ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

СТБ IEC 60034-2-1-2011

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 2-1

Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия при испытаниях (за исключением машин для тяговых транспортных средств)

МАШЫНЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫЯ, ЯКІЯ ВЕРЦЯЦЦА

Частка 2-1

Стандартныя метады вызначэння страт і каэфіцыента карыснага дзеяння пры выпрабаваннях (за выключэннем машын для цягавых транспартных сродкаў)

(IEC 60034-2-1:2007, IDT)

Издание официальное

БЗ 2-2011

Госстандарт
Минск

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.313:620.1.052(083.74)(476) МКС 29.160 КП 02 IDT

Ключевые слова: машина постоянного тока, асинхронная машина, синхронная машина, коэффициент полезного действия, потери, прямой метод измерения, косвенный метод измерения

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 30 сентября 2011 г. № 70

3 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту IEC 60034-2-1:2007 Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) (Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия при испытаниях (за исключением машин для тяговых транспортных средств).

Международный стандарт разработан подкомитетом 2D «Потери и КПД» технического комитета по стандартизации IEC/TC 2 «Вращающиеся машины» Международной электротехнической комиссии (IEC).

Перевод с английского языка (en).

Официальные экземпляры международного стандарта, на основе которого подготовлен настоящий государственный стандарт, и международных стандартов, на которые даны ссылки, имеются в Национальном фонде ТНПА.

В разделе «Нормативные ссылки» и тексте стандарта ссылки на международные стандарты актуализированы.

Сведения о соответствии государственных стандартов ссылочным международным стандартам приведены в дополнительном приложении Д.А.

Степень соответствия – идентичная (IDT)

4 ВЗАМЕН СТБ МЭК 60034-2-2005 (с отменой на территории Республики Беларусь ГОСТ МЭК 60034-2-2008)

© Госстандарт, 2011

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

Издан на русском языке

Содержание

1 Область применения ... 1
2 Нормативные ссылки ... 1
3 Термины и определения ... 2
3.2 Испытания для определения коэффициента полезного действия прямым методом измерения ... 2
3.3 Испытания для определения коэффициента полезного действия косвенным методом измерения ... 2
3.4 Потери ... 3
3.5 Определяемые при испытаниях параметры (многофазные машины переменного тока) ... 5
4 Условные обозначения и сокращения ... 5
4.1 Условные обозначения ... 5
4.2 Дополнительные подстрочные индексы ... 6
5 Основные требования ... 7
5.1 Прямое и косвенное определение коэффициента полезного действия ... 7
5.2 Неопределенность ... 7
5.3 Предпочтительные методы ... 7
5.4 Электропитание ... 10
5.5 Средства измерения ... 10
5.6 Единицы измерения ... 11
5.7 Электрическое сопротивление ... 11
6 Методы испытаний для определения коэффициента полезного действия ... 12
6.1 Состояние испытуемой машины и категории испытаний ... 12
6.2 Измерения в цепи возбуждения ... 13
6.3 Прямые измерения ... 13
6.4 Косвенные измерения ... 15
7 Определение коэффициента полезного действия (машины постоянного тока) ... 24
7.1 Определение прямым методом измерения ... 24
7.2 Определение косвенным методом измерения ... 24
8 Определение коэффициента полезного действия (асинхронные машины) ... 28
8.1 Определение прямым методом измерения ... 28
8.2 Определение косвенным методом измерения ... 28
9 Определение коэффициента полезного действия (синхронные машины) ... 37
9.1 Определение прямым методом измерения ... 37
9.2 Определение косвенным методом измерения ... 37
Приложение А (обязательное) Корректировка значений при определении вращающего момента с помощью динамометра ... 41
Приложение В (обязательное) Расчет значений параметров методом Eh-star ... 42
Приложение С (справочное) Виды систем возбуждения ... 44
Приложение D (обязательное) Дополнительные методы испытания ... 45
Приложение Д.А (справочное) Сведения о соответствии государственных стандартов ссылочным международным стандартам ... 53

Введение

На этапе пересмотра IEC 60034-2:1972 и его изменения A1:1995 (в раздел 17 введена ссылка на IEC 60034-2A:1974) и изменения A2:1996 от рабочей группы WG 28 поступило предложение, которое было принято техническим комитетом по стандартизации TC 2, о разделении пересмотренных стандартов на три части:

– первая часть (IEC 60034-2-1), распространяющаяся на машины, входящие в область применения IEC 60034-1, которые обычно испытывают под нагрузкой;

– вторая часть (IEC 60034-2-2), распространяющаяся на испытания, применимые главным образом к большим машинам, в отношении которых применение других методов экономически нецелесообразно (особенно испытание машин методом тарированного двигателя, испытание методом самоторможения или выбега и калориметрический метод);

– третья часть (IEC 60034-2-3), устанавливающая методы испытаний машин, питающихся от преобразователя.

Для сохранения в IEC 60034-2-1 в качестве обязательных методов испытаний, которые в итоге будут представлены в IEC 60034-2-2, в него было добавлено временное приложение D. В это приложение включены элементы из IEC 60034-2:1972 с его изменением A1:1995. В нем также дается ссылка на IEC 60034-2A:1974. Содержимое обоих этих стандартов будет включено в разрабатываемый стандарт IEC 60034-2-2.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ
Часть 2-1
Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия при испытаниях (за исключением машин для тяговых транспортных средств)

МАШЫНЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫЯ, ЯКІЯ ВЕРЦЯЦЦА
Частка 2-1
Стандартныя метады вызначэння страт і каэфіцыента карыснага дзеяння пры выпрабаваннях (за выключэннем машын для цягавых транспартных сродкаў)

Rotating electrical machines
Part 2-1
Standard methods for determining losses and efficiency from tests
(excluding machines for traction vehicles)

Дата введения 2012-01-01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методы определения коэффициента полезного действия на основании испытаний, а также методы получения значений конкретных потерь.

Настоящий стандарт распространяется на машины постоянного тока и синхронные и асинхронные машины переменного тока любых размеров, входящие в область применения IEC 60034-1.

Примечание – Эти методы можно применять и к другим типам машин, таким как вращающиеся преобразователи, коллекторные двигатели переменного тока и однофазные асинхронные двигатели.

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего стандарта необходимы следующие ссылочные стандарты. Для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного стандарта (включая все его изменения).

IEC 60027-1:1992 Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 1. Общие положения

IEC 60034-1:2010 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные и эксплуатационные характеристики

IEC 60034-2A:1974 Машины электрические вращающиеся. Часть 2. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава). 1-е дополнение. Измерение потерь калориметрическим методом

IEC 60034-4:2008 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин

IEC 60034-19:1995 Машины электрические вращающиеся. Часть 19. Специальные методы испытаний для машин постоянного тока со стандартными источниками питания и с источниками питания от преобразователей и выпрямителей

IEC 60034-29:2008 * Машины электрические вращающиеся. Часть 29. Эквивалентная нагрузка и методы наложения. Косвенные испытания для определения повышения температуры

IEC 60044 (все части) Трансформаторы измерительные

IEC 60051-1:1997 Приборы электроизмерительные аналоговые показывающие прямого действия и комплектующие принадлежности к ним. Часть 1. Определения и общие требования, присущие всем деталям

* Действует взамен IEC 61986:2002.

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяют термины, установленные в IEC 60034-1 и IEC 60051-1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 коэффициент полезного действия (efficiency): Отношение полезной мощности к потребляемой мощности, значения которых должны быть указаны в одних и тех же единицах измерения, выраженное, как правило, в процентах.

3.2 Испытания для определения коэффициента полезного действия прямым методом измерения

3.2.1 Общие положения

Метод, которым непосредственное определение коэффициента полезного действия осуществляется посредством прямого измерения входной и выходной мощности.

3.2.2 испытание с применением измерителя вращающего момента (torque meter test): Испытание, при котором выходная механическая мощность на валу машины, работающей в режиме двигателя, определяется посредством измерения вращающего момента вала с помощью измерителя вращающего момента совместно с частотой вращения; или же испытание, которое проводится на машине, работающей в режиме генератора, с помощью измерителя вращающего момента для определения входной механической мощности.

3.2.3 испытание с применением динамометра (dynamometer test): Испытание в соответствии с 3.2.2, при котором измерение вращающего момента вала осуществляют с помощью динамометра.

3.2.4 испытание методом взаимной нагрузки с двумя источниками питания (dual-supply back-to-back test): Испытание, при котором две идентичные машины соединяют механически и рассчитывают полные потери обеих машин как разность между входной электрической мощностью одной машины и выходной электрической мощностью другой машины.

3.3 Испытания для определения коэффициента полезного действия косвенным методом измерения

3.3.1 Общие положения

Испытание, при котором косвенное определение коэффициента полезного действия осуществляется посредством измерения входной или выходной мощности и определения полных потерь. Эти потери суммируют с выходной мощностью для получения входной мощности или вычитают из входной мощности для получения выходной мощности.

3.3.2 испытание методом взаимной нагрузки с одним источником питания (single-supply back-to-back test): Испытание, при котором две идентичные машины соединяют механически и электрически подключают к одной и той же сети питания. За полные потери обеих машин принимают входную мощность, потребляемую от сети.

3.3.3 испытание машины без нагрузки (no-load test): Испытание, при котором машина работает в режиме двигателя, не создавая полезной механической выходной мощности на валу, или в режиме генератора с разомкнутыми выходными зажимами.

3.3.4 испытание с нулевым коэффициентом мощности (синхронные машины) [zero power factor test (synchronous machines)]: Испытание без нагрузки возбужденной синхронной машины, которая работает с коэффициентом мощности, близким к нулю.

3.3.5 метод эквивалентных схем (асинхронные машины) [equivalent circuit method (induction machines)]: Испытание, при котором потери определяют с помощью эквивалентной схемы замещения.

3.3.6 испытание при извлеченном роторе и испытание при вращении ротора в обратном направлении (асинхронные машины) [test with rotor removed and reverse rotation test (induction machines)]: Комбинированное испытание, при котором добавочные потери при нагрузке определяют на основании испытания при извлеченном роторе и испытания при вращении ротором в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля.

3.3.7 испытание при коротком замыкании (синхронные машины) [short-circuit test (synchronous machines)]: Испытание, при котором машина работает в режиме генератора с короткозамкнутыми выходными зажимами.

3.3.8 испытание при заторможенном роторе (locked rotor test): Испытание, при котором ротор затормаживают для предотвращения вращения.

3.3.9 испытание eh-star (eh-star test): Испытание, при котором двигатель работает при соединении обмоток звездой и несимметричном напряжении питания.

3.4 Потери

3.4.1 полные потери P_T (total losses P_T): Разность между входной мощностью и выходной мощностью, эквивалентная сумме постоянных потерь (см. 3.4.2), потерь при нагрузке (см. 3.4.4), добавочных потерь при нагрузке (см. 3.4.5) и потерь в цепи возбуждения (см. 3.4.3).

3.4.2 Постоянные потери

3.4.2.1 постоянные потери P_k (constant losses P_k): Сумма потерь в стали, потерь на трение и вентиляционных потерь.

3.4.2.2 потери в стали P_{fe} (iron losses P_{fe}): Потери в активной стали и добавочные потери без нагрузки в других металлических частях.

3.4.2.3 Потери на трение и т-потери

3.4.2.3.1 потери на трение (friction losses): Потери вследствие трения (для подшипников и щеток, если они функционируют при нормальных условиях) без учета любых потерь в автономной системе смазки. Потери в обычных подшипниках следует учитывать отдельно, вне зависимости от того, оснащена ли ими машина или нет. Потери в подшипниках зависят от рабочей температуры подшипников, типа смазки и температуры смазки.

Примечание 1 – При необходимости учета потерь в автономной системе смазки их учитывают отдельно.

Для машин с вертикальным расположением вала потери в упорных подшипниках следует определять без учета внешних осевых нагрузок.

Примечание 2 – Добавочные потери вследствие внешней осевой нагрузки могут быть определены отдельно по соглашению, в таком случае должны учитываться нагрузка на ось, температура подшипников, тип смазки, а также температура смазки.

Примечание 3 – Потери на трение вследствие нагрузки на ось подшипников могут быть определены по соглашению.

Если в испытуемой машине используется прямоточное охлаждение подшипников, эти потери распределяются между испытуемой машиной и любой другой машиной, присоединенной к ней механически, такой как турбогенератор, пропорционально массе их вращающихся частей. При отсутствии прямоточного охлаждения распределение потерь в подшипниках определяют по соглашению на основании эмпирических формул.

3.4.2.3.2 вентиляционные потери (windage losses): Полные потери вследствие аэродинамического трения во всех частях машины, включая мощность, потребляемую вентиляторами, расположенными на валу, и вспомогательными устройствами, являющимися неотъемлемой составной частью машины.

Примечание 1 – Потери в автономной системе вентиляции следует учитывать отдельно.

Примечание 2 – Информация о машинах, непосредственно или косвенно охлаждаемых водородом, приведена в IEC 60034-1.

3.4.3 Потери в цепи возбуждения

3.4.3.1 потери в цепи возбуждения P_e (excitation circuit losses P_e): Сумма потерь в обмотке возбуждения (см. 3.4.3.2), потерь в возбудителе (см. 3.4.3.3), а также для синхронных машин – электрических потерь в щетках (см. 3.4.3.5) (при их наличии).

3.4.3.2 потери в обмотке возбуждения P_f (excitation winding losses P_f): Потери в обмотке возбуждения (электромагнитное возбуждение), равные произведению тока возбуждения I_e на напряжение возбуждения U_e.

3.4.3.3 потери в возбудителе P_{Ed} (exciter losses P_{Ed}): Потери в возбудителе различных систем возбуждения (см. приложение С), которые определяют следующим образом:

а) Возбудитель с приводом от вала.

Потери в возбудителе – это сумма мощности, потребляемой возбудителем на своем валу (без учета потерь на трение и вентиляционных потерь), и мощности P_{1E} от автономного источника, потребляемой его обмоткой возбуждения, за вычетом полезной мощности, которую возбудитель обеспечивает на своих зажимах. Полезная мощность на зажимах возбудителя равна потерям в обмотке возбуждения в соответствии с 3.4.3.2, с которыми суммируются (для синхронных машин) электрические потери в щетках в соответствии с 3.4.3.5.

Если возбудитель может быть отсоединен и испытан отдельно, то его потери могут быть определены в соответствии с 5.3.

Если возбудитель питается от отдельных дополнительных источников питания, то потребляемая ими мощность должна быть включена в потери возбудителя, если она не рассматривается совместно с потребляемой мощностью дополнительных устройств основной машины.

b) Бесщеточный возбудитель.

Потери в возбудителе – это сумма мощности, потребляемой возбудителем на своем валу без учета потерь на трение и вентиляционных потерь (когда соответствующее испытание проводят на основной машине совместно с возбудителем), и электрической мощности P_{1E} от автономного источника (если таковой имеется), потребляемой его обмоткой возбуждения или обмоткой статора (для асинхронного возбудителя) за вычетом полезной мощности, которую возбудитель обеспечивает на зажимах вращающегося силового преобразователя.

Если возбудитель питается от отдельных дополнительных источников питания, то потребляемая ими мощность должна быть включена в потери возбудителя, если она не рассматривается совместно с потребляемой мощностью дополнительных устройств основной машины.

Если возбудитель может быть отсоединен и испытан отдельно, то его потери могут быть определены в соответствии с 5.3.

c) Отдельный вращающийся возбудитель.

Потери возбудителя – это разность между суммой мощности, потребляемой приводным двигателем, и мощности, потребляемой автономными источниками питания, как приводимыми, так и приводными машинами, включая мощность от автономного источника питания к зажимам обмотки возбуждения, и мощностью возбуждения в соответствии с 3.4.3.2 и 3.4.3.4. Потери в возбудителе могут быть определены в соответствии с 5.3.

d) Система статического возбуждения (статический возбудитель).

Потери в системе возбуждения – это разность между суммой электрической мощности, поступающей от ее источника питания, и мощности, потребляемой отдельными дополнительными источниками питания, и мощностью возбуждения в соответствии с 3.4.3.2 и 3.4.3.4.

Если электропитание систем осуществляется от трансформаторов, то потери в трансформаторе должны быть включены в потери в возбудителе.

e) Возбуждение от вспомогательной обмотки (возбудитель вспомогательной обмотки).

Потери в возбудителе – это потери в меди во вспомогательной (вторичной) обмотке и добавочные потери в стали, создаваемые возросшими гармоническими составляющими магнитного потока. Добавочные потери в стали – это разность между потерями, которые возникают при нагрузке вспомогательной обмотки и без ее нагрузки.

Поскольку разделение потерь составляющих возбуждения является сложным, рекомендуется рассматривать эти потери как неотъемлемую часть потерь в статоре при определении общих потерь.

В случаях, описанных в перечислениях c) и d), не учитываются потери в источнике возбуждения (если таковой имеется), или в соединениях между источником и щетками (синхронные машины), или между источником и выводами обмотки возбуждения (машины постоянного тока).

Если для возбуждения применяется система, имеющая составные части, которые указаны в перечислениях b) – e), то потери в возбудителе должны включать соответствующие потери этих составных частей, относящихся к категориям, перечисленным в приложении C, в зависимости от конкретного случая.

3.4.3.4 отдельно подводимая мощность возбуждения P_{1E} (separately supplied excitation power P_{1E}): Мощность возбуждения P_{1E}, подводимая от автономного источника питания, является:

– для возбудителей типов, указанных в перечислениях a) и b), – мощностью возбуждения возбудителя (возбудитель постоянного тока или синхронный возбудитель) или входной мощностью обмотки статора (асинхронный возбудитель). Она охватывает часть потерь в возбудителе P_{Ed} (и добавочные потери в асинхронных возбудителях), тогда как большая часть P_e подводится через вал;

– для возбудителей типов, указанных в перечислениях c) и d), – равной потерям в цепи возбуждения, $P_{1E} = P_e$;

– для возбудителей типа, указанного в перечислении e), $P_{1E} = 0$, мощность возбуждения полностью подводится через вал. Также $P_{1E} = 0$ для машин с возбуждением от постоянных магнитов.

Типы возбудителя должны соответствовать 3.4.3.3.

3.4.3.5 потери в щетках P_b (цепь возбуждения) (brush losses P_b (excitation circuit): Электрические потери в щетках (включая потери в переходных контактах) синхронных машин, возбуждаемых от отдельного источника.

3.4.4 Потери при нагрузке P_L

3.4.4.1 потери при нагрузке (load losses): Сумма потерь в обмотках (I^2R) и электрических потерь в щетках (см. 3.4.4.3) (при их наличии).

3.4.4.2 потери в обмотках (winding losses): Потери в обмотках – это потери вида I^2R:

– в цепи якоря машин постоянного тока;

– в обмотках статора и ротора асинхронных машин;

– в обмотках якоря синхронных машин.

3.4.4.3 потери в щетках P_b (цепи нагрузки) [brush losses P_b (load circuits)]: Электрические потери в щетках (включая потери в переходных контактах) в цепи якоря машин постоянного тока и в щетках асинхронных машин с фазным ротором.

3.4.5 добавочные потери при нагрузке P_{LL} [additional load losses P_{LL} (stray-load losses)]: Потери, создаваемые током нагрузки в активных частях из стали и других металлов, кроме проводников; потери от вихревых токов в проводниках обмотки, вызванные пульсациями магнитного потока, зависящими от тока нагрузки, и добавочные потери в щетках, вызванные коммутационными процессами.

Примечание – Эти потери не включают добавочных потерь без нагрузки по 3.4.2.2.

