточного напряжения менее 0,3 приложенного напряжения за I_{min} принимают полусумму двух последовательных минимумов по огибающей кривой тока.

Результаты измерения X_q методом малого скольжения считают правильными в том случае, когда полученное во время этого же испытания значение X_d совпадает с его значением, полученным в соответствии с разделом 27. В противном случае испытание необходимо повторить при нескольких значениях скольжения и экстраполировать полученные значения к скольжению, равному нулю. Значение синхронного индуктивного сопротивления по поперечной оси, полученное в результате данного испытания, соответствует ненасыщенному состоянию машины.

38 Метод нагрузки с измерением угла δ

Такое испытание проводится при работе испытуемой машины параллельно с сетью. Активная нагрузка машины должна составлять не менее 0,5 номинальной при коэффициенте мощности, близком к номинальному.

При проведении испытания необходимо измерять напряжение (u), ток якоря (i), а также проводить измерения тока якоря и напряжения, угол φ между напряжением и током (с использованием метода двух ваттметров) и угол δ (внутренний угол между векторами напряжения на выводах и э.д.с.). Угол нагрузки может быть измерен стробоскопическим или каким-либо другим методом.

39 Определение X_q методом нагрузки с измерением угла нагрузки

X_q (см. раздел 6) методом измерения угла нагрузки определяют по формуле

$$X_q = \frac{U \operatorname{tg} \delta}{\sqrt{3} I (\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \delta)}; \left[x_q = \frac{u \operatorname{tg} \delta}{i (\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \delta)} \right].$$

40 Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание

Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание следует проводить для определения параметров синхронной машины при номинальной частоте. Замыкание накоротко обмотки якоря должно производиться при работе машины в режиме холостого хода с заданным напряжением. Возбуждение машины, как правило, производят от собственного возбудителя, возбуждение которого осуществляется от независимого источника. Если собственный возбудитель не может быть использован, то может использоваться независимый источник возбуждения, при этом его номинальный ток должен в два или более раз превышать ток возбуждения на холостом ходу испытуемой машины, а сопротивление обмотки якоря не должно быть больше сопротивления основного возбудителя машины. Возбудитель в этом случае должен иметь независимое возбуждение.

Три фазы должны быть замкнуты накоротко практически одновременно. Фазовые контакты должны быть закорочены с расхождением во времени не более 15 электрических градусов. Если не требуется определять ток якоря, то указанное значение во время испытания может быть превышено. Для измерения токов короткого замыкания необходимо применять безиндукционные шунты, трансформаторы с магнитным сердечником или соответствующие трансформаторы тока. Трансформаторы тока следует выбирать таким образом, чтобы наибольшее возможное значение тока короткого замыкания находилось на прямолинейной части характеристики трансформатора.

Допускается применение воздушных трансформаторов тока, которые подключают к осциллографу через интегрирующие усилители. Когда требуется определить только ударный ток и периодическую составляющую, допускается применять интегрирующие осциллографические гальванометры.

Общее сопротивление измерительной аппаратуры и соединительных проводов, включаемых во вторичную цепь трансформаторов тока, не должно превышать установленного для них номинального значения.

Непосредственно перед коротким замыканием необходимо измерять напряжение на выводах машины, ток возбуждения и температуру обмотки возбуждения.

Для получения параметров, соответствующих ненасыщенному состоянию машины, испытание внезапного короткого замыкания следует проводить при нескольких значениях напряжения в пределах 0,1 – 0,4 номинального. Для каждого напряжения определяют параметры и затем строят зависимости их изменения от начальных значений переходного или сверхпереходного токов. Непредельные значения параметров следует определять по этим зависимостям для токов, равных номинальному току якоря.

Значения параметров, соответствующие насыщенному состоянию машины, определяют в том случае, когда опыт внезапного короткого замыкания производят при номинальном напряжении на выводах машины.

Если испытание внезапного короткого замыкания при номинальном напряжении не может быть выполнено, то проводят три испытания при напряжениях 0,3; 0,5 и 0,7 номинального, определяют параметры для каждого испытания, строят зависимости параметров от напряжения перед испытанием и экстраполяцией определяют предельные значения параметров, соответствующие номинальному напряжению.

Для определения параметров машины необходимо осциллографировать токи во всех фазах якоря и ток в цепи возбуждения.

Регистрацию показаний осциллографа следует продолжать в течение времени не менее чем через τ'_d + 0,2 с после короткого замыкания. Установившиеся значения должны быть измерены с помощью приборов и записаны на осциллографе. Допускается применение показаний осциллографа для более коротких по времени измерений, если результаты измерений на подобных машинах показывают, что значение тока уменьшается по экспоненциальной кривой.

По осциллограмме токов внезапного трехфазного короткого замыкания находят зависимости изменения во времени апериодической и периодической составляющих тока в каждой фазе якоря, которые определят соответственно как алгебраические полусуммы и алгебраические полуразности ординат верхней и нижней огибающих фазного тока якоря при коротком замыкании.

Периодическую составляющую тока якоря при коротком замыкании следует определять как среднее арифметическое периодических составляющих токов трех фаз.

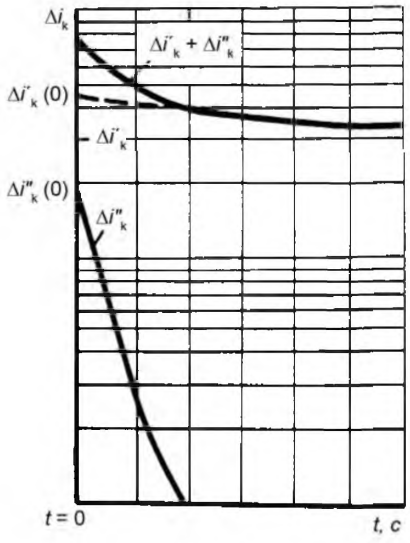


Рисунок 9

Для определения переходной ($\Delta i'_k$) и сверхпереходной ($\Delta i''_k$) составляющих тока из кривой изменения периодической составляющей тока якоря вычитают амплитуду установившегося тока короткого замыкания $i(\infty)$. Полученную разность, представляющую сумму $\Delta i'_k + \Delta i''_k$, строят на графике в полулогарифмических координатах. Это может быть либо прямая, либо кривая линия.

a) Если построенная кривая, за исключением начальной части, представляет собой прямую линию (соответствует экспоненте), то, экстраполируя ее на ось ординат, определяют начальное значение $\Delta i'_k(0)$ переходной составляющей тока короткого замыкания (рисунок 9).

b) Если кривая не имеет прямолинейного участка, то измеряют амплитуду тока i_A (рисунок 10), соответствующую времени OA′, где OA′ принимают равной 0,2 с или времени, в течение которого сверхпереходная составляющая становится незначительной. Определяют время OB′, в течение которого ток затухает до значения $i_B = 1/e\, i_A$. Постоянную времени τ'_d определяют как разность (OB′ – OA′) в секундах. Начальное значение переходной составляющей $\Delta i'_k(0)$ определяют экстраполяцией на ось ординат прямой при $t = 0$, проведенной через точки, соответствующие точки i_B и i_A.

Сверхпереходную составляющую тока короткого замыкания следует определять как разность между кривой $(\Delta i'_k + \Delta i''_k)$ и прямой, определяющей значение $\Delta i'_k$. Изменение сверхпереходной составляющей тока во времени также строят в полулогарифмических координатах (рисунок 9).

Апериодические составляющие токов всех фаз следует строить в зависимости от времени в полулогарифмических координатах. Экстраполяция этих кривых на момент возникновения короткого замыкания дает начальные значения соответствующих токов.

Для нахождения наибольшего возможного значения апериодической составляющей тока якоря полученные экстраполяцией начальные значения апериодических составляющих токов отдельных фаз якоря строят в виде векторов, выходящих из одной точки. Из конца каждого вектора проводят перпендикуляр к нему. Длина вектора, проведенного из нулевой точки в центр треугольника, образованного пересечением этих перпендикуляров, определяет наибольшую возможную апериодическую составляющую, которая равна начальному значению амплитуды периодической составляющей (рисунок 11).

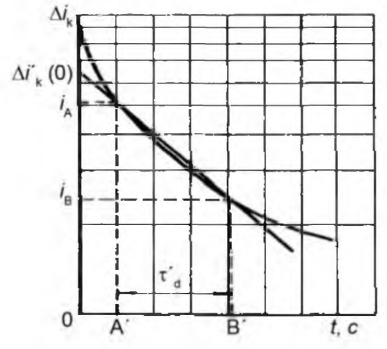


Рисунок 10

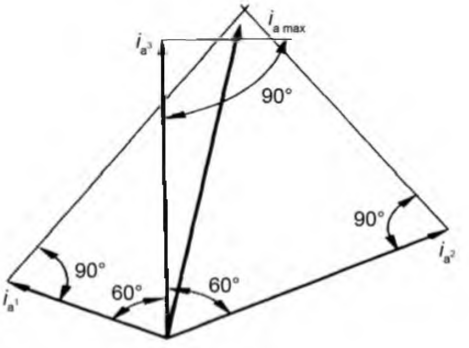


Рисунок 11

Наибольшее возможное значение апериодической составляющей тока может быть определено аналитически (в относительных единицах или единицах физических величин):

$$I_{a\,max} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{I_{a2}^2 + I_{a3}^2 + i_{a2}I_{a3}},$$

где i_{a3} – начальное наибольшее абсолютное значение апериодической составляющей тока (то есть вне зависимости от знака), полученное в результате испытания;

I_{a2} – начальное абсолютное значение апериодической составляющей тока в любой из двух других фаз.

По осциллограмме тока в цепи возбуждения при внезапном коротком замыкании обмотки якоря следует определять зависимость периодической составляющей тока от времени как полуразность ординат верхней и нижней огибающих осциллограммы тока в обмотке возбуждения и строить ее в полулогарифмических координатах. Начальное значение тока периодической составляющей определяют экстраполяцией полученной кривой на момент короткого замыкания.

41 Определение параметров из опыта внезапного трехфазного короткого замыкания

Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. 7) определяют из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания как отношение напряжения холостого хода, измеренного непосредственно перед коротким замыканием *U(0),* к начальному значению периодической составляющей тока короткого замыкания за вычетом сверхпереходной составляющей (рисунок 9):

$$X'_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}\left[I(\infty) + \Delta I'_k(0)\right]}\ \text{Ом};\quad \left[x'_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0)}\right].$$

41.1 Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. 8) следует определять из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания как отношение напряжения холостого хода, измеренного непосредственно перед коротким замыканием, к начальному значению периодической составляющей тока короткого замыкания, определенному из анализа осциллограммы (рисунок 9):

$$X''_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}\left[I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)\right]}\ \text{Ом};\quad \left[x''_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0) + \Delta i''_k(0)}\right].$$

41.2 Переходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря (см. 18 и 18.1), определенная из опыта внезапного трехфазного короткого замыкания, – это время, в течение которого разность переходного тока якоря и тока, обусловленного остаточным напряжением машины, уменьшается до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ своего первоначального значения при номинальной частоте вращения (см. также 40 b)).

41.3 Сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря (см. 19 и 19.1) – это время, в течение которого сверхпереходная составляющая тока якоря уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ от своего первоначального значения при номинальной частоте вращения.

41.4 Постоянная времени апериодической составляющей тока якоря (см. 20) – это время, в течение которого периодическая составляющая тока в цепи возбуждения уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ своего первоначального значения при номинальной частоте вращения.

41.5 Постоянная времени апериодической составляющей тока якоря (см. 20) от уменьшения апериодических составляющих тока якоря в каждой фазе определяют как время, необходимое для того, чтобы эти составляющие уменьшились до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ своего первоначального значения. Любая фаза, начальная апериодическая составляющая которой меньше 0,4 от максимального найденного начального значения, не должна учитываться при определении постоянной времени апериодической составляющей тока якоря.

Определение постоянной времени апериодической составляющей тока якоря с учетом уменьшения апериодических составляющих тока якоря допустимо только при условии, что ток якоря измерен во время опыта внезапного короткого замыкания с помощью неиндуктивных шунтов.

41.6 Наибольший возможный ударный ток внезапного трехфазного короткого замыкания следует определять как сумму периодической и апериодической составляющих через 0,5 периода после момента короткого замыкания.

Значение периодической составляющей для этого момента времени определяют как сумму установившегося тока внезапного короткого замыкания, переходной и сверхпереходной составляющих этого тока.

Последние две составляющие необходимо брать из графика (рисунок 9) для соответствующего момента времени.

Значение апериодической составляющей определяют по формуле (в относительных единицах или единицах физических величин):

$$i_a = i_{a\,max} \cdot e^{-\frac{0,5}{f \cdot \tau_a}},$$

где $i_{a\,max}$ – наибольшее возможное значение апериодической составляющей тока внезапного короткого замыкания;

e – основание натуральных логарифмов;

τ_a – постоянная времени апериодической составляющей тока (см. 20);

f – частота, Гц ($\frac{0,5}{f}$ соответствует полупериоду).

42 Испытание методом восстановления напряжения

Испытание методом восстановления напряжения производят после отключения установившегося трехфазного короткого замыкания при условии, что испытуемая машина вращается с номинальной частотой при замкнутой накоротко обмотке якоря.

Испытуемая машина должна вращаться при замкнутой накоротко обмотке якоря, при этом ток возбуждения необходимо устанавливать соответствующим линейной части характеристики холостого хода, которая, как правило, соответствует напряжению, не превышающему 0,7 номинального при отключенном коротком замыкании в установившемся состоянии в момент отключения.

Значения, полученные в результате этого испытания, будут соответствовать ненасыщенному состоянию машины. Требования к системе возбуждения аналогичные приведенным в 40.

Отключение установившегося трехфазного короткого замыкания следует производить практически одновременно во всех трех фазах с расхождением по углу в момент гашения дуги в пределах 180 электрических градусов. Во время испытания необходимо производить осциллографирование линейных напряжений и тока якоря во всех фазах.

Разность установившегося и восстанавливающегося напряжений, определяемую по их амплитудам, следует наносить на график зависимости от времени в полулогарифмических координатах, а затем экстраполировать на момент отключения короткого замыкания (рисунок 12, кривая 1).

Экстраполяция прямолинейной части кривой 1 на ось ординат дает начальное значение переходной составляющей напряжения $\Delta u'(0)$.

Разность между напряжением, определяемым кривой 1, и переходной составляющей напряжения $(\Delta u')$ дает значение сверхпереходной составляющей напряжения $(\Delta u'')$.

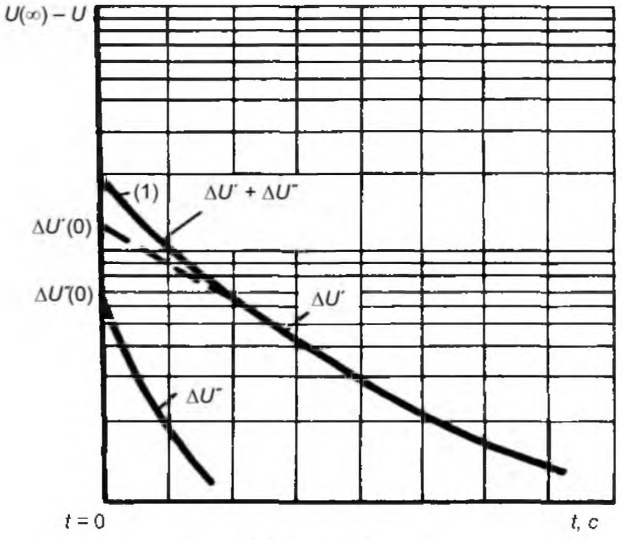


Рисунок 12

43 Определение параметров методом восстановления напряжения

Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. 7) определ ɔдом восстановления напряжения как отношение разности между установившемся напряжением $u(\infty)$ и начальным значением переходной составляющей напряжения $\Delta u'(0)$ к току якоря (i_k), измеренному непосредственно перед отключением короткого замыкания (рисунок 12).

$$X'_d = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3} I_k} \text{Ом}; \quad \left[x'_d = \frac{u(\infty) - \Delta u'(0)}{i_k} \right].$$

43.1 Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. 8) определяют методом восстановления напряжения как отношение разности между установившемся напряжением $u(\infty)$ и суммой начальных значений переходной $\Delta u'(0)$ и сверхпереходной $\Delta u''(0)$ составляющих напряжения к току якоря (i_k), измеренному непосредственно перед отключением короткого замыкания (рисунок 12).

$$X''_d = \frac{U(\infty) - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{\sqrt{3} I_k} \text{Ом}; \quad \left[x''_d = \frac{u(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{i_k} \right].$$

43.2 Переходную постоянную времени по продольной оси (см. 17) определяют методом восстановления напряжения как время, в течение которого переходная составляющая напряжения $\Delta u'$ уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ от своего первоначального значения.

44 Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора и при произвольном положении ротора

Испытание проводят при подключении к двум любым линейным выводам обмотки якоря источника переменного тока пониженного напряжения номинальной частоты.

Обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко. Длительность приложения напряжения следует ограничить во избежание перегрева частей ротора.

Медленно поворачивая ротор, следует найти его положения, в которых ток в обмотке возбуждения имеет максимальное и практически нулевое значение. Первое положение соответствует продольной оси, второе – поперечной. В этих положениях необходимо измерить приложенное напряжение, ток в обмотке якоря и потребляемую мощность. Ток возбуждения определяют для оценки положения ротора (продольная или поперечная ось), поэтому для его измерения необходимо применять оборудование, имеющее не обязательно высокую точность.

Если испытание не может быть выполнено при номинальном токе или номинальном напряжении, то для определения параметров, соответствующих пусковым условиям или ненасыщенному состоянию машины, следует проводить несколько испытаний при различных значениях приложенного напряжения (от 0,2 до 0,7 u_n).

По полученным значениям строится зависимость определяемого параметра от приложенного напряжения или тока в обмотке якоря, и значение определяемого параметра определяется экстраполяцией.

Для машин с закрытыми или полузакрытыми пазами обмотки якоря или закрытыми пазами успокоительной обмотки приложенное напряжение должно быть не ниже 0,2 номинального.

45 Определение параметров методом питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора и при произвольном положении ротора

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси (см. раздел 8) определяют по формуле

$$X''_d = \sqrt{Z''^2_d - R''^2_d}\ \text{Ом},$$

где

$$Z''_d = \frac{U}{2I}\ \text{Ом};\quad R''_d = \frac{P}{2I^2}\ \text{Ом};$$

$$\left[x''_d = \sqrt{z''^2_d - r''^2_d};\ z''_d = \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{u}{i};\ r''_d = \frac{3}{2}\cdot\frac{p}{i^2} \right].$$

Значения напряжения *U,* тока *I* и мощности *P* должны быть измерены при таком положении ротора, когда ток в обмотке возбуждения максимален.

45.1 Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси (см. 9) при питании от внешнего источника следует определять по 45 по тем же формулам, в которых индекс «d» необходимо заменить индексом «q». Напряжение, ток и мощность должны измеряться при положении ротора, при котором ток в обмотке возбуждения равен нулю.

46 Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора

Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника питания производят при поочередном подключении каждых двух линейных выводов обмотки якоря испытуемой машины к источнику переменного тока.

Обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко. Испытание следует производить при неизменном положении ротора для всех трех измерений.

При необходимости ротор должен быть заторможен. Длительность приложения напряжения должна быть ограничена, чтобы избежать перегрева ротора.

При подключении каждой пары выводов измеряют приложенное напряжение, ток и мощность в цепи якоря и ток в обмотке возбуждения.

Условия получения значений параметров, соответствующих ненасыщенному и насыщенному состоянию машины – аналогичные 44.

47 Определение параметров методом питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора

Определение сверхпереходного индуктивного сопротивления методом питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора производят следующим образом.

По данным испытаний, следует вычислять индуктивные сопротивления между каждой парой линейных выводов обмотки якоря x_{12}, x_{23} и x_{31} по формулам, приведенным в 45 (заменяя нижний индекс «d» индексами 12, 23 и 31 в соответствии с выводами, к которым прикладывают напряжение).

Сверхпереходное индуктивное сопротивление (в единицах физических величин или относительных единицах) определяют по формуле

$$x''_d = x_{med} \pm \Delta x;$$

где

$$x_{med} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3};$$

$$\Delta x = \frac{2}{3}\sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}.$$

Определение знака перед Δx производят следующим образом: плюс (+) – если максимальному из трех измеренных индуктивных сопротивлений якоря соответствует максимальное из трех значений тока в цепи возбуждения; минус (–) – если максимальному из трех измеренных индуктивных сопротивлений якоря соответствует минимальное из трех значений тока в цепи возбуждения.

47.1 Определение сверхпереходного индуктивного сопротивления по поперечной оси – по разделу 47.

Определение знака перед Δx производят следующим образом: плюс (+) – если максимальному из трех измеренных индуктивных сопротивлений якоря соответствует минимальное из трех значений тока в цепи возбуждения; минус (–) – если максимальному из трех измеренных индуктивных сопротивлений якоря соответствует максимальное из трех значений тока в цепи возбуждения.

48 Метод продолжительного двухфазного короткого замыкания

При проведении испытания методом продолжительного двухфазного короткого замыкания любые две фазы замыкают накоротко с нейтралью (рисунок 13) на машине, вращающейся с номинальной частотой с помощью пускового двигателя.

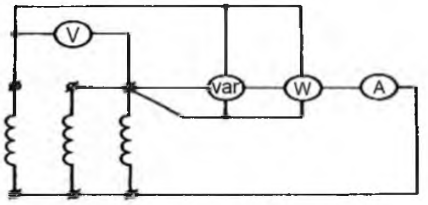


Рисунок 13

При проведении испытаний измеряют ток короткого замыкания I_{k2}, ток возбуждения и напряжение U_{k2} между выводом разомкнутой фазы и нейтралью.

Для увеличения точности измерений при наличии гармонических составляющих рекомендуется измерять активную P и реактивную мощность Q.

Измерения производят при нескольких значениях тока короткого замыкания.

Во избежание чрезмерного перегрева частей ротора длительность опыта продолжительного двухфазного короткого замыкания при токах выше $0{,}3I_n$ ограничивают временем, необходимым для снятия показаний приборов.

Для явнополюсных машин ток может быть доведен до номинального значения, если при этом вибрация машины не превышает допустимого значения. У неявнополюсных машин ток якоря, как правило, должен быть ограничен $0{,}5I_n$.