3.4.6 потери короткого замыкания P_{sc} (short-circuit losses P_{sc}): Потери, зависящие от тока, при закороченной обмотке якоря в синхронных машинах и машинах постоянного тока.

3.5 Определяемые при испытаниях параметры (многофазные машины переменного тока)

3.5.1 напряжение на зажимах (terminal voltage): Среднее арифметическое значение линейных напряжений для многофазных машин переменного тока.

3.5.2 линейный ток (line current): Среднее арифметическое значение линейных токов для многофазных машин переменного тока.

3.5.3 междуфазное сопротивление (line-to-line resistance): Среднее арифметическое значение междуфазного сопротивления для каждой группы зажимов многофазных машин переменного тока.

Примечание 1 – Для трехфазных машин с *Y*-образным соединением значение фазного сопротивления составляет 0,5 значения междуфазного сопротивления. Для машин с Δ-образным соединением значение фазного сопротивления составляет 1,5 значения междуфазного сопротивления.

Примечание 2 – В разделах 7, 8 и 9 приведенные разъяснения и уравнения относятся к трехфазным машинам, если не указано иное.

4 Условные обозначения и сокращения

4.1 Условные обозначения

В настоящем стандарте применены следующие условные обозначения:

cos φ – коэффициент мощности [1];

f – частота питающей сети, Гц;

I – средний линейный ток, А;

k_θ – температурный поправочный коэффициент;

n – частота вращения, $с^{-1}$;

p – количество полюсных пар;

P – мощность, Вт;

P_0 – входная мощность без нагрузки, Вт;

P_1 – входная мощность, исключая мощность возбуждения [2], Вт;

P_2 – выходная мощность, Вт;

P_b – потери в щетках, Вт;

P_e – потери в цепи возбуждения, Вт;

P_{1E} – мощность возбуждения, подводимая от отдельного источника, Вт;

P_{Ed} – потери в возбудителе, Вт;

P_{el} – электрическая мощность без учета мощности возбуждения, Вт;

P_f – потери в обмотке возбуждения (электромагнитное возбуждение), Вт;

P_{fe} – потери в стали, Вт;

P_{fw} – потери на трение и вентиляционные потери, Вт;

---

[1] Данное определение относится к напряжению и току синусоидальной формы.

[2] Если не указано иное, испытания в настоящем стандарте описаны для двигательного режима, где P_1 и P_2 – это входная электрическая мощность и выходная механическая мощность соответственно.

P_C – постоянные потери, Вт;
P_L – потери при нагрузке, Вт;
P_{Lr} – остаточные потери, Вт;
P_{LL} – потери при дополнительной нагрузке, Вт;
P_{mech} – механическая мощность, Вт;
P_k – потери при коротком замыкании, Вт;
P_T – полные потери, Вт;
P_w – потери в обмотке, Вт, где подстрочный индекс w обычно заменяют на a, f, e, s или r;
R – сопротивление обмотки, Ом;
R_{eh} – фактическое значение дополнительного резистора, используемое для испытания методом Eh-star (см. 6.4.5.5), Ом;
R'_{eh} – типичное значение дополнительного резистора, Ом;
R_f – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;
R_{ll} – среднее междуфазное сопротивление, Ом;
R_{ph} – среднее фазное сопротивление, Ом;
s – скольжение, выраженное в относительных единицах или в процентах от синхронной частоты вращения;
T – вращающий момент машины, Н·м;
T_d – показание устройства измерения вращающего момента, Н·м;
T_c – корректирующая поправка к значению вращающего момента, Н·м;
U – среднее напряжение на выходных зажимах, В;
U_0 – напряжение на выходных зажимах без нагрузки, В;
U_N – номинальное напряжение на выходных зажимах, В;
X – реактивное сопротивление, Ом;
$\underline{Z} = R + j \cdot X$ – значение комплексной величины (например, полного сопротивления);
$Z = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$ – абсолютное значение комплексной величины (например, полного сопротивления);
Z – полное сопротивление, Ом;
η – коэффициент полезного действия;
θ_0 – начальная температура обмотки, °С;
θ_a – температура окружающей среды, °С;
θ_c – температура хладагента первого контура, °С;
θ_w – температура обмотки, °С;
τ – постоянная времени, с.

4.2 Дополнительные подстрочные индексы

Следующие подстрочные индексы могут быть добавлены к символам с целью уточнения функциональных показателей машины и различения параметров.

Элементы машины:
a – якорь;
e – система возбуждения;
f – обмотка возбуждения;
r – ротор;
s – статор;
w – обмотка;
U, V, W – обозначения фаз.

Вид электрических устройств:
B – вольтодобавочный генератор;
D – динамометр;
E – возбудитель;
G – генератор;
M – двигатель.

Рабочие условия:
0 – без нагрузки;
1 – вход;
2 – выход;
av – средний;

d – рассеянный;
el – электрический;
i – внутренний;
L – испытательная нагрузка;
lr – заторможенный ротор;
mech – механический;
N – номинальный;
red – при пониженном напряжении;
t – испытательный;
zpf – испытание с нулевым коэффициентом мощности;
θ – с поправкой на температуру охлаждающей среды.

Примечание – В соответствующих подразделах введены другие дополнительные подстрочные индексы.

5 Основные требования

5.1 Прямое и косвенное определение коэффициента полезного действия

Испытания могут быть подразделены на три следующие группы:

a) измерение входной и выходной мощности на отдельной машине. Это подразумевает измерение электрической или механической мощности на входе машины и механической или электрической мощности на выходе машины;

b) измерение входной и выходной мощности на двух идентичных машинах, механически соединенных последовательно друг за другом. Этим устраняется измерение механической мощности на входе или выходе машины;

c) измерение фактических потерь в машине при определенных условиях ее работы. Обычно это не полные потери, а отдельные составляющие полных потерь. Тем не менее метод может быть применен для определения как полных потерь, так и составляющих потерь.

Определение полных потерь следует проводить одним из следующих методов:

– измерение полных потерь;

– определение отдельных потерь для их последующего суммирования.

Примечание – Методы определения коэффициента полезного действия машин базируются на ряде допущений. Поэтому сопоставить значения коэффициента полезного действия, полученные различными методами, не представляется возможным.

5.2 Неопределенность

Неопределенность в настоящем стандарте относится к определению действительного значения коэффициента полезного действия. Она отражает погрешности методики испытаний и испытательного оборудования.

Несмотря на то что неопределенность следует выражать числовым значением, для выполнения данного требования необходимо проведение надлежащих испытаний по определению репрезентативных и сопоставимых значений. В настоящем стандарте использованы следующие термины, относящиеся к неопределенности:

– «низкая» применяется к определению коэффициента полезного действия исключительно на основании результатов испытаний;

– «средняя» применяется к определению коэффициента полезного действия на основании аппроксимированных предельных значений;

– «высокая» применяется к определению коэффициента полезного действия на основании допускаемых значений.

5.3 Предпочтительные методы

Затруднительно установить конкретные правила определения коэффициента полезного действия. Выбор испытания зависит от объема необходимой информации, требуемой точности измерений, вида и размера испытуемой машины и доступного испытательного оборудования (источники питания, нагрузочная или приводная машины).

Предпочтительные методы испытаний приведены в таблицах 1 – 3 для различных видов машин. Метод испытания должен быть выбран из установленных процедур с наименьшей неопределенностью измерений.

Таблица 1 – Машины постоянного тока

Метод	Раздел	Предпочтительный метод	Необходимое оборудование	Неопределенность
Прямой метод измерения				
Испытание с помощью калиброванной машины	Приложение D		Калиброванная машина	См. примечание 3
Измерение вращающего момента	7.1.1	Размер машины: H ≤ 180	Измеритель вращающего момента/ динамометр для испытания при полной нагрузке	Низкая
Полные потери				
Метод взаимной нагрузки с одним источником питания	7.2.1.1		Две идентичные машины. Вольтодобавочный генератор	Низкая
Суммирование потерь, испытание при нагрузке				
P_{LL}, составляющая постоянного тока, метод взаимной нагрузки с одним источником питания	7.2.2.6.1		Две идентичные машины. Вольтодобавочный генератор	Низкая
P_{LL}, составляющая постоянного тока, определяемые по заданным значениям параметров	7.2.2.6.3			Средняя
P_{LL}, составляющая переменного тока, определяемые с помощью выпрямляющего устройства	7.2.2.6.2	Размер машины: H > 180	Выпрямитель с требуемыми характеристиками	Низкая
Суммирование потерь, испытание без нагрузки				
Потери в цепи возбуждения по заданному отношению нагрузки к току возбуждения без нагрузки P_{LL}, определяемые по заданным значениям параметров	7.2.2.5		Если в наличии нет испытательного оборудования для проведения других испытаний (нет возможности нагружения, нет идентичной машины)	Высокая

Примечание 1 – Вследствие инструментальной погрешности прямой метод измерений позволяет обеспечить определение коэффициента полезного действия до значений 95 % – 96 %. Для практического применения в настоящем стандарте рекомендуется выполнять прямые измерения для машин с валом до 180 мм, так как их коэффициент полезного действия не превышает 95 %. Машины больших размеров с коэффициентами полезного действия ниже 95 % – 96 % можно также успешно испытывать, применяя прямой метод измерения.
Примечание 2 – В графе «Неопределенность» «низкая» указывает на процедуру, с помощью которой определяются все составляющие потерь при испытаниях; «средняя» – процедуру, которая основывается на упрощенной физической модели машины; «высокая» – на процедуру, с помощью которой невозможно определить все составляющие потерь при испытаниях.
Примечание 3 – Неопределенность будет определена.

Таблица 2 – Асинхронные машины

Метод	Раздел	Предпочтительный метод	Необходимое оборудование	Неопределенность
Прямой метод измерения				
Измерение вращающего момента	8.1.1	Все однофазные и многофазные машины мощностью ≤ 1 кВт	Измеритель вращающего момента/динамометр для испытания при полной нагрузке	Низкая
Испытание с помощью калиброванной машины	Приложение D		Калиброванная машина	См. примечание 4

Окончание таблицы 2

Метод	Раздел	Предпочтительный метод	Необходимое оборудование	Неопределенность
Метод взаимной нагрузки с двумя источниками питания	8.1.2		Машина для испытаний при полной нагрузке. Две идентичные машины	Низкая
Полные потери				
Калориметрический метод	Приложение D		Специальная теплоизоляционная камера	См. примечание 4
Метод взаимной нагрузки с одним источником питания	8.2.1		Две идентичные машины (фазный ротор)	Низкая
Суммирование потерь, испытания при нагрузке и без нагрузки				
P_{LL}, определяемые по остаточным потерям	8.2.2.5.1	Трехфазные машины мощностью более 1 кВт и до 150 кВт	Измеритель вращающего момента/динамометр для испытаний при нагрузке не менее 1,25 полной нагрузки	Низкая
P_{LL}, определяемые по заданным значениям параметров	8.2.2.5.3			От средней до высокой
P_{LL}, определяемая при испытаниях с неподвижным ротором и при вращении ротора в обратном направлении	8.2.2.5.2		Вспомогательный двигатель номинальной мощностью не более 5-кратных полных потерь P_T	Высокая
P_{LL}, определяемые при испытании методом Eh-star	8.2.2.5.4	(См. примечание 3)	Резистор для 150 % номинального фазного тока	Средняя
Суммирование потерь, испытание без нагрузки				
Ток, мощность и скольжение по методу эквивалентных схем P_{LL}, определяемые по заданным значениям параметров	8.2.2.4.3		Если в наличии нет испытательного оборудования для проведения других испытаний (нет возможности применения номинальной нагрузки, нет идентичной машины)	Средняя / высокая

Примечание 1 – Вследствие инструментальной погрешности определение P_{LL} по остаточным потерям не позволяет получить значение коэффициента корреляции (см. 8.2.2.5.1.2) свыше 0,95, что может привести к неопределенности определения коэффициента полезного действия, превышающей ±0,5 %.

Примечание 2 – В графе «Неопределенность» «низкая» указывает на процедуру, с помощью которой определяются все составляющие потерь при испытаниях; «средняя» – процедуру, которая основывается на упрощенной физической модели машины; «высокая» – на процедуру, с помощью которой невозможно определить все составляющие потерь при испытаниях.

Примечание 3 – Метод определения P_{LL} при испытании методом Eh-star пригоден для двигателей мощностью от 1 до 150 кВт; методы испытаний для двигателей большей мощности находятся в стадии рассмотрения. Для применения этого метода требуется, чтобы обмотки двигателя могли быть соединены по схеме «звезда».

Примечание 4 – Неопределенность будет определена.

Таблица 3 – Синхронные машины

Метод	Раздел	Предпочтительный метод	Необходимое оборудование	Неопределенность
Прямой метод измерения				
Измерение вращающего момента	9.1.1	Размер машины: H ≤ 180	Измеритель вращающего момента/ динамометр для испытания при полной нагрузке	Низкая
Испытание с помощью калиброванной машины	Приложение D		Калиброванная машина	См. примечание 3
Метод взаимной нагрузки с двумя источниками питания	9.1.2		Две идентичные машины	Средняя

Окончание таблицы 3

Метод	Раздел	Предпочтительный метод	Необходимое оборудование	Неопределенность
Полные потери				
Испытание с нулевым коэффициентом мощности и током возбуждения в соответствии с диаграммой Потье / ASA / Шведской диаграммой	9.2.1.2		Источник питания с требуемым максимальным напряжением и током	Средняя
Калориметрический метод	Приложение D		Специальная теплоизоляционная камера	См. примечание 3
Метод взаимной нагрузки с одним источником питания	9.2.1.1		Две идентичные машины	Низкая
Суммирование потерь, испытания при нагрузке				
Суммирование, за исключением P_{LL}	9.2.1		Машина для проведения испытаний с полной нагрузкой	Высокая
P_{LL}, определяемые при испытании на короткое замыкание	9.2.2.6	Размер машины: $H \leq 180$		Низкая
Суммирование потерь, испытание без нагрузки				
Ток возбуждения в соответствии с диаграммой Потье / ASA / Шведской диаграммой	9.2.2.4 9.2.2.6		Если в наличии нет испытательного оборудования для проведения других испытаний (нет возможности применения номинальной нагрузки, нет идентичной машины)	Средняя

Примечание 1 – Вследствие инструментальной погрешности прямой метод измерений позволяет обеспечить определение коэффициента полезного действия до значений 95 % – 96 %. Для практического применения в настоящем стандарте рекомендуется выполнять прямые измерения для машин с валом до 180 мм, так как их коэффициент полезного действия не превышает 95 %. Машины больших размеров с коэффициентами полезного действия ниже 95 % – 96 % можно также успешно испытывать, применяя прямой метод измерения.

Примечание 2 – В графе «Неопределенность» «низкая» указывает на процедуру, с помощью которой определяются все составляющие потерь при испытаниях; «средняя» – процедуру, которая основывается на упрощенной физической модели машины; «высокая» – на процедуру, с помощью которой невозможно определить все составляющие потерь при испытаниях.

Примечание 3 – Неопределенность будет определена.

Примечание – В таблицах условное обозначение H – это высота вала (расстояние от центральной линии вала до основания опоры), выраженная в мм (см. номера станины в IEC 60072-1).

5.4 Электропитание

5.4.1 Напряжение питания

Напряжение питания должно соответствовать требованиям IEC 60034-1 (подраздел 7.2, а также пункт 8.3.1 для термических испытаний).

5.4.2 Частота напряжения питания

Отклонение частоты напряжения питания во время измерений должно составлять ±0,3 % ее номинального значения.

Примечание – Данное требование не распространяется на метод эквивалентных схем (6.4.4.4).

5.5 Средства измерения

5.5.1 Общие положения

Поскольку точность приборов обычно выражается в процентном соотношении от всей шкалы, диапазон измерений выбранных приборов должен быть как можно меньшим.

Примечание – Для аналоговых измерительных приборов наблюдаемые значения должны быть в верхней трети диапазона измерений.

5.5.2 Средства измерений электрических величин

Средства измерений должны иметь класс точности 0,2 в соответствии с IEC 60051.

Примечание – При проведении приемо-сдаточных испытаний, описанных в IEC 60034-1 (подраздел 9.1), допускается применять приборы с классом точности 0,5.

Если в настоящем стандарте не установлено иное, используют среднее арифметическое трех значений линейного тока и напряжения.

5.5.3 Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы по точности должны соответствовать IEC 60044-1, чтобы погрешность не превышала ±0,3 % при применении их для испытания асинхронных машин и ±0,5 % – для испытания других видов вращающихся электрических машин, а метод суммирования потерь с определением добавочных потерь при нагрузке должен соответствовать 8.2.2.5.1.

5.5.4 Измерение вращающего момента

Приборы, применяемые для измерения вращающего момента, должны иметь погрешность ±0,2 % от всей шкалы.

Если вращающий момент вала измеряют с помощью динамометра, то проводят испытание на определение корректирующей поправки к его значению. Испытание также проводят, если между устройством измерения вращающего момента и валом двигателя размещен какой-либо подшипник или соединительная втулка. Вращающий момент машины T рассчитывают по формуле

$$T = T_d + T_c,$$

где T_d – измеренное значение вращающего момента при испытании с нагрузкой;

T_c – корректирующая поправка к значению вращающего момента согласно приложению А.

5.5.5 Измерение скорости и частоты вращения

Приборы, применяемые для измерения частоты вращения, должны иметь погрешность ±0,1 % от всей шкалы. Измерение скорости вращения должно выполняться с точностью в пределах ±0,1 % или 1 об/мин в зависимости от того, что дает наименьшую погрешность.

Примечание 1 – Скорость вращения, выраженная в мин$^{-1}$, соответствует частоте вращения n в с$^{-1}$·60.

Примечание 2 – Измерение скольжения соответствующим методом должно заменить измерение скорости вращения.

5.5.6 Измерение температуры

Приборы, применяемые для измерения температуры обмотки, должны иметь точность измерения ±0,1 °С.

5.6 Единицы измерения

Если не установлено иное, применяют единицы измерения системы СИ, указанные в IEC 60027-1.

5.7 Электрическое сопротивление

5.7.1 Сопротивление обмотки

Сопротивление обмотки R является активным, и его значение определяется соответствующими методами.

Для машин постоянного тока R является полным сопротивлением всех обмоток, по которым протекает ток якоря (обмотка якоря, коммутационная обмотка, компенсационная обмотка, смешанная обмотка возбуждения). Там, где измерение сопротивления невозможно вследствие его небольших значений, допускается определять его расчетным методом.

Для машин постоянного тока и асинхронных машин R_f является сопротивлением обмотки возбуждения.

Для многофазных машин переменного тока $R = R_{ll}$ является междуфазным сопротивлением статора или обмотки якоря в соответствии с 3.5.3. В отношении асинхронных машин с фазным ротором $R_{r,ll}$ является междуфазным сопротивлением ротора. Значение сопротивления в конце теплового испытания определяют аналогично процедуре экстраполяции, как описано в IEC 60034-1 (пункт 8.6.2.3.3), применяя по возможности наиболее короткий временной интервал вместо временного интервала, указанного в таблице 5 вышеупомянутого стандарта, и экстраполируя его к нулю.

Испытательную температуру обмоток определяют в соответствии с 5.7.2.

Если сопротивление обмотки (при нагрузке) нельзя определить прямым измерением, значение сопротивления определяют исходя из разницы между температурой измеренного сопротивления и температурой, определенной в соответствии с 5.7.2 (методы, описанные в перечислениях a) – e).

5.7.2 Температура обмотки

Температуру обмотки определяют одним из следующих методов (указаны в порядке предпочтения):

a) температура, определяемая на основании сопротивления при номинальной нагрузке R_N по процедуре экстраполяции, как описано в 5.7.1;

b) температура, измеренная непосредственно, либо встроенным датчиком температуры (EDT), либо термопарой;

c) температура, определяемая в соответствии с перечислением a) на идентичной машине с одинаковыми механическими и электрическими устройствами;

d) если нагрузочная способность неизвестна, рабочую температуру определяют в соответствии с IEC 61986;

e) если сопротивление при номинальной нагрузке R_N невозможно определить прямым измерением, температуру обмотки следует принимать равной расчетной рабочей температуре установленного класса нагревостойкости, указанного в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетная рабочая температура

Класс нагревостойкости систем изоляции	Расчетная рабочая температура, °C
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

Если номинальное повышение температуры или номинальная температура установлены так, что они ниже температуры того класса нагревостойкости, который используется в конструкции, то расчетная рабочая температура должна соответствовать температуре низшего класса нагревостойкости.

5.7.3 Поправка для приведения к стандартной исходной температуре хладагента

Значения сопротивления обмотки, зарегистрированные во время испытания, должны быть приведены к стандартной исходной температуре 25 °C. Поправочный коэффициент, используемый для приведения сопротивления обмотки (и скольжения в асинхронных машинах с короткозамкнутым ротором) к стандартной исходной температуре хладагента 25 °C, определяют по формуле

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w},$$

где k_θ – поправочный коэффициент температуры для обмоток;

θ_c – температура хладагента на входе во время испытания;

θ_w – температура обмотки в соответствии с 5.7.2.

Значение температурной постоянной 235 относится к меди; для алюминиевой обмотки оно должно быть заменено на 225.

Для машин, первичным или вторичным хладагентом которых является вода, исходная температура воды должна составлять 25 °C в соответствии с IEC 60034-1 (таблица 4). Альтернативные значения могут быть установлены по соглашению.

6 Методы испытаний для определения коэффициента полезного действия

6.1 Состояние испытуемой машины и категории испытаний

Испытания проводят на машине со всеми необходимыми компонентами, установленной таким образом, чтобы обеспечить условия испытаний, совпадающие или очень схожие с нормальными условиями эксплуатации.

Примечание – Предпочтительно, чтобы машина была выбрана случайным образом из ряда машин без особых учитываемых факторов.

Примечание – Уплотняющие элементы при проведении испытаний могут быть удалены, если дополнительное испытание машин аналогичной конструкции показало, что после достаточно длительной эксплуатации влияние трения является несущественным.

Процедура испытаний состоит из отдельных операций, которые проводят в указанной последовательности. Нет особой необходимости в проведении испытаний немедленно одно за другим. Однако, если некоторые испытания проводят с задержкой или отдельно от остальных испытаний, то в этом случае следует повторно устанавливать требуемые температурные условия до получения данных испытаний.

Щетки в машинах с регулируемым положением щеток размещают в положении, соответствующем установленной мощности. В асинхронных двигателях с фазным ротором, имеющих щеткоподъемное приспособление, щетки при проведении испытаний следует поднимать, а обмотку ротора – закорачивать. Для измерений, проводимых без нагрузки, щетки в машинах постоянного тока должны быть установлены в нейтральное положение.

6.2 Измерения в цепи возбуждения

Определение напряжения U_e и тока I_e (см. 3.4.3.2) зависит от конфигурации системы возбуждения (см. 3.4.3.3). Если применимо, данные испытаний фиксируют в соответствии со следующими указаниями:

a) для машин, возбуждаемых возбудителем с приводом от вала, отдельным вращающимся возбудителем, статическим возбудителем и возбудителем вспомогательной обмотки [см. 3.4.3.3, перечисления a), c), d) и e)], напряжение U_e и ток I_e измеряют:

– на зажимах обмотки возбуждения машин постоянного тока;

– на контактных кольцах обмотки возбуждения синхронных машин;

b) для машин, возбуждаемых бесщеточным возбудителем [см. 3.4.3.3, перечисление b)], данные испытаний фиксируют, применяя один из следующих методов:

– напряжение U_e, измеряемое с использованием вспомогательных (обычных) контактных колец, соединенных с концами обмотки возбуждения. Исходя из значений напряжения и сопротивления R_e определяют ток обмотки возбуждения:

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{U_f}{R_f}.$$

Сопротивление обмотки возбуждения измеряют после отключения машины, применяя процедуру экстраполяции в соответствии с 5.7.1;

– напряжение U_e и ток I_e, измеренные с использованием контактных колец, пригодных для непосредственного измерения тока обмотки возбуждения.

Примечание – На практике разница между U_e и U_f (падение напряжения) почти незначительна.

Напряжения и токи измеряют при установившейся температуре.

Потери в цепи возбуждения P_e определяют в соответствии с 7.2.2.5 (машины постоянного тока) или 9.2.2.4 (синхронные машины).

6.3 Прямые измерения

6.3.1 Испытания для измерения вращающего момента

6.3.1.1 Общие положения

Это методы испытания, при которых механическую мощность P_{mech} машины определяют измерением вращающего момента вала и частоты вращения. Электрическую мощность P_{el} (статора в машинах переменного тока, якоря в машинах постоянного тока) измеряют при этом же испытании.

Потребляемая и полезная мощность:

– при работе в режиме двигателя: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$ (см. рисунок 1);

– при работе в режиме генератора: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$.

Примечание – Обычно рекомендуется снимать несколько показаний всех измерительных приборов в каждой точке подключения нагрузки в короткие периоды времени и усреднять результаты, чтобы получить более точный результат измерения.

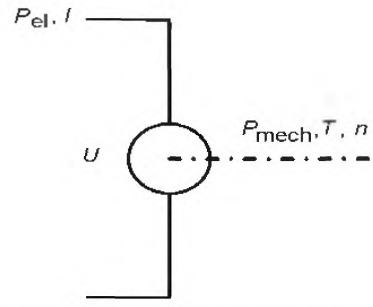

Рисунок 1 – Схема испытания для измерения вращающего момента

6.3.1.2 Измерение с помощью измерителя вращающего момента

При испытании подсоединяют либо двигатель к нагрузочной машине, либо генератор к двигателю с измерителем вращающего момента. При испытании машина работает при требуемой нагрузке.

Фиксируют значения U, I, P_{el}, T, θ_c.

Если требуется возбуждение, то действуют в соответствии с 6.2.

6.3.1.3 Измерение динамометром

К испытуемой машине подсоединяют динамометр. Динамометр калибруют так, чтобы его показание составляло 0,0, когда вращающий момент вала равен 0,0 (см. 5.5.3). При испытании машина работает при требуемой нагрузке.

Фиксируют значения U, I, P_{el}, n, T, θ_c.

Если требуется возбуждение, то действуют в соответствии с 6.2.

6.3.2 Испытание методом взаимной нагрузки с двумя источниками питания

6.3.2.1 Общие положения

Две идентичные машины механически соединяют вместе (см. рисунок 2).

При проведении испытания источники питания могут быть подключены к любой машине, но измерительные приборы и измерительные трансформаторы должны всегда подключаться только к одной и той же машине.

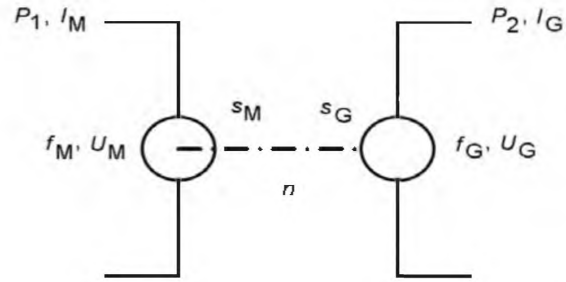

Рисунок 2 – Схема испытания методом взаимной нагрузки с двумя источниками питания (для синхронных машин: $I_M = I_G$, $f_M = f_G$)

6.3.2.2 Асинхронные машины

Присоединяют зажимы приводной машины (асинхронного генератора) к машинному агрегату или к преобразователю с низкими гармоническими искажениями, подводящим реактивную мощность и потребляющим активную мощность. На одну машину, работающую в режиме двигателя при номинальной мощности, в режиме генератора при номинальной мощности, подают номинальное напряжение и частоту; на вторую машину подают частоту, значение которой меньше частоты, подаваемой на первую машину для работы в режиме генератора, или больше – для работы машины в режиме двигателя. Значение напряжения, подаваемого на вторую машину, должно быть такое, как требуется для обеспечения номинального соотношения напряжение/частота.

Изменяют присоединение двигателя и генератора на противоположное и повторяют испытание.

Для каждого испытания фиксируют значения:
– U_M, I_M, P_1, f_M, s_M – для двигателя;
– U_G, I_G, P_2, f_G, s_G – для генератора;
– θ_c.

6.3.2.3 Синхронные машины

Напряжение и ток двух машин должны быть идентичными, и одна машина, работающая в режиме двигателя при номинальной мощности, в режиме генератора при номинальной мощности, должна иметь номинальный коэффициент мощности. Этого можно достичь присоединением синхронной машины и машины постоянного тока к генератору, возвращающих всю генерируемую энергию обратно в электрическую цепь.

Примечание – Коэффициент мощности и ток возбуждения другой машины будут отклоняться от номинального значения вследствие потерь в двух машинах.

Изменяют присоединение двигателя и генератора на противоположное и повторяют испытание.
Для каждого испытания фиксируют значения U, I, f, P_1, P_2, $\cos\varphi_M$, $\cos\varphi_G$, θ_c.
Измерения в цепи системы возбуждения – в соответствии с 6.2.

6.4 Косвенные измерения

6.4.1 Полные потери

6.4.1.1 Испытания методом взаимной нагрузки с одним источником питания

6.4.1.1.1 Общие положения

Данное испытание применяется к асинхронным машинам постоянного тока с фазным ротором и синхронным машинам. Две идентичные машины присоединяют вместе механически и электрически к одному и тому же источнику питания так, чтобы они работали при номинальной частоте вращения и номинальном напряжении следующим образом: одна – в режиме двигателя, а вторая – в режиме генератора.

Примечание – Кроме того, потери могут быть также обусловлены использованием калиброванного приводного двигателя, вольтодобавочного генератора или комбинации различных устройств этих видов.

6.4.1.1.2 Машины постоянного тока

Приводную машину присоединяют к источнику питания с последовательно подключенным вольтодобавочным генератором (см. рисунок 3). Обе машины работают, обеспечивая ток и напряжение, приблизительно соответствующие точке подключения нагрузки, для которой требуется определить коэффициент полезного действия. Источник питания должен обеспечивать номинальное напряжение питания и требуемую нагрузку двигателя. Для обеспечения номинального напряжения питания и требуемой нагрузки генератора его напряжение регулируют с помощью вольтодобавочного генератора. Напряжение источника питания главным образом имеет значение для определения потерь без нагрузки, а показания вольтодобавочного генератора – для определения потерь при нагрузке.

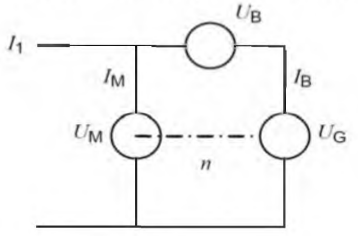

Рисунок 3 – Схема испытания машины постоянного тока методом взаимной нагрузки с одним источником питания

При отсутствии вольтодобавочного генератора напряжение на зажимах машин регулируют так, чтобы среднее значение токов обеих машин соответствовало номинальному току.
Для каждого испытания фиксируют значения:
– U_M, I_1 источника питания;
– P_M на зажимах двигателя;
– U_B, I_B вольтодобавочного генератора;
– n, θ_c.
Измерения в цепи системы возбуждения – в соответствии с 6.2.

6.4.1.1.3 Асинхронные машины с фазным ротором

Обмотка ротора двигателя должна быть закорочена, а обмотка ротора генератора – подсоединена к многофазному источнику питания, способному обеспечивать номинальный ток ротора на частоте скольжения. Необходимой мощности двигателя достигают путем регулирования частоты и тока низкочастотного источника питания.

Для каждого испытания фиксируют значения:

– U_1, P_1, I_1 источника питания с частотой сети;

– U_r, I_r, P_r низкочастотного источника питания;

– P_M на зажимах двигателя;

– P_G, отдаваемая генератором;

– θ_c.

6.4.1.1.4 Синхронные машины

Машины механически соединяют с угловым смещением их роторов и обеспечивают возможность функционирования одной машины в условиях нагрузки, при которой необходимо определить коэффициент полезного действия, а второй – при неизменном абсолютном значении тока статора (см. рисунок 4).

Примечание – Отклонение, выражаемое как электрический угол α для данного условия, является приблизительно двойным внутренним углом при необходимом условии нагрузки. В общем случае для конкретного значения напряжения реактивная мощность зависит от угла α и от токов возбуждения двигателя и генератора. На одной машине регулируют ток и коэффициент мощности с целью установления их номинальных значений; отклонение тока возбуждения от его номинального значения на другой машине используют для оценки погрешности.

Для каждого испытания фиксируют значения:

– U_1, I_1, P_1 источника питания с частотой сети;

– I_M, P_M двигателя;

– I_G, P_G генератора;

– параметров возбуждения в цепи системы возбуждения в соответствии с 6.2;

– θ_c.

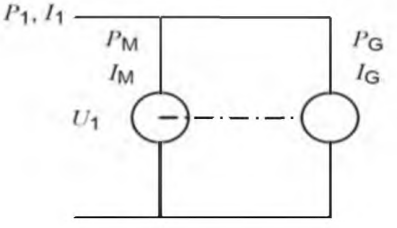

Рисунок 4 – Схема испытания синхронных машин методом взаимной нагрузки с одним источником питания

6.4.1.2 Испытание с нулевым коэффициентом мощности (синхронные машины)

До проведения данного испытания должны быть получены результаты испытаний на магнитное насыщение магнитной системы машины без нагрузки, на длительное многофазное короткое замыкание и на перевозбуждение при нулевом коэффициенте мощности в соответствии с IEC 60034-4 (разделы 25, 26 и 28).

Неприсоединенная машина работает в режиме двигателя при номинальной частоте вращения и перевозбуждении. Напряжение питания регулируют до такого же значения электродвижущей силы E и тока в обмотке якоря I (с коэффициентом мощности, близким к нулю), как и при требуемой нагрузке.

Примечание 1 – E – это векторная сумма напряжения на зажимах и падения напряжения на индуктивном сопротивлении Потье в соответствии с IEC 60034-4 (разделы 30 и 31).

Испытание проводят при температуре, близкой к рабочей температуре, которая должна быть установлена в рабочем состоянии при номинальной нагрузке и в конце периода времени, установленного изготовителем. Поправку на температуру обмотки не делают.

Примечание 2 – Для вышеуказанного испытания необходимо регулировать напряжение питания таким образом, чтобы потери в стали имели одно и то же значение в ходе этого испытания, как при номинальном коэффициенте мощности в условиях нагрузки при номинальном напряжении. Если напряжение источника питания не регулируется, но равно номинальному напряжению, то это может приводить к потерям в активной стали, значительно отличающимся от таких потерь при полной нагрузке. В принципе, реактивная мощность должна

отдаваться (т. е. машина должна находиться в перевозбужденном состоянии), но, если это невозможно вследствие ограниченного напряжения возбудителя, испытание может проводиться с поглощением реактивной мощности (т. е. машина должна находиться в недовозбужденном состоянии) до тех пор, пока возможна ее стабильная работа.

Потери в обмотке возбуждения при требуемой нагрузке должны быть получены на основании значения тока возбуждения, определенного в соответствии с IEC 30034-4 [раздел 31 (диаграмма Потье), раздел 32 (диаграмма ASA) или раздел 33 (Шведская диаграмма)]. Для определения потерь в возбудителе см. 6.4.3.3. Если значение E при проведении испытания с нулевым коэффициентом мощности отклоняется от его значения при требуемой нагрузке, разница потерь в стали может быть получена на основании кривой потерь в стали (см. 6.4.2.3) и двух значений напряжения E.

Примечание 3 – Точность этого метода зависит от точности ваттметров и измерительных трансформаторов с низким коэффициентом мощности.

При нулевом коэффициенте мощности фиксируют значения:

– U, f, I, P_1;

– параметров возбуждения в цепи системы возбуждения в соответствии с 6.2;

– θ_c и θ_w.

6.4.2 Постоянные потери

6.4.2.1 Общие положения

Для машин постоянного тока или синхронных машин машина может быть испытана как отдельно при работе в режиме двигателя, так и присоединенной к приводной машине и при работе в режиме генератора (мощность, затрачиваемую на вращение вала, измеряют в соответствии с 6.3.1.2 или 6.3.1.3).

6.4.2.2 Условия для испытания без нагрузки

Потери без нагрузки должны быть стабилизированы при следующих условиях:

– номинальные скорость и напряжение для машины постоянного тока (посредством регулирования тока возбуждения);

– номинальные частота и напряжение для асинхронной машины;

– номинальные частота и напряжение для синхронной машины (посредством регулирования тока возбуждения) и коэффициент мощности, равный единице (минимальный ток в обмотке статора), когда машина работает отдельно в режиме двигателя.

Примечание 1 – Для машин постоянного тока или синхронных машин с возбудителем с приводом от вала [см. 3.4.3.3, перечисление а)] машина должна возбуждаться отдельно и возбудитель должен быть отсоединен от источника питания и от обмотки возбуждения.

Потери без нагрузки считаются стабилизированными, если входная мощность при работе машины без нагрузки отличается на 3 % или менее при измерении через два последовательных интервала времени длительностью 30 мин.

Примечание 2 – Потери без нагрузки считаются стабилизированными, если испытание машины без нагрузки проводят сразу же после испытания при нагрузке.

6.4.2.3 Потери на трение и вентиляционные потери, потери в стали

Минимальное число регистрируемых значений напряжения, включая номинальное напряжение, должно быть равно семи при условии, что:

– значения четырех или более показаний напряжения приблизительно равномерно расположены в диапазоне от 60 % до 125 % номинального напряжения;

– значения трех или более показаний напряжения приблизительно равномерно расположены в диапазоне от 20 % до 50 % номинального напряжения или в таком же диапазоне относительно точки (для отдельно работающей машины), в которой ток имеет стабильное значение.

Для машин постоянного тока, работающих отдельно, частота вращения должна поддерживаться постоянной путем регулирования тока возбуждения.

Испытание проводят за наименьшее возможное время с отсчетами показаний в порядке убывания напряжения.

Для каждого значения напряжения фиксируют значения U_0, I_0, P_0, R_0, где R_0 определяют путем измерения сопротивления после наименьшего показания напряжения.

Примечание 1 – Для машин переменного тока R_0 – это $R_{ll,0}$, а для машин постоянного тока R_0 – это полное сопротивление всех обмоток, по которым протекает ток якоря (обмотка якоря, коммутационная обмотка, компенсационная обмотка). Если измерение сопротивления неосуществимо на практике вследствие очень низких значений сопротивления, допускается использовать расчетные значения.

Для присоединенной машины P_0 определяют на основании T и n.

Значения параметров возбуждения в цепи системы возбуждения фиксируют в соответствии с 6.2.

Примечание 2 – Для больших машин рекомендуется учитывать другие параметры, влияющие на коэффициент полезного действия, например температуру охлаждающей жидкости, чистоту и давление газа, температуру смазки для скользящих подшипников, вязкость смазочного масла для подшипников.