49 Определение параметров методом продолжительного двухфазного короткого замыкания

Индуктивное сопротивление обратной последовательности (см. 10) методом продолжительного двухфазного короткого замыкания определяют по формулам:

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} I_{k2}^2} \text{ Ом}; \quad \left[x_2 = \sqrt{3} \frac{p}{i_{k2}^2} \right].$$

Эта формула применяется, когда основные гармоники можно не принимать во внимание.

$$X_2 = \frac{U^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ Ом}; \quad \left[x_2 = \frac{u^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right].$$

Эта формула применяется, когда основные гармоники необходимо принимать во внимание.

Индуктивное сопротивление обратной последовательности определяют при нескольких значениях тока короткого замыкания. По полученным экспериментальным данным X_2 строят кривую тока.

Примечание – Значение X_2 определяют при номинальном значении тока, равном $\sqrt{3}$ номинального значения фазного тока.

49.1 Активное сопротивление обратной последовательности (см. 11) методом продолжительного двухфазного короткого замыкания определяют по формулам:

$$R_2 = \frac{U^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad \left[r_2 = \frac{u^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right].$$

Активное сопротивление обратной последовательности определяют при нескольких значениях тока короткого замыкания якоря. По полученным экспериментальным данным R_2 строят кривую тока.

Примечание – Значение R_2 определяют при номинальном значении тока, равном $\sqrt{3}$ номинального значения фазного тока.

50 Метод обратного чередования фаз

Метод обратного чередования фаз производят при питании машины, вращающейся с номинальной частотой от постороннего источника пониженного симметричного напряжения, равного (0,02 – 0,2)U_n с обратным чередованием фаз, т. е. в режиме электромагнитного тормоза со скольжением, равным 2.

Обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко.

Если остаточное напряжение испытуемой машины превышает 0,3 напряжения источника, то ротор машины перед испытанием следует размагнитить (см. 37). При испытаниях измеряют напряжение и ток во всех трех фазах и подведенную мощность.

51 Определение параметров методом обратного чередования фаз

Индуктивное и активное сопротивление обратной последовательности (см. разделы 10 и 11), определяют методом обратного чередования фаз по формулам

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \text{ Ом}; \quad Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3} I} \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{P}{3 I^2} \text{ Ом};$$

$$\left[x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}; \quad z_2 = \frac{u}{i}; \quad r_2 = \frac{p}{i^2} \right],$$

где P – мощность, подведенная к обмотке якоря;

I – средний измеренный ток;

U – среднее приложенное напряжение.

Индуктивное и активное сопротивления определяют для каждого значения приложенного напряжения. На основании результатов опытов строят их зависимости от тока.

52 Метод однофазного питания трех фаз

Испытание методом однофазного питания трех фаз следует производить на машине, вращающейся с номинальной частотой, при этом все три фазы обмотки якоря соединяют последовательно в разомкнутый треугольник.

Напряжение следует выбирать так, чтобы ток в обмотке якоря не превышал номинального значения. Допускается производить испытание при параллельном соединении фаз обмотки. Обмотка возбуждения замкнута накоротко.

При проведении испытания должны измеряться напряжение, ток и мощность при нескольких значениях приложенного напряжения.

53 Определение параметров методом однофазного питания трех фаз

Индуктивное и активное сопротивление нулевой последовательности (см. 12 и 13) методом однофазного питания трех фаз определяют по формулам:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}\ \text{Ом}; \quad \left[x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \right],$$

при последовательном соединении фаз обмотки:

$$Z_0 = \frac{U}{3I}\ \text{Ом}; \quad R_0 = \frac{P}{3I^2}\ \text{Ом}; \quad \left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{i}; \quad r_0 = \frac{p}{i^2} \right];$$

при параллельном соединении фаз обмотки:

$$Z_0 = \frac{3U}{I}\ \text{Ом}; \quad R_0 = \frac{3P}{I^2}\ \text{Ом}; \quad \left[z_0 = 3\sqrt{3}\,\frac{u}{i}; \quad r_0 = \frac{9p}{i^2} \right].$$

54 Метод установившегося короткого замыкания двух фаз с нейтралью

При проведении испытания методом установившегося короткого замыкания двух фаз с нейтралью обмотка якоря должна быть соединена в звезду, а две фазы замкнуты на нейтраль, машина должна вращаться с номинальной частотой (рисунок 14).

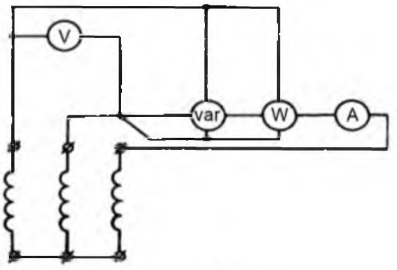


Рисунок 14

При проведении испытания машину следует возбудить и измерить напряжение между выводом разомкнутой фазы и нейтралью (U_0) и ток, протекающий в перемычке от замкнутых накоротко выводов к нейтрали (I_0).

Для увеличения точности измерений при наличии гармонических составляющих рекомендуется измерять активную и реактивную мощность.

Измерения следует производить при нескольких значениях тока в нейтрали. Значение тока и длительность проведения испытания должны быть ограничены из условий нагревания ротора или возникновения вибрации.

55 Определение параметров методом установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности (см. 12) методом установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль определяют по формулам:

$$X_0 = \frac{U_0}{I_0}\ \text{Ом}; \qquad \left[x_0 = \frac{3u_0}{i_0} \right]$$

Эта формула применяется, когда основные гармоники могут не приниматься во внимание.

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2}\ \text{Ом}; \qquad \left[x_0 = \frac{u_0^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \right].$$

Эта формула применяется, когда основные гармоники должны приниматься во внимание,

где U, P и Q являются измеренными значениями напряжения, активной и реактивной мощности соответственно.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности рассчитывают при нескольких значениях тока в нейтрали. По полученным данным X_0 строят его зависимость от тока в нейтрали.

Примечание – Значение X_0 определяют при токе в нейтрали, равном трехкратному номинальному фазному току.

55.1 Активное сопротивление нулевой последовательности (см.13) методом установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль определяют по формулам:

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2}\ \text{Ом}; \qquad \left[r_0 = \frac{u_0^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \right].$$

По полученным значениям строят зависимость R_0 от тока в нейтрали.

Примечание – Непредельное значение R_0 следует определять экстраполяцией полученной зависимости на ток в нейтрали, равный трехкратному номинальному току.

56 Измерение сопротивления при постоянном токе методом вольтметра и амперметра или методом моста

Для измерения сопротивления при постоянном токе методом вольтметра и амперметра или методом моста в качестве источника питания измерительной схемы может использоваться источник постоянного напряжения (батарея, генератор, и т. д.).

Сопротивление должно измеряться непосредственно на выводах обмоток при неподвижном роторе.

Сопротивление обмотки якоря должно быть измерено для каждой фазы отдельно. Если по каким-либо причинам фазовое сопротивление не может быть измерено непосредственно, то измерения должны производиться между каждой парой выводов обмотки якоря.

Значение постоянного тока при измерении сопротивления обмотки должно быть таким, чтобы адиабатное повышение температуры измеряемой обмотки за время измерения не превышало 1 К.

Скорость адиабатного повышения температуры (в градусах в секунду) определяют по формуле

$$\Delta\vartheta = \frac{j^2}{c}$$

где j – плотность тока в обмотке при измерении, в А/мм^2;

c – константа, равная 200 для медных обмоток, и 86 – для алюминиевых обмоток.

Если невозможно рассчитать адиабатное повышение температуры измеряемой обмотки, то значение тока при измерении не должно превышать 10 % номинального тока данной обмотки, а продолжительность его протекания – 1 мин.

Время измерений должно быть таким, чтобы в момент снятия показаний измерительных приборов их значения были установившимися (то есть чтобы отсутствовали переходные процессы как в измерительных приборах, так и в обмотках, сопротивления которых измеряются).

Для измерения температуры следует применять заложенные или встраиваемые измерители температуры.

Термометры и термопары, используемые при измерении температуры обмотки, должны быть встроены в машину не позднее чем за 15 мин до начала измерения и защищены от любого внешнего воздействия.

57 Определение сопротивления обмотки при постоянном токе методом вольтметра и амперметра или методом моста

Измерение сопротивления якоря или обмотки возбуждения при постоянном токе методом вольтметра и амперметра рекомендуется проводить при трех – пяти различных установившихся значениях тока.

Сопротивление обмотки определяют по формулам:

$$R = \frac{U}{I} \text{ Ом};$$

$$\left[r = 3 \cdot \frac{u}{i} \right] - \text{ для обмотки возбуждения,}$$

где U – напряжение, прикладываемое к обмотке, В;

I – ток в обмотке, А.

В качестве значения сопротивления принимают среднее значение. При определении среднего значения принимаются результаты измерений сопротивления, которые отличаются не более чем на ± 0,01 от среднего значения.

Если сопротивление измерено между каждой парой выводов обмотки якоря, то сопротивление R_1 фазы 1 рассчитывают по формуле (в единицах физических величин или относительных единицах):

– при соединении фаз в звезду

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2} \text{ Ом};$$

– при соединении фаз в треугольник

$$R_1 = \frac{2R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2} \text{ Ом},$$

где R_{12}, R_{23} и R_{31} – сопротивления, измеренные соответственно между выводами 1 – 2, 2 – 3 и 3 – 1.

57.1 При измерении сопротивления обмотки якоря методом моста измерения должны производиться не менее трех раз – каждый раз после нарушения равновесия моста. Сопротивление должно быть измерено на контактных кольцах или выводах обмотки таким образом, чтобы сопротивление щеток и их контактов не оказывали влияния.

В качестве значения сопротивления принимают среднее значение. При определении среднего значения принимаются результаты измерений сопротивления, которые отличаются не более чем на ± 0,01 от среднего значения.

Если сопротивление измерено между каждой парой выводов обмотки якоря, то сопротивление фаз рассчитывают в соответствии с 57.

58 Метод гашения поля при разомкнутой обмотке якоря

Испытание методом гашения поля при разомкнутой обмотке якоря производят на машине, приводимой во вращение пусковым двигателем с номинальной частотой путем внезапного замыкания накоротко обмотки возбуждения. В тех случаях, когда это необходимо, источник питания обмотки возбуждения должен быть отключен за время не более 0,02 с после замыкания обмотки возбуждения.

Для ограничения тока короткого замыкания источника питания обмотки возбуждения рекомендуется последовательно с ним вводить добавочное сопротивление.

Во время испытания осциллографируют напряжение якоря и ток в обмотке возбуждения и напряжение на контактных кольцах. Последние служат для точного определения момента начала гашения поля и напряжения якоря, соответствующее этому моменту, которое принимают за исходное.

Разность напряжения якоря, полученного из осциллограммы и остаточного напряжения машины для различных моментов времени, строят на графике в полулогарифмических координатах.

59 Определение τ'_{do} методом гашения поля при разомкнутой обмотке якоря

Переходную постоянную времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря (см. 17) определяют методом гашения поля как время, в течение которого разность напряжения, приведенного в 58, уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ от своего первоначального значения.

60 Метод гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря

Испытание методом гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря производят на машине, приводимой во вращение пусковым двигателем с номинальной частотой путем внезапного замыкания накоротко обмотки возбуждения при номинальном токе якоря. Ограничение продолжительности и тока короткого замыкания источника питания обмотки возбуждения производят в соответствии с разделом 58.

При проведении испытания осциллографируют ток в одной из фаз обмотки якоря и ток в цепи возбуждения или напряжение на контактных кольцах.

Разность переходного тока якоря, полученного из осциллограммы, и тока, обусловленного остаточным напряжением машины для различных моментов времени, строят на графике в полулогарифмических координатах.

61 Определение τ'_{d} методом гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря

Переходную постоянную времени по продольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря (см. 18) методом гашения поля определяют как время, в течение которого разность напряжения, упомянутого в разделе 60, уменьшится до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения.

62 Испытание подвешенного ротора методом крутильных колебаний

Для проведения этого испытания ротор должен быть подвешен на одной или двух параллельных струнах таким образом, чтобы его ось находилась в вертикальном положении. Поворачивая ротор, провоцируют возникновение самовозбуждения вокруг оси вала. Измеряют время, необходимое для осуществления нескольких процессов самовозбуждения и рассчитывают среднее время периода самовозбуждения.

Для условия самовозбуждения с одной струной испытание следует проводить два раза – сначала только с ротором, а затем с ротором, когда к нему присоединены маховик или шкив.

Однонаправленный угол смещения при испытании с одной струной не должен превышать 45° – с двумя струнами – 10°.

63 Определение τ_J и H методом крутильных колебаний

Время ускорения (см. 21) и постоянную накопленной энергии (см. 22) методом крутильных колебаний определяют по формулам:

$$\tau_J = \frac{J\omega^2}{P_n} \cdot 10^{-3}\, c,$$

$$H = \frac{J\omega^2}{2S_n} 10^{-3}\, c.$$

Переменные в формулах выражены в единицах СИ.

J – момент инерции, кг/м^2;

ω – $\frac{\pi n}{30}$, рад/с;

n – номинальная частота вращения, об./мин;

P_n – номинальная активная мощность, кВт;

S_n – номинальная полная мощность, кВ · А.

Момент инерции (J, кг · м^2), когда ротор подвешен на одной струне, рассчитывают по формуле

$$J = J_p \frac{T^2}{T_p^2 - T^2},$$

на двух струнах – по формуле

$$J = \frac{T^2 \cdot a^2}{L} \cdot \frac{mg}{(4\pi)^2},$$

где J – момент инерции шкива, кг/м^2;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

T – время одного цикла колебаний ротора, с;

T_n – время одного цикла колебаний ротора вместе со шкивом или маховиком, с;

a – расстояние между точками крепления, м;

L – длина струны, м;

m – масса ротора, кг.

64 Метод вспомогательного маятника

Для проведения испытания вспомогательный маятник (масса, расположенная в конце рычага) расположен в плоскости под прямым углом к валу машины, размещенной горизонтально. Масса маятника, которая известна, должна быть как можно меньше. Вместо вспомогательного маятника известная масса может быть приложена в окружности ротора или шкива.

Вспомогательный маятник расположен под углом приблизительно 5° от его установившегося положения. Время одного колебания измеряют.

Это испытание рекомендуется для машин, снабженных шариковыми или роликовыми подшипниками.

65 Определение τ_J и H с помощью испытания вспомогательного маятника

Время разгона (см. 21) и постоянную накопленной энергии (см. 22) во время дополнительного испытания маятником рассчитывают по формуле, приведенной в 63.

Момент инерции рассчитывают по формуле

$$J = m_p L \left(\frac{T_p^2 g}{4\pi^2} - L \right) кг \cdot м^2,$$

где m_p – масса вспомогательного маятника, кг,

L – расстояние от центра вала до центра тяжести маятника или до центра тяжести массы, приложенной в окружности ротора или шкива, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

T_p – время одного цикла колебания, с.

66 Испытание самоторможением без нагрузки

Испытание самоторможением проводится, когда отсутствует дополнительная масса маховика на валу машины во время испытания. Машина возбуждается от отдельного источника, и возбуждение остается постоянным в течение испытания.

Машина во время испытания разгоняется до максимальной частоты вращения увеличением частоты электропитания или с помощью пускового двигателя, с которым сцеплена; после этого электропитание отключается.

Суть этого метода состоит в измерении времени запаздывания, когда машина тормозится между двумя заданными скоростями с разностью $\Delta\omega$, или от 1,10 до 0,9 относительных единиц, или от 1,05 до 0,95 относительных единиц.

67 Определение τ_J и H с помощью испытания самоторможением без нагрузки

Время разгона машины (см. 21) и постоянную накопленной энергии (см. 22) с помощью испытания самоторможением без нагрузки определяют по формулам:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{mech} + P_{Fe}}{P_n} c;$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \frac{P_{mech} + P_{Fe}}{S_n} c,$$

где P_{mech} – механические потери при номинальной частоте вращения, кВт,

P_{Fe} – потери в сердечнике при номинальной скорости и соответствующие величине испытательного напряжения, кВт;

P_n – номинальная активная мощность, кВт;

ω_n – номинальная угловая скорость, в радианах в секунду;

S_n – номинальная кажущаяся мощность, кВ · А.

68 Испытание при нагрузке самоторможением машины, механически соединенной с синхронной машиной, работающей как двигатель

Испытание проводится с машиной, работающей как двигатель при нагрузке. Частота вращения перед отключением от сети должна быть равна номинальной частоте вращения. Подводимая мощность перед отключением должна быть не меньше чем 0,6 от номинальной мощности; коэффициент мощности должен быть близок к единице. Возбуждение машины в течение всего испытания постоянно.

После отключения источника электропитания определяется изменение частоты вращения в течение первых нескольких секунд.

Составляется график зависимости скорости от времени и откладывается касательная от исходного положения кривой. Эта касательная используется для определения изменения скорости $\Delta\omega$ для временного интервала Δt.

69 Определение τ_J и H методом самоторможения при нагрузке для механически соединенной машины с синхронной машиной, работающей как двигатель

Время разгона (см. 21) и постоянную накопленной энергии (см. 22) машины методом самоторможения при нагрузке для механически соединенной машины с синхронной машиной, работающей как двигатель, определяют по формулам:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1 - (P_{str} + P_{cu})}{P_n} c;$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1 - (P_{str} + P_{cu})}{S_n} c,$$

где P_1 – мощность, подаваемая на двигатель непосредственно перед отключением от сети, кВт;

$P_{str} + P_{cu}$ – потери в обмотке якоря (паразитные и в меди) непосредственно перед отключением, кВт;

ω_n – номинальная угловая скорость, рад/с.

Этот метод определения не очень точен.

70 Ускорение после испытания методом снятия нагрузки с машины, работающей как генератор

Испытание проводится с машиной, работающей как генератор, который запускает пусковой двигатель.

Перед испытанием нагрузку генератора устанавливают от 0,1 до 0,2 от номинальной нагрузки (коэффициент мощности устанавливают близким к единице), регулятор скорости пускового двигателя выведен из работы.

Возбуждение генератора в течение испытания должно быть постоянно. После внезапного отключения генератора от сети строится график зависимости изменения частоты вращения от времени. На частоте вращения приблизительно от 1,07 до 1,1 от номинальной величины подключается регулятор пускового двигателя. Строится график кривой ускорения.

Проводят касательную к кривой ускорения в точке, соответствующей номинальной частоте вращения машины, и определяют изменение скорости для конкретного временного интервала.

71 Определение τ_J и H механически соединенных машин в зависимости от ускорения после испытания методом снятия нагрузки с машины, работающей как генератор

Время разгона машины и ее пускового двигателя (см. 21) и постоянную накопленной энергии (см. 22) в зависимости от ускорения после испытания методом снятия нагрузки с машины, работающей как генератор, определяют по формулам:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1}{P_n} c;$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1}{S_n} c,$$

где P_1 – мощность, выдаваемая генератором непосредственно перед отключением от сети, кВт.

Этот метод определения не очень точен.

72 Определение параметров с помощью вычислений с использованием известных значений, полученных при испытаниях

Параметры x'_d, x_d, τ'_{do} взаимосвязаны друг с другом следующим соотношением:

$$x_d \cdot \tau'_d = x'_d \cdot \tau'_{do}.$$

Это соотношение используется для определения x'_d, или τ'_d, или τ'_{do} при остальных известных величинах.

72.1 Реактивное сопротивление обратной последовательности X_2 (см. 10) при известных из испытаний X''_d (см. 8) и X''_q (см. 9) рассчитывают по формуле

$$X_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2}.$$

72.2 Сопротивление прямой последовательности обмотки якоря (см.16) определяют с учетом известных потерь $3I^2 R_a$ (P_{cu}) и паразитных потерь в обмотке якоря (P_{str}), измеренных при номинальном токе в соответствии с МЭК 60034-2 «Машины электрические вращающиеся. Часть 2. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин при испытаниях (исключая машины для тяговых транспортных средств)» с использованием формулы

$$R_1 = \frac{P_{cu} + P_{sup}}{3I_n^2} \text{ Ом} \quad \left[r_1 = P_{cu} + P_{sup}\right].$$

Величина R_1 соответствует температуре обмотки, при которой проводились измерения потерь.

72.3 Постоянная времени короткого замыкания якоря (см. 20) при номинальной частоте f_n, учитывая полученные при испытаниях известные значения величин X_2 (см. 10) и R_a (см. 15), рассчитывают по формуле

$$\tau_a = \frac{x_2}{2\pi f_n r_a} \text{ с.}$$

Примечание – Используют предельное значение x_2.