6.4.3 Потери в цепи возбуждения

6.4.3.1 Определение потерь из испытания при нагрузке

Машина функционирует при номинальной нагрузке, как описано в 6.4.4.1, до тех пор, пока температура не стабилизируется.

Значения параметров возбуждения в цепи системы возбуждения фиксируют в соответствии с 6.2.

6.4.3.2 Определение потерь без испытания при нагрузке

Для синхронной машины ток возбуждения I_e определяют в соответствии с IEC 60034-4 [раздел 31, (диаграмма Потье), раздел 32 (диаграмма ASA) или раздел 33 (Шведская диаграмма)] на основании испытания без нагрузки, испытания на короткое замыкание и испытания с нулевым коэффициентом мощности или при измерении реактивного сопротивления обмотки якоря при неподвижном роторе.

Фиксируют значения I_e для каждой точки подключения нагрузки.

Примечание – Для машин, на которых нельзя провести вышеуказанные испытания, для расчета потерь в обмотке используют значение тока возбуждения, указанное изготовителем.

6.4.3.3 Потери в возбудителе

Возбудитель отсоединяют от основной машины (если это возможно), а затем присоединяют его к:

a) устройству для измерения вращающего момента, чтобы определить потребляемую механическую мощность в соответствии с 6.3.1;

b) калиброванному приводному двигателю, чтобы измерить потребляемую электрическую мощность двигателя.

Подсоединяют возбудитель (для синхронной машины, возбуждение которой происходит посредством контактных колец) к соответствующей активной нагрузке. Возбудитель работает в невозбужденном состоянии при напряжении U_e и токе I_e в каждой из точек подключения нагрузки.

Фиксируют значения:

– U_e, I_e, P_{Ed}, n, T_E в каждой точке подключения нагрузки (P_{Ed} в соответствии с 3.4.3.3);

– $T_{E,0}$ (вращающий момент при невозбужденном возбудителе).

Примечание – В качестве альтернативы возбудитель может быть подсоединен к калиброванному двигателю с предварительно установленной входной электрической мощностью.

Если возбудитель является неотделяемой частью машины, то значение потерь в возбудителе должно быть указано изготовителем.

6.4.4 Потери при нагрузке

6.4.4.1 Температурное испытание при номинальной нагрузке

Машина должна быть нагружена соответствующим способом, подключена к источнику питания с мощностью, соответствующей номинальной мощности машины, и должна работать до достижения теплового равновесия (временной градиент температуры 2 К/ч).

В конце испытания при номинальной нагрузке фиксируют значения:

– P_N, I_N, U_N, s, f, θ_c, θ_N;

– $R_N = R$ (сопротивление обмотки при номинальной нагрузке в соответствии с 5.7.1);

– θ_N (температура обмотки при номинальной нагрузке в соответствии с 5.7.2).

Для машин постоянного тока с выпрямленным напряжением питания измеряют среднее значение I_{av} и среднеквадратическое значение I.

Примечание 1 – Для машин постоянного тока R является полным сопротивлением всех обмоток, по которым протекает ток якоря (обмотка якоря, коммутационная обмотка, компенсационная обмотка, смешанная обмотка возбуждения). Если измерение сопротивления неосуществимо на практике вследствие очень низких значений сопротивления, допускается использовать расчетные значения.

Примечание 2 – Для машин постоянного тока $f = 0$.

Значения, которые необходимо измерить, чтобы определить потери в обмотке возбуждения и добавочные потери при нагрузке, указаны в 6.4.3.1 и 6.4.5.3.

6.4.4.2 Испытания нагрузочных характеристик

Примечание 1 – Данное испытание применяют в первую очередь для определения добавочных потерь в асинхронных двигателях.

Перед началом регистрации данных при этом испытании температура обмоток должна находиться в пределах 5 K от температуры θ_N, полученной при температурном испытании при номинальной нагрузке (см. 6.4.4.1).

Машина должна быть нагружена соответствующим способом.

Нагрузку к машине прикладывают в шести точках ее подключения. Четыре точки подключения нагрузки должны быть расположены приблизительно равномерно в диапазоне нагрузок с предельными значениями не менее чем 25 % и 100 % включительно. Две оставшиеся точки подключения нагрузки следует выбирать для нагрузки более 100 %, но не более 150 % нагрузки. Нагружают машину, начиная с наибольшего значения нагрузки и уменьшая ее до наименьшего значения. Эти испытания проводят за наименьшее возможное время, чтобы свести к минимуму изменения температуры в машине в ходе испытания.

В машинах переменного тока изменение частоты между всеми точками нагрузки должно быть менее 0,1 %. Измеряют R до испытания с наибольшим значением и после испытания с наименьшим значением нагрузки. Сопротивление при 100 % нагрузки и более высоких нагрузках должно иметь значение, определенное перед испытанием с наибольшей нагрузкой. Сопротивление, используемое при нагрузках менее 100 %, определяют исходя из линейной зависимости сопротивления от нагрузки, используя его значения, определенные до испытания с наибольшей нагрузкой и после испытания с наименьшим значением при 25%-ной нагрузке.

Примечание 2 – В машинах переменного тока значения сопротивления могут быть также определены путем измерения температуры обмотки статора с использованием датчика температуры, установленного на обмотке. Сопротивления в каждой точке подключения нагрузки можно затем определить по температуре обмотки в этой точке в зависимости от значений сопротивления и температуры, измеренных до начала испытания.

Для каждой точки подключения нагрузки фиксируют значения U, I, P_1, R, n, f, T, где R – в соответствии с 5.7.1.

6.4.4.3 Испытание при нагрузке и пониженном напряжении (асинхронные машины)

Данный метод является подходящим для больших машин, которые не могут быть испытаны при полной нагрузке. Метод заключается в проведении следующих испытаний: испытания при нагрузке машины, работающей в режиме двигателя, при номинальной частоте вращения, испытания без нагрузки при пониженном напряжении U_{red} и испытания без нагрузки при номинальном напряжении и номинальной частоте.

При применении данного метода предполагается, что при пониженном напряжении и постоянной частоте вращения токи уменьшаются пропорционально напряжению, а мощность уменьшается пропорционально квадрату напряжения.

При пониженном напряжении фиксируют значения U_{red}, I_{red}, P_{1red}, I_{0red}, $\cos \varphi_{0red}$.

При номинальном напряжении фиксируют значения U_N, I_0, $\cos \varphi_0$.

6.4.4.4 Метод эквивалентных схем (асинхронные машины)

6.4.4.4.1 Общие положения

Данный метод применяют в тех случаях, когда проведение испытания при нагрузке невозможно. Он основывается на упрощенной Т-образной эквивалентной схеме замещения фазной цепи асинхронной машины, включая резистор, учитывающий потери в стали и подключенный параллельно реактивному сопротивлению основной обмотки возбуждения (см. рисунок 5). Параметры и обозначения элементов ротора соотнесены с параметрами и обозначениями статора. Это обозначено наличием апострофа (') после символа, например, $X'_{\sigma r}$.

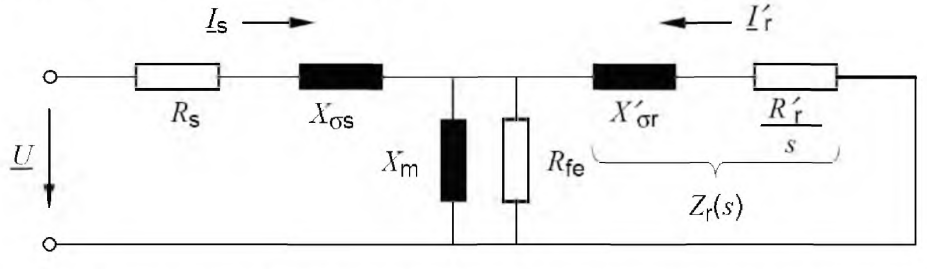

Рисунок 5 – Асинхронная машина, Т-образная эквивалентная схема замещения с резистором, учитывающим потери в стали

Применение данного метода к асинхронным машинам с короткозамкнутым ротором требует наличия следующих расчетных значений:

– отношения реактивного сопротивления рассеяния статора к реактивному сопротивлению рассеяния ротора, приведенному к статору $\frac{X_{os}}{X'_{or}}$;

– температурного коэффициента обмоток ротора α_r (электропроводимость, приведенная к 0 °С);

– реактивного сопротивления рассеяния статора X_{os} и реактивного сопротивления намагничивания X_m.

Примечание 1 – При применении метода эквивалентных схем по 6.4.4.4 и 8.2.2.4.3 все напряжения, токи и полные сопротивления являются фазными значениями для трехфазной машины при соединении по схеме «Y»; мощности и реактивные мощности – для всей машины.

Примечание 2 – Для меди α_r = 1/235, а для алюминия α_r = 1/225.

Примечание 3 – Метод получения параметров эквивалентной схемы приведен в 8.2.2.4.3.

6.4.4.4.2 Испытания при пониженной частоте

При заторможенном роторе машины питание подают от трехфазного преобразователя с регулируемой частотой, способного обеспечивать снижение частоты до 25 % ее номинального значения при номинальном токе. Среднее значение полного сопротивления получают при установленном заданном положении ротора относительно статора.

Примечание 1 – В ходе испытаний преобразователь частоты (либо машинная установка, либо статический преобразователь) должен выдавать на выходе ток практически синусоидальной формы.

Примечание 2 – При испытании обмотки ротора машин с фазным ротором должны быть закорочены.

Подают номинальный ток и снимают показания не менее трех значений частоты, включая одно при менее чем 25 %, а другие – в диапазоне от 25 % до 50 % номинальной частоты. В ходе этого испытания, проводимого за наименьшее возможное время, повышение температуры обмотки статора не должно превышать 5 K.

Для не менее чем трех частот фиксируют значения U, I, f, P_1, R_s, θ_c, θ_w.

6.4.4.4.3 Испытания при номинальной частоте

Значения полного сопротивления могут также быть определены на основании следующих испытаний:

a) реактивное сопротивление – испытания при заторможенном роторе при номинальной частоте, пониженном напряжении, номинальном токе. Фиксируют значения напряжения, тока, мощности, частоты и температуры;

b) активное сопротивление ротора при его вращении:

1) испытания при нагрузке при стабилизированной номинальной частоте и пониженном номинальном напряжении. Фиксируют значения напряжения, мощности, тока, скольжения и температуры для точек подключения нагрузки; или

2) испытания на холостом ходу при функционировании машины без нагрузки при стабилизированной номинальной частоте и номинальном напряжении. Фиксируют значения напряжения холостого хода и температуры обмотки в функции времени после отключения двигателя при испытании без нагрузки.

Примечание – При этом испытании допускается сравнительно небольшое отклонение значения тока ротора.

6.4.5 Добавочные потери при нагрузке

6.4.5.1 Испытание методом взаимной нагрузки с одним источником питания (машины постоянного тока)

Данный метод позволяет определить составляющую постоянного тока добавочных потерь, когда имеются две идентичные машины постоянного тока. Они должны быть соединены друг с другом и подключены вместе к источнику напряжения постоянного тока, при этом к машине, работающей в режиме генератора, последовательно должен быть подключен вольтодобавочный генератор (см. рисунок 6).

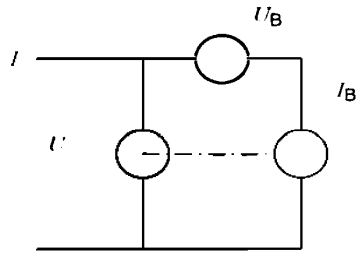

Рисунок 6 – Схема испытаний методом взаимной нагрузки с одним источником питания, добавочные потери, машины постоянного тока

Если машины предназначены для работы в режиме двигателя, то номинальное напряжение и номинальный ток для машины, работающей в режиме двигателя, подаются от источника питания. Для машин, предназначенных для работы в режиме генератора, напряжение, подаваемое на машину, работающую в режиме генератора, следует регулировать с целью обеспечения значений номинального напряжения и номинального тока. Двигатель и генератор должны функционировать при магнитном потоке, требуемом для создания электродвижущей силы, соответствующей испытательной нагрузке.

Примечание – Источник напряжения влияет в основном на потери машины без нагрузки, а вольтодобавочный генератор – в основном на потери машины при нагрузке.

Для машин с возбудителями, запускаемыми от вала, при этом испытании обмотки возбуждения должны возбуждаться по отдельности, с возбудителями, отключенными от их источника питания, и обмотками возбуждения.

После установления требуемой температуры фиксируют значения U, I, U_B, I_B, $U_{e,M}$, $I_{e,M}$, $U_{e,G}$, $I_{e,G}$, n, θ_c.

6.4.5.2 Потери на переменном токе (машины постоянного тока, возбуждаемые преобразователем)

Потери определяют на основании испытания машины при нагрузке с питанием от соответствующего выпрямителя. См. также IEC 60034-19.

Фиксируют значения:

– P_1, мощности переменного тока, подаваемого к машине;

– I, среднеквадратической составляющей переменного тока;

– θ_w, температуры обмоток с гальваническим контактом в цепи якоря.

Примечание – Для двигателей с последовательным возбуждением небольшое увеличение входной мощности переменного тока приводит к возрастанию вращающего момента двигателя. Это увеличение обычно настолько мало, что им можно пренебречь.

6.4.5.3 Испытание при нагрузке с измерением вращающего момента (асинхронные машины)

Для определения добавочных потерь проводят испытание машины при нагрузке в соответствии с 6.4.4.2, используя дополнительное устройство измерения вращающего момента, отвечающее требованиям 5.5.4.

Для каждой точки подключения нагрузки дополнительно фиксируют значение вращающего момента T.

6.4.5.4 Испытания при извлеченном роторе и при вращении ротора в обратном направлении (асинхронные машины)

6.4.5.4.1 Общие положения

Это комбинированное испытание, состоящее из двух отдельных испытаний:

a) при извлеченном роторе (для добавочных потерь на основной частоте);

b) с машиной, вращающейся на синхронной частоте противоположно магнитному полю, приводимой в движение внешними устройствами (для потерь на более высоких частотах).

В ходе обоих испытаний на статор должен подаваться сбалансированный многофазный ток номинальной частоты для четырех токов в диапазоне от 25 % до 100 % номинального тока и двух токов, значения которых не превышают 150 % номинального тока. Рассчитывают ток нагрузки ротора I_L по формуле

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2},$$

где I – значение тока статора во время испытания, обеспечивающего требуемый ток нагрузки;

I_0 – ток холостого хода при номинальном напряжении.

6.4.5.4.2 Испытание при извлеченном роторе

Для данного испытания все части, в которых могут индуцироваться вихревые токи, например торцевые щиты и части подшипников, должны быть на месте. Подают ток нагрузки.

Для каждого тока нагрузки фиксируют значения (обозначения с индексом «rm») $P_{1,rm}$, $I_{L,rm}$, R_{rm}, $\theta_{w,rm}$.

6.4.5.4.3 Испытание при вращении ротора в обратном направлении

Для данного испытания полностью собранную машину подсоединяют к приводному двигателю с выходной мощностью не менее, чем общая сумма номинальных потерь, не превышающая более чем в пять раз номинальные потери испытуемой машины. Если для определения мощности на валу двигателя используется измеритель вращающего момента, то его максимальный вращающий момент не должен превышать более чем в десять раз вращающий момент, соответствующий полным номинальным потерям испытуемой машины. Для машин с фазным ротором зажимы ротора должны быть закорочены.

Испытуемая машина должна работать на синхронной частоте вращения в обратном направлении, если она питается при нормальной последовательности фаз:

a) без приложения напряжения к статору, до тех пор пока не стабилизируются потери на трение. Фиксируют значение $P_{0,rr}$, отдаваемое приводной машиной при $I = 0$;

b) с напряжением, прикладываемым к статору, чтобы получить значения тока статора, равные значениям при испытании с неподвижным ротором. Для всех испытательных токов фиксируют значения (обозначения с индексом «rr») $I_{L,rr}$, R_{rr}, $P_{1,rr}$, $\theta_{w,rr}$ для испытуемого двигателя; $P_{D,rr}$ приводного двигателя.

Примечание – При низком коэффициенте мощности при проведении испытаний может потребоваться корректировка фазовой погрешности для всех показаний ваттметра.

6.4.5.5 Испытание методом Eh-star (асинхронные машины)

Для данного испытания требуется функционирование двигателя, не подключенного к источнику несимметричного напряжения. Схема испытания приведена на рисунке 7.

В ходе данного испытания обмотки двигателя, которые соединены по схеме «треугольник», должны быть повторно соединены по схеме «звезда». Нулевая точка звезды не должна быть соединена с нейтралью или с землей во избежание токов нулевой последовательности.

Третью фазу двигателя подключают к линии электроснабжения с помощью резистора R_{eh} (см. рисунок 7), имеющего приблизительно следующее типичное значение:

– для двигателей с соединением обмоток по схеме «звезда»: $R'_{eh} = \dfrac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0{,}2$;

– для двигателей с соединением обмоток по схеме «треугольник»: $R'_{eh} = \dfrac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0{,}2$.

Резистор R_{eh}, используемый во время испытания, регулируют так, чтобы ток прямой последовательности $I_{(1)}$ был ниже 30 % тока обратной последовательности $I_{(2)}$ и частота вращения находилась в диапазоне типичных частот вращения двигателя и была близка к номинальной частоте вращения (см. ниже). Рекомендуется начинать испытание с фактическим значением резистора R_{eh}, которое отличается не более чем на 20 % от типичного значения R'_{eh}.

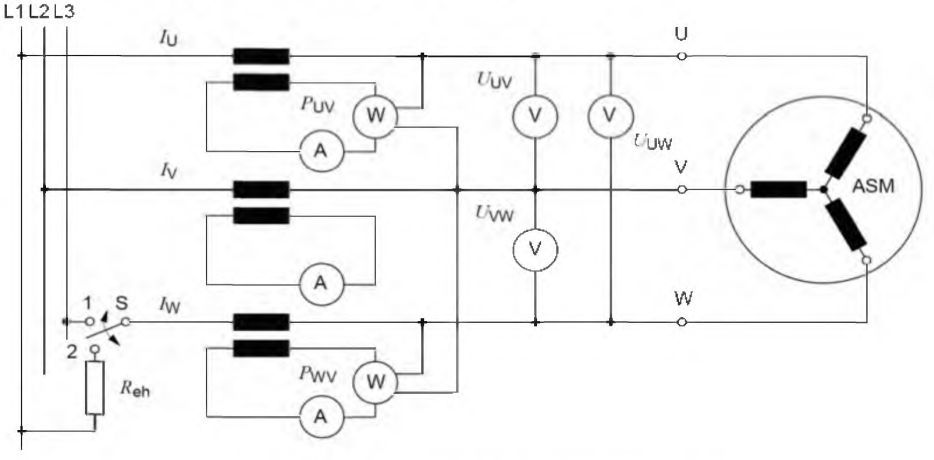

Рисунок 7 – Схема испытаний методом Eh-star

Испытательный ток I_t должен быть равен:

– для двигателей с соединением обмоток по схеме «звезда»: $I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$;

– для двигателей с соединением обмоток по схеме «треугольник»: $I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}}$.

Испытательное напряжение U_t должно быть равно:

– для двигателей с соединением обмоток по схеме «звезда»: $U_t = U_N$;

– для двигателей с соединением обмоток по схеме «треугольник»: $U_t = U_N \cdot \sqrt{3}$.

До начала испытания потери без нагрузки должны быть стабилизированы в соответствии с 6.4.2.2.

Измеряют и фиксируют сопротивление между зажимами V и W (R_{VW}) до и после полного испытания.

Во избежание чрезмерного неравномерного нагревания трех фаз испытание следует проводить на холодной машине и за возможно короткое время.

Большие двигатели можно запускать только без резистора R_{eh} (переключают S в положение 1, см. рисунок 7) при пониженном напряжении (от 25 % до 40 % U_N). После разгона двигателя подсоединяют R_{eh} путем его переключения в положение 2.

Небольшие двигатели запускают с уже подсоединенным резистором R_{eh}. В этом случае нет необходимости в переключении.

Варьируют напряжение питания для шести контрольных точек. Контрольные точки следует выбирать так, чтобы они располагались приблизительно равномерно в диапазоне от 150 % до 75 % номинального фазного тока, измеренного в фазе V (IV). Испытание начинают с наибольшего значения тока и уменьшают его до наименьшего значения.

Значение междуфазного сопротивления R_{VW} для 100 % испытательного тока и меньших токов должно быть определено после испытания с наименьшим значением тока (в конце испытания). Значение сопротивления, используемого для токов свыше 100 %, определяют как линейную функцию тока, используя показания, полученные до и после полного испытания. Испытательное сопротивление определяют, используя экстраполяцию, в соответствии с 5.7.1.

Для каждой контрольной точки фиксируют значения I_U, I_V, I_W, U_{UV}, U_{VW}, U_{WU}, P_{UV}, P_{WV}, n.

Примечание 1 – Имеется в виду, что в данном испытании никакого усреднения сопротивлений фазы не допускается.

Примечание 2 – Значения сопротивления также можно определить путем измерения температуры обмотки статора с использованием чувствительного датчика температуры, установленного на обмотке. Значения сопротивления в каждой точке подключения нагрузки можно затем определить по температуре обмотки в этой точке в зависимости от значений сопротивления и температуры, измеренных до начала испытания.

Примечание 3 – В некоторых широко используемых встроенных ваттметрах симметрируют три фазы посредством внутреннего виртуального соединения по схеме «звезда». Однако в данном испытании источник питания является намеренно несимметричным. Поэтому важно убедиться в том, чтобы не было заземления ни нулевой, ни виртуальной точки звезды. Необходимо строго придерживаться предложенной испытательной схемы (см. рисунок 7).

Для получения точных результатов скольжение не должно превышать более чем в два раза номинальное скольжение для всех токов, другими словами $n > n_{syn} - 2(n_{syn} - n_N)$. Если это условие не может быть соблюдено, то испытание следует повторить при увеличенном значении R_{eh}. Если двигатель по-прежнему работает нестабильно при токах менее 100 % номинального фазного тока, то эти точки должны быть исключены.

6.4.5.6 Испытание на короткое замыкание и испытание с неприсоединенной машиной (синхронные машины)

6.4.5.6.1 Испытание на короткое замыкание с присоединенной машиной

Подсоединяют испытуемую машину с короткозамкнутой обмоткой якоря к приводному двигателю для регистрации вращающего момента с использованием измерителя вращающего момента (см. 6.3.1.2) или динамометра (см. 6.3.1.3). Машина должна работать при номинальной частоте вращения и возбуждаться так, чтобы ток в короткозамкнутой первичной обмотке был равен номинальному току.

Примечание – Машина с возбудителем, приводимым в действие от вала [см. 3.4.3.3, перечисление а)], должна возбуждаться отдельно, а возбудитель должен быть отсоединен от источника питания и от обмотки возбуждения.

Сумма потерь при нагрузке и добавочные потери, как принято считать, не зависят от температуры, и поправки для приведения к исходной температуре не производят. Допускается, что добавочные потери изменяются пропорционально квадрату тока статора.

Фиксируют значения T, n, I.

Значения параметров возбуждения в цепи системы возбуждения должны соответствовать 6.2.

6.4.5.6.2 Испытание с неприсоединенной машиной

Машина функционирует в режиме синхронного двигателя при постоянном напряжении, составляющем приблизительно 1/3 нормального напряжения, или при его наименьшем значении, при котором может быть обеспечена стабильная работа двигателя. Ток якоря изменяют путем регулирования тока возбуждения. Ток якоря должен быть изменен примерно шесть раз в диапазоне от 125 % до 25 % номинального тока, и измерения должны быть выполнены в одной или двух точках при очень малом токе. Максимальное значение испытательного тока, равное обычно 125 % номинального тока, должно быть указано изготовителем, поскольку иногда охлаждение статора не дает возможности машине работать при токе, значение которого превышает 100 % номинального тока, не выходя при этом из строя. Сначала следует выбирать наибольшее значение тока, чтобы обеспечить более равномерную температуру обмотки статора в ходе испытания.

Фиксируют значения P_1, I, U.

Значения параметров возбуждения в цепи системы возбуждения должны соответствовать 6.2.

Примечание – Для больших машин максимальный шаг изменения тока якоря может ограничиваться 60 % – 70 % его номинального значения.

7 Определение коэффициента полезного действия (машины постоянного тока)

7.1 Определение прямым методом измерения

7.1.1 Измерение вращающего момента

Если испытания проводят в соответствии с 6.3.1, то коэффициент полезного действия определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}.$$

В соответствии с 6.3.1.1 потребляемая мощность P_1 и полезная мощность P_2 определяются следующим образом:

– при работе в режиме двигателя: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;

– при работе в режиме генератора: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$,

где P_{el}, T и n – в соответствии с 6.3.1.2, 6.3.1.3;

$P_{mech} = 2\pi \cdot T \cdot n$;

P_{1E} – в соответствии с 6.2 с учетом 3.4.3.3 и 3.4.3.4.

Примечание – Потери в цепи возбуждения, не учитываемые в P_{1E}, обусловлены механическим вращением вала.

7.1.2 Испытание методом взаимной нагрузки с двумя источниками питания

Если идентичные машины работают фактически в одинаковых нормальных условиях, коэффициент полезного действия рассчитывают, исходя из половины полных потерь и средней входной мощности двигателя и генератора, по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}},$$

где

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E};\ P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G});$$

и P_1 и P_2 – в соответствии с 6.3.2;

P_{1E} – в соответствии с 6.3.2 с учетом 3.4.3.3 и 3.4.3.4.

7.2 Определение косвенным методом измерения

7.2.1 Полные потери

7.2.1.1 Испытание методом взаимной нагрузки с одним источником питания

Если идентичные машины работают фактически в нормальных условиях, то коэффициент полезного действия рассчитывают путем определения половины полных потерь для каждой машины.

Коэффициент полезного действия рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}},$$

где P_M – мощность, потребляемая на зажимах машины, работающей в режиме двигателя (за исключением мощности возбуждения), в соответствии с 6.4.1.1;

P_T – полные потери, определенные как половина поглощенных полных потерь;

P_{1E} – мощность возбуждения, обеспечиваемая отдельным источником (для машин с вольтодобавочным генератором см. 6.4.1.1.2):

$$P_T = \frac{1}{2}(U_M \cdot I_1 + U_B \cdot I_B) + P_{1E};\ P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G}).$$

7.2.2 Суммирование отдельных потерь

7.2.2.1 Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T},$$

где P_1 – входная мощность, за исключением мощности возбуждения от автономного источника;

P_2 – выходная мощность;

P_{1E} – мощность возбуждения от автономного источника;

P_T – в соответствии с 7.2.2.2.

Примечание 1 – Обычно первое выражение используют для двигателя, а второе – для генератора.

Примечание 2 – P_T включает мощность возбуждения P_e (см. 6.2) машины (при необходимости).

7.2.2.2 Полные потери

Полные потери рассматривают как сумму отдельных потерь по 7.2.2.3 – 7.2.2.6:

$$P_T = P_k + P_a + P_b + P_{LL} + P_e,$$

$$P_e = P_f + P_{Ed},$$

где P_a – потери в обмотке якоря;

P_b – потери в щетках;

P_k – постоянные потери;

P_{LL} – добавочные потери;

P_f – потери на возбуждение (в обмотке возбуждения);

P_{Ed} – потери в возбудителе.

7.2.2.3 Постоянные потери

7.2.2.3.1 Определение постоянных потерь

Постоянные потери определяют по формуле

$$P_k = P_0 - P_a,$$

где $P_a = I_0^2 \cdot R_0$;

I_0 и R_0 соответствуют каждому значению напряжения, зафиксированному согласно 6.4.2.3.

Если измерение сопротивления невозможно вследствие его малых значений, то допускается использовать расчетные значения, скорректированные до требуемой температуры обмотки.

Примечание – Потери в якоре P_a должны включать потери в компенсационных обмотках, обмотках коммутирующих полюсов и в шунтирующих резисторах (диверторы). Что касается диверторов, включенных параллельно с последовательной обмоткой, то потери в электрической обмотке можно определять, используя общий ток и результирующее сопротивление.

7.2.2.3.2 Потери на трение и вентиляционные потери (добавочные)

Для каждого из значений напряжения 50 % или менее по 6.4.2.3 строят кривую постоянных потерь (P_k) по 7.2.2.3.1 в зависимости от квадрата напряжения U_0^2. Экстраполируют прямую линию до нулевого значения напряжения. Точка пересечения с осью напряжения дает значение вентиляционных потерь и потерь на трение P_{fw}.

7.2.2.3.3 Потери в стали (добавочные)

Для каждого из значений напряжения в диапазоне от 60 % до 125 % по 6.4.2.3 строят кривую постоянных потерь (P_k) по 7.2.2.3.1 в зависимости от напряжения U_0. Экстраполируют прямую линию

до нулевого значения напряжения. Потери в стали должны быть определены при следующих значениях напряжения:

$$U_0 = U_N - (IR)_a - 2U_b \text{ – для двигателя;}$$
$$U_0 = U_N - (IR)_a + 2U_b \text{ – для генератора,}$$

где U_N – номинальное напряжение;

$2U_b$ – падение напряжения на щетках, как указано в 7.2.2.4.2;

I – ток для требуемой точки подключения нагрузки;

R – сопротивление всех обмоток цепи якоря при значении температуры при полной нагрузке.

Потери в стали определяют по формуле

$$P_{fe} = P_k - P_{fw},$$

где P_{fw} – в соответствии с 7.2.2.3.2.

7.2.2.4 Потери при нагрузке

7.2.2.4.1 Потери в обмотках цепи якоря

Для каждой зафиксированной нагрузки определяют потери в обмотках цепи якоря:

$$P_a = I^2 \cdot R,$$

где I и R – в соответствии с 5.7.2 и 6.4.4.2 с R с учетом сопротивления всех обмоток в цепи якоря.

7.2.2.4.2 Электрические потери в щетках

Потери в щетках определяют, используя заданное значение падения напряжения на щетке:

$$P_b = 2 \cdot U_b \cdot I,$$

где I – ток якоря при номинальном режиме работы;

U_b – предполагаемое значение падения напряжения на щетке в зависимости от типа щетки:

– 1,0 В для угольных, электрографитных или графитных щеток;

– 0,3 В для металлизированных угольных щеток.

7.2.2.5 Потери в цепи возбуждения

При проведении испытания при нагрузке в соответствии с 6.4.3.1 потери в цепи возбуждения получают на основании значений измеренного напряжения и тока по формуле

$$P_f = U_e \cdot I_e.$$

Без проведения испытания при нагрузке потери в обмотке возбуждения P_e следует рассчитывать по формуле $I_e^2 \cdot R_f$, где R_f – сопротивление параллельной обмотки возбуждения (или отдельно возбуждаемой обмотки), скорректированное с учетом поправки для приведения к исходной температуре, указанной в 5.7.3, а I_e равен току возбуждения при соответствии следующим перечислениям:

a) для параллельно соединенных или отдельно возбуждаемых генераторов с коммутирующими полюсами или без них I_e составляет 110 % тока возбуждения, соответствующего току без нагрузки при напряжении, равном сумме номинального напряжения и активного падения напряжения в цепи якоря (якорь, щетки и коммутационные обмотки (если таковые имеются), см. также 7.2.2.4.1) при токе в установленной точке подключения нагрузки;

b) для компенсированных генераторов параллельного возбуждения или отдельно возбуждаемых генераторов I_e – это ток возбуждения, соответствующий току без нагрузки при напряжении, равном сумме номинального напряжения и активного падения напряжения в цепи якоря при токе в установленной точке подключения нагрузки;

c) для плоско-компаундированных генераторов I_e – это ток возбуждения при номинальном напряжении без нагрузки;

d) для перекомпаундированного и недокомпаундированного генераторов и специальных типов генераторов, не указанных в перечислениях a) – c), I_e определяют по соглашению;

e) для двигателей параллельного возбуждения I_e равен току возбуждения без нагрузки, соответствующему номинальному напряжению.

Потери в возбудителе P_{Ed} в соответствии с 6.4.3.3, если определены на основании испытаний, составляют

$$P_{Ed} = (T_E - T_{E,0}) \cdot 2 \cdot \pi n + P_{1E} - U_e \times I_e,$$

где $T_{E,0}$ – вращающий момент с невозбужденным возбудителем.

Во всех случаях следует использовать расчетные значения.

7.2.2.6 Добавочные потери при нагрузке

7.2.2.6.1 Потери на постоянном токе (испытание методом взаимной нагрузки с одним источником питания)

Добавочные потери определяют на каждой машине при номинальном токе, исходя из измеренных значений по 6.4.5.1.

$$P_{Ш} = \frac{1}{2}(P_1 - \Sigma P_k - \Sigma P_a - P_{con} - 2U_b(I + I_в) - 2I_в U_b),$$

где $P_1 = U_M \cdot I_1 + U_в \cdot I_в$ – мощность от источника питания и вольтодобавочного генератора; см. рисунок 3;

ΣP_k – сумма постоянных потерь обеих машин на основании 7.2.2.3;

ΣP_a – сумма потерь сопротивления обеих цепей якоря на основании 7.2.2.4.1;

P_{con} – потери в кабельных соединениях.

Для определения потерь для других точек подключения нагрузки применяют коэффициенты, указанные в таблице 5.

7.2.2.6.2 Потери на переменном токе

Добавочные потери вследствие переменной составляющей напряжения питания, определяют по формуле

$$P_{Ш} = P_1 - I^2 \cdot R_a,$$

где R_a – сопротивление постоянного тока цепи якоря при значении температуры при номинальной нагрузке;

P_1 и I – в соответствии с 6.4.5.2.

7.2.2.6.3 Потери с допускаемыми поправками при измерении (потери постоянного тока) и при расчетах (потери переменного тока)

Считается, что потери постоянного тока изменяются пропорционально квадрату тока и их суммарное значение при максимальном номинальном токе равно:

a) для некомпенсированных машин:

– 1 % номинальной входной мощности для двигателей;

– 1 % номинальной выходной мощности для генераторов;

b) для компенсированных машин:

– 0,5 % номинальной входной мощности для двигателей;

– 0,5 % номинальной выходной мощности для генераторов.

Для машин с постоянной частотой вращения номинальная мощность – это мощность при максимальном номинальном токе и максимальном номинальном напряжении.

Для двигателей с переменной частотой вращения, в которых регулирование частоты вращения осуществляется путем изменения подаваемого напряжения, номинальную потребляемую мощность определяют для каждой частоты вращения как фактическую потребляемую мощность, когда максимальный номинальный ток соответствует подаваемому напряжению при конкретной частоте вращения.

Для двигателей с переменной частотой вращения, в которых повышение частоты вращения достигается посредством ослабления поля, номинальную потребляемую мощность определяют как фактическую потребляемую мощность при значении номинального напряжения, соответствующем значению максимального номинального тока.

Для генераторов с переменной частотой вращения, в которых напряжение поддерживается постоянным за счет изменения поля, номинальную выходную мощность определяют как фактическую выходную мощность, которая существует на зажимах при номинальном напряжении и максимальном номинальном токе. Допустимые значения для добавочных потерь при частоте вращения, соответствующей полному возбуждению, должны соответствовать значениям, указанным в перечислениях a) и b). Допустимые значения добавочных потерь при других частотах вращения рассчитывают с применением соответствующих коэффициентов, приведенных в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты для различных отношений частот вращения

Отношение частот вращения	Коэффициент
1,5 : 1	1,4
2 : 1	1,7
3 : 1	2,5
4 : 1	3,2

За отношение частот вращения в первой колонке таблицы 5 принимают отношение фактической рассматриваемой частоты вращения к минимальной номинальной частоте вращения при продолжительном режиме работы.

Для отношений частот вращения, не указанных в таблице 5, соответствующие коэффициенты могут быть определены методом интерполяции.

Для двигателей с питанием от статических силовых преобразователей в случаях, когда коэффициент пульсаций тока якоря (см. IEC 60034-1) превышает 0,1, добавочные потери, обусловленные составляющей переменного тока якоря (см. 7.2.2.6.2), должны быть дополнены потерями, указанными выше.

8 Определение коэффициента полезного действия (асинхронные машины)

8.1 Определение прямым методом измерения

8.1.1 Измерение вращающего момента

Если испытание проводят в соответствии с 6.3.1, то коэффициент полезного действия равен

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Входная мощность P_1 и выходная мощность P_2 соответствуют 6.3.1.1:

– при работе в режиме двигателя: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;

– при работе в режиме генератора: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$,

где P_{el}, T и n – в соответствии с 6.3.1.2 и 6.3.1.3;

$P_{mech} = 2\pi \cdot T \cdot n$.

8.1.2 Испытание методом взаимной нагрузки с двумя источниками питания

Если идентичные машины работают фактически в одинаковых нормальных условиях, то коэффициент полезного действия рассчитывают на основании половины значения полных потерь и средней потребляемой мощности двигателя и генератора по следующей формуле:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}},$$

где P_T = $P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2)$;

P_1 и P_2 – в соответствии с 6.3.2.

8.2 Определение косвенным методом измерения

8.2.1 Полные потери, определяемые при испытании методом взаимной нагрузки с одним источником питания

Если идентичные машины работают фактически в одинаковых нормальных условиях, коэффициент полезного действия рассчитывают на основании половины значения полных потерь для каждой машины.

Коэффициент полезного действия рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M},$$

где P_M – мощность, потребляемая на зажимах машины, работающей в режиме двигателя, в соответствии с 6.4.1.1;

P_T – полные потери, определяемые как половина общей потребляемой мощности, измеренной для асинхронных машин с фазным ротором в соответствии с 6.4.1.1.3 по формуле

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 + P_r).$$

8.2.2 Суммирование отдельных потерь

8.2.2.1 Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T},$$

где P_1 – потребляемая мощность при испытании с номинальной нагрузкой в соответствии с 6.4.4.1;

P_2 – полезная мощность;

P_T – в соответствии с 8.2.2.2.

Примечание – Обычно первое выражение более предпочтительно использовать для двигателя, а второе – для генератора.

8.2.2.2 Полные потери

За полные потери принимают сумму потерь, рассчитанных по 8.2.2.3 (постоянные потери), 8.2.2.4 (потери при нагрузке) и 8.2.2.5 (добавочные потери при нагрузке):

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL}.$$

8.2.2.3 Постоянные потери

8.2.2.3.1 Общие положения

Постоянные потери определяют путем вычитания потерь в обмотке без нагрузки (при температуре во время испытания без нагрузки) из входной мощности без нагрузки. Эти постоянные потери являются суммой потерь на трение, вентиляционных потерь и потерь в стали. Постоянные потери определяют для каждого значения напряжения, зафиксированного в 6.4.2:

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe},$$

где $P_s = 1{,}5 \cdot I_0^2 \cdot R_{ll0}$ (см. 6.4.2.3).