Таблица 1 – Методы испытаний и перекрестные ссылки

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина	Примечание
X_d	4, 27	Характеристика холостого хода и определение характеристики трехфазного короткого замыкания	25, 26	Непредельная	
K_c	5, 27.1	Характеристика холостого хода и определение характеристики трехфазного короткого замыкания	25, 26		
X_q	6, 35	Метод отрицательного возбуждения.	34	Предельная Непредельная	Предпочтительно
	37	Метод малого скольжения.	36	Непредельная	
	39	Метод нагрузки с измерением угла	38	Предельная	
X''_d	7, 41	Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание.	40	Непредельная Предельная	Предпочтительно
	43	Испытание методом восстановления напряжения	42	Непредельная	
X''_d	8, 41.1	Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание.	40	Непредельная Предельная	Предпочтительно
	43.1	Испытание методом восстановления напряжения.	42	Насыщенный	
	45	Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора и при произвольном положении ротора.	44	Непредельная (Предельная)	
	47	Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора	46	Непредельная (Предельная)	
X''_q	9, 45.1	Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника при двух положениях ротора и при произвольном положении ротора.	44	Непредельная (Предельная)	
	47.1	Испытание методом питания обмотки якоря от внешнего источника при произвольном положении ротора	46	Непредельная (Предельная)	

Продолжение таблицы 1

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина	Примечание
X_2	10, 49	Метод продолжительного двухфазного короткого замыкания	48	Непредельная	Предпочтительно
R_2	11, 49.1	Метод продолжительного двухфазного короткого замыкания.	48	Непредельная	Предпочтительно
	51	Метод обратного чередования фаз	50	Непредельная	
X_0	12, 53	Метод однофазного питания трех фаз.	52	Непредельная	Предпочтительно
	55	Метод установившегося короткого замыкания двух фаз с нейтралью	54	Непредельная	
R_0	13, 53	Метод однофазного питания трех фаз.	52	Непредельная	Предпочтительно
	55.1	Метод установившегося короткого замыкания двух фаз с нейтралью	54	Непредельная	
X_p	14, 30	Характеристика холостого хода, определение характеристики трехфазного короткого замыкания и испытания в режиме перевозбуждения при коэффициенте мощности, равным нулю	25, 26, 28		
R_a	15, 57, 57.1	Метод вольтметра и амперметра или метод моста	56		
R_f	15, 57, 57.1	Метод вольтметра и амперметра или метод моста	56		
R_1	16	Сопротивление прямой последовательности обмотки якоря	72.2		см. МЭК 60034-2
τ'_{do}	17, 59	Метод гашения поля при разомкнутой обмотке якоря.	58		Предпочтительно
	43.2	Метод восстановления напряжения	42		
τ'_{do}	18, 41.2	Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание.	40		Предпочтительно
	61	Метод гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря	60		
τ''_d	19, 41.3	Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание	40		
τ_a	20	Испытание на внезапное трехфазное короткое замыкание	40		

Окончание таблицы 1

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина	Примечание
τ_J	21, 63	Испытание подвешенного ротора методом крутильных колебаний.	62		
	65	Метод вспомогательного маятника.	64		
	67	Испытание самоторможением без нагрузки.	66		
	69	Испытание под нагрузкой самоторможением машины, механически соединенной с синхронной машиной, работающей как двигатель.	68		
	71	Ускорение после испытания методом снятия нагрузки с машины, работающей как генератор	70		
H	22, 63	Испытание подвешенного ротора методом крутильных колебаний.	62		
	65	Метод вспомогательного маятника.	64		
	67	Самоторможение без нагрузки.	66		
	69	Испытание под нагрузкой самоторможением машины, механически соединенной с синхронной машиной, работающей как двигатель.	68		
	71	Ускорение после испытания методом снятия нагрузки с машины, работающей как генератор	70		
i_{fn}	23, 23.1	Определение номинального тока возбуждения с помощью диаграмм:			Предпочтительно
		– Потье	31		
		– ASA	32		
		– Шведской	33		
ΔU_n	24	Определение номинального тока возбуждения с помощью	25, 31		
	24.1	диаграмм без нагрузки и известным i_{fn}	32, 33		

Приложение А

Нестандартизованные методы испытаний для определения параметров синхронных машин при испытаниях

А1 Область распространения

Настоящее приложение относится к трехфазным синхронным машинам мощностью от 1 кВ · А и более с номинальной частотой не более 500 Гц и не менее 10 Гц.

Методы испытаний не распространяются на специальные синхронные машины типа машин с постоянными магнитами, асинхронные машины, и т. д. Испытания также применяются к бесщеточным машинам, модели которых существуют, и должны быть приняты специальные меры предосторожности.

А2 Цель

Целью настоящего приложения является изучение дальнейших методов определения характеристик и величин для трехфазных синхронных машин при испытаниях.

Это не означает, что приложение должно распространяться на какое-либо или все испытания, описанные для любой машины. Особые испытания, которые будут выполняться, должны быть подчинены специальному соглашению. Они дополняют испытания, рекомендованные разделом 4.

В этом приложении приводится также несколько методов испытаний для получения характеристик и величин, дополнительных к тем, которые уже приводились в настоящем стандарте.

Заинтересованным в изучении методов, упоминаемых ниже, полностью или частично, или тем, кто хотел бы ввести какие-либо новые методы, необходимо иметь в виду результаты, полученные этими новыми методами в сравнении с соответствующими известными, простоту испытательной характеристики и непротиворечивость полученного результата. Также желательно определить методы, которые дают самые точные результаты для каждой из задач, для которых определяются величины или характеристики.

Любую информацию относительно сравнения результатов испытаний, выполненных согласно этому приложению, и общепринятых методов, необходимо посылать в Секретариат Подкомитета 2G для дальнейшего обобщения и рассылки Национальным комитетам, чтобы облегчить изучение новых методов и выработать рекомендации.

Такая информация не является обязательной, и авторы могут издать результаты их исследований в любом желаемом виде (периодические технические журналы, книги, и т. д.).

А3 Общие положения

Общие требования и условия для экспериментального изучения, оборудования и конфигурации цепей синхронных машин те же, что и в разделе 2.

А3.1 Расчет большинства величин и экспериментальные методы их определения, которые приведены в этом приложении, соответствуют широко известной теории синхронных машин с двумя осями, в основном для подраздела 3.6, с заменой всех цепей, дополнительных к обмотке возбуждения, и стационарных относительно их цепей, двумя схемами замещения: одной – вдоль продольной оси и другой – вдоль поперечной оси с учетом приблизительного сопротивления якоря. Опыт показывает, что, как правило для машин с массивным ротором, ограничение количества цепей, особенно по поперечной оси, препятствует экспериментальному определению величин и делает результаты аналитических расчетов синхронных машин при кратковременных асинхронных состояниях, отличающимися от их фактической характеристики при реальной работе. Кроме того, синхронные машины с обмотками возбуждения по продольной и поперечной осями используются на практике.

Вследствие этого, две и больше эквивалентные схемы ротора для каждой из двух осей (продольной и поперечной) также рассматривают в этом приложении. Например, переходная реактивность поперечной оси и постоянные времени переходного процесса поперечной оси вводятся для того, чтобы представить дополнительную эквивалентную цепь ротора по поперечной оси; при определении значений по частотной характеристике можно принять во внимание больше чем две эквивалентные цепи ротора вдоль продольной и поперечной осей.

A4 Ток возбуждения, соответствующий номинальному току короткого замыкания якоря (i_{fk})

Ток в обмотке возбуждения, когда машина работает при номинальной частоте вращения и устойчивом номинальном токе якоря, обмотка (первичная) якоря замкнута накоротко.

A4.1 Ток возбуждения для номинального состояния якоря и продолжительного тока короткого замыкания может быть определен в дополнение к методу, внесенному в список в 27, при испытании перевозбуждением при нулевом коэффициенте мощности и переменном напряжении обмотки (первичной) якоря (см. A25 и A26).

A5 Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси X_d

Для определения синхронного реактивного сопротивления по продольной оси см. 4.

A5.1 Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси X_d, соответствующее ненасыщенному состоянию может быть определено в дополнение к методу, описанному в подразделе 4.1, с помощью испытания фазовым сдвигом (см. A27 и A28).

A6 Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси X_q

Для определения синхронного реактивного сопротивления по поперечной оси см. 6.

A6.1 Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси X_q, соответствующее ненасыщенному состоянию, может быть определено в дополнение к методам, описанным в 6.1, одним из следующих методов:

a) испытание фазовым сдвигом (см. A27 и A28);

b) снятие прикладываемого к якорю низкого напряжения при очень низком скольжении (см. A29 и A30);

c) снятие прикладываемого к якорю низкого напряжения при асинхронной работе машины при нагрузке (см. A31 и A32);

d) уменьшение постоянного тока до отключения (см. A59 и A60).

A7 Переходное реактивное сопротивление по продольной оси X'_d

Для определения переходного реактивного сопротивления по продольной оси см. 7.

A7.1 Переходное реактивное сопротивление по продольной оси может быть определено в дополнение к методам, описанным в 7.1, методом затухания постоянного тока до отключения (см. A59 и A60).

A8 Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси X'_q

Отношение внезапно изменяющейся начальной величины переменного напряжения якоря для основной составляющей переменного тока, которая получается под действием полного потока по поперечной оси, и величины одновременно изменяющейся основной составляющей переменного тока якоря по поперечной оси при работе машины при номинальной частоте вращения и быстрозатухающей составляющей в течение первых циклов.

A8.1 Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси определяется следующими методами:

a) отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при очень низком скольжении (см. A29 и A30);

b) отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при работе машины в асинхронном режиме под нагрузкой (см. A31 и A32);

c) внезапное короткое замыкание машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении (см. A33 и A34);

d) затухание постоянного тока до отключения (см. A59 и A60).

A9 Сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси X''_q

Для определения сверхпереходного реактивного сопротивления по поперечной оси см. 9.

A9.1 Сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси может быть определено в дополнение к методам, описанным в 45.1, одним из следующих методов:

a) отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при очень низком скольжении (см. A29 и A30);

b) отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при работе машины в асинхронном режиме под нагрузкой (см. A31 и A32);

c) внезапное короткое замыкание при работе машины под нагрузкой при низком напряжении (см. A33 и A34).

A10 Реактивное сопротивление обратной последовательности X_2

Для определения сопротивления обратной последовательности см. 10.

10.1 Сопротивление обратной последовательности в дополнение к методам, описанным в 11.1, может быть определено следующими методами:

a) внезапное междуфазное короткое замыкание (см. A35 и A36);

b) затухание постоянного тока до отключения (см. A59 и A60).

A11 Реактивное сопротивление рассеяния ротора X_σ

Отношение основной реактивной составляющей напряжения якоря к потоку рассеяния обмотки якоря относительно цепи ротора и основной составляющей тока якоря машины, работающей при номинальной частоте вращения.

A11.1 Реактивное сопротивление рассеяния ротора может быть определено методом приложения симметричного трехфазного напряжения к обмотке якоря со снятым ротором (см. A39 и A40).

A12 Исходное сопротивление при запуске синхронных двигателей Z_{st}

Отношение приложенного к якорю напряжения к устойчивому среднему току якоря застопоренной машины.

12.1 Исходное сопротивление при запуске машины может быть определено непосредственно с помощью испытания блокированного ротора (см. A41 и A42).

В случаях, когда сопротивлением якоря переменному току, которое учитывает положительные потери фазовой последовательности в роторе, можно пренебречь, исходное сопротивление при запуске можно вычислять как приблизительно равное половине суммы сверхпереходных сопротивлений по продольной и поперечной осям.

A13 Кратковременная постоянная времени по продольной оси при холостом ходе τ'_{d0}

Для определения постоянной времени по продольной оси см. 17.

13.1 Постоянная времени по продольной оси при кратковременном холостом ходе может быть определено в дополнение к методам определения, описанным в подразделе 17.1, следующими методами:

a) внезапно прикладываемое возбуждение с разомкнутой обмоткой якоря (см. A43 и A44);

b) затухание постоянного тока до отключения (см. A59 и A60).

A14 Кратковременная постоянная времени по продольной оси при коротком замыкании τ'_d

Для определения постоянной времени по продольной оси при кратковременном коротком замыкании см. 18.

A14.1 Постоянная времени по продольной оси при кратковременном коротком замыкании может быть определена в дополнение к методам определения, описанным в 18.1, следующими методами:

a) внезапно прикладываемое возбуждение с короткозамкнутой обмоткой якоря (см. A45 и A46);

b) затухание постоянного тока до отключения (см. A59 и A60).

А15 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном холостом ходе τ'_{q0}

Время, требуемое для медленно изменяющейся составляющей напряжения разомкнутой обмотки якоря, соответствующей потоку по поперечной оси, вследствие внезапного изменения рабочих условий, для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины, при работе машины при номинальной частоте вращения.

А15.1 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном холостом ходе может быть определена следующими методами:

a) отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низком скольжении (см. А29 и А30);

b) отключение низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой (см. А31 и А32);

c) затухание постоянного тока до отключения (см. А59 и А60).

А16 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном коротком замыкании τ'_q

Время, требуемое для медленно изменяющейся составляющей тока короткого замыкания по поперечной оси обмотки якоря вследствие внезапного изменения рабочих условий, для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины, при работе машины при номинальной частоте вращения.

А16.1 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном коротком замыкании может быть определена следующими методами:

a) внезапное короткое замыкание машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении (см. А33 и А34);

b) определение величин вычислением, используя известные значения X_q (см. 6), X'_q (см. А8) и τ_{q0} (см. 15), полученные при испытании. Вычисление проводится с использованием формулы, приведенной в А63;

c) затухание постоянного тока до отключения (см. А59 и А60).

А17 Сверхпереходная постоянная времени холостого хода по продольной оси τ''_{d0}

Время, требуемое для медленно изменяющейся составляющей, имеющей место в течение первых нескольких циклов напряжения холостого хода обмотки якоря, свободно протекающего по продольной оси вследствие внезапного изменения рабочих условий, для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины при работе машины при номинальной частоте вращения.

17.1 Сверхпереходная постоянная времени холостого хода по продольной оси может быть определена следующими методами:

a) восстановление напряжения (см. А47 и А48);

b) затухание постоянного тока до отключения (см. А59 и А60).

А18 Сверхпереходная постоянная времени холостого хода по поперечной оси τ''_{q0}

Время, требуемое для быстро изменяющейся составляющей, имеющей место в течение первых нескольких циклов тока холостого хода обмотки якоря, свободно протекающего по поперечной оси вследствие внезапного изменения рабочих условий, для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины при работе машины при номинальной частоте вращения.

18.1 Сверхпереходная постоянная времени холостого хода по поперечной оси может быть определена следующими методами:

a) отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низком скольжении (см. А29 и А30);

b) отключение низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой (см. А31 и А32);

c) затухание постоянного тока до отключения (см. А59 и А60).

А19 Сверхпереходная постоянная времени короткого замыкания по поперечной оси τ''_q

Время, требуемое для быстро изменяющейся составляющей, имеющей место в течение первых нескольких циклов тока короткого замыкания обмотки якоря, свободно протекающего по поперечной оси, вследствие внезапного изменения рабочих условий, для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины при работе машины при номинальной частоте вращения.

19.1 Сверхпереходная постоянная времени короткого замыкания по поперечной оси может быть определена следующими методами:

a) внезапное короткое замыкание машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении (см. А33 и А34);

b) определение величин вычислением с использованием известных величин X'_q (см. А8), X''_q (см. А9) и τ''_{q0} (см. А18), полученных при испытаниях. Вычисление проводится с использованием формулы, приведенной в А63;

c) затухание постоянного тока до отключения (см. А59 и А60).

А20 Постоянная времени холостого хода по продольной оси τ_{fd0}

Время, требуемое для быстро изменяющейся составляющей, имеющей место в течение первых нескольких циклов тока короткого замыкания обмотки якоря, свободно протекающего по поперечной оси, вследствие внезапного изменения рабочих условий, для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины при работе машины при номинальной частоте вращения.

А20.1 Постоянную времени холостого хода по продольной оси определяют с помощью испытания гашением поля с разомкнутой обмоткой якоря (см. А49 и А50).

А21 Постоянная времени по продольной оси в режиме холостого хода при наличии эквивалентной демпфирующей обмотки τ_{kd0}

Время, требуемое для составляющей наведенного тока эквивалентной демпфирующей обмотки для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины вследствие внезапного изменения рабочих условий в режиме холостого хода обмотки якоря и обмотки возбуждения при работе машины при номинальной частоте вращения.

А21.1 Постоянная времени по продольной оси в режиме холостого хода при наличии эквивалентной демпфирующей обмотки может быть определена с помощью испытания гашением поля с разомкнутой обмоткой якоря (см. А49 и А50).

А22 Постоянная времени по продольной оси обмотки возбуждения в режиме короткого замыкания τ_{fd}

Время, требуемое для составляющей наведенного тока обмотки возбуждения для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины вследствие внезапного изменения рабочих условий с короткозамкнутой обмоткой якоря, когда все другие цепи ротора являются разомкнутыми и машина работает при номинальной частоте вращения.

А22.1 Постоянная времени обмотки возбуждения в режиме короткого замыкания может быть определена с помощью испытания гашением поля с короткозамкнутой обмотки якоря (см. А51 и А52).

А23 Постоянная времени эквивалентной демпфирующей обмотки по продольной оси в режиме короткого замыкания τ_{kd}

Время, требуемое для составляющей наведенного тока эквивалентной демпфирующей обмотки для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины вследствие внезапного изменения рабочих условий, с короткозамкнутой обмоткой якоря при разомкнутой обмотке возбуждения и машине, работающей при номинальной частоте вращения.

А23.1 Постоянная времени эквивалентной демпфирующей обмотки по продольной оси в режиме короткого замыкания может быть определена с помощью испытания гашением поля с короткозамкнутой обмоткой якоря (см. А51 и А52).

А24 Частотные характеристики

Частотные характеристики машины – ряд характеристических кривых или аналитических выражений, связывающих полную проводимость или обратное полное сопротивление (или их составляющие) со скольжением при номинальной частоте питания, если не оговорено иное.

В этом приложении рассматривают следующие частотные характеристики:

Частотная характеристика по продольной оси в зависимости от реактивного сопротивления X_d *(js)*[1)]

Отношение, выраженное как скольжение в функции постоянной комплексной величины (вектора) фундаментальной составляющей переменного напряжения якоря, которое создается током якоря по продольной оси и комплексной величины (вектора) фундаментальной составляющей переменного тока машины, работающей при данном скольжении с короткозамкнутой обмоткой возбуждения.[1)]

Частотная характеристика по поперечной оси в зависимости от реактивного сопротивления X_q *(js)*[2)]

Отношение, выраженное как скольжение в функции постоянной комплексной величины (вектора) фундаментальной составляющей переменного напряжения якоря, которая создается якорем по поперечной оси, под воздействием потока, соответствующего току якоря по поперечной оси и комплексной величине (вектору) фундаментальной составляющей переменного тока при работе машины с данным скольжением, с короткозамкнутой обмоткой возбуждения.[1)]

Частотная характеристика для коэффициента возбуждения G (js)

Отношение постоянной комплексной величины (вектора) напряжения якоря, созданной током в обмотке возбуждения при частоте *sf,* и комплексной величины напряжения, приложенного к обмотке возбуждения машины, работающей при номинальной частоте вращения.

А24.1 Частотные характеристики могут быть определены следующими методами:

a) асинхронная работа под нагрузкой (см. А53 и А54);

b) асинхронная работа в течение испытания при низком напряжении (см. А55 и А56);

c) приложение напряжения переменной частоты в состоянии покоя (см. А57 и А58);

d) затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя (см. А59 и А60);

e) внезапное приложение постоянного тока в состоянии покоя (см. А61 и А62).

Примечание – Необходимо подчеркнуть, что установленные методы могут дать результаты, отличные от полученных на вращающихся машинах, например когда параметры демпфирующей обмотки зависят от центробежных сил.

ОПИСАНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЭТИХ ИСПЫТАНИЯХ

А25 Испытание перевозбуждением при нулевом коэффициенте мощности и переменном напряжении якоря

Испытанию подвергается машина, работающая в режиме генератора или двигателя. Активная мощность при работе машины в режиме генератора должна быть равна нулю. Нагрузка на валу при работе машины в режиме двигателя должна быть равна нулю.

В течение испытания ток обмотки якоря сохраняется постоянным и соответствующим номинальному значению, напряжение якоря отличается от номинальной величины в меньшую сторону, но не менее самого низкого значения, при котором машина остается в устойчивом состоянии. Для приемлемой точности рекомендуется, чтобы напряжение якоря было уменьшено в 0,5 раз от номинальной величины.

Должны быть приняты меры предосторожности для предотвращения перегрева обмотки возбуждения.

[1)] Вместо характеристик по продольной и поперечной оси иногда используют характеристику *X (js)* и существует несколько методов получения приближенного значения, например средней величины или средней обратной величины.

[2)] Характеристики могут быть получены с обмоткой возбуждения, замкнутой на точно установленное полное сопротивление.

A26 Определение тока возбуждения, соответствующего номинальному току якоря в режиме устойчивого короткого замыкания

Экспериментальные точки строятся на диаграмме и соединяются кривой, формируя верхнюю часть кривой при нулевом коэффициенте мощности. Там же схематически отображают кривую насыщения без нагрузки. Тогда кривая при нулевом коэффициенте мощности экстраполируется параллельно к кривой режима без нагрузки, пока не пересечется с осью абсцисс. Абсцисса этой точки представляет собой ток возбуждения, соответствующий номинальной величине тока якоря в режиме продолжительного короткого замыкания (i_{fk}).

A27 Испытание фазовым сдвигом

Испытание фазовым сдвигом проводится в соответствии с любым из следующих методов:

a) во время испытания машина работает как обыкновенный синхронный двигатель, подавая на обмотку якоря машины при испытании низкое напряжение той же частоты, что и для синхронного двигателя, работающего с фазовращателем;

b) при работе машины в режиме синхронного двигателя во время испытания с обмотками возбуждения по прямой и поперечной осям обмотка якоря запускаемой машины подсоединяется к симметричному низковольтному источнику питания той же частоты, что и для используемого синхронного двигателя.

Ток в машине при испытании изменяется в зависимости от положения оси полюса от минимальной величины X_d до максимальной величины X_q.

Изменяя от одного до любого другого положения фазовращатель [метод *a)*] или изменяя возбуждением по обеим осям синхронного двигателя [метод *b)*] максимальные и минимальные величины тока якоря, измеряют соответствующие величины напряжения, прикладываемого к клеммам машины.

Когда производятся измерения, обмотка возбуждения должна быть разомкнута. Однако обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко (или замкнута на разрядное сопротивление) для избежания возможного повреждения, если измерения не проводятся.

В методе *a)* фазовращатель должен иметь возможность сдвинуть подаваемое на якорь напряжение не меньше чем на 180 электрических градусов.

В методе *b)* мощность работающего двигателя зависит от напряжения, прикладываемого к обмотке якоря машины при испытании, которое создает вращающий момент при перемещении из одного положения в другое.

A28 Определение параметров при испытании фазовым сдвигом[1)]

Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси (см. A5), как определено при этом испытании, рассчитывают по формуле

$$X_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3} I_{min}} \text{ Ом}; \quad \left[x_d = \frac{u_{max}}{i_{min}} \right].$$

A28.1 Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. A6), как определено при этом испытании, рассчитывают по формуле

$$X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3} I_{max}} \text{ Ом}; \quad \left[x_q = \frac{u_{min}}{i_{max}} \right].$$

[1)] Если остаточное напряжение машины при испытании составляет от 0,1 до 0,3 подаваемого испытательного напряжения, поправка должна быть сделана как в 37.