8.2.2.3.2 Потери на трение и вентиляционные потери

Из указанных выше точек, в которых были определены потери без нагрузки, используют те точки, в которых не наблюдается значительного эффекта насыщения, и строят кривую постоянных потерь (P_k) в зависимости от квадрата напряжения (U_0^2). Экстраполируют прямую линию до нулевого значения напряжения. Точка пересечения с осью напряжения дает значение потерь на трение и вентиляционных потерь P_{fw}.

Примечание – Считают, что вентиляционные потери и потери на трение не зависят от нагрузки и одно и то же значение вентиляционных потерь и потерь на трение можно использовать для каждой из точек подключения нагрузки.

8.2.2.3.3 Потери в стали

На основании значений напряжения в диапазоне от 60 % до 125 % номинального напряжения строят кривую потерь $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ в зависимости от напряжения U_0. Значение потерь в стали для требуемой точки подключения нагрузки получают на основании кривой при напряжении U_r с учетом активного падения напряжения в первичной обмотке:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R\cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R\sin\varphi\right)^2},$$

где $\cos\varphi = \dfrac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$;

$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$;

U, P_1, I и R – в соответствии с 6.4.4.2.

8.2.2.4 Потери при нагрузке

8.2.2.4.1 Испытание при нагрузке

8.2.2.4.1.1 Общие положения

При определении номинального коэффициента полезного действия для потерь при нагрузке должны использоваться входные данные по 6.4.4.1.

При определении добавочных потерь при нагрузке для потерь при нагрузке должны использоваться входные данные по 6.4.4.2.

8.2.2.4.1.2 Потери в обмотке статора и поправка на температуру

Нескорректированные потери в обмотке статора для каждой из точек подключения нагрузки рассчитывают по формуле

$$P_s = 1{,}5 \cdot I^2 \cdot R,$$

где значения I и R определены в 6.4.4.1.

Скорректированные потери в обмотке статора для каждой из точек подключения нагрузки определяют с использованием значения сопротивления обмотки статора R_N, определенного при испытании на номинальную нагрузку, скорректированного с учетом поправки для приведения к стандартной исходной температуре хладагента, равной 25 °С, по формуле

$$P_{s,\theta} = P_s \cdot k_\theta,$$

где k_θ – в соответствии с 5.7.3.

8.2.2.4.1.3 Потери в обмотке ротора и поправка на температуру

Для определения нескорректированных потерь в обмотке ротора для каждой из точек подключения нагрузки используют уравнение

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s,$$

где $s = 1 - \frac{p \cdot n}{f}$;

P_1, n и f – в соответствии с 6.4.4.1;

P_s – в соответствии с 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} – в соответствии с 8.2.2.3.3.

Скорректированные потери в обмотке ротора для любой точки подключения нагрузки определяют, используя значение скольжения для каждой из точек, скорректированное с учетом поправки для приведения к стандартной исходной температуре хладагента, равной 25 °С, и скорректированное значение потерь в обмотке статора (см. 8.2.2.4.1.2) для каждой точки.

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \cdot s_\theta,$$

где $P_{s,\theta}$ – в соответствии с 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} – в соответствии с 8.2.2.3.3;

$s_\theta = s \cdot k_\theta$ – скольжение, скорректированное с учетом поправки для приведения к стандартной исходной температуре хладагента, равной 25 °С (см. 5.7.3);

k_θ – в соответствии с 5.7.3.

8.2.2.4.1.4 Электрические потери в щетках (только в фазном роторе)

Эти потери включены в потери, указанные 8.2.2.4.1.3.

Потери в щетках в каждой фазе определяют, используя заданное значение падения напряжения на каждой щетке по формуле

$$P_b = N \cdot U_b \cdot I_2,$$

где N – общее количество фаз, в которых протекает ток I;

I_2 – вторичный ток (не относящийся к первичному);

U_b – заданное значение падения напряжения на каждой щетке в зависимости от типа щетки:

– 1,0 В для угольных, электрографитных или графитных щеток;

– 0,3 В для металлизированных угольных щеток.

Примечание – Для I_2 можно использовать расчетное значение.

8.2.2.4.2 Определение потерь посредством испытания при нагрузке и пониженном напряжении

Исходя из результирующих данных, полученных при испытании по 6.4.4.3, рассчитывают ток при нагрузке и потребляемую мощность при номинальном напряжении:

$$\underline{I} = \underline{I}_{red} \frac{U_N}{U_{red}} + \Delta \underline{I}_0,$$

где

$$\Delta \underline{I}_0 = -j\left(|\underline{I}_0| \sin\varphi_0 - |\underline{I}_{0,red}| \frac{U_N}{U_{red}} \sin\varphi_{0,red}\right);$$

$$P_1 = P_{1,red} \cdot \left(\frac{U_N}{U_{red}}\right)^2.$$

Примечание – Подчеркнутые обозначения тока указывают, что это векторная величина (см. рисунок 8).

С использованием значений I и P_1, определенных таким образом, и скольжения, измеренного при пониженном напряжении, можно рассчитать потери при нагрузке, как указано в 8.2.2.4.1.

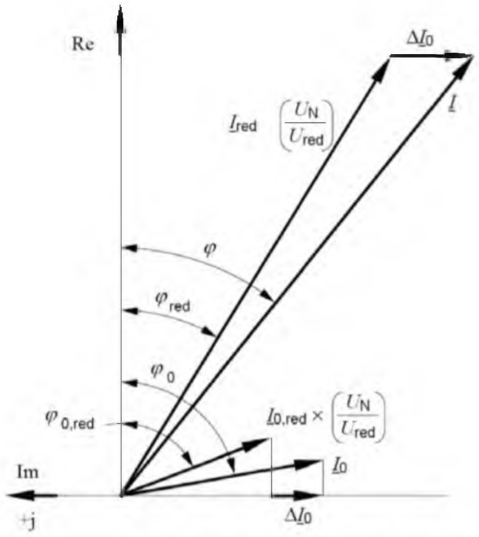

Рисунок 8 – Векторная диаграмма для построения вектора тока на основании испытания при пониженном напряжении

8.2.2.4.3 Определение потерь с применением метода эквивалентных схем

8.2.2.4.3.1 Значения параметров, полученные измерением

Данный метод основан на применении Т-образной эквивалентной схемы замещения (см. 6.4.4.4 и рисунок 5).

Примечание – При применении метода эквивалентных схем все значения напряжения, тока и полного сопротивления являются фазными для трехфазной машины с соединением по схеме Y; значения мощности и реактивной мощности – для всей машины.

В основе процедуры, описанной в настоящем подразделе, лежит методика, приведенная в 6.4.4.4.2. При применении метода, указанного в 6.4.4.4.3, учитывают следующие отклонения:

a) реактивные сопротивления рассчитывают способом, который приведен в 8.2.2.4.3.2;

b) сопротивление вращающегося ротора определяют следующим образом:

– применяя испытание, описанное в 6.4.4.4.3, перечисление a), посредством вычислений, применяя эквивалентную схему замещения, приведенную на рисунке 5, и учитывая значение сопротивления R_r'. Корректируют значение R_r' до тех пор, пока расчетная мощность не станет равной 0,1 % измеренной мощности или расчетный ток не станет равным 0,1 % измеренного тока;

– применяя испытание, описанное в 6.4.4.4.3, перечисление b), путем определения постоянной времени по наклону кривой зависимости напряжения от времени при испытании на холостом ходу. Определяют R_r' по формуле

$$R_r' = \frac{(X_m + X_{or}')}{2\pi f \tau_0},$$

где X_m – реактивное сопротивление намагничивания;

X_{or}' – реактивное сопротивление рассеяния ротора;

f – частота сетевого напряжения;

τ_0 – постоянная времени в режиме холостого хода.

Корректируют значение R_r' путем приведения его к рабочей температуре.

Определяют значения реактивной мощности:

– на основании испытания без нагрузки при номинальном напряжении $U_0 = U_N$ и номинальной частоте вращения (6.4.2.2):

$$P_{Q,0} = \sqrt{(3U_0 I_0)^2 - P_0^2};$$

– на основании испытания при заторможенном роторе и пониженной частоте (6.4.4.4.2):

$$P_{Q,1r} = \sqrt{(3UI)^2 - P_1^2}\ ,$$

где U_0, I_0 и P_0 – фазное напряжение, фазный ток и подаваемая мощность при испытании без нагрузки при номинальном напряжении на зажимах;

U, I и P_1 – фазное напряжение, фазный ток и подаваемая мощность при испытании при заторможенном роторе (см. 6.4.4.4.3) при частотах f для данного испытания.

8.2.2.4.3.2 Параметры эквивалентной схемы замещения

Параметры эквивалентной схемы замещения определяют в несколько этапов:

– Реактивное сопротивление.

Рассчитывают реактивное сопротивление X_m, исходя из результатов испытания без нагрузки, и $X_{\sigma s,Ir}$, исходя из результатов испытания при заторможенном роторе и номинальной частоте 25 %:

$$X_m = \frac{3U_0^2}{P_{Q,0} - 3I_0^2 X_{\sigma s}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2};\quad X_{s,1r} = \frac{P_{Q,1r}}{3I^2\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X'_{rr}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)} \times \left(\frac{X_{ss}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right);$$

$$X_{\sigma s} = \frac{f_N}{f_{1r}} X_{\sigma s,1r};\quad X'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma s}}{X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}}\ .$$

Вычисляют, применяя расчетные значения как начальные величины (см. 6.4.4.4.1),

$$X_{\sigma s}, X_m \text{ и } \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}\ .$$

Производят повторные расчеты до тех пор, пока значения X_m и $X_{\sigma s}$ не будут отклоняться менее чем на 0,1 % от значений, полученных на предыдущем этапе.

– Сопротивление потерь в стали.

Определяют сопротивление в каждой фазе, эквивалентное потерям в стали при номинальном напряжении, по формуле

$$R_{fe} = \frac{3U_{N,ph}^2}{P_{fe}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2},$$

где P_{fe} – потери в стали в соответствии с 8.2.2.3.3, исходя из значения P_0 при номинальном напряжении.

– Сопротивление ротора.

Определяют нескорректированное значение сопротивления ротора для каждой контрольной точки полного сопротивления при заторможенном роторе:

$$R'_{r,1r} = \left(\frac{P_1}{3I^2} - R_s\right) \cdot \left(1 + \frac{X'_{\sigma r}}{X_m}\right) - \left(\frac{X'_{\sigma r}}{X_{\sigma s}}\right)^2 \cdot \frac{X_{\sigma s,1r}^2}{R_{fe}},$$

где R_s – это сопротивление обмотки статора в каждой фазе при соответствующей температуре θ_w.

Примечание – Если температура обмотки ротора намного отклоняется от температуры обмотки статора, то метод считают некорректным.

Значение сопротивления ротора, скорректированное с учетом поправки для приведения к стандартной исходной температуре (см. 5.7.2 и таблицу 4), рассчитывают для каждой испытательной частоты для полного сопротивления при заторможенном роторе по формуле

$$R''_{r,1r} = R'_{r,1r} \cdot \frac{1 + \alpha_r \theta_{ref}}{1 + \alpha_r \theta_W}\ .$$

Строят кривую зависимости значений $R''_{r,1r}$ от частоты f_{Ir}. Точка пересечения с осью $f_{Ir} = 0$ дает значение сопротивления статора, приведенное к сопротивлению ротора R'_r.

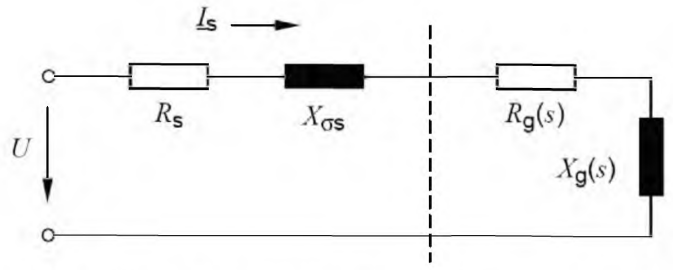

Рисунок 9 – Асинхронные машины, упрощенная эквивалентная схема для расчета

– Полное сопротивление, зависящее от нагрузки.

Для каждой требуемой промежуточной точки подключения нагрузки рассчитывают полное сопротивление, зависящее от нагрузки, и проводимость (см. рисунок 9):

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}'^2}\ ;\ Y_g = \sqrt{\left(\frac{R_r'/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X_{\sigma r}'}{Z_r^2} + \frac{1}{x_m}\right)^2}\ ;$$

$$R_g = \frac{\dfrac{R_r'/s}{Z_r^2} + \dfrac{1}{R_{fe}}}{Y_g^2}\ ;\ X_g = \frac{\dfrac{X_{\sigma r}'}{Z_r^2} + \dfrac{1}{X_m}}{Y_g^2}.$$

Определяют полное сопротивление на зажимах:

$$R = R_s + R_g;\ X = X_{\sigma s} + X_g;\ Z = \sqrt{R^2 + X^2}\ ,$$

где s – установленное скольжение;

R_s – сопротивление обмотки статора в каждой фазе при исходной температуре θ_{ref}.

8.2.2.4.3.3 Токи и потери

Рабочие значения определяют в несколько этапов.

Определяют: $I_s = \dfrac{U_N}{Z}$ – фазный ток статора; $I_r' = I_s \dfrac{1}{Y_g Z_r}$ – фазный ток ротора;

$P_\delta = 3I_r'^2 \dfrac{R_r'}{s}$ – мощность, передаваемую на ротор через воздушный зазор;

$P_{fe} = 3I_s^2 \dfrac{1}{Y_g^2 R_{fe}}$ – потери в стали;

$P_s = 3I_s^2 R_s$ и $P_r = 3I_r'^2 R_r'$ – потери в обмотке статора и ротора соответственно;

$P_{LL} = P_{LL,N}\left(\dfrac{I_r'}{I_{r,N}'}\right)$ – добавочные потери при нагрузке для значения $P_{LL,N}$ при номинальной нагрузке (либо заданного (8.2.2.5.3), либо измеренного (8.2.2.5.2), или определенного в соответствии с 8.2.2.5.4).

Полные потери будут равны

$$P_T = P_s + P_{fe} + P_r + P_{LL} + P_{fw}.$$

Поскольку входная мощность и мощность на валу соответственно равны $P_1 = 3I_s^2 R$ и $P_2 = P_1 - P_T$, скольжение следует корректировать, а расчеты тока и потерь – повторять до тех пор, пока значения P_2 при работе в режиме двигателя или P_1 при работе в режиме генератора не станут достаточно близки к требуемым значениям.

Коэффициент полезного действия (при работе в режиме двигателя) рассчитывают по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

8.2.2.5 Добавочные потери при нагрузке

8.2.2.5.1 Испытания при нагрузке с измерением вращающего момента

8.2.2.5.1.1 Остаточные потери P_{Lr}

Остаточные потери определяют для каждой точки подключения нагрузки путем вычитания из потребляемой мощности полезной мощности, потерь в обмотке статора при сопротивлении, установленном для испытания, потерь в стали, вентиляционных потерь и потерь на трение, потерь в обмотке ротора, соответствующих определенному значению скольжения:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw};\ P_2 = 2\pi \cdot T \cdot n,$$

где P_1, T и n – в соответствии с 6.4.4.2;

P_s – в соответствии с 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} – в соответствии с 8.2.2.3.3;

P_{fw} – в соответствии с 8.2.2.3.2;

P_r – в соответствии с 8.2.2.4.1.3.

8.2.2.5.1.2 Усреднение значений остаточных потерь

Полученные значения остаточных потерь должны быть усреднены путем применения линейного регрессионного анализа (см. рисунок 10), основанного на выражении потерь как функции квадрата вращающего момента при нагрузке, соответствующей соотношению

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B,$$

где T – соответствует значению, указанному в 8.2.2.5.1.1;

A и B – постоянные, определенные в соответствии с 6.4.4.2 и 8.2.2.5.1.1 на основании как минимум шести точек подключения нагрузки с применением следующих уравнений:

A – коэффициент регрессии в соответствии с $A = \dfrac{i \cdot \Sigma\left((P_L) \cdot (T^2)\right) - \Sigma P_L \cdot \Sigma T^2}{i \cdot \Sigma (T^2)^2 - (\Sigma T^2)^2}$;

B – начальная ордината регрессионной прямой в соответствии с $B = \dfrac{\Sigma P_L}{i} - A \cdot \dfrac{\Sigma T^2}{i}$;

i – количество суммированных точек подключения нагрузки.



Рисунок 10 – Усреднение значений остаточных потерь

Коэффициент корреляции рассчитывается в соответствии с выражением

$$\gamma = \frac{i \cdot \Sigma (P_L \cdot T^2) - (\Sigma P_L) \cdot (\Sigma T^2)}{\sqrt{\left(i \cdot \Sigma (T^2)^2 - (\Sigma T^2)^2\right) \cdot \left(i \cdot \Sigma P_L^2 - (\Sigma P_L)^2\right)}}.$$

Если значение коэффициента корреляции γ менее 0,95, наихудшую точку удаляют и регрессионный анализ проводят повторно. Если значение γ увеличивается до ≥ 0,95, используют вторую регрессионную прямую; если значение γ по-прежнему составляет менее 0,95, то результат испытания считают неудовлетворительным и оценивают погрешности средств и (или) результатов измерений. Источники погрешности необходимо исследовать и устранить, а испытание (см. 6.4.4.2) повторить.

8.2.2.5.1.3 Добавочные потери при нагрузке P_{LL}

Когда коэффициент регрессии A установлен, определяют значение добавочных потерь при нагрузке для каждой точки подключения нагрузки по формуле

$$P_{LL} = A \cdot T^2,$$

где A и T соответствуют значениям, указанным в 8.2.2.5.1.2.

8.2.2.5.2 Испытания с неподвижным ротором и при вращении ротора в обратном направлении

Усредняют полученные при испытании (см. 6.4.5.4) значения мощностей статора $P_{1,rm}$ и $P_{1,rr}$ и мощности на валу ($P_{D,rr} - P_{0,rr}$), применяя регрессионный анализ к зафиксированным значениям мощностей и токов, в результате чего получены следующие соотношения:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \cdot I^{N1} + B_{L,rm};\ P_{1,rr} = A_{rr} \cdot I^{N2} + B_{L,rr};\ (P_{D,rr} - P_{0,rr}) = A_{D,rr} \cdot I^{N3} + B_{D,rr}.$$

Затем усредненные значения мощности должны быть рассчитаны следующим образом:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \cdot I^{N1};\ P_{1,rr} = A_{rr} \cdot I^{N2};\ (P_{D,rr} - P_{0,rr}) = A_{D,rr} \cdot I^{N3}.$$

Если данные являются точными, то соотношение между мощностью и током для каждой кривой имеет квадратичный характер.

Добавочные потери при нагрузке определяют как $P_{LL} = P_{LL,rm} + P_{LL,rr}$, причем для тока каждого испытания:

– $P_{LL,rm} = P_{1,rm} - (3 \cdot I^2 \cdot R_{s,rm})$ – потери на основной частоте,

где $R_{s,rm}$ – фазное сопротивление статора, приведенное к среднему значению температур $\theta_{w,rm}$;

– $P_{LL,rr} = (P_{D,rr} - P_{0,rr}) - (P_{1,rr} - P_{LL,rm} - (3 \cdot I^2 \cdot R_{s,rr})$ – потери на более высоких частотах,

где $R_{s,rr}$ – фазное сопротивление статора, приведенное к среднему значению температур $\theta_{w,rr}$.

Добавочные потери при нагрузке в конкретной рабочей точке определяют в несколько этапов:

a) рассчитывают приблизительное значение тока нагрузки I_{NL}, соответствующее номинальному значению линейного тока статора:

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2},$$

где I_N – номинальное значение линейного тока статора;

I_0 – значение тока статора без нагрузки;

b) для значения тока нагрузки I_{NL} рассчитывают номинальное значение добавочных потерь при нагрузке P_{NLL} следующим образом:

$$P_{NLL} = A_{Drr} \cdot I_{NL}^{N3} + 2A_{rm} \cdot I_{NL}^{N1} - A_{rr} \cdot I_{NL}^{N2} - 6I_{NL}^2 \cdot (R_{srm} - 0{,}5R_{srr});$$

c) рассчитывают значение тока нагрузки I_L в любой рабочей точке:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2},$$

где I – линейный ток статора в рабочей точке:

d) рассчитывают значение добавочных потерь при нагрузке P_{LL} в рабочей точке:

$$P_{LL} = P_{NLL} \cdot \left(\frac{I_L}{I_{NL}}\right)^2.$$

8.2.2.5.3 Заданные значения параметров

Значение добавочных потерь при нагрузке P_{LL} в процентах от потребляемой мощности для номинальной нагрузки определяют с использованием кривой, приведенной на рисунке 11.

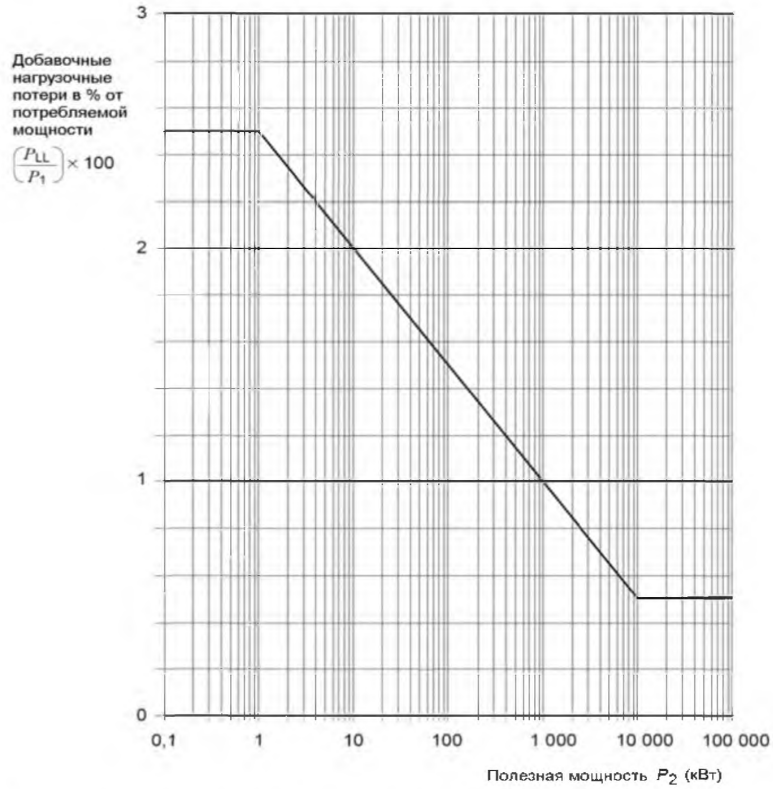

Рисунок 11 – Заданные значения для добавочных потерь при нагрузке P_{LL}, асинхронные машины

Значения, приведенные на кривой, можно описывать с применением следующих равенств:
– для $P_2 \leq 1$ кВт:

$$P_{LL} = P_I \cdot 0{,}025;$$

– для 1 кВт < P_2 < 10000 кВт:

$$P_{LL} = P_I \cdot \left[0{,}025 - 0{,}005 \log 10\left(\frac{P_2}{1\ \text{кВт}}\right)\right];$$

– для $P_2 \geq 10000$ кВт:

$$P_{LL} = P_I \cdot 0{,}005.$$

Для нагрузок, отличных от номинальных, предполагается, что добавочные потери при нагрузке изменяются пропорционально квадрату первичного тока за вычетом квадрата тока без нагрузки.

Примечание – Кривая представляет собой не осредненную, а верхнюю огибающую большего числа измеренных значений, что может в большинстве случаев привести к завышенным значениям добавочных потерь при нагрузке в сравнении с указанными в 8.2.2.5.1 или 8.2.2.5.2.

8.2.2.5.4 Испытание методом Eh-star

8.2.2.5.4.1 Определение промежуточных значений

Для каждой контрольной точки (согласно 6.4.5.5) рассчитывают значения, применяя уравнения, приведенные в приложении В.

8.2.2.5.4.2 Усреднение значений добавочных потерь при нагрузке

Значения добавочных потерь при нагрузке усредняют, применяя линейный регрессионный анализ (см. рисунок 10).

Потери выражают как функцию квадрата тока обратной последовательности $I_{i(2)}$, связанной с испытательным током I_t, согласно 6.4.5.5:

$$P_{Lr} = A \cdot \left(\frac{I_{1(2)}}{I_t} \right)^2 + B .$$

A и B рассчитывают подобно процедуре, описанной в 8.2.2.5.1.2.

Когда коэффициент регрессии A установлен, определяют значение добавочных потерь при нагрузке P_{LL} для номинальной нагрузки, используя уравнение $P_{LL} = A \cdot T^2$.

9 Определение коэффициента полезного действия (синхронные машины)

9.1 Определение прямым методом измерения

9.1.1 Процедура определения путем измерения вращающего момента

При испытании в соответствии с 6.3.1 коэффициент полезного действия равен

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}} .$$

Входная мощность P_1 и выходная мощность P_2 – в соответствии с 6.3.1.1:

– при работе в режиме двигателя: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;

– при работе в режиме генератора: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$,

где P_{el}, T и n – в соответствии с 6.3.1.2 и 6.3.1.3;

$P_{mech} = 2\pi \cdot T \cdot n$;

P_{1E} – в соответствии с 6.2, с учетом 3.4.3.3 и 3.4.3.4.

Примечание – Потери в цепи возбуждения, не учитываемые в P_{1E}, обусловлены механическим вращением вала.

9.1.2 Испытание методом взаимной нагрузки с двумя источниками питания

Если идентичные машины работают, по существу, в одинаковых номинальных условиях, коэффициент полезного действия рассчитывают из половины полных потерь и средней входной мощности двигателя и генератора по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}},$$

где

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E} ; \; P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G}) ;$$

и P_1 и P_2 – в соответствии с 6.3.2;

P_{1E} – в соответствии с 6.2, с учетом 3.4.3.4.

9.2 Определение косвенным методом измерения

9.2.1 Полные потери

9.2.1.1 Процедура испытания методом взаимной нагрузки с одним источником питания

Если идентичные машины работают фактически при номинальных условиях, то коэффициент полезного действия рассчитывают путем определения половины полных потерь для каждой машины.

Коэффициент полезного действия рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}} ,$$

где P_M – мощность, потребляемая на зажимах машины, работающей в режиме двигателя (за исключением мощности возбуждения) в соответствии с 6.4.1.1;

P_T – полные потери, определенные как половина полных потерь для каждой машины;

P_{1E} – мощность возбуждения, обеспечиваемая отдельным источником (для синхронных машин, измеренная в соответствии с 6.4.1.1.4).

$$P_T = \frac{1}{2} P_1 + P_{1E} ; \; P_{IE} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G}) .$$

9.2.1.2 Процедура определения нулевого коэффициента мощности

Для каждой требуемой точки подключения нагрузки коэффициент полезного действия определяют на основании измеренных значений по 6.4.1.2 по следующей формуле:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_1 + P_{1E}},$$

где $P_1 = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I \cos\varphi_N$ – мощность, потребляемая на зажимах обмотки якоря в номинальном режиме;

P_T – потери, включая потери при возбуждении.

Полные потери определяют:

a) для машин с возбудителями типов, указанных в перечислениях c) и d) (см. 3.4.3.3):

$$P_T = P_{1,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e,$$

при этом P_e определяют в соответствии с 6.2, применяя следующую поправку на температуру сопротивления обмотки возбуждения:

$$R_e = R_{e,0} \cdot \frac{235 + \theta_e}{235 + \theta_0};\ \theta_e = 25 + (\theta_w - \theta_c) \cdot \left(\frac{I_e}{I_{e,zpf}}\right)^2,$$

где I_e – ток возбуждения обмотки, определенный методом, описанным в IEC 60034-4 (см. также 6.4.1.2);

$P_{i,zpf}$ – соответствует P_1 согласно 6.4.1.2;

R_e – сопротивление возбуждения обмотки с поправкой температуры для заданной нагрузки;

$R_{e,0}$ – сопротивление холодной обмотки при температуре θ_0;

$I_{e,zpf}$ – ток обмотки возбуждения, определенный на основании испытания по определению нулевого коэффициента мощности;

θ_w – температура обмотки возбуждения, определенная на основании испытания по определению нулевого коэффициента мощности (zpf-испытания);

θ_c – эталонная температура хладагента, определенная на основании испытания по определению нулевого коэффициента мощности (zpf-испытания);

θ_e – температура обмотки возбуждения при I_e;

ΔP_{fe} – приведено ниже.

b) для машин с возбудителями типов, указанных в перечислениях a) и b) (см. 3.4.3.3):

Значения P_e, P_{Ed} и P_{1E} соответствуют определенным в 6.2 на основании испытания, приведенного в 6.4.3.3 для тока обмотки возбуждения заданной нагрузки, определенной в соответствии с IEC 60034-4 (см. также 6.4.1.2):

$$P_T = P_{1,zpf} + P_{1E,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e;$$

$$P_e = P_f + P_{Ed} - P_{f,zpf} - P_{Ed,zpf},$$

где $P_{1,zpf}$, $P_{f,zpf}$ и $P_{1E,zpf}$ – измеренные значения, определенные на основании испытания по 6.4.1.2;

P_f – значение, определенное, как для машин с отдельным возбуждением;

P_{Ed}, $P_{Ed,zpf}$ – значения, определенные на основании испытания по 6.4.3.3 для I_e, R_e и $I_{e,zpf}$, $R_{e,zpf}$;

ΔP_{fe} – значение, определенное на основании кривой потери напряжения в стали (см. 6.4.2.3) и являющееся разностью значений при напряжениях, равных электродвижущей силе (e.m.f.) для заданной нагрузки и электродвижущей силе при испытании по определению нулевого коэффициента мощности.

Примечание – Уравнения приведены для работы в режиме двигателя.

9.2.2 Суммирование отдельных потерь

9.2.2.1 Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T},$$

где P_1 – входная мощность, за исключением мощности возбуждения от автономного источника;

P_2 – выходная мощность;

P_{1E} – мощность возбуждения от автономного источника;
P_T – в соответствии с 9.2.2.2.

Примечание 1 – Обычно первое выражение применяют для двигателя, а второе – для генератора.
Примечание 2 – P_T включает мощность возбуждения P_e (см. 6.2) машины, если применимо.

9.2.2.2 Полные потери

Полные потери, включающие потери в цепи возбуждения, составляют:

$$P_T = P_k + P_s + P_{LL} + P_e,$$

где P_k – в соответствии с 9.2.2.3;
P_s – в соответствии с 9.2.2.5;
P_{LL} – в соответствии с 9.2.2.6;
P_e – в соответствии с 9.2.2.4.

9.2.2.3 Постоянные потери

9.2.2.3.1 Общие положения

Для каждого значения напряжения, указанного в 6.4.2.3, определяют постоянные потери:

$$P_k = P_0 - P_s,$$

где $P_s = 1{,}5 \cdot I_0^2 \cdot R_{ll,0}$;

P_0, I_0 и $R_{ll,0}$ – в соответствии с 6.4.2.3.

Для машин с бесщеточными возбудителями потери на возбуждение также определяют следующим образом:

$$P_k = P_0 - P_s - P_{f,0} - P_{Ed} + P_{1E},$$

где $P_{f,0}$ – потери в обмотке возбуждения на холостом ходу;
P_{Ed} – потери в возбудителе в соответствии с 6.4.3.3, соответствующие U_e и I_e для контрольной точки;
P_{1E} – мощность согласно 6.2, соответствующая U_e и I_e для контрольной точки.

9.2.2.3.2 Потери на трение и вентиляционные потери

Из контрольных точек без нагрузки (см. 6.4.2.3) используют все те точки, в которых отсутствует значительный эффект насыщения, и строят кривую зависимости постоянных потерь (P_k) от квадрата напряжения (U_0^2). Экстраполируют прямую линию до нулевого напряжения. Пересечение с осью нулевого напряжения будет отражать потери на трение и вентиляционные потери P_{fw}.

Примечание – Считают, что потери на трение и вентиляционные потери не зависят от нагрузки, и поэтому одни и те же значения вентиляционных потерь и потерь на трение можно использовать для каждой из точек подключения нагрузки.

9.2.2.3.3 Потери в стали

Для каждого из значений напряжения (см. 6.4.2.3) строят кривую зависимости постоянных потерь от напряжения. Для определения потерь в стали из этого значения вычитают вентиляционные потери и потери на трение:

$$P_{fe} = P_k - P_{fw}.$$

9.2.2.4 Потери в цепи возбуждения

9.2.2.4.1 Общие положения

Потери в цепи возбуждения определяют для каждой точки подключения нагрузки по формуле

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b,$$

где P_{Ed} и P_f – в соответствии с 9.2.2.4.2 и 9.2.2.4.3 соответственно;
P_b – в соответствии с 9.2.2.4.4, если используются щетки.

9.2.2.4.2 Испытание при нагрузке

P_f – потери в обмотке возбуждения в соответствии с 6.4.3.1;
P_{Ed} – потери в возбудителе в соответствии с 6.4.3.3:

$$P_{Ed} = 2\pi n(T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f.$$

9.2.2.4.3 Испытание без нагрузки

P_f – потери в обмотке возбуждения в соответствии с 6.4.3.2;
P_{Ed} – потери в возбудителе в соответствии с 6.4.3.3.

Для синхронных машин с отдельным возбуждением потери в обмотке возбуждения P_f равны произведению U_e на I_e за вычетом потерь в щетках P_b в соответствии с 9.2.2.4.4.

9.2.2.4.4 Электрические потери в щетках

Потери в щетках определяют исходя из заданного значения падения напряжения на каждой щетке для каждой полярности напряжения:

$$P_b = 2 \cdot U_b \cdot I_e ,$$

где I_e – соответствует испытанию при нагрузке по 6.4.3.1 или определяется расчетом, как указано в 6.4.3.2;

U_b – заданное значение падения напряжения на каждой щетке для каждой полярности напряжения в зависимости от типа щетки:

– 1,0 В для угольных, электрографитных или графитных щеток;

– 0,3 В для металлизированных угольных щеток.

9.2.2.5 Потери при нагрузке

9.2.2.5.1 Определение потерь на основании испытания при нагрузке

Для каждой из точек, к которым прикладывается нагрузка, определяют потери в обмотке статора:

$$P_s = 1{,}5 \cdot I^2 \cdot R_{ll} ,$$

где I – в соответствии с 6.4.4.1;

R_{ll} – в соответствии с 6.4.4.1, приведенное к стандартной исходной температуре хладагента 25 °С.

9.2.2.5.2 Определение потерь на основании испытания холостого хода

Определяют потери в обмотке статора:

$$P_s = 1{,}5 \cdot I^2 \cdot R_{ll} ,$$

где I – рассчитанный ток статора для требуемой точки подключения нагрузки;

R_{ll} – измеренное сопротивление обмотки, приведенное к стандартной исходной температуре по 5.7.2.

9.2.2.6 Добавочные потери при нагрузке P_{LL}

9.2.2.6.1 Испытание с присоединенной машиной

Добавочные потери при нагрузке определяются с учетом потребляемой мощности на основании испытания на короткое замыкание по 6.4.5.6.1 без учета потерь на трение и вентиляционных потерь P_{fw} в соответствии с 9.2.2.3.2 и потерь при нагрузке при номинальном токе в соответствии с 9.2.2.5.1 или 9.2.2.5.2:

$$P_{LL,N} = 2\pi nT - P_{fw} - P_s .$$

Для машин с бесщеточным возбуждением дополнительно следует вычесть потери в обмотке возбуждения и потери в возбудителе, возникающие за счет приводимой машины:

$$P_{LL,N} = 2\pi nT + P_{1E} - P_{fw} - P_s - P_f - P_{Ed},$$

где P_f – в соответствии с 6.2;

P_{Ed} – потери в возбудителе в соответствии с 6.4.3.3.

Для других точек подключения нагрузки добавочные потери рассчитывают по формуле

$$P_{LL} = P_{LL,N} \cdot \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 .$$

9.2.2.6.2 Испытание с неприсоединенной машиной

Добавочные потери при нагрузке определяют на основании испытания с неприсоединенной машиной по 6.4.5.6.2.

Чтобы определить добавочные потери при любом токе якоря, вычитают постоянные потери P_k (в соответствии с 9.2.2.3) и потери при нагрузке P_s (в соответствии с 9.2.2.5.1) при любом токе якоря из потребляемой мощности для каждого значения тока якоря при испытании по 6.4.5.6.2.

Приложение А
(обязательное)

Корректировка значений при определении вращающего момента с помощью динамометра

Примечание – Метод корректировки также применяют в том случае, если между устройством измерения вращающего момента и валом двигателя размещен какой-либо подшипник.

А.1 Корректировка по результатам измерения параметров двигателя, работающего без нагрузки

А.1.1 Корректировка с применением динамометра

Двигатель должен работать при номинальном напряжении и быть присоединен к динамометру, отключенному от питания.

Измеряют и фиксируют значения $P_{d,0}$, $I_{d,0}$, $T_{d,0}$ и $R_{d,0}$ или температуру θ (при значении R, полученном на основании контрольных измерений).

Определяют значение скольжения (s) и

$$P_d = (I^2R)_{d,0} = 1{,}5 \cdot I_{d,0}^2 \cdot R_{d,0}\,.$$

А.1.2 Корректировка без применения динамометра

Двигатель должен работать при номинальном напряжении и номинальной частоте при неприсоединенном динамометре.

Измеряют и фиксируют P_0, I_0 и R_0 или температуру θ (при значении R, полученном на основании контрольных измерений).

Определяют

$$P_s = (I^2R)_0 = 1{,}5 \cdot I_0^2 \cdot R_0\,.$$

А.1.3 Поправка при применении динамометра

Поправку к значению вращающего момента T_c, Н·м, при применении динамометра определяют по формуле

$$T_c = \frac{(P_{d,0} - P_d - P_{fe})(1-s) - (P_0 - P_s - P_{fe})}{2\pi n} - T_{d,0}\,,$$

где n, $P_{d,0}$, P_d и $T_{d,0}$ – в соответствии с А.1.1;

P_0 и P_s – в соответствии с А.1.2.

P_{fe} – в соответствии с 8.2.2.3.3.

Примечание – На практике $T_{d,0}$ является наиболее компенсируемым значением за счет калибровки динамометра, так что показание динамометра должно быть 0,0, когда показание вращающего момента вала составляет 0,0.

А.2 Корректировка по результатам измерения с неприсоединенным двигателем

Отсоединяют испытуемый двигатель; соединительное устройство присоединяют к валу динамометра. Динамометр работает в качестве двигателя с внешним охлаждением, если таковое имеется. Корректирующая поправка к значению вращающего момента T_c при применении динамометра равняется измеренному вращающему моменту с такой же частотой вращения n, что и при нагрузке в каждой из точек подключения нагрузки.