А29 Отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением

Внезапное отключение прикладываемого низкого напряжения якоря в течение испытания с низким скольжением выполнено на машине, работающей при скольжении значительно меньшем чем 0,01, с первичной обмоткой якоря, подсоединенной к симметричному трехфазному низковольтному источнику питания номинальной частоты (от 0,05 U_n до 0,10 U_n). Обмотка возбуждения замкнута накоротко. При определении величин по поперечной оси обмотка возбуждения может быть разомкнута. Подаваемое напряжение внезапно отключается, когда ротор намагничен по поперечной или продольной оси. Положение ротора проверяется путем измерения внутренних углов между напряжением якоря и поперечной (или продольной) осью ротора (см. А31) или используется другой эквивалентный метод. Ток якоря и напряжение и показатели положения ротора измеряются и регистрируются.

В момент выключения машины напряжение обмотки якоря внезапно понижается до частного значения и затем постепенно затухает (рисунок А1).

Это начальное падение напряжения независит от остаточного напряжения. В определении постоянных времени, остаточное напряжение должно быть меньше чем 0,2 от подаваемого напряжения, и его необходимые значения могут не приниматься во внимание при определении постоянных времени по поперечной оси с заданной точностью. Если вышеупомянутое имеет место, ротор машины должен быть размагничен.

Напряжение якоря, определенное по осциллограмме, представляет собой график по полулогарифмической шкале в зависимости от времени (рисунок А2). Если постоянные времени по продольной оси определены, величина остаточного напряжения U (∞) вычитается из напряжения якоря и эта разность представляет собой график зависимости от времени.

Примечание 1 – Прикладываемое к обмотке якоря напряжение имеет малую величину в течение этого испытания, остаточный магнетизм должен быть точно определен по амплитуде и совпадать по фазе. Метод арифметического вычитания напряжения U (∞) неточен, потому что фазовое искажение U (∞), влияющее на U_d или U_q, может быть существенно. Точный метод представляет собой вычитание U (∞) вектора во всех точках кривой на рисунке А1. Угол сдвига фаз может быть легко определен с помощью фазового генератора на конце вала. Альтернативный метод может заключаться в полном размагничивании машины при испытании.

Примечание 2 – Для многих типов машин трудно отделить переходные и сверхпереходные составляющие напряжения по поперечной оси, потому что составляющие производной высоких порядков не могут быть отделены от остаточного члена.

Прямая часть кривой падения напряжения якоря, экстраполируемая к оси ординат, определяет составляющую переходного напряжения с начальным значением $U'(0)+U(\infty)$ (рисунок А1). Вычитание этой составляющей переходного напряжения из затухающего напряжения U позволяет определить сверхпереходную составляющую напряжения с начальным значением $U''(0)$.

А30 Определение значений при применении отключения низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением

Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А6) определяют при внезапном отключении подаваемого напряжения в течение испытания машины с низким скольжением по поперечной оси как частное разности между начальным напряжением $U(0)$ и остаточным напряжением $U(\infty)$ (см. А29, примечание 1) и тока $I(0)$ перед моментом отключения по формулам:

$$X_q = \frac{U(0)-U(\infty)}{\sqrt{3}I(0)} \text{ Ом}; \quad \left[x_q = \frac{u(0)-u(\infty)}{i(0)} \right].$$

Проверка измеренной величины может быть сделана определением X_d при этом испытании при том же скольжении, как при испытании намагниченной по продольной оси машины. Для вычисления X_d используется соответствующая формула. Величину X_q, полученную при этом испытании, можно считать точной, если величина X_d, полученная при том же испытании, соответствует величине, полученной в соответствии с 27. Иначе испытание повторяется при нескольких меньших величинах скольжения с последующей экстраполяцией величины X_q к нулевому скольжению. Величина X_q, полученная при этом испытании, соответствует непредельному значению.

А30.1 Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А8) определяется с помощью испытания с внезапным отключением подаваемого напряжения, когда испытываемая машина намагничена по поперечной оси, и выражается как отношение разности между начальным измеренным линейным напряжением $U(0)$ и начальным переходным напряжением $\Delta U'(0) + U(\infty)$ (см. А29, примечание 1) и (b) к току якоря $I(0)$ перед моментом отключения

$$X''_q = \frac{U(0) - \Delta U'(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I(0)} \text{ Ом}; \quad \left[x''_q = \frac{u(0) - \Delta u'(0) - u(\infty)}{i(0)} \right].$$

Проверка измеренной величины может быть сделана определением X'_d при этом же испытании, когда внезапное отключение подаваемого напряжения осуществляется во время намагничивания испытываемой машины по продольной оси. Величину X'_d тогда рассчитывают используя соответствующую формулу.

Значения X'_q, измеренные при испытании с внезапным отключением подаваемого напряжения, могут считаться точными, если величина X'_d, полученная при этом испытании, действительно соответствует величине, полученной в соответствии с этим стандартом. Иначе испытание повторяется при нескольких меньших величинах скольжения с последующей экстраполяцией величины X'_q к нулевому скольжению. Величина X'_q, полученная при этом испытании, соответствует непредельной величине.

А30.2 При этом испытании реактивное сопротивление сверхпереходного процесса по поперечной оси (см. А9) может быть получено (см. А29, примечание 1) как:

$$X''_q = \frac{U(0) - \Delta U'(0) - \Delta U''(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I} \text{ Ом}; \quad \left[x''_q = \frac{u(0) - \Delta u'(0) - \Delta u''(0) - u(\infty)}{i} \right].$$

Когда машина намагничена по продольной оси, в момент ее отключения сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси может быть получено используя соответствующую формулу.

А30.3 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном холостом ходе (см. А15) вычисляется при внезапном отключении подаваемого испытательного напряжения, если время, заданное для кратковременной составляющей напряжения якоря, уменьшить до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ его начальной величины. Проверка измеренной величины τ'_{q0} может быть сделана путем вычисления τ'_{d0} при том же испытании при определении X'_d. Значение τ'_{q0}, полученное при испытании с внезапным отключением подаваемого напряжения, можно считать точными, если оно соответствует величине, в соответствии с настоящим стандартом.

А30.4 Сверхпереходная постоянная времени холостого хода по поперечной оси (см.18), полученная при испытании с внезапным отключением подаваемого напряжения, это время, заданное для сверхкратковременной составляющей напряжения якоря, необходимое для ее уменьшения в $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ раз от начальной величины $\Delta U''(0)$.

Проверка величины τ''_{q0} может быть сделана подобно способу, упомянутому в А30.3, при определении τ''_{d0} при том же испытании, выполненном по продольной оси, и соответствовать величине, полученной в соответствии с настоящим стандартом.

А31 Применение испытания с отключением низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой

Испытание с отключением низкого напряжения якоря при работе машины в асинхронном режиме при нагрузке выполняют с обмоткой якоря, подключенной к симметричному трехфазному источнику низкого напряжения номинальной частоты, для избежания влияния насыщения, и обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко.

С помощью сигналов позиционирования на валу определяют составляющие тока и напряжения по прямой и поперечной осям.

Напряжение, ток и сигналы получены как следы на осциллограмме со скоростью прохождения от 2 м/с до 3 м/с.

Сигналы позиционирования установлены в соответствии с поперечной или продольной осями посредством линейного напряжения без нагрузки.

Излучатель, генерирующий сигнал позиционирования, должен быть помещен вблизи вала, пока его сигнал не совпадает с моментом, когда линейное напряжение U_{12} пройдет через ноль. В этом положении сигнал совпадет с максимумом фазного напряжения U_3, которое без нагрузки соответствует напряжению по поперечной оси (рисунок А3).

Когда машина нагружена, мгновенные значения фазного напряжения U_3 и фазного тока I_3 в момент сигнала совпадают с составляющими этого напряжения и тока по поперечной оси. Сигнал отражает также составляющую линейного напряжения U_{12} по поперечной оси.

Этим способом и напряжение по продольной оси, и ток по поперечной оси получены с одним единственным сигналом.

В основном напряжения и токи включают в себя составляющие по продольной и поперечной осям. Эти составляющие определяют из осциллограммы как показано на рисунке А4 для условий, соответствующих рисунку А5. Сигналы, соответствующие мгновенным значениям составляющих по поперечной оси проведены как сплошные линии, а те, которые соответствуют продольной оси, – как ломаные линии (они не являются необходимыми для вычислений).

После настройки регистрирующих устройств, выполняют измерения. Когда машина достигла внутреннего угла, приближающегося к 90 ± 20 электрических градусов, осциллограмма берется для линейного напряжения U_{12}, фазного тока I_3 и сигнала по поперечной оси, показывающего временной интервал, в который входит отключение. Пример приведен на рисунке А6. Перед отключением подаваемого напряжения измеряют ток $I_q(0)$ и напряжение $U_d(0)$. После отключения последовательно определяют из осциллограммы напряжения (U_{d1}, U_{d2}, U_{d3}, и т. д.). Эти напряжения, за вычетом при необходимости остаточного напряжения $U_d(\infty)$ (см. рисунок А7), составляют график зависимости на логарифмической шкале (рисунок А8) от времени и начальных кратковременных и сверхкратковременных составляющих, определенных обычным способом.

А32 Определение параметров при испытании с внезапным отключением прикладываемого низкого напряжения якоря машины, работающей в асинхронном режиме под нагрузкой

Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А6) может быть определено при испытании с внезапным отключением прикладываемого низкого напряжения, если машина при испытании приближается к $\delta = (90 \pm 20)°$, используя $U_d(0) - U_d(\infty)$ и Iq(0) (перед моментом выключения) в момент сигнала (рисунок А6).

Тогда синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси рассчитывают по формуле

$$X_q = \frac{U_d(0) - U_d(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \text{ Ом}; \quad \left[x_q = \frac{u_d(0) - u_d(\infty)}{i_q(0)} \right].$$

Проверка измеренной величины может быть сделана, определяя X_d при этом испытании при том же скольжении, когда машина при испытании намагничена по продольной оси. Соответствующая формула используется для вычисления X_d. Величину X'_q считают точной, когда величина X_d, полученная при этом испытании, соответствует значению, полученному в соответствии с разделом 27.

А32.1 Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А8) может быть определено при испытании (см. А31) как (рисунок А6):

$$X'_q = \frac{U_d(0) - \Delta U'_d(0) - U_d(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \text{ Ом}; \quad \left[x_q = \frac{u_d(0) - \Delta u'_d(0) - u_d(\infty)}{i_q(0)} \right].$$

А32.2 Сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А9) может быть определено при этом испытании (см. А31) по формуле

$$X''_q = \frac{U_d(0) - \Delta U'_d(0) - \Delta U''_d(0) - U_d(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \text{ Ом}; \quad \left[x''_q = \frac{u_d(0) - \Delta u'_d(0) - \Delta u''_d(0) - u_d(\infty)}{i_q(0)} \right].$$

А32.3 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном холостом ходе (см. А15) может быть определена при испытании с внезапным отключением подаваемого напряжения как время, заданное для кратковременной составляющей напряжения якоря по продольной оси и необходимое для ее уменьшения в $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ раз от начальной величины $\Delta U'(0)$.

А32.4 Сверхпереходная постоянная времени холостого хода по поперечной оси (см. 18) определяется при испытании с внезапным отключением подаваемого напряжения как время, заданное для сверхкратковременной составляющей напряжения якоря по продольной оси, необходимое для ее уменьшения до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины $\Delta U''(0)$.

А33 Испытание внезапным коротким замыканием машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении

Внезапное короткое замыкание машины выполняется во время работы при нагрузке с обмоткой якоря, связанной с низковольтным симметричным трехфазным источником питания номинальной частоты (около 0,1 U_n). Обмотка возбуждения замкнута накоротко.

Выбор напряжения должен осуществляться тщательно, чтобы гарантировать, что машина может нагружаться до 90 ± 20 электрических градусов, а также что никакое повреждение короткозамкнутой машины не будет иметь место. Напряжение отключается после короткого замыкания машины.

Сигналы позиционирования на валу отрегулированы так, как описано в А31. Ток по поперечной оси измеряют используя ток, совпадающий по трем фазам по времени с сигналом по поперечной оси. Напряжение по продольной оси измеряют в то же время, что и линейное напряжение U_{12}. Испытание выполняется с короткозамкнутой машиной после того, как она достигла угла, близкого к 90 электрическим градусам $(t = 0)$. Это может быть при очень низком скольжении. Величины $I_q(0)$ и $U_d(0)$ и, после короткого замыкания I_{q1}, I_{q2}, и т. д. снимаются с осциллографа, как показано на рисунке А9. График зависимости величины тока от времени по натуральному ряду (рисунок 10) может быть получен из осциллограммы; начальные величины $\Delta I'_q(0)$ и $\Delta I''_q(0)$ и изменения переходного $\Delta I'_q$ и сверхпереходного $\Delta I''_q$ токов относительно времени определены и построены на полулогарифмической шкале (рисунок А11) подобно рисунку А8).

А34 Определение параметров при испытании с внезапным коротким замыканием при работе машины при нагрузке при низком напряжении

Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А8) определяется из опыта внезапного короткого замыкания при низком напряжении, когда машина при нагрузке приближается к углу 90 электрических градусов.

Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А8) может быть определено при этом испытании (см. А33) по формулам:

$$X'_q = \frac{U_d(0)}{\sqrt{3}\left[I_q(0) + \Delta I'_q(0)\right]}\ \text{Ом}; \qquad \left[x_q = \frac{u_d(0)}{i_q(0) + \Delta i'_q(0)}\right].$$

А34.1 Сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. А9) может быть определено при этом испытании (см. А33) по формулам

$$X''_q = \frac{U_d(0)}{\sqrt{3}\left[I_q(0) + \Delta I'_q(0) + \Delta I''_q(0)\right]}\ \text{Ом}; \qquad \left[x''_q = \frac{u_d(0)}{i_q(0) + \Delta i'_q(0) + \Delta i''_q(0)}\right].$$

А34.2 Постоянная времени по поперечной оси при кратковременном коротком замыкании (см. 16), как определено из испытаний внезапным коротким замыканием при низком напряжении при работе машины под нагрузкой, является временем, заданным для составляющей тока якоря короткого замыкания поперечной оси, необходимым для ее уменьшения до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины $\Delta I'_q(0)$.

А34.3 Сверхпереходная постоянная времени короткого замыкания по поперечной оси (см. 19), как определено из опыта внезапного короткого замыкания при низком напряжении при работе машины при нагрузке, является временем, заданным для составляющей тока якоря короткого замыкания поперечной оси, необходимым для ее уменьшения до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины $\Delta I''_q(0)$.

А35 Испытание внезапным междуфазным коротким замыканием

Испытание внезапным междуфазным коротким замыканием для определения реактивного сопротивления отрицательной фазовой последовательности проводится при номинальной скорости. Перед осуществлением короткого замыкания машина должна работать с разомкнутой обмоткой якоря.

Требования для системы возбуждения и выбора измерительных приборов должны быть в соответствии с требованиями, установленными в 40.

Напряжение на зажимах машины, ток возбуждения и температуру ротора измеряют непосредственно перед коротким замыканием.

Для определения реактивного сопротивления обратной последовательности, осциллограммы приняты для напряжения на зажимах обмотки якоря, которые замкнуты накоротко, ток якоря в тех же фазах, что и ток в цепи возбуждения. Регистрация показаний осциллографа и метод анализа осциллограммы в соответствии с 38.

Чтобы получить X_2, соответствующее ненасыщенному состоянию машины, т. е. номинальным значениям тока, испытание выполняют для нескольких междуфазных напряжений, подобно испытаниям внезапного трехфазного короткого замыкания, описанному в 40, и заданную величину получают по результатам графиков.

Чтобы получить X_2, соответствующее насыщенному состоянию машины, напряжение на клеммах машины перед междуфазным коротким замыканием первичной обмотки якоря должно быть равно номинальной величине.

Если испытание не может быть выполнено при номинальном напряжении, оно может быть проведено при несколько уменьшенных значениях напряжений якоря как в 40, и X_2 определяют для каждого испытания. Эти величины тогда составляют график напряжения холостого хода до момента кратковременного короткого замыкания и приближенное значение, соответствующее номинальному напряжению, может быть найдено с помощью экстраполяции.

Испытание коротким замыканием должно быть выполнено так, что апериодическая составляющая является максимумом, который фактически является коротким замыканием и должен произойти в пределах 30° для времени нулевого напряжения.

А36 Определение реактивного сопротивления обратной последовательности при испытании внезапным междуфазным коротким замыканием

Реактивное сопротивление обратной последовательности (см. А10) испытанием внезапным междуфазным коротким замыканием, определяют по формуле

$$X_2 = \frac{U}{I''} - X''_d \text{ Ом}; \qquad \left[x_2 = \frac{\sqrt{3}u}{i''} - x''_d \right].$$

где U – междуфазное напряжение разомкнутой обмотки якоря, измеренное непосредственно перед коротким замыканием;

I'' – исходная основная периодическая составляющая междуфазного тока короткого замыкания якоря, полученная по показаниям осциллографа как сумма $I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)$, где каждая из составляющих тока определяется в соответствии с 38.

X''_d – сверхкратковременное реактивное сопротивление по продольной оси как определено в опыте внезапного трехфазного короткого замыкания в соответствии с 41.1. Предельная или непредельная величина X''_d должна быть взята в соответствии с заданной величиной X_2.

А37 Испытание внезапным коротким замыканием после отключения от линии

Испытание внезапным трехфазным коротким замыканием для определения параметров синхронной машины может проводиться во время работы испытываемой машины с коэффициентом замедления не более 0,05 номинальной частоты в секунду. Перед отключением от линии питания машина, работающая на холостом ходу, должна быть возбуждена до величины тока, для которой коэффициент мощности равен единице, или до более низкой величины тока. Ток возбуждения и напряжение измеряют и и регистрируют.

Как можно скорее после отключения, но не позже чем через одну секунду (фактически одновременно), машину замыкают накоротко. Общие требования для оборудования, измерительных устройств, возбуждения и определения параметров подобно определенным в 40.

А38 Определение параметров при испытании внезапным коротким замыканием после отключения от линии

Определение параметров при испытании внезапным коротким замыканием проводится как в 41.

А39 Испытание прикладываемым напряжением со снятым ротором

Испытание выполняют, прикладывая трехфазное симметричное напряжение номинальной частоты к обмотке якоря снятого ротора. Измерительную катушку помещают над зубьями или на расстоянии диаметра немного меньшего, чем диаметр расточки для исключения утечки потока перекрестных пазов. Длина катушки равна полной длине сердечника якоря; ширина катушки равна полюсному делению. Концевые части подтягивают крепежными проводами к оси машины по радиусам в плоскостях зубьев конца сердечника якоря, чтобы исключить влияния потоков рассеяния вокруг концевой обмотки якоря (рисунок А12).

Если якорь имеет дробное число пазов на полюс и фазу, ширину катушки делают равной наибольшему целому числу пазов, включая полюсное деление.

Обмотку якоря подключают к источнику напряжения и измеряют подаваемое напряжение *(U)*, ток намагничивания обмотки якоря (*I*), подводимую мощность *(P)* и напряжение измерительной катушки *(U_c)*. Измерение напряжения измерительной катушки должно быть проведено вольтметром с большим внутренним сопротивлением (предпочтительно электронный вольтметр).

А40 Определение параметров при испытании прикладываемым напряжением

Реактивное сопротивление рассеяния (см. А11) при испытании подаваемым напряжением со снятым ротором рассчитывают по следующей формуле

$$X = X_a - X_b \text{ Ом},$$

где:

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2}\ \text{Ом},\quad Z = \frac{U}{\sqrt{3}I}\ \text{Ом},\ R = \frac{P}{3I^2}\ \text{Ом};$$

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{Nk_w}{N_c}\ \text{Ом},$$ – реактивное сопротивление вследствие магнитного потока по активной поверхности якоря, созданного обмоткой якоря в пространстве, которое обычно занято ротором.

U_c – напряжение измерительной катушки, В;
I – ток якоря, А;
N – количество соединенных последовательно витков обмотки якоря в фазе;
N_c – количество витков измерительной катушки;
k_w – коэффициент обмотки якоря.

В случае, когда статор имеет дробное число пазов на полюс и фазу, ширину пробной катушки выбирают равной наибольшему целому числу пазов на полюс. Тогда X_b рассчитывают по формуле

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{Nk_w}{N_c \sin\left(\frac{q'}{3q}\frac{\pi}{2}\right)}\ \text{Ом};$$

где q' – наибольшее целое число пазов на полюс;
q – дробное число пазов на полюс и фазу.

Когда измерительная катушка не используется, значение X_b может быть рассчитано опытным путем по формуле

$$X_b = \frac{15N^2k_w^2fL'}{p}10^{-8}\ \text{Ом},$$

где N и k_w, как указано выше;
f – приложенная частота;
p – количество пар полюсов.

$$L' = L - \frac{nd}{2} + \frac{\tau_p}{6},$$

где L – полная длина сердечника статора (включая вентиляционные каналы), см;
n – количество вентиляционных каналов;
d – осевая длина вентиляционных каналов, см;
τ_p – расстояние между полюсами, см.

Испытательный метод определения предпочтителен.

А41 Испытание с блокированным ротором

Испытание выполняют с блокированным ротором и приложенным к обмотке якоря трехфазным напряжением номинальной частоты, обмотка возбуждения замкнута накоротко или замкнута на пусковое сопротивление, если необходимо.

Испытание должно быть проведено с номинальным напряжением, приложенным к обмотке якоря, если перегрев демпфирующей обмотки и обмотки якоря не препятствует проведению такого испытания.

В этом случае ряд испытаний с понижением напряжения может быть выполнен так, чтобы значения номинального напряжения могли быть определены экстраполяцией. В результате эффекта насыщения величина прикладываемого пониженного напряжения должна быть достаточно высока, чтобы значение номинального напряжения могло быть экстраполировано. Как правило, ток якоря в течение испытания должен быть более чем в два раза больше величины номинального тока.

Продолжительность приложения напряжения ограничена временем, требующимся для снятия показаний и нагрева частей ротора, и обычно составляет менее 10 с.

Напряжение якоря и ток во всех трех фазах регистрируется. Рекомендуется измерить подводимую мощность.

А42 Определение начального пускового сопротивления при испытании с блокированным ротором

Начальное сопротивление при запуске может быть определено при испытании с блокированным ротором по формуле

$$Z_{st} = \frac{U}{\sqrt{3} I_{av}} \text{ Ом}; \quad \left[Z_{st} = \frac{u}{i_{av}} \right],$$

где U – прикладываемое линейное напряжение, В;
I_{av} – среднее значение для установившихся токов в трех фазах, измеренное в течение испытания, А.

Если испытание выполнено для нескольких пониженных напряжений, то величина начального сопротивления при старте определена для каждого напряжения и величина номинального напряжения может быть определена экстраполяцией начального сопротивления при старте к величине номинального напряжения для кривой Z_{st}, построенной в зависимости от прикладываемого напряжения.

Если подводимая мощность измерена, то начальное пусковое сопротивление и реактивное сопротивление могут быть определены по формулам:

$$R_{st} = \frac{P}{3 I_{av}^2} \text{ Ом}; \quad \left[r_{st} = \frac{p}{i_{av}^2} \right];$$

$$X_{st} = \sqrt{Z_{st}^2 - R_{st}^2} \text{ Ом}; \quad \left[x_{st} = \sqrt{z_{st}^2 - r_{st}^2} \right].$$

А43 Испытание внезапно прикладываемым возбуждением с разомкнутой обмоткой якоря

Испытание внезапно прикладываемым возбуждением с разомкнутой обмоткой якоря выполняют при работе машины при номинальной частоте вращения с первоначально разомкнутой обмоткой возбуждения. Возбуждение машины обеспечивается (предпочтительно) от ее собственного возбудителя, который должен быть отдельно возбужден. Если ее собственный возбудитель не может использоваться, то может применяться отдельный возбудитель, но величина его номинального тока должна быть по крайней мере в два раза больше тока возбуждения холостого хода испытываемой машины, а сопротивление якоря не больше чем у главного возбудителя машины. Этот отдельный возбудитель должен также быть отдельно возбужден.

Напряжение возбудителя равняется величине, соответствующей линейной части кривой насыщения на холостом ходу, которая, как правило, не более, чем в 0,7 раза больше номинального напряжения якоря на холостом ходу. Обмотка возбуждения машины при испытании внезапно подключается к возбудителю. Регистрация осциллограммы сделана для одного напряжения якоря, тока возбуждения и для контроля напряжения возбудителя.

Испытание считают удовлетворительным, если остаточное напряжение возбудителя преимущественно постоянно в течение испытания. Разность между устойчивым напряжением якоря и напряжением, определенным огибающей повышающегося напряжения якоря, составляет график на полулогарифмической шкале в зависимости от времени и затем экстраполируется к моменту замыкания выключателя присоединения возбудителя (рисунок А13). Экстраполяция прямой части этой кривой к оси ординаты дает начальную величину кратковременной составляющей $\Delta U'$ (0).

Примечание – Для больших машин остаточным напряжением, как правило, можно пренебречь.

А44 Определение τ'_{do} во время испытания внезапно прикладываемым возбуждением с разомкнутой обмоткой якоря

Кратковременная постоянная времени по продольной оси при холостом ходе (см. А13) при испытании внезапно прикладываемым возбуждением с разомкнутой обмоткой якоря определена как время, заданное для составляющей переходного напряжения $\Delta U'(0)$, и необходимое для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины.

А45 Испытание внезапно прикладываемым возбуждением с короткозамкнутой обмоткой якоря

Испытание внезапно прикладываемым возбуждением с короткозамкнутой обмоткой якоря выполняют при работе машины при номинальной скорости с первоначально разомкнутой обмоткой возбуждения. Требования к источнику возбуждения – в соответствии с А43. Возбуждение машины подается от ее собственного возбудителя, который должен быть отдельно возбужден. Возбуждение может подаваться от другого источника.

Напряжение возбудителя может представлять собой ряд величин, соответствующий номинальному току короткого замыкания машины при испытании. Обмотка возбуждения машины при испытании внезапно подключается к возбудителю. Осуществляется регистрация осциллограммы тока обмотки якоря, тока возбуждения и напряжения возбудителя. Испытание считают удовлетворительным, если остаточное напряжение возбудителя преимущественно постоянно в течение испытания. Разность между установившимся током якоря и током, который определяется огибающей повышающегося тока якоря, составляет график на полулогарифмической шкале в зависимости от времени и затем экстраполируется к моменту отключения возбудителя (рисунок 14). Экстраполяция прямой части кривой к оси ординаты дает начальное значение кратковременной составляющей $\Delta I'_d(0)$. Начальным током, который появляется в результате остаточного потока, обычно можно пренебречь.

А46 Определение τ'_d во время испытания внезапно прикладываемым возбуждением с короткозамкнутой обмоткой якоря

Кратковременная постоянная времени по продольной оси при коротком замыкании (см. А14) при испытании внезапно прикладываемым возбуждением с короткозамкнутой обмоткой якоря определена как время, заданное для составляющей тока якоря $\Delta I'_d(0)$ и необходимое для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины.

А47 Испытание методом восстановления напряжения

Для описания испытания (см. 42). Для определения быстро затухающих сверхкратковременных составляющих разности устойчивого напряжения и огибающей напряжения необходимо использовать высокую скорость при регистрации начальной части кривой напряжения якоря. Рекомендуется, чтобы скорость регистрации была не меньше чем 0,4 м/с.

Кроме того, сопротивление, подключенное последовательно с регистрирующим элементом, должно обеспечивать соответствующую начальную амплитуду следа и обычно не позже, чем через 0,5 с должно быть автоматически увеличено, или должен применяться способ, при котором регистрирующий элемент отключается, предохраняя систему от чрезмерного напряжения.

А48 Определение параметров при испытании методом восстановления напряжения

Переходное реактивное сопротивление по продольной оси (см. А7), переходное реактивное сопротивление по поперечной оси (см. 8) и кратковременную постоянную времени по продольной оси при холостом ходе (см. 13) определяют в соответствии с 43, 43.1 и 43.2.

А48.1 Сверхпереходную постоянную времени холостого хода по продольной оси (см. А17) определяют при испытании методом восстановления напряжения как время, заданное для сверхкратковременной составляющей $\Delta U''$, определенной в соответствии с разделом 42, необходимое для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины.

А49 Испытание гашением поля с разомкнутой обмоткой якоря

Процедура проведения этого испытания подобна описанной в 58. В отличие от испытания, описанного в 58, это испытание выполняется, когда машина ненасыщена, т. е. когда машина возбуждена до напряжения, соответствующего линейной части кривой насыщения на холостом ходу. Это отдельное испытание с обмоткой якоря выполняется дважды: сначала с короткозамкнутой обмоткой возбуждения и потом с соединенной обмоткой возбуждения последовательно с гасящим поле сопротивлением, величина которого должна быть между $3R_f$ и $10R_f$.

Междуфазное напряжение обмотки якоря и ток возбуждения должны быть измерены и зарегистрированы на осциллографе. Напряжение якоря представляет собой график зависимости от времени по полулогарифмической шкале с напряжением по логарифмической шкале. Если остаточное напряжение машины более чем 0,03 прикладываемой величины, то для разности измеренного напряжения якоря и остаточного напряжения составляют график. Ток возбуждения, полученный из осциллограммы, также оформляют в виде графика в полулогарифмической шкале для определения начальной величины кратковременного тока $\Delta I'_f\ (0)$ обмотки возбуждения, поскольку прямая часть кривой спада тока возбуждения экстраполируется к оси ординаты (рисунок 15). Разность между током, полученным из осциллограммы, и составляющей переходного тока дает сверхкратковременный ток $\Delta I''_f$. Эта составляющая тока составляет отдельный график по полулогарифмической шкале для получения его начальной величины $\Delta I''_f(0)$.

Если диаграмма, представляющая отклонение $\Delta I''_f$, в зависимости от времени изгибается, начальную амплитуду $\Delta I''_f\ (0)$ определяют в соответствии с рисунком 10.

Примечание – Если возникают некоторые трудности при получении быстро затухающих составляющих тока возбуждения, то испытание должно быть повторено с более высокой скоростью регистрации начальной части затухающего тока.

А50 Определение параметров при испытании гашением поля с разомкнутой обмоткой якоря

При испытании с короткозамкнутой обмоткой возбуждения кратковременную постоянную времени при холостом ходе τ'_{do} определяют способом, описанным в 59 как время, заданное для напряжения обмотки якоря, необходимое для уменьшения ее в $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ раз от начальной величины.

Аналогично постоянную времени τ'_{dor} получают при испытании гашением поля с разрядным сопротивлением, присоединенным последовательно к обмотке возбуждения.

А50.1 Свехкратковременную постоянную времени τ''_{do} получают с помощью кривой сверхкратковременной составляющей тока возбуждения $\Delta I''_f$ (см. А49), как время, заданное для этой составляющей тока, необходимое для уменьшения ее до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ начальной величины.

Аналогично постоянную времени τ'_{dor} получают при испытании гашением поля с разрядным сопротивлением, присоединенным последовательно к обмотке возбуждения.

А50.2 Постоянную времени холостого хода по продольной оси (τ_{fd0}) и постоянную времени по продольной оси в режиме холостого хода при наличии эквивалентной демпфирующей обмотки (τ_{kd0}) рассчитывают с использованием величин постоянных времени, полученных при испытании по формулам:

$$\tau_{fdo} \approx \frac{1+\alpha}{\alpha}\left[\left(\tau'_{do}-\tau'_{dor}\right)+\left(\tau''_{do}-\tau''_{dor}\right)\right];$$

$$\tau_{kdo} \approx \left(\tau'_{dor}+\tau''_{dor}\right)-\frac{1}{\alpha}\left[\left(\tau'_{do}-\tau'_{dor}\right)+\left(\tau''_{do}-\tau''_{dor}\right)\right]=\left(\tau'_{dor}+\tau''_{dor}\right)-\frac{\tau_{fdo}}{1+\alpha}$$

где $\alpha = \dfrac{R_{dr}}{R_f} = \dfrac{\textit{разрядное сопротивление на постоянном токе}}{\textit{сопротивление обмотки возбуждения на постоянном токе}}$.

Сопротивление обмотки возбуждения соответствует температуре обмотки в течение испытания.

Примечание – Эквивалентная постоянная времени демпфирующей обмотки может быть определена с достаточной точностью по формуле

$$\tau_{kdo} \cong \tau'_{do} - \tau_{fdo}.$$

А50.3 Постоянная времени холостого хода по продольной оси (τ_{fd0}) и постоянная времени по продольной оси в режиме холостого хода при наличии эквивалентной демпфирующей обмотки (τ_{kd0}) также могут быть получены при испытании гашением поля с короткозамкнутой обмоткой возбуждения.

В этом случае τ'_{d0} и τ''_{d0} могут быть определены, как в А50, с использованием отношения начальных составляющих тока возбуждения $\Delta i''_f(0)$ и $\Delta i'_f(0)$, как определено в А49 по формулам:

$$\tau_{fdo} = \frac{\tau'_{do}+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}\tau''_{do}}{1+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}} \quad \textit{и} \quad \tau_{kdo} = \frac{\tau''_{do}+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}\tau'_{do}}{1+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}}.$$

Если возникают трудности при проведении испытания с разрядным сопротивлением, равным нулю, т. е. когда $\alpha = 0$, то для испытания при $\alpha \neq 0$ заданные постоянные времени τ_{fd0} и τ_{kd0} получают при испытании гашением поля с сопротивлением последовательно с обмоткой возбуждения:

$$\tau_{fdo} \approx \frac{\tau'_{dor}+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}\tau''_{dor}}{1+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}}(1+\alpha);$$

$$\tau_{kdo} = \frac{\tau'_{dor}+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}\tau_{do}}{1+\dfrac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f}}.$$

А50.4 Постоянная времени по продольной оси в режиме холостого хода при наличии эквивалентной демпфирующей обмотки (τ_{kd0}) может быть определена непосредственно из испытания, описанного в А49, при проведении испытания с разомкнутой обмоткой возбуждения без разрядного сопротивления. В этом случае τ_{kd0} будет определен как время, необходимое для уменьшения напряжения обмотки якоря до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ его начальной величины.

Это испытание обычно выполняется на машинах с массивным ротором или машинах с хорошими демпфирующими обмотками, когда индуцируемое напряжение в обмотке возбуждения во время затухания поля достаточно низко, чтобы избежать повреждения изоляции обмотки.

А51 Испытание гашением поля с короткозамкнутой обмоткой якоря

Процедура проведения этого испытания такая же, как описано в 60. Это испытание с короткозамкнутой обмоткой якоря проводится дважды: сначала с короткозамкнутой обмоткой возбуждения и потом с использованием разрядного сопротивления в обмотке возбуждения с величиной между $3R_f$ и $10R_f$, включенным последовательно с обмоткой возбуждения. Ток якоря в одной фазе и ток возбуждения регистрируются на осциллографе.

Ток якоря представляет собой график зависимости от времени на полулогарифмической шкале с током на логарифмической шкале.

Ток возбуждения, полученный из осциллограммы, также представляет собой график на полулогарифмической шкале в зависимости от времени с током на логарифмической шкале. Прямая часть кривой спада тока возбуждения $\Delta i_f'(0)$ экстраполируется к оси ординат. Разность $\Delta i_f''(0)$ между током, определенным по осциллограмме, и продолжительной прямолинейной частью составляющей переходного тока также представляет собой график на полулогарифмической шкале, по которому определяется его начальная величина.

А52 Определение значений из испытания с гашением поля с короткозамкнутой обмоткой якоря

Постоянную времени по продольной оси обмотки возбуждения в режиме короткого замыкания τ_{fd} и постоянную времени эквивалентной демпфирующей обмотки τ_{kd} рассчитывают способом, описанным в А50. В этом случае нулевые индексы не используются.

А52.1 Постоянные времени обмотки возбуждения и демпфирующей обмотки с короткозамкнутой обмоткой якоря могут также быть получены при испытании гашением поля с короткозамкнутой обмоткой возбуждения. В этом случае τ'_d τ''_d получают в соответствии с А50. Тогда, зная соотношение начальных величин $\Delta i_f''(0)$ и $\Delta i_f'(0)$ (см. 51), необходимые постоянные времени рассчитывают в соответствии с А50. В этом случае нулевые индексы не используются.

А52.2 Постоянные времени эквивалентной демпфирующей обмотки τ_{kd} могут быть определены непосредственно из испытания, описанного в А51, выполненного с разомкнутой обмоткой возбуждение без разрядного сопротивления. В этом случае τ_{kd} определяют как время, необходимое для уменьшения тока обмотки якоря до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ его начальной величины.

Условия испытания для предотвращения возможных повреждений изоляции обмотки возбуждения подобны описанным в А50.4.

А53 Испытание при асинхронной работе при нагрузке

Испытание при асинхронной работе при нагрузке может быть проведено с машиной, работающей при испытании как генератор или двигатель, питающийся напряжением номинальной частоты. В начале испытания машина работает синхронно (при номинальной частоте вращения) и возбуждена; затем возбуждение внезапно отключается, и обмотка возбуждения в течение испытания является *a)* – короткозамкнутой, *b)* – замкнутой на разрядное сопротивление, или *c)* – разомкнутой, так, чтобы могли быть получены характеристики для трех состояний обмотки возбуждения.

Должны быть приняты необходимые предосторожности, чтобы не превысить максимальный асинхронный вращающий момент и не вызвать опасные напряжения в обмотках возбуждения.

При выполнении испытаний с большими машинами ожидаемые понижения линейного напряжения и реактивной мощности источника питания должны быть первоначально проверены вычислением и приняты меры, необходимые для предотвращения отключения машины при испытании и машин, работающих параллельно с ними в течение испытания.

Испытание должно быть выполнено приблизительно при трех – пяти различных нагрузках (начиная с самой низкой) равных приблизительно от 0,1 до 1,0 или более чем номинальная величина. Когда токи обмотки якоря начинают превышать номинальную величину, должны быть приняты меры предосторожности при проведении испытания в пределах допустимого времени работы для таких величин тока.

При изменении величины нагрузки от одной величины до другой, возбуждение должно быть изменено, если продолжительность испытания от 3 до 5 мин. Фазное напряжение, линейный ток, активная и реактивная мощность и напряжение или ток обмотки возбуждения (в зависимости от обстоятельств) измеряют и регистрируют. Кроме того, рекомендуют делать запись сигнала датчика положения вала относительно продольной и поперечной осей.

Времена, заданные для единичного полного периода напряжения якоря и тока возбуждения (напряжения) также определяют. Продолжительность асинхронной работы при каждой нагрузке должна быть достаточно большой, чтобы сделать необходимые измерения и зарегистрировать их при точно установленных параметрах нагрузки, но не должна превышать время, учитывающее действие сверхтока якоря.

Для каждого состояния обмотки возбуждения (короткозамкнутая, замкнутая на разрядное сопротивление, разомкнутая), средние значения измеренной мощности, тока и напряжения в течение испытания представляют собой график зависимости от скольжения. Среднее скольжение определяют в относительных единицах по формуле

$$s = \frac{1}{Tf},$$

где T – время периода колебания наведенного напряжения возбуждения или тока или двойное время периода колебания тока якоря;

f – номинальная частота.

А54 Определение частотной характеристики и параметров при испытании в асинхронном режиме работы при нагрузке

Средние значения полного сопротивления, активного и реактивного сопротивлений определяют для каждого скольжения по формулам:

$$Z(s) = \frac{U_{av}}{\sqrt{3} I_{av}} \text{ Ом}; \quad \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right];$$

$$R(s) = \frac{P_{av}}{\sqrt{3} I_{av}^2} \text{ Ом}; \quad \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right];$$

$$X(s) = \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)} \text{ Ом}; \quad \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right].$$

Средняя величина действующего фазного напряжения (U_{av}) в течение периода колебания, средняя действующая величина тока (I_{av}) и среднее значение мощности (P_{av}) для того же самого цикла должны быть рассчитаны по измеренным величинам или по осциллограммам.

Затем величины получают по графику зависимости от скольжения для определения частотной характеристики на низких частотах (см. А24).

А54.1 Характеристика скольжения вращающего момента может быть получена при таком же испытании. В этом случае мощность и ток рассматриваются приблизительно при номинальном напряжении, умножая измеренную мощность для $\left(\frac{U_n}{U}\right)^2$ и измеренный ток для $\frac{U_n}{U}$, где U_n – номинальное напряжение и U – измеренное напряжение. Следовательно, вычитая соответствующие потери якоря из активной мощности, получают величину, определенную как: $P_a = P - (\Delta P_{fe} + \Delta P_{cu})$. P_a пропорционально моменту, и это отношение пропорционально кажущейся номинальной мощности при данном вращающемся моменте в относительных единицах.

Строят график зависимости момента от скольжения в относительных единицах и получают заданную характеристику.

А55 Асинхронная работа в течение испытания при низком напряжении

Испытание выполняют с пониженным симметричным напряжением (от 0,01 U_n до 0,2 U_n) при номинальной частоте, приложенной к испытуемой машине от внешнего источника.

Обмотку возбуждения замыкают накоротко. Если остаточное напряжение машины превышает 0,3 подаваемого напряжения, ротор должен быть размагничен перед испытанием машины. Фазное напряжение, ток линии и входную мощность измеряют и регистрируют в течение испытания. При вычислениях рассматривают средние значения этих величин в течение полного периода колебания.

Частоту вращения машины изменяют ступенчато; в каждом шаге частоты вращения напряжение прикладывается к обмотке якоря в течение времени, необходимого для применения регистрирующего прибора и осуществления записи. В диапазоне малых скольжений (ниже 0,05) трудно сохранить постоянную частоту вращения в пределах заданной точности. В этом случае испытание с регистрацией осциллограммы может быть выполнено с постепенным торможением (не более чем 0,04 номинальной частоты вращения в секунду для малых машин; для больших машин – это намного меньше по отношению к собственным характеристикам установки).

Из средних значений в течение периода колебания мощности и тока составляют график зависимости от скольжения (рисунок 16).

А56 Определение параметров частотной характеристики и величин при асинхронном низковольтном испытании в рабочих условиях

Полные сопротивления, активные и реактивные сопротивления для каждого шага частоты вращения (скольжения) рассчитывают по формулам:

$$Z(s) = \frac{U}{\sqrt{3} I_{av}} \text{ Ом}; \quad \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right];$$

$$R(s) = \frac{P}{\sqrt{3} I_{av}^2} \text{ Ом}; \quad \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right];$$

$$X(s) = \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)} \text{ Ом}; \quad \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right].$$

Используя полученные величины, строят график зависимости от скольжения и определяют параметры частотной характеристики на низких частотах (см. А24).

Примечание 1 – В результате низкого прикладываемого напряжения потерями в сердечнике пренебрегают, и полученные реактивные сопротивления являются ненасыщенными.

Примечание 2 – Полученные реактивные сопротивления приблизительно соответствуют половине ненасыщенной суммы сверхпереходных реактивных сопротивлений в состоянии покоя и сумме половины синхронных реактивных сопротивлений при нулевом скольжении.

Величины среднего полного сопротивления для каждого скольжения представлены в виде графика на рисунке 17. Желательно составлять график зависимости от скольжения при одинаковых величинах диаграммы коэффициента мощности.

А57 Испытание приложением напряжения переменной частоты в состоянии покоя

При проведении испытания напряжение различных частот прикладывается к паре клемм проводов обмотки якоря. Машина находится в состоянии покоя. Испытание может быть выполнено с разомкнутой обмоткой возбуждения.

Обмотку возбуждения замыкают накоротко. Третья клемма или обмотка якоря могут остаться разомкнутыми или соединенными, как показано на рисунке 18, где показаны основные соединения.

В течение испытания ротор один раз располагается в таком положении, чтобы был максимальный ток, индуцированный на обмотке возбуждения (продольная ось), и один раз, – чтобы был минимальный (фактически ноль) индуцированный ток (поперечная ось).

На частотах приблизительно 5 Гц и ниже может использоваться установка постоянного тока генератор – двигатель, отдельно возбуждаемая непосредственно от низкочастотного электронного генератора или посредством небольшого вращающегося усилителя, возбужденного низкочастотным генератором.

Напряжение питания, ток обмотки якоря и угол сдвига фаз между ними измеряют и регистрируют при помощи осциллографа (рисунок 19). Может использоваться обычный шунт постоянного тока для регистрации тока якоря. Ток обмотки возбуждения регистрируется только для оценки положения ротора. Угол сдвига фаз может также быть измерен каким-либо другим методом с соответствующей точностью. В течение испытания должны быть предприняты меры предосторожности, что может быть достигнуто при любом из сравнительно высоких токов (от 0,3 до 0,5 номинальной величины якоря) или при малых токах якоря (от 0,05 до 0,1 номинальной величины) и дополнительном магнитном потоке, индуцируемом постоянным током в той же обмотке якоря при токе низкой частоты таким способом, что пиковое значение переменного тока ниже величины постоянного тока. При всех частотах значения переменного и постоянного тока должны быть одинаковыми.

На частотах 5 Гц и ниже разность между полными и активными сопротивлениями становится малой и угол сдвига фаз между напряжением и током уменьшается, что вводит дополнительные погрешности при измерении угла на осциллограмме.

Погрешности можно значительно уменьшить, если сопротивление цепи якоря компенсировать в течение испытания. Для компенсирования падения напряжения на сопротивлении якоря используют суммирующий усилитель, обычно используемый в аналоговых компьютерах и во вспомогательном сопротивлении, необходимом для устойчивой работы генератора постоянного тока. В течение испытания температура должна быть постоянной.

Падение напряжения в шунте и добавочном резисторе, пропорциональное измеряемому току, вычитается из напряжения на зажиме обмотки якоря с помощью усилителя. Изменяя сопротивление на входе, выходное напряжение усилителя регулируют до нулевого значения, в то время как постоянный ток протекает в обмотке якоря, компенсируя таким образом сопротивление якоря. Чтобы уменьшить ошибку, обусловленную погрешностью при нагревании обмотки в течение испытания, несколько раз должна быть проверена возможность компенсации постоянного тока в обмотке якоря, каждый раз регулируя выходное напряжение усилителя до нуля.

А58 Определение параметров частотной характеристики и величин от приложенного напряжения переменной частоты в состоянии покоя

Значение величины для каждой частоты получают отдельно для прямой и поперечной оси. Применяют одинаковые формулы для d- и q-осей, поэтому следующие примеры вычислений приведены только для одной оси. Получив по осциллограмме U и I для конкретной частоты и сдвига фаз, полное сопротивление цепи в состоянии покоя определяют по формуле

$$Z_{stat}(js) = \frac{U(js)}{I(js)} K_{con},$$

где Z_{stat} – постоянное полное сопротивление машины, определенное для каждой частоты подаваемого напряжения по q- и d-осям;

U – подаваемое напряжение при скольжении s, В;

I – измеренный ток, А;

K_{con} – коэффициент, зависящий от соединения обмотки якоря. Если напряжение прикладывается к зажимам, один из которых разомкнут, то K_{con} = 1/2; если две фазы соединены параллельно-последовательно с третьей – 2/3.

Для машины, вращающейся со скольжением s, и приложенным напряжением номинальной частоты, ее полное сопротивление определяется по формуле

$$Z(js) = \frac{Z_{stat}(js) - R_{1s}}{s} + R_1 \text{ Ом},$$

где $Z_{stat}(js)$ – как указано выше;

R_{1s} – активное сопротивление обмотки якоря на переменном токе с приложенным напряжением номинальной частоты. Это может быть определено при испытании с ротором, работающим на частоте, соответствующей *s*, или может быть рассчитано по формуле

$$R_{1s} \approx R_a \left[1 + (R_1 - R_a) \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right].$$

Для скольжения 0,25 и меньше $R_{1s} \approx R_a$ с погрешностью 5 %. (Для R_a *и* R_1 см. 15 и 16)

Проводимость машины может быть определена как величина обратная *Z (js):*

$$Y(js) = \frac{1}{Z(js)}.$$

Используя угол φ между напряжением и током, полученный из осциллограммы или посредством соответствующего устройства, величины реактивных и активных сопротивлений, относящиеся к вращающейся машине с определенным скольжением, могут быть рассчитаны следующим образом:

$$X(js) = \mathrm{Im}\left[Z_{stat}(js)\right] \frac{|Z_{stat}(js)| \sin\varphi}{s} \text{ Ом}$$

$$R(js) = \mathrm{Re}\left[Z_{stat}(js)\right] + R_1 = \frac{|Z_{stat}(js)| \cos\varphi - P_{1s}}{s} + R_1 \text{ Ом}$$

При этом испытании получены ненасыщенные величины.

А58.1 Параметры частотной характеристики машины представлены кривыми полученных величин как функции скольжения для каждой из осей.

А58.2 Величины синхронных машин (реактивные сопротивления, активные сопротивления и постоянные времени) могут быть получены, используя параметры частотной характеристики. Реактивные и активные сопротивления при скольжении в относительных единицах приблизительно равны сверхпереходным величинам. Реактивные и активные сопротивления, экстраполируемые при нулевом скольжении, представляют собой синхронные величины.

А59 Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя

Испытание затухания постоянного тока в обмотке якоря выполняют в состоянии покоя. Напряжение постоянного тока прикладывается к обмотке якоря (две клеммы разомкнуты с третьей, или две фазы – параллельно, а третья – последовательно с ними) через сопротивление (рисунок А20). Когда контактор *K* закрыт, обмотка замкнута накоротко и ток в обмотке якоря затухает. Весь процесс затухания тока регистрируется.

Сопротивление контактора *K* должно быть значительно ниже, чем сопротивление обмотки якоря. Сопротивление, соединенное последовательно с источником напряжения, должно иметь такое выбранное значение, чтобы закрытие контактора заметно не воздействовало на величину тока источника (величина тока не должна изменяться больше, чем на несколько процентов).

Испытание выполняют с ротором, помещенным вдоль прямой и затем поперечной оси (см. А57) после предварительного намагничивания магнитной системы машины, пропуская через обмотку якоря (первичную) постоянный ток, который произведет насыщение. Затем выполняется постепенное размагничивание вниз до испытательной величины тока, при этом контактор *K* замкнут накоротко или разомкнут после окончания.

Чтобы улучшить точность испытания, регистрация затухающего тока выполняется тремя шагами (испытание может быть выполнено один раз используя три осциллографа):

1) начальная часть кривой затухания регистрируется при скорости приблизительно 10 м/с;

2) начальная часть и средняя часть кривой регистрируется при скорости приблизительно 1 м/с;

3) вся кривая затухания в течение приблизительно 10 с регистрируется при скорости приблизительно 0,1 м/с.

При регистрации токов затухания масштаб записи автоматически изменяется дважды, каждый раз приблизительно в пять раз от величины шкалы, используя реле времени, чтобы шунтировать существующие сопротивления в регистрирующей цепи.

Рекомендуют использовать два типа регистрации осциллограммы. Чтобы регистрировать начальную часть кривой, должна использоваться регистрация высокой собственной частоты ($f_0 \approx 5\ 000$ Гц). Чтобы регистрировать середину и конечные части кривой затухания, используется регистрация с высокой чувствительностью по току. Чтобы обеспечить достаточно широкое отклонение записывающего устройства, используются токовые измерительные шунты, имеющие высокое сопротивление.

При выполнении испытания с положением ротора по продольной оси обмотка возбуждения замкнута накоротко и ток в этом случае регистрируется тем же осциллографом. При выполнении испытания с ротором по поперечной оси, обмотка возбуждения разомкнута и наведенное напряжение в нем регистрируется тем же осциллографом.

После испытания регистрирующие устройства калибруются и цену деления шкалы осциллографа получают для каждого регистрирующего устройства и для каждой цены деления для шкалы якоря и цепи обмотки возбуждения. Измеряют сопротивление цепи обмотки возбуждения постоянного тока и, собственно, обмотки возбуждения.

Не должно быть никакого добавочного сопротивления переменному току в цепи обмотки возбуждения.

Величину тока затухания в обмотке якоря рассматривают как отношение тока в любой момент времени $I(t)$ к начальному току $I(0)$.

Так же затухание индуцированного тока в обмотке возбуждения принимают как отношение затухающего индуцированного тока и начального индуцированного тока. Эти величины затухающих токов составляют график зависимости от времени.

Из полулогарифмических графиков токов затухания находят кратковременные и подкратковременные начальные величины и их постоянные времени. Для этого прямая линия проводится через крайние точки (рисунок А21а). Пересечение этой прямой с осью ординат дает начальную амплитуду первой экспоненты (i_{10}). Полученная постоянная времени (τ_1) – самая большая, и определена как время, необходимое для того, чтобы i_{10} уменьшилось до $1/\varepsilon \approx 0{,}368$ первоначального значения.

По разности между начальной кривой и первой экспонентой повторно составляют график на полулогарифмической диаграмме и определяют амплитуду (i_{20}) и постоянную времени второй экспоненты (τ_2) (рисунок А21b).

Анализ кривой продолжается тем же методом до той точки, где уже не соблюдается нелинейность затухающей кривой.

Анализ затухающего тока обмотки якоря и наведенного тока обмотки возбуждения при этом испытании должен быть сделан, учитывая одновременное равенство постоянных времени τ_k и τ_{kf} для массивного ротора. Это дает возможность получить более высокую точность параметров частотной характеристики. При анализе кривой затухания тока обмотки якоря рекомендуется получать сумму экспоненциальных функций насколько возможно близко к испытательной кривой для того, чтобы получить:

$$\sum_{x} \frac{i_{ko}}{\tau_k} = \frac{1}{\tau(0)},$$

где $\tau(0)$ – эквивалентная постоянная времени кривой затухания тока якоря в начальный момент (рисунок А21а).

Постоянная времени $\tau(0)$ получена из графика начальной части кривой затухания тока на полулогарифмической диаграмме для построения касательной к ней для нулевого времени (рисунок 21а). Начальную постоянную времени $\tau(0)$ находят по этой касательной линии как время, необходимое для уменьшения начальной величины тока до значения $1/\varepsilon \approx 0{,}368$.

Если вышеупомянутое условие не выполнено, возможно существенное уменьшение точности полученных подкратковременных величин. Более высокая точность при анализе испытательной кривой с помощью экспоненты может быть получена, используя ЭВМ.

А60 Определение параметров частотной характеристики и величин при испытании затухания

Параметры частотной характеристики $\frac{1}{x(js)}$ и $G(js)$ могут быть представлены следующим образом:

$$\frac{1}{x(js)} = \frac{1}{r}\left[\frac{1}{\int_0^\infty i(t)\varepsilon^{-jst}dt} - js\right] = -\frac{1}{r}\frac{\int_0^\infty \left[\frac{d}{dt}i(t)\right]\varepsilon^{-jst}dt}{\int_0^\infty i(t)\varepsilon^{-jst}dt};$$

$$G(js) = \frac{\int_0^\infty i_f(t)\varepsilon^{-jst}dt}{i_0\left[1 - js\int_0^\infty i(t)\varepsilon^{-jst}dt\right]},$$

где $i(t)$ – отношение испытательного тока обмотки якоря (или разность испытательной кривой и установившейся величины) и начальной величины этого тока;

$i_f(t)$ – затухающий ток обмотки возбуждения в относительных единицах;

i_0 – начальное значение или ток обмотки якоря по d- или q-оси в относительных единицах;

r – сопротивление в цепи обмотки якоря на фазу в относительных единицах.

$$r = r_a + K_{con}\Delta r,$$

где r_a – сопротивление обмотки якоря на постоянном токе в относительных единицах;

Δr – дополнительное (внешнее) сопротивление цепи якоря в относительных единицах;

K_{con} – связующий коэффициент обмотки якоря (см. А58)

Параметры частотной характеристики $\frac{1}{x_d(js)}$, $\frac{1}{x_q(js)}$ и $G(js)$ могут быть выражены через корни характеристических уравнений $D_d\,(p) = 0$; $D'_d\,(p) = 0$; $D_q(p) = 0$; $D'_q\,(p) = 0$ и $A(p) = 0$ для вращающихся синхронных машин:

$$\frac{1}{x_d(js)} = \frac{1}{x''_d}\frac{D_d(js)}{D'_d(js)} = \frac{1}{x''_d}\frac{(\alpha_{1d}+js)(\alpha_{2d}+js)...(\alpha_{nd}+js)}{(\alpha'_{1d}+js)(\alpha'_{2d}+js)...(\alpha'_{nd}+js)};$$

$$\frac{1}{x_q(js)} = \frac{1}{x''_q}\frac{D_q(js)}{D'_q(js)} = \frac{1}{x''_d}\frac{(\alpha_{1q}+js)(\alpha_{2q}+js)...(\alpha_{nq}+js)}{(\alpha'_{1q}+js)(\alpha'_{2q}+js)...(\alpha'_{nq}+js)};$$

$$G(js) = N\frac{A(js)}{D_d(js)} = N\frac{(\gamma_1+js)(\gamma_2+js)...(\gamma_{n-1}+js)}{(\alpha_{1d}+js)(\alpha_{2d}+js)...(\alpha_{nd}+js)};$$

Корни характеристических уравнений $D_d\,(p) = 0$; $D'_d\,(p) = 0$; $D_q(p) = 0$; $D'_q\,(p) = 0$ и $A(p) = 0$ могут быть определены, используя амплитуду i_k и экспоненциальный декремент (коэффициент) λ_k кривых затухания тока.

Корни $-a_1$, $-a_2$, ... $-a_n$ для характеристического уравнения $D\,(p) = 0$ определяют из корней уравнения:

$$\sum_{k=1}^{n+1}\frac{i_k\lambda_k}{p+\lambda_k} = 0.$$

Корни – a'_1, – a'_2, ... – a'_n для характеристического уравнения $D'(p) = 0$ определяют из корней уравнения:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_k}{p + \lambda_k} = 0 .$$

Корни – γ_1, – γ_2, ... – γ_n для характеристического уравнения $A(p) = 0$ определяют из корней уравнения:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kf}}{p + \lambda_{kf}} = 0 .$$

Используя известные значения корней характеристических уравнений, частотную характеристику рассчитывают по формуле

$$\frac{1}{X_d(js)} = \frac{1}{X_d} + \sum_{k=1}^{n} \left[\frac{C_{kd}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s}\right)^2} + j \frac{C_{kd} \frac{\alpha'_{kd}}{s}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s}\right)^2} \right];$$

$$\frac{1}{X_q(js)} = \frac{1}{X_q} + \sum_{k=1}^{m} \left[\frac{C_{1q}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{1q}}{s}\right)^2} + j \frac{C_{1q} \frac{\alpha'_{1q}}{s}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{1q}}{s}\right)^2} \right];$$

$$G(js) = \sum_{k=1}^{n} \left[\frac{A_k \alpha_{kd}}{\alpha_{kd}^2 + s^2} - j \frac{A_k s}{\alpha_{kd}^2 + s^2} \right],$$

где $C_{kd} = -\frac{1}{X''_d} \frac{(\alpha_{1d} - \alpha'_{kd})(\alpha_{2d} - \alpha'_{kd}) \ldots (\alpha_{nd} - \alpha'_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha'_{kd}) \ldots (\alpha'_{k-1,d} - \alpha'_{kd}) \alpha'_{kd} (\alpha'_{k+1,d} - \alpha'_{kd}) \ldots (\alpha'_{nd} - \alpha'_{kd})};$

$$C_{1q} = -\frac{1}{X''_q} \frac{(\alpha_{1q} - \alpha'_{1q})(\alpha_{2q} - \alpha'_{1q}) \ldots (\alpha_{mq} - \alpha'_{1q})}{(\alpha_{1q} - \alpha_{kd}) \ldots (\alpha'_{1-1,q} - \alpha'_{1q}) \alpha'_{1q} (\alpha'_{1+1,q} - \alpha'_{1q}) \ldots (\alpha'_{mq} - \alpha'_{1q})};$$

$$A_k = N \frac{(\gamma_1 - \alpha_{kd}) \ldots (\gamma_{n-1} - \alpha_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha_{kd}) \ldots (\alpha_{k-1,d} - \alpha_{kd})(\alpha_{k+1,d} - \alpha_{kd}) \ldots (\alpha_{nd} - \alpha_{kd})};$$

$$N = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} \ldots \alpha_{nd}}{\gamma_1 \gamma_2 \ldots \gamma_{n-1}} \frac{\sum_{k=1}^{n-1} \frac{i_{kf}}{\lambda_{kf}}}{i_{od}}; \quad X_d = r \sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kd}}{\lambda_{kd}}; \quad X_q = r \sum_{k=1}^{m+1} \frac{i_{1q}}{\lambda_{1q}};$$

$$X''_d = \frac{r}{\sum_{k=1}^{n+1} i_{kd} \lambda_{kd}}; \quad X''_q = \frac{r}{\sum_{k=1}^{m+1} i_{1q} \lambda_{1q}}.$$

Проверка величин x_d, x''_d, x_q и x''_q должна быть сделана с величинами, полученными рекомендованными в настоящем стандарте методами, и параметрами частотной характеристики соответственно откорректированными. Если расхождение больше чем 10 %, затухание постоянного тока должно быть повторено, чтобы в результате получить равенство с фактическими параметрами частотной характеристики.

А60.1 Синхронные реактивные сопротивления и подкратковременные реактивные сопротивления по d- и q-осям определяют по формулам, приведенным в А60.

Переходное реактивное сопротивление по d- и q-осям определяют по формулам:

$$x'_{\mathrm{d}} = \frac{1}{\frac{1}{x_{\mathrm{d}}} + C_{1\mathrm{d}}} \quad \text{и} \quad x'_{\mathrm{q}} = \frac{1}{\frac{1}{x_{\mathrm{q}}} + C_{1\mathrm{q}}}$$

где $C_{1\mathrm{d}}$ и $C_{1\mathrm{q}}$ – в соответствии с А60.

А60.2 Реактивное сопротивление обратной последовательности, зная параметры частотной характеристики $\frac{1}{x_{\mathrm{d}}(js)}$ и $\frac{1}{x_{\mathrm{q}}(js)}$, определяют как мнимую часть:

$$x_2 = \mathrm{Im}\left\{\frac{j}{\frac{1}{2}\left[\frac{1}{x_{\mathrm{d}}(js)_{s=2}} + \frac{1}{x_{\mathrm{q}}(js)_{s=2}}\right]}\right\}$$

А60.3 Постоянные времени по продольной оси синхронных машин определяют, используя известные корни характеристических уравнений $D_{\mathrm{d}}(p) = 0$; $D'_{\mathrm{d}}(p) = 0$, по формулам:

$$\tau'_{\mathrm{d}} = \frac{1}{\omega\alpha'_{1\mathrm{d}}}; \quad \tau''_{\mathrm{d}} = \frac{1}{\omega\alpha'_{2\mathrm{d}}}; \quad \tau'''_{\mathrm{d}} = \frac{1}{\omega\alpha'_{3\mathrm{d}}}; \ldots$$

$$\tau'_{\mathrm{do}} = \frac{1}{\omega\alpha_{1\mathrm{d}}}; \quad \tau''_{\mathrm{do}} = \frac{1}{\omega\alpha_{2\mathrm{d}}}; \quad \tau'_{\mathrm{do}} = \frac{1}{\omega\alpha_{3\mathrm{d}}}; \ldots$$

$$\omega = 2\pi f.$$

А60.4 Постоянные времени по поперечной оси определяются подобным образом, используя корни характеристических уравнений $D_{\mathrm{q}}(p) = 0$; $D'_{\mathrm{q}}(p) = 0$.

А60.5 Функция частотной характеристики, учитывая определенное скольжение, для d- и q-осей (см. А56, А58 и А58.1) может быть представлена как:

$$Z(js) = \mathrm{Re}\left[Z(js)\right] + j\,\mathrm{Im}\left[Z(js)\right],$$

где $Z(js) = \frac{r}{s} + jx(js)$ для конкретной оси.

А61 Испытание внезапно прикладываемым постоянным током в состоянии покоя

Внезапно прикладываемый постоянный ток при испытании обмотки якоря используется для определения передаточных функций уравнений всех синхронных машин. Эти передаточные функции могут использоваться для изучения переходных процессов в синхронных машинах. Они имеют специальное значение для машин с цельным ротором.

В соответствии с блок-схемой (рисунок А22), следующие передаточные функции могут использоваться для продольной оси:

$$\psi_{dd}(p); \psi_{df}(p); \psi_{qq}(p); i_{ff}(p); i_{fd}(p); U_{ff}(p); U_{fd}(p).$$

Подобные передаточные функции могут использоваться и для q-оси.

Так как $i_{\mathrm{ff}}(p) = \frac{1}{u_{\mathrm{ff}}(p)}$ и $U_{\mathrm{fd}}(p) = i_{\mathrm{fd}}(p)$, $U_{\mathrm{ff}}(p) = \frac{i_{\mathrm{fd}}(p)}{i_{\mathrm{ff}}(p)}$, то экспериментальное определение может быть ограничено пятью функциями.

Испытание проводят с машиной, когда ротор находится в состоянии покоя, сориентированный сначала по продольной, а затем по поперечной оси (см. 57).

Для измерений, при которых U_f будет равно нулю, обмотка возбуждения замкнута накоротко перемычкой из тяжелого металла.

Это целесообразно проводить сначала, чтобы измерить все передаточные функции при одном положении оси и затем повернуть ротор на другое положение оси.

А61.1 Измерение $\psi_{dd}(p)$

Обмотку возбуждения замыкают накоротко *(U_f = 0)*.

Входной величиной должна быть скачкообразная функция тока обмотки якоря по продольным осям. Ток подается от генератора постоянного тока, напряжение которого U_0 фактически независимо от нагрузки. Большое сопротивление R включено между генератором постоянного тока и обмоткой якоря (рисунок А23). Индуктивность L_s цепи зависит от обмотки якоря машины при испытании, измерительных приборов и генератора постоянного тока. Последовательное сопротивление R должно быть выбрано так, чтобы постоянная времени нарастания тока после подключения генератора постоянного тока была меньше чем 5 мс. Ток статора фактически равен U_0/R и должен быть не менее 5 % номинального тока турбогенератора.

Выходная величина – это переходная характеристика магнитного потока ψ_d машины. Заданную выходную величину измеряют с помощью датчика. Изменение потока $d\psi_d/dt$ обмотки якоря получают как разность между напряжением U_s в обмотке и напряжением на сопротивлении R_s обмотки якоря.

$$\frac{d\psi_d}{d_t} = U_s - I_s R_s .$$

Напряжение U_s является питающим для суммирующего устройства датчиков через потенциометр, понижающий его. Понижение должно быть не менее чем U_R/U_0, чтобы гарантировать, что напряжение на входе суммирующего устройства не превышает опорное напряжение U_R аналогового компьютера, например, 10 В или 100 В.

Напряжение, которое является пропорциональным $I_s R_s$, может отводиться на сопротивление R. Чтобы была возможность его точного задания, это напряжение подается на суммирующее устройство как отрицательная величина через потенциометр. Выход суммирующего устройства объединен. Постоянная времени интегрирования $\tau_I = R_I C_I$ должна быть такой, чтобы напряжение на выходе интегратора не превышало опорное напряжение аналогового компьютера. При измерении с помощью турбогенератора 300 МВА C_I должно быть приблизительно 1 мкФ и R_I приблизительно 50 кОм. Это напряжение может наблюдаться на экране осциллографа и фотографироваться.

Потенциометр, с помощью которого измеряют напряжение $I_s R_s$, должен быть сбалансирован так, чтобы напряжение было равно, но противоположно по знаку, напряжению U_s, измеренному на постоянном токе, т. е. ($U_s - I_s R_s = 0$). После того как включен ток якоря, передаточная функция генератора ψ_d *(t)* появится на осциллографе.

Те же самые электромагнитные характеристики могут быть получены посредством опыта внезапного короткого замыкания. Обмотку возбуждения замыкают накоротко *($U_f = 0$)*. Внутренним сопротивлением обмотки возбуждения можно пренебречь. Когда напряжение на короткозамкнутых зажимах равно U_q, входная величина, т. е. магнитный поток, резко изменяется.

Реакция на скачок – ток в обмотке якоря после вычитания составляющей постоянного тока (сопротивление обмотки якоря мало относительно ее реактивного сопротивления). Передаточная функция, полученная при опыте внезапного короткого замыкания, будет $\psi_{dd}(p)$.

А61.2 Измерение ψ_{df}(p)

Обмотку якоря (первичную) размыкают ($I_d = 0$).

Входной величиной должна быть ступенчатая функция напряжения на выходе цепи возбуждения. Целесообразно отключить напряжение непосредственно на короткозамкнутой обмотке возбуждения, одновременно переключив короткозамкнутый источник напряжения на сопротивление.

Выходная величина – это магнитный поток ψ_d в машине, который может быть измерен методом, подобно описанному в А61.1.

А61.3 Измерение $i_{fd}(p)$

Обмотку возбуждения замыкают накоротко ($U_f = 0$).

Входная величина – ток обмотки якоря, приложенный, как описано в А61.1.

Выходная величина – ток обмотки возбуждения.

А61.4 Измерение $U_{fd}(p)$

Обмотку возбуждения размыкают ($I_f = 0$).

Входная величина – ток обмотки якоря, приложенный, как описано в А61.1.

Выходная величина – напряжение обмотки возбуждения.

Опыт показывает, что напряжение обмотки возбуждения в момент времени $t = 0$ очень высоко, но быстро уменьшается. Поэтому должен быть подан только малый ток к якорю, так как иначе напряжение обмотки возбуждения может оказаться чрезмерным. Допустимая величина тока обмотки якоря зависит от эффекта демпфирования в роторе, и ток должен быть выбран на основании опыта.

Желательно брать напряжение обмотки возбуждения U_L с функционального преобразователя аналогового компьютера. Входное напряжение этого функционального преобразователя – U_L, а выходное напряжение – $\log U_L$. Переходная характеристика может тогда быть лучше оценена.

А61.5 Измерение $\psi_{qq}(p)$

Входная величина – ступенчатая функция тока обмотки якоря по поперечной оси. Структура цепи такая, как описано в А61.1. Но ротор повернут на 90 электрических градусов.

Выходная величина – передаточная функция магнитного потока машины ψ_q. Измеряется так же, как описано в А61.1.

Возможно измерить ток короткого замыкания по поперечной оси, но устройство будет более сложным, чем для продольной оси. Определяемая передаточная функция тогда будет $1/\psi_{qq}(p)$.

А61.6 Измерение $i_{ff}(p)$

Обмотка якоря разомкнута ($I_d = 0$).

Входная величина – ступенчатая функция напряжения на обмотке возбуждения, как в случае измерения $\psi_{df}(p)$.

Передаточная функция обмотки возбуждения измерена как выходная величина.

А62 Определение частотной характеристики при испытании внезапно прикладываемым постоянным током в состоянии покоя

Для измерения магнитного потока необходимо калибровать измерительное устройство, состоящее из преобразователя и осциллографа.

Ступенчатая функция напряжения U_e подается на вход преобразователя. Тогда на экране осциллографа появляется пилообразная функция.

За время T_a напряжение на осциллографе повышается от 0 до L_g. Следовательно, вольт-временная область U_eT_a на входе преобразователя на выходе производит напряжение U_a.

Если при испытании с генератором напряжение U_a^x измеряют на осциллографе, вольт-временная область, т. е. поток в генераторе, определяют по формуле

$$\Phi = \frac{U_e T_a}{U_a} U_a^x .$$

Зная Ф, угловую частоту и ток обмотки якоря, реактивное сопротивление вычисляют по формуле $X = \omega\Phi/I$.

А62.1 Для времени $t \to \infty$ синхронные реактивные сопротивления X_d или X_q для двух фаз соединены.

Для одной фазы синхронное реактивное сопротивление X_d с измеренными значениями равно:

$$X_d = \frac{\omega}{\sqrt{3}} = \frac{U_e T_a}{U_a} = \frac{U_a^x}{I} .$$

Тогда номинальное сопротивление U'^2/S возможно вычислить по формулам:

$$X_d = \frac{\omega}{\sqrt{3}} = \frac{U_e T_e}{U_a} = \frac{U_a^x}{I} = \frac{S}{U^2}, \text{ относительные единицы,}$$

где S – номинальная кажущаяся мощность испытуемой машины;
U – номинальное напряжение той же самой машины.

Величина X_d должна быть проверена с помощью рекомендованного метода (см. 27), и если полученные величины совпадают, результаты испытания могут использоваться для того, чтобы определить частотную характеристику.

А62.2 Калибровка измерительных приборов, использованных для определения частотных характеристик в цепи возбуждения проводится обычным способом. Функциональный генератор $f(U_L)$ = log U_L должен быть введен в схему для калибровки.

А63 Определение величин вычислением, используя известные величины, полученные при испытании

Постоянную времени короткого замыкания переходного процесса по поперечной оси (см. 16) определяют вычислением с учетом полученных при испытании величин x_q (см. А6), x'_q (см. А8) и τ'_{q0} (см. А15) по формуле

$$\tau'_q = \tau'_{q0} \frac{x'_q}{x_q}.$$

А63.1 Сверхпереходную постоянную времени короткого замыкания по поперечной оси (см. А19) определяют с учетом полученных при испытании величин x'_q (см. А8), x''_q (см. А9) и τ''_{q0} (см. А18) по формуле

$$\tau''_q = \tau''_{q0} \frac{x''_q}{x'_q}.$$

Таблица 1А – Методы испытаний и таблица перекрестных ссылок

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина
i_{fk}	А4	Испытание перевозбуждением при нулевом коэффициенте мощности и переменном напряжении якоря	А25 А26	
x_d	А5	Испытание фазовым сдвигом	А27 А28	Непредельная
x_q	А6	Испытание фазовым сдвигом	А27 А28	Непредельная
		Отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением	А29 А30	
		Применение испытания с отключением низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой	А31 А32	
		Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	
x'_d	А7	Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	Непредельная

Продолжение таблицы 1А

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина
x'_q	А8	Отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением	А29 А30	Непредельная
		Применение испытания с отключением низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой	А31 А32	
		Испытание внезапным коротким замыканием машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении	А33 А34	
		Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	
x''_q	А9	Отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением	А29 А30	
		Применение испытания с отключением низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой	А31 А32	
		Испытание внезапным коротким замыканием машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении	А33 А34	
x_2	А10	Испытание внезапным междуфазным коротким замыканием	А35 А36	
		Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	
x_o	А11	Испытание прикладываемым напряжением со снятым ротором	А39 А40	
z_{st}	А12	Испытание с блокированным ротором	А41 А42	
τ'_{d0}	А13	Испытание внезапно прикладываемым возбуждением с разомкнутой обмоткой якоря	А43 А44	
		Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	
τ'_d	А14	Испытание внезапно прикладываемым возбуждением с короткозамкнутой обмоткой якоря	А45 А46	
		Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	

Продолжение таблицы 1А

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина
τ'_{q0}	А15	Отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением Применение испытания с отключением низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А29 А30 А31 А32 А59 А60	
τ'_{q}	А16	Испытание внезапным коротким замыканием машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении Определение величин вычислением, используя известные величины, полученные при испытании Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А33 А34 А63 А59 А60	
τ''_{d0}	А17	Испытание методом восстановления напряжения Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А47 А48 А59 А60	
τ''_{q0}	А18	Отключение прикладываемого низкого напряжения якоря при испытании с очень низким скольжением Применение испытания с отключением низкого напряжения якоря машины, работающей асинхронно под нагрузкой Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А29 А30 А31 А32 А39 А60	
τ''_{q}	А19	Испытание внезапным коротким замыканием машины, работающей под нагрузкой при низком напряжении Определение величин вычислением, используя известные величины, полученные при испытании Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А33 А34 А63 А59 А60	
τ_{fd0} τ_{kd0}	А20 А21	Испытание гашением поля с разомкнутой обмоткой якоря	А49 А50	
τ_{fd} τ_{kd}	А22 А23	Испытание гашением поля с короткозамкнутой обмоткой якоря	А51 А52	

Окончание таблицы 1А

Величина	Определения (пункты и подпункты)	Наименование испытания	Методы испытаний (пункты)	Предельная или непредельная величина
Частотные характеристики	А24	Испытание при асинхронной работе под нагрузкой	А53 А54	
		Асинхронная работа в течение испытания при низком напряжении	А55 А56	
		Испытание приложением напряжения переменной частоты в состоянии покоя	А57 А58	
		Затухание постоянного тока в обмотке якоря при испытании в состоянии покоя	А59 А60	
		Испытание внезапно прикладываемым постоянным током в состоянии покоя	А61 А62	

Список литературы

В списке приведена литература по новым методам определения параметров и характеристик синхронных машин, включенных в это приложение. Этот список не является полным списком литературы по предмету или установлению авторских прав.

1. S.H. Wright. Determination of synchronous machine constants by test (Reactances, Resistances and Time Constants), Tr. AIEE, v.50, № 4, 1931, p. 1331 (Определение постоянных для синхронных машин испытанием (Реактивные сопротивления. Постоянные сопротивления и времени).

2. R. Rudenberg. Transient performance of electric power systems. 1950. New York (Переходной процесс в системах электроэнергии).

3. E.J. Kazovski. Calculating a.c. machine transients using frequency characteristics, Electrichestvo, 1960, № 4, pp. 30 – 37 (Расчет переходных процессов в электрических машинах переменного тока, используя частотные характеристики).

4. S.K. Sen and B.Adkins The application of the frequency response method to electrical machines, Proceedings of the IEE. Part C, Volume 103, 1956, № 4, pp. 378 – 391 (Применение метода частотной характеристики к электрическим машинам).

5. E.J. Kazovski and G. G. Ragozin. A study of transients in turbogenerators by the method of frequency characteristics, Electrichestvo, 1964, № 2, pp. 42 – 48 (Изучение переходных процессов в турбогенераторах методом частотных характеристик).

6. E.J. Kazovski and G. G. Ragozin. Turbogenerator frequency characteristics determined experimentally, Electrichestvo, 1963, № 10, pp. 14 – 22 (Частотные характеристики турбогенератора, определенные экспериментально).

7. N.L. Sokolov and B. I. Kirkin. Determination of synchronous machine frequency characteristics, Electrichestvo, 1962, № 1, pp. 29 – 36 (Определение частотных характеристик синхронных машин).

8. B.I. Kirkin and L. S. Lindorf. Determining starting characteristics of synchronous motors. Electrichestvo, 1964, № 6, pp. 63 – 68 (Определение пусковых характеристик синхронных двигателей).

9. L.G. Mamikoniants. Transients in synchronous machines with damper rotor winding, Electrichestvo, 1954, No.7, pp. 10 – 15 (Переходных процессы в синхронных машинах с демпферной обмоткой ротора).

10. P. Bharali and B. Adkins. Operational impedances of turbogenerators with solid rotors, Pr.IEE, 1963, v. 110, № 12, p. 2185 (Полные сопротивления турбогенераторов с массивными роторами).

11. W. Paczek. Analysis of the fundamental parameters of the synchronous machines with consideration of their measurement, Przeglad Elektrotechniczny, 1962, v. XXXVIII, № 1, pp. 14 – 20 (Исследование основных характеристик синхронных машин с учетом их измерения).

12. L. Hannakan. Structural schemes and frequency response characteristics of a.c. machines. Papers IAAC, 1960 (Структурные схемы и частотные характеристики электрических машин переменного тока).

13. Z. Zoubeck. Frequency characteristics of synchronous machines, Electrotechnicky Obzor, 1964, v. 53, № 2, pp. 65 – 73 (Частотные характеристики синхронных машин, Электротехнический обзор).

14. I.M. Canay. Block diagrams and transfer functions of the synchronous machine. Trans IEEE, paper 66 – 129 (PAS-85, № 9, pp. 952 – 959) (Структурные схемы и передаточные функции синхронных машин).

15. I.M. Canay. Determination of frequency response characteristic of synchronous machines with help of direct current. Bull. ASE, v. 56, 1965, № 21 – 26, October (Определение частотной характеристики синхронных машин с помощью прямого тока).

16. I.M. Canay. A new method of determining q-axis quantities of a synchronous machine, ETZ A, vol. 86, 1965, pp. 561 – 568 (Новый метод определения параметров поперечной оси синхронных машин).

17. G.C. Gervais. Testing of electrical machines, published by Energia, 1968.

18. J.C. Prescott and A. K. El-Kharashi. A method of measuring self-inductances applicable to large electrical machines. Pr. IEE, Part A, April 1959, v.1, 106, № 26 (Промышленные испытания электрических машин).

19. J.B. Danilevich, V. V. Dombrovski, E.J. Kazovski. Quantities of a.c. electrical machines, published by Nauka, 1965 (Метод измерения собственных индуктивностей, применяемый к большим электрическим машинам).

20. K.Fork. Messtechnische Grundlage zur Berechnung von Ausgleichsvorgangen der Synchronmaschinen, ETZ-A, v. 88 (1967), № 3, pp. 65 – 69 (Параметры машин переменного тока).

21. IEEE Committee Report. Recommended phasor diagram for synchronous machines, PAS-88, 1969, № 11, pp. 1593 – 1611 (Рекомендованная векторная диаграмма для синхронных машин).

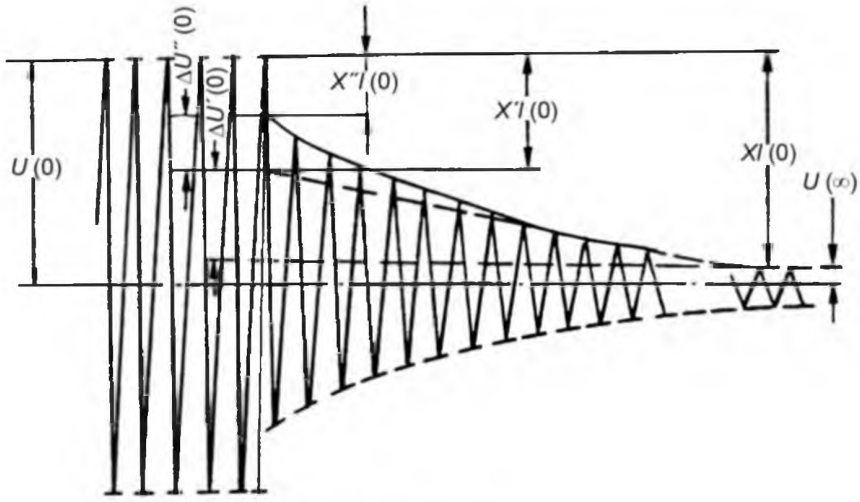


Рисунок А1

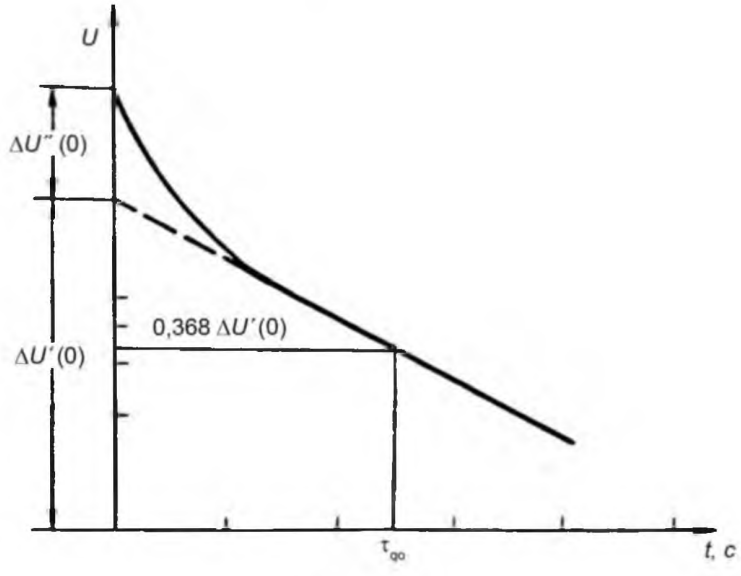


Рисунок А2

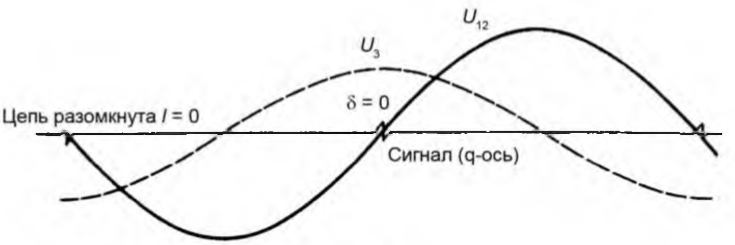


Рисунок А3

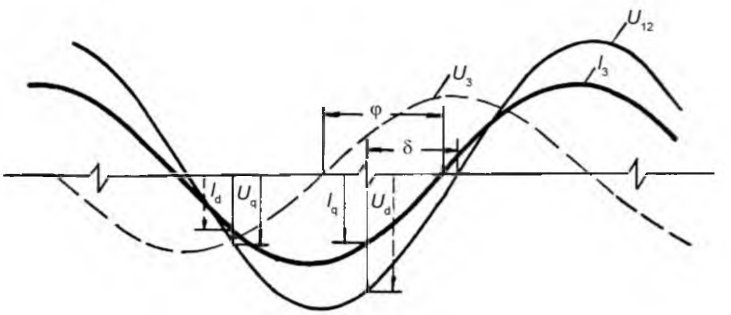


Рисунок А4

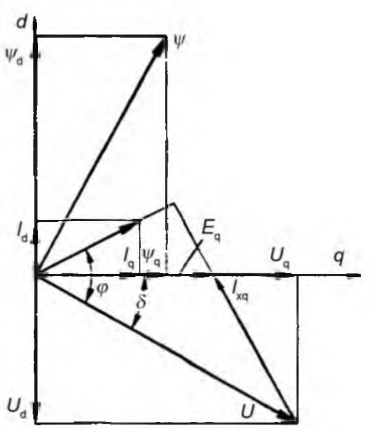


Рисунок А5

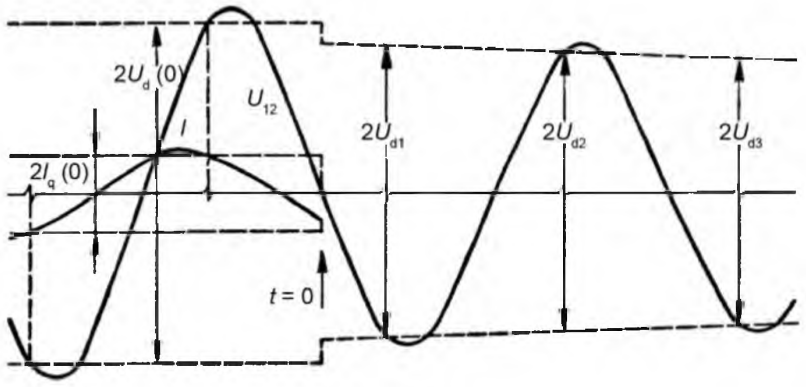


Рисунок А6

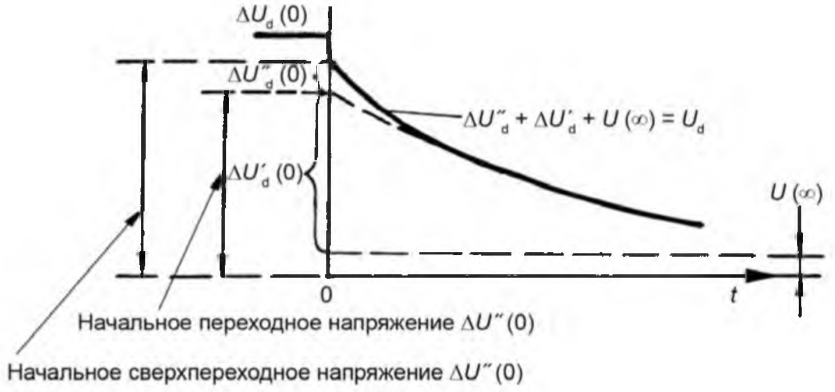


Рисунок А7

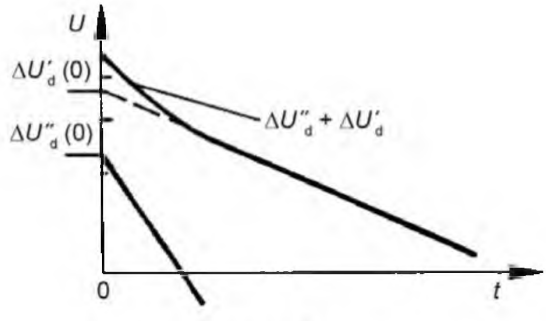


Рисунок А8

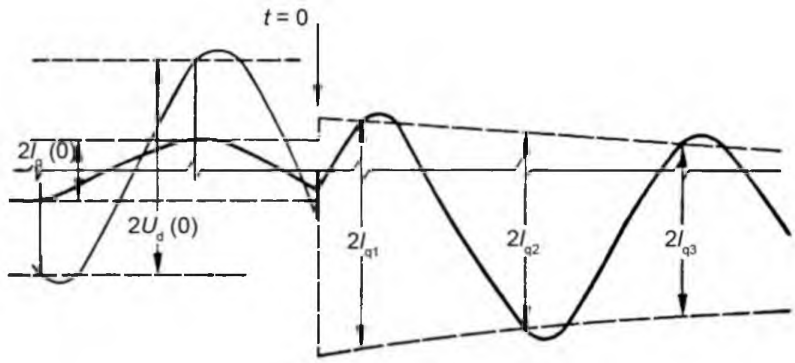


Рисунок А9

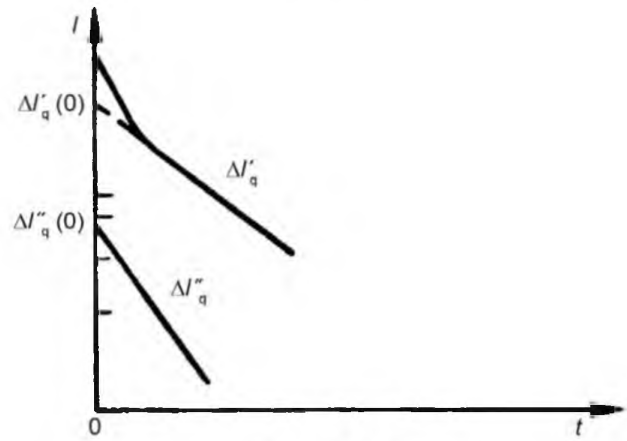


Рисунок А10

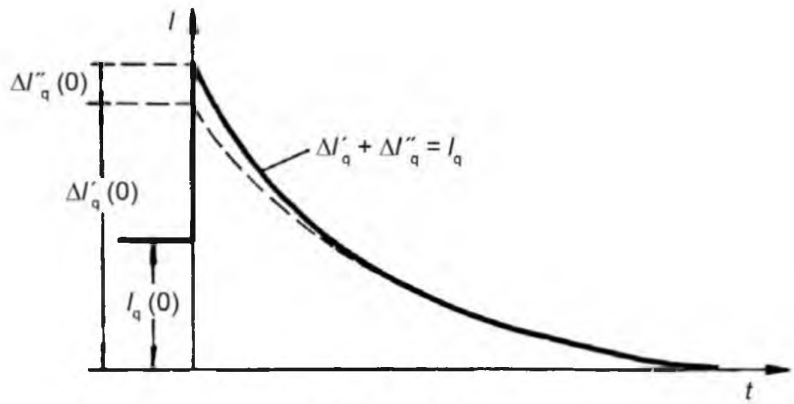


Рисунок А11

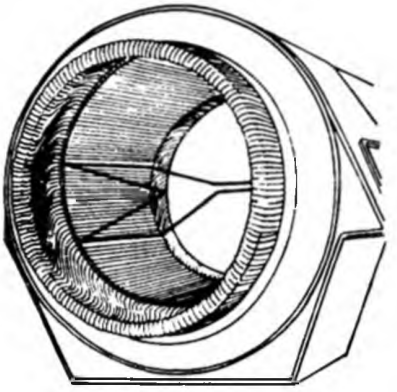


Рисунок А12

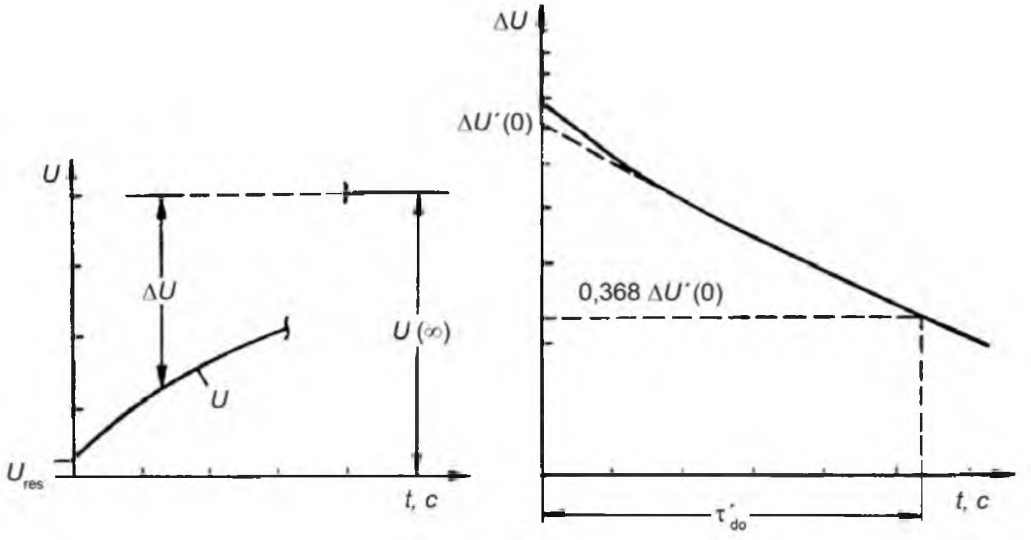


Рисунок А13

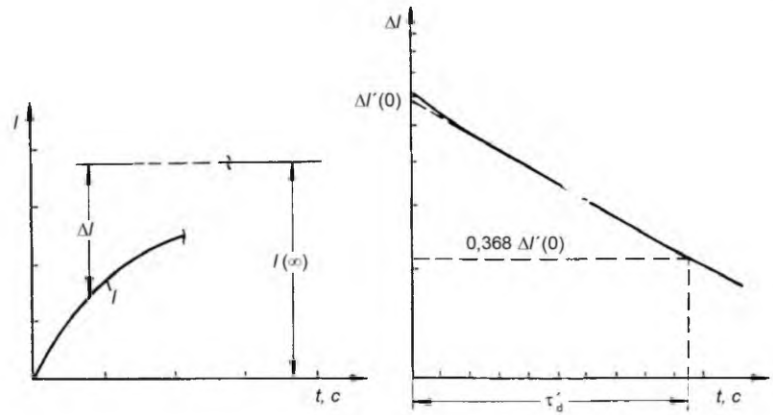


Рисунок А14

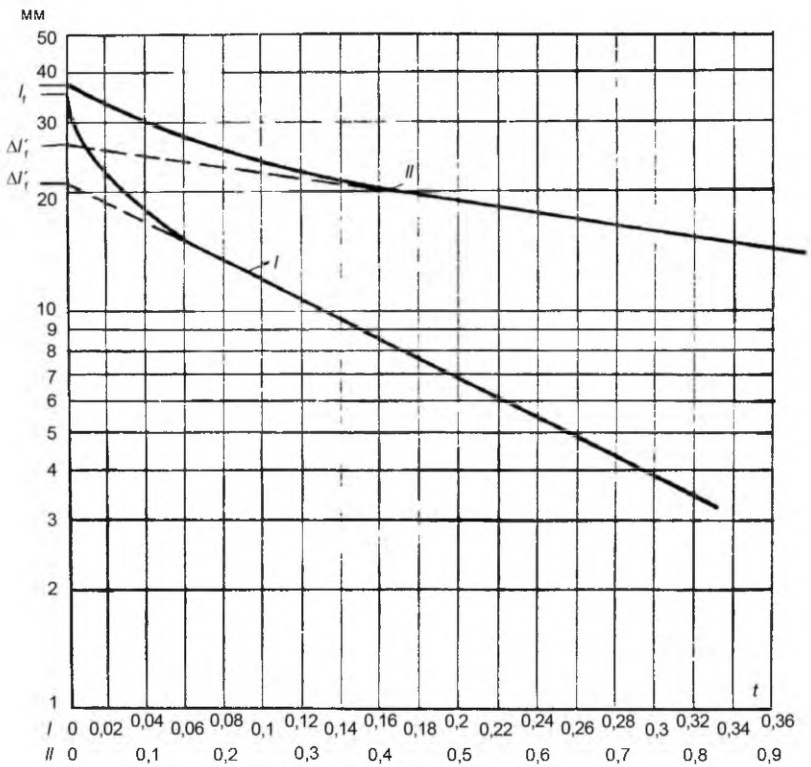


Рисунок А15

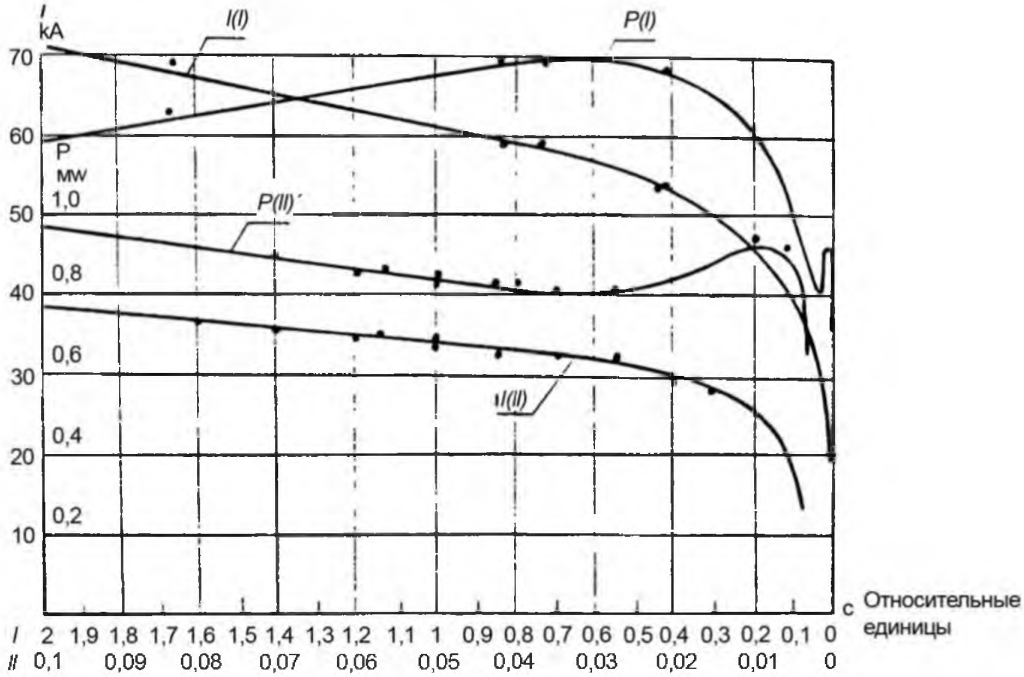


Рисунок А16

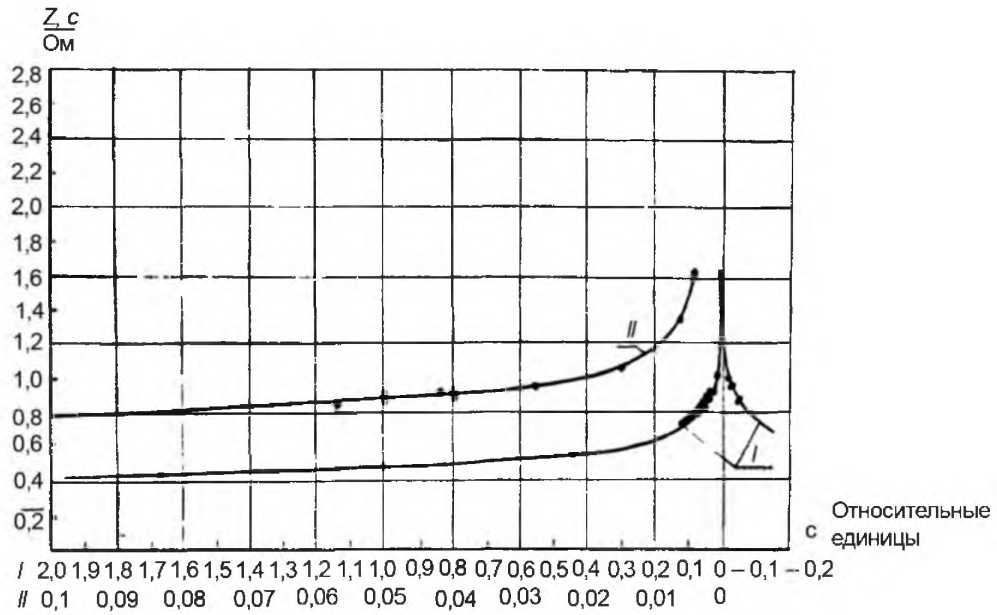
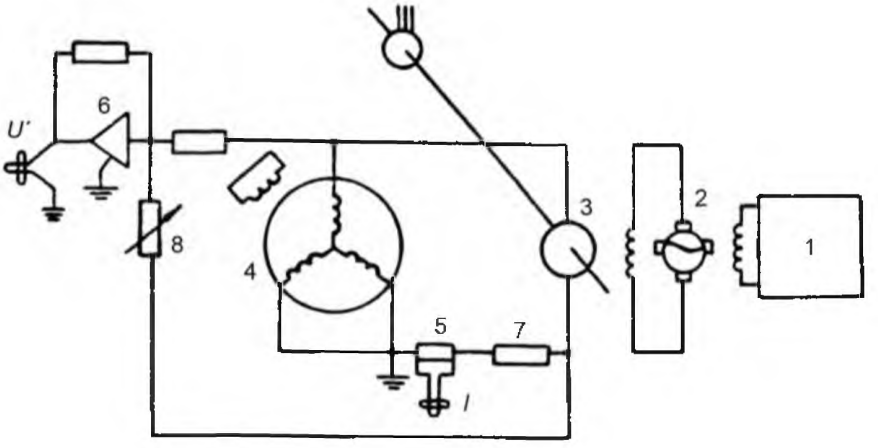
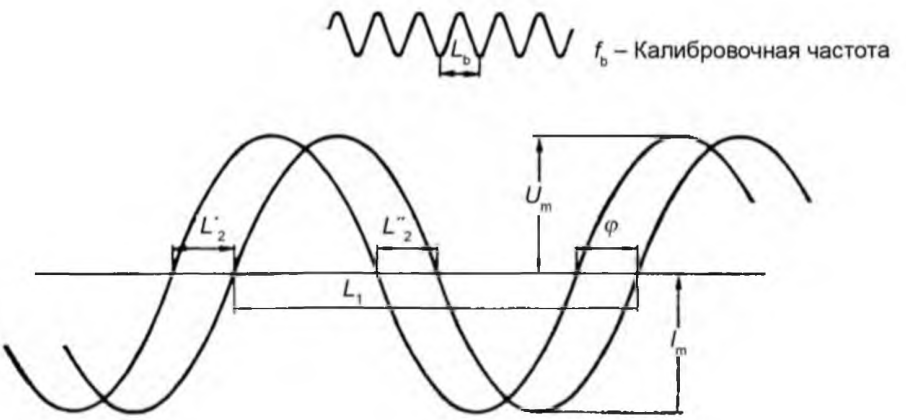


Рисунок А17



1 – генератор переменной низкой частоты;
2 – электромашинный усилитель;
3 – генераторная установка постоянного тока;
4 – испытуемая машина (соединение фаз: две фазы последовательно с третьей разомкнутой или две фазы параллельно и последовательно с третьей);
5 – шунт;
6 – суммирующий усилитель;
7 – добавочный резистор 0,1 Ом для стабилизации работы машины постоянного тока;
8 – переменный резистор для усилителя.

Рисунок А18



$$\varphi = \frac{L'_1 + L''_2}{2L_1} \cdot 360\,;\; S = \frac{f_b L_b}{fL_1}$$ *f – номинальная частота*

Рисунок А19

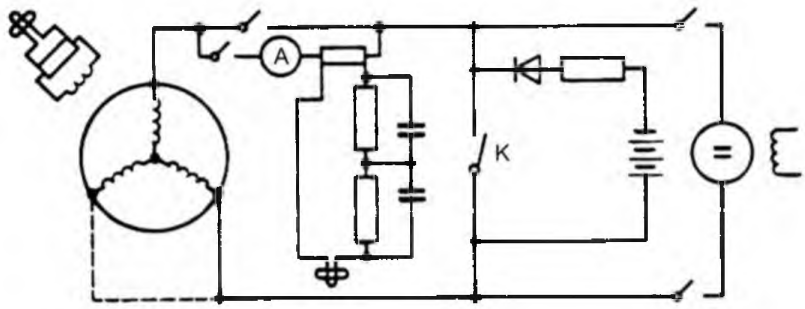


Рисунок А20

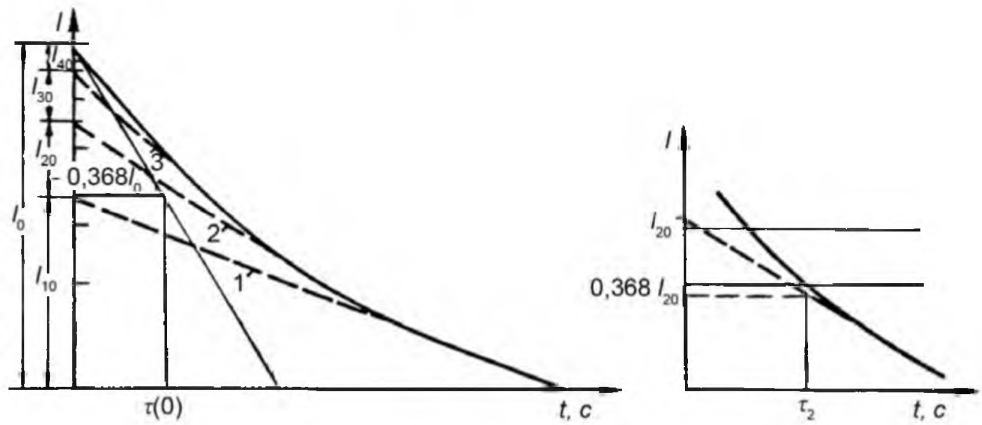


Рисунок А21

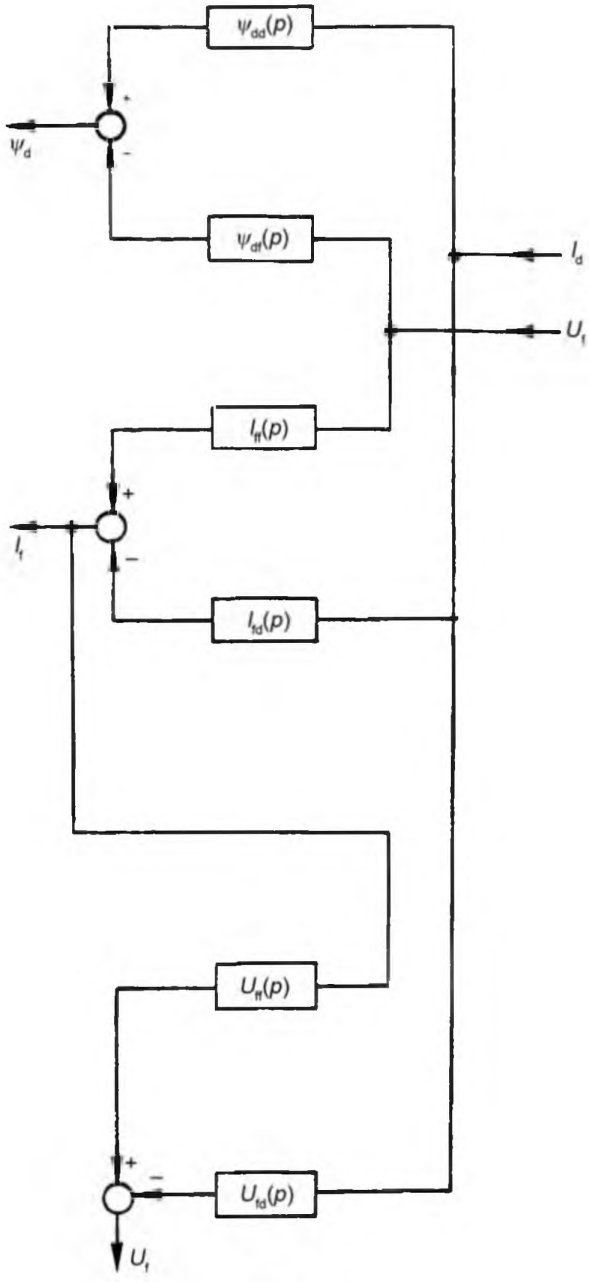
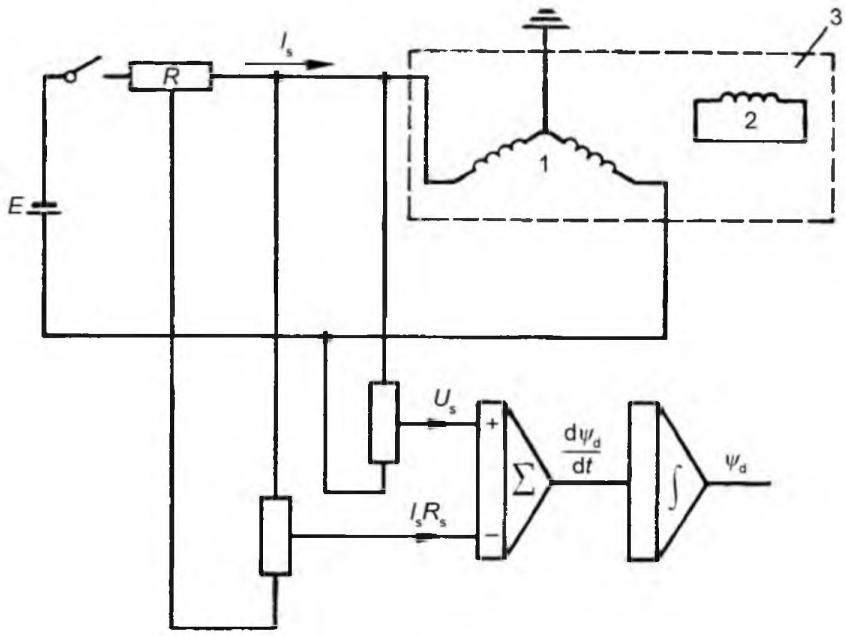


Рисунок А22



1 – обмотка (первичная) якоря;
2 – обмотка возбуждения;
3 – испытуемая машина

Рисунок А23

Ответственный за выпуск *В.Л. Гуревич*

Сдано в набор 19.09.2006 Подписано в печать 27.10.2006 Формат бумаги 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать ризографическая Усл. печ.л. 9,42 Уч.-изд. л. 4,51 Тираж экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
НПРУП "Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации" (БелГИСС)
Лицензия № 02330/0133084 от 30.04.2004
БелГИСС, 220113, г. Минск, ул. Мележа, 3

gost.e-ecolog.ru