Примечание – Данное испытание не проводят с нагружающими устройствами, действующими только в качестве механической нагрузки, например динамометрами вихревого тока.

Приложение В
(обязательное)

Расчет значений параметров методом Eh-star

На основании результатов испытания рассчитывают следующие комплексные напряжения и токи:

$$\underline{U}_{UV} = U_{UV};$$

$$U'_{WV} = \frac{U^2_{VW} - U^2_{WU} - U^2_{UV}}{2 \cdot U_{UV}};$$

$$U''_{WU} = \sqrt{U^2_{WU} - U'^2_{WU}};$$

$$U'_{VW} = -U_{UV} - U'_{WU};$$

$$U''_{VW} = -U''_{WU};$$

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} \cdot I_W}{U_{UV}}.$$

Примечание – В вышеприведенной формуле предполагается, что ток I_W находится в фазе с напряжением U_{WU}. В том случае, если полное сопротивление резистора содержит значительную реактивную составляющую, применяют следующую формулу:

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + R_{eh} \cdot I^2_W}{U_{UV}},$$

где R_{eh} – измеренное значение активной составляющей.

$$I''_V = \sqrt{I^2_V - I'^2_V};$$

$$k_1 = \frac{1}{2 \cdot I^2_V} \cdot (I^2_W - I^2_U - I^2_V);$$

$$I'_U = k \cdot I'_V + \sqrt{(k_1^2 - \frac{I^2_U}{I^2_V})(I'^2_V - I^2_V)};$$

$$I''_U = \frac{k_1 I^2_V - I'_U \cdot I'_V}{I''_V};$$

$$I'_W = I'_U - I'_V;$$

$$I''_W = -I''_U - I''_V.$$

Определяют внутренние междуфазные напряжения на основании комплексных междуфазных напряжений и токов:

$$\underline{U}_{iUV} = \underline{U}_{UV} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_V - \underline{I}_U);$$

$$\underline{U}_{iVW} = \underline{U}_{VW} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_W - \underline{I}_V);$$

$$\underline{U}_{iWU} = \underline{U}_{WU} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_U - \underline{I}_W).$$

Отделяют междуфазные составляющие отрицательной и положительной последовательности ($\underline{a} = e^{j2\pi/3}$):

$$\underline{U}_{iLL(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iWU});$$

$$\underline{U}_{iLL(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iWU}).$$

Отделяют составляющие отрицательной и положительной последовательности внутреннего фазного напряжения $\underline{U}_i$:

$$\underline{U}_{\mathrm{I(1)}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{\mathrm{ILL(1)}};$$

$$\underline{U}_{\mathrm{I(2)}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{\mathrm{j}\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{\mathrm{ILL(2)}}.$$

Определяют несимметричные внутренние фазные напряжения:

$$\underline{U}_{\mathrm{IU}} = \underline{U}_{\mathrm{I(1)}} + \underline{U}_{\mathrm{I(2)}};$$

$$\underline{U}_{\mathrm{IV}} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{\mathrm{I(1)}} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{\mathrm{I(2)}};$$

$$\underline{U}_{\mathrm{IW}} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{\mathrm{I(1)}} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{\mathrm{I(2)}}.$$

Определяют сопротивление потери в стали:

$$R_{\mathrm{fe}} = \frac{U_{\mathrm{t}}^2}{P_{\mathrm{fe}}},$$

где U_{t} – в соответствии с 6.4.5.5;

P_{fe} – в соответствии с 8.2.2.3.3;

$$\underline{I}_{\mathrm{feU}} = \frac{\underline{U}_{\mathrm{IU}}}{R_{\mathrm{fe}}};$$

$$\underline{I}_{\mathrm{feV}} = \frac{\underline{U}_{\mathrm{IV}}}{R_{\mathrm{fe}}};$$

$$\underline{I}_{\mathrm{feW}} = \frac{\underline{U}_{\mathrm{IW}}}{R_{\mathrm{fe}}}.$$

Определяют внутренние фазные токи:

$$\underline{I}_{\mathrm{IU}} = \underline{I}_{\mathrm{U}} - \underline{I}_{\mathrm{feU}};$$

$$\underline{I}_{\mathrm{IV}} = \underline{I}_{\mathrm{V}} - \underline{I}_{\mathrm{feV}};$$

$$\underline{I}_{\mathrm{IW}} = \underline{I}_{\mathrm{W}} - \underline{I}_{\mathrm{feW}}.$$

Определяют составляющие отрицательной и положительной последовательности внутренних фазных токов:

$$\underline{I}_{\mathrm{I(1)}} = \frac{1}{3} \cdot \left(\underline{I}_{\mathrm{IU}} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{\mathrm{IV}} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{\mathrm{IW}}\right);$$

$$\underline{I}_{\mathrm{I(2)}} = \frac{1}{3} \cdot \left(\underline{I}_{\mathrm{IU}} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{\mathrm{IV}} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{\mathrm{IW}}\right).$$

Для того чтобы получить точные результаты, абсолютные значения тока положительной последовательности $I_{\mathrm{I(1)}}$ должны быть менее 30 % абсолютного значения тока отрицательной последовательности $I_{\mathrm{I(2)}}$. Если это условие не соблюдается, то испытание необходимо повторить, используя другое значение R_{eh}.

Определяют мощность, передаваемую через воздушный зазор:

$$P_{\delta(1)} = 3 \cdot (U'_{\mathrm{I(1)}} \cdot I'_{\mathrm{I(1)}} + U''_{\mathrm{I(1)}} \cdot I''_{\mathrm{I(1)}});$$

$$P_{\delta(2)} = 3 \cdot (U'_{\mathrm{I(2)}} \cdot I'_{\mathrm{I(2)}} + U''_{\mathrm{I(2)}} \cdot I''_{\mathrm{I(2)}}).$$

Определяют добавочные потери при нагрузке:

$$P_{\mathrm{Lr}} = k \cdot [(1 - s) \cdot (P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - P_{\mathrm{fw}}],$$

где

$$k = \frac{1}{1 + (I_{\mathrm{I(1)}} / I_{\mathrm{I(2)}})^2}.$$

Приложение С
(справочное)

Виды систем возбуждения

Существует несколько видов систем возбуждения, рассматриваемых для определения потерь в возбудителе:

a) Возбудитель с приводом от вала.

Возбудитель постоянного и переменного тока приводится в действие от вала основной установки непосредственно или через привод. Если основная установка является синхронной машиной, то мощность возбуждения подводится к обмотке возбуждения через контактные кольца и щетки.

b) Бесщеточный возбудитель.

Переменный ток подается в обмотку возбуждения от возбудителя, соединенного с синхронной основной установкой, непосредственно через вращающиеся выпрямители без использования контактных колец и щеток. Возбудитель может быть синхронным генератором или асинхронной машиной.

Мощность на возбуждение синхронного возбудителя подается либо от присоединенного напрямую первичного возбудителя переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов, либо от вспомогательной (вторичной) обмотки в пазах статора основной установки [аналогично тосу, как указано в перечислении e)], либо от статического блока питания.

Асинхронный возбудитель соединяется с регулируемым источником питания переменного тока.

c) Отдельный вращающийся возбудитель.

Ток возбуждения подается в обмотку возбуждения основной установки от генератора постоянного или переменного тока, являющегося частью отдельного двигатель-генераторного агрегата.

d) Система статического возбуждения (статический возбудитель).

Мощность возбуждения подается в обмотку возбуждения основной установки посредством статического источника питания, например батарей или статического силового преобразователя, питаемого от отдельного источника.

e) Возбуждение от вспомогательной обмотки (возбудитель с вспомогательной обмоткой).

Мощность возбуждения для генератора переменного тока обеспечивается вспомогательной (вторичной) обмоткой в пазах статора основной установки, использующей основной или гармонический поток, и подается в обмотку возбуждения через выпрямители, контактные кольца и щетки.

Приложение D
(обязательное)

Дополнительные методы испытания

D.1 Цель

В настоящий стандарт не включены следующие методы испытаний, установленные в IEC 60034-2:1972 с изменением A1:1995 и изменением A2:1996 (ссылка на IEC 60034-2A:1974 дана в разделе 17):

– метод испытания с помощью калиброванной машины;

– метод самоторможения;

– калориметрический метод.

Считается, что эти методы испытаний пригодны в основном для больших машин, поскольку стоимость технических средств для других методов испытаний не принимается во внимание с экономической точки зрения. Они должны быть включены в стандарт IEC 60034-2-2, который находится в стадии рассмотрения. На данный момент предусматривается в этом приложении оставить эти методы испытаний в качестве обязательных. После введения в действие стандарта IEC 60034-2-2, распространяющегося на эти методы испытаний, данное приложение будет отменено.

D.2 Испытание с помощью калиброванной машины

D.2.1 Определение

Испытание, при котором механическую потребляемую или полезную мощность электрической машины рассчитывают по электрической полезной или потребляемой мощности калиброванной машины, механически соединенной с испытуемой машиной.

D.2.2 Метод

Машину, для которой определяют потери, отключают от сети, при необходимости отсоединяют от ее приводного двигателя и она функционирует на своей номинальной частоте вращении за счет калиброванного двигателя, потери которого были предварительно определены с высокой точностью. Зная электрическую мощность, потребляемую машиной, и частоту вращения вала, можно определить механическую мощность. Механическая мощность, передаваемая калиброванным двигателем к валу машины в ходе испытания, является критерием для определения потерь машины для условий, при которых были проведены испытания. Испытуемая машина может работать в режиме холостого хода, может быть в возбужденном или невозбужденном состоянии, со щетками или без них или быть короткозамкнутой, что позволяет определить отдельные виды потерь.

Альтернативой калиброванному двигателю может служить любой другой двигатель или крутильный динамометр, приводящий в движение машину при испытании, например торсиометр, который позволяет определить вращающий момент, переданный машине, и, как следствие, механическую мощность, поглощаемую этой машиной.

D.2.3 Определение коэффициента полезного действия

Если машина работает в соответствии с D.2.2 при номинальных условиях частоты вращения, напряжения и тока, то коэффициент полезного действия рассматривают как отношение полезной мощности к потребляемой.

Испытание проводят при температуре, как можно близкой к той, которая достигается при работе в конце указанного периода времени. Какой-либо корректировки температуры производить не следует.

Примечание – Раздел D.2 без технического изменения повторяет требования IEC 60034-2:1972 (подраздел 4.4 и раздел 13) и изменения A1:1995 к IEC 60034-2 (пункты 7.3.2, 9.3.2 и 11.3.2).

D.3 Метод самоторможения

D.3.1 Определение

Метод испытания, при котором потери в машине определяют посредством ее торможения за счет этих потерь.

Данный метод используют для определения отдельных потерь вращающихся электрических машин.

Методы определения потерь, описанные в настоящем разделе, в основном предназначены для больших синхронных машин, но используемые принципы можно также применять к другим машинам (асинхронные машины переменного тока и машины постоянного тока, имеющие, в большинстве, значительную инерцию вращения) с учетом соответствующих потерь для таких машин.

Метод самоторможения используют для определения:

– суммы потерь на трение и вентиляционных потерь (механических потерь) машин всех типов;

– суммы потерь в активной стали и добавочных потерь холостого хода синхронных машин и машин постоянного тока;

– суммы потерь вида I^2R в рабочей обмотке и добавочных потерь при нагрузке (потерь короткого замыкания) синхронных машин.

D.3.2 Общие положения

D.3.2.1 Основные принципы

Полные потери P_t в процессе самоторможения пропорциональны произведению частоты вращения, которой эти потери соответствуют, на изменение скорости торможения при данной частоте вращения:

$$P_t = -Cn\frac{dn}{dt},$$

где P_t – это полные потери при испытании на самоторможение.

Если n выражена в об/мин, а P_t – в кВт, то постоянную самоторможения C определяют по формуле

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2 10^3} = 10{,}97 \cdot 10^{-6} J,$$

где J – момент инерции, выраженный в кг·м^2.

Изменение скорости торможения dn/dt может быть определено либо непосредственно с использованием акселерометра, либо косвенно одним из методов, приведенных в D.3.2.2, D.3.2.3 и D.3.2.4.

D.3.2.2 Метод хорды

С помощью данного метода определяют интервал времени $t_2 - t_1$, в течение которого частота вращения испытуемой машины изменяется от n_N (1 + δ) до n_N (1 − δ) (рисунок D.1). Отношение интервала частоты вращения $2\delta n_N$ к интервалу времени $t_2 - t_1$ примерно равно изменению скорости торможения при номинальной частоте вращения:

$$\frac{2\,\delta n_N}{t_2 - t_1} \approx -\frac{dn}{dt}\bigg|_{n = n_N},$$

где δ – отклонение частоты вращения от ее номинального значения, выраженное в относительных единицах.

Значение отклонения δ не должно превышать 0,1 и в зависимости от характеристик машины может быть меньше указанного значения.

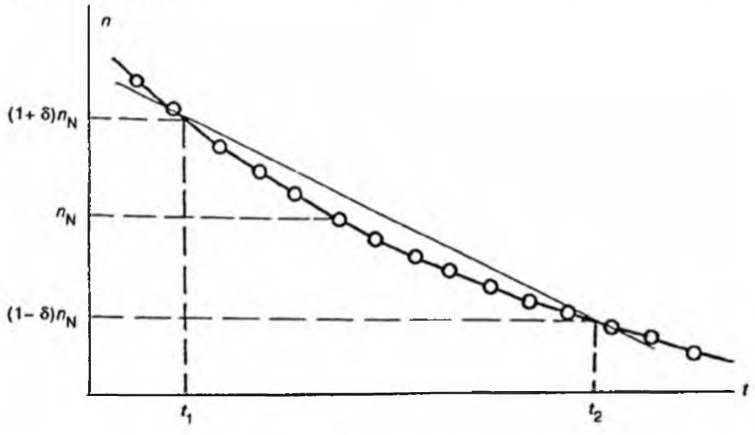

Рисунок D.1 – Метод хорды

D.3.2.3 Метод предельной секущей

Данный метод, представляющий собой вариант метода хорды, применяют в тех случаях, когда значение частоты вращения не превышает ее номинального значения. Момент времени, когда частота вращения имеет номинальное значение n_N, обозначают как t_1, а момент времени, когда частота вращения равна $(1 - \delta)\ n_N$, обозначают как t_2. Постепенно уменьшают значения отклонения δ, и предел тангенса угла, образованного линией, проходящей через точки t_1 и t_2, и осью времени, будет равен производной частоты вращения по времени, так как δ стремится к нулю (рисунок D.2):

$$\lim_{\delta \to 0} \frac{\delta n_N}{t_2 - t_1} = -\frac{dn}{dt}\bigg| n = n_N .$$

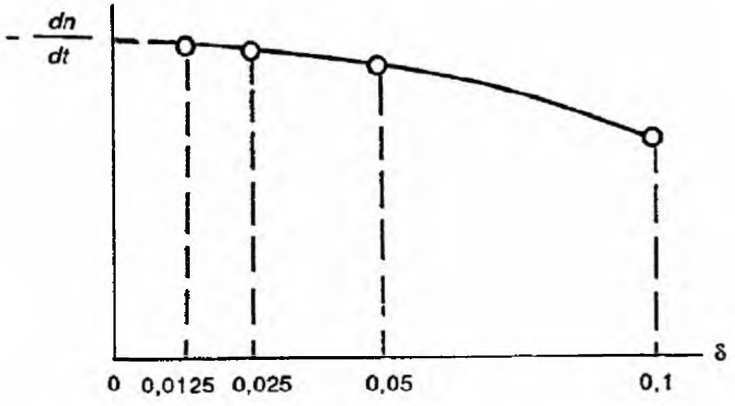

Рисунок D.2 – Метод предельной секущей

D.3.2.4 Метод средней частоты вращения

Если t_1, t_2 и t_3 представляют собой последовательно зарегистрированные моменты времени и вал осуществляет N полных оборотов в пределах временного интервала между двумя любыми последовательными значениями, то средние значения частоты вращения в течение временных интервалов должны быть:

$$\overline{n_{12}} = \frac{60N}{t_2 - t_1} \text{ и } \overline{n_{23}} = \frac{60N}{t_3 - t_2},$$

а изменение скорости торможения вала в промежуточный момент времени t_2

$$\frac{dn}{dt} = \frac{2\,(\overline{n_{23}} - \overline{n_{12}})}{t_3 - t_1}.$$

По вычисленным таким образом значениям строят график зависимости изменения скорости торможения от средних значений частоты вращения. Значение изменения скорости торможения при номинальной частоте вращения определяют по графику.

D.3.3 Состав испытаний на самоторможение

D.3.3.1 Состав испытаний с известным моментом инерции

Если момент инерции вращающейся части машины определен в результате измерения или расчета, то для машины постоянного тока достаточно проведения испытаний на самоторможение только в двух основных режимах работы: машина работает без возбуждения и машина работает в режиме холостого хода, возбужденная при номинальном напряжении и номинальной частоте вращения. Для синхронной машины дополнительно должно быть проведено испытание на самоторможение в режиме с короткозамкнутой обмоткой якоря и возбуждением, обеспечивающим номинальный ток якоря.

При первом испытании механические потери P_{fw} (потери на трение и вентиляционные потери) испытуемой машины определяют по формуле

$$P_{fw} = -C n_N \frac{dn}{dt}\bigg|_1 .$$

При втором испытании определяют сумму механических потерь P_{fw} и потерь в стали P_{fe} по формуле

$$P_{fw} + P_{fe} = -C n_N \left.\frac{dn}{dt}\right|_2 .$$

При третьем испытании определяют сумму механических потерь P_{fw} и потерь короткого замыкания P_k по формуле

$$P_{fw} + P_k = -C n_N \left.\frac{dn}{dt}\right|_3 .$$

В вышеприведенных формулах значения

$$\left.\frac{dn}{dt}\right|_1, \left.\frac{dn}{dt}\right|_2, \left.\frac{dn}{dt}\right|_3$$

являются производными частоты вращения по времени соответственно при первом, втором и третьем испытании.

Потери в стали определяют как разность потерь, определенных при первом и втором испытаниях.

Сумму потерь вида I^2R и добавочных потерь в цепи якоря определяют как разность потерь, определенных при третьем и первом испытаниях. Разделение этой суммы на составляющие при необходимости осуществляют вычитанием потерь вида I^2R в цепи якоря, рассчитанных с учетом зависимости сопротивления цепи якоря от температуры. Для этого после каждого испытания на самоторможение с короткозамкнутой цепью якоря температура обмотки должна быть установлена подходящим методом непосредственного измерения температуры.

D.3.3.2 Состав испытания с неизвестным моментом инерции

Если момент инерции вращающейся части машины неизвестен или если машина механически соединена с другими вращающимися частями, например турбиной, момент инерции которой неизвестен, то должны быть проведены дополнительные испытания для определения постоянной самоторможения C.

Если испытуемая машина работает в режиме двигателя без нагрузки от источника питания с соответствующим напряжением, числом фаз и частотой (в случае машин переменного тока), а мощность, подаваемая на испытуемую машину, может быть измерена (равна сумме механических потерь P_{fw} и потерь в стали P_{fe}, поскольку потери вида I^2R в цепи якоря обычно не учитывают), то постоянную самоторможения C определяют по формуле:

$$C = \frac{P_{fw} + P_{fe}}{n_N \left.\frac{dn}{dt}\right|_2} .$$

При колебаниях частоты напряжения питания мощность, подаваемую на испытуемую машину, измеряют с помощью интегрирующего измерительного прибора. Для этой цели необходимо, чтобы машина в течение некоторого времени работала в режиме двигателя при постоянном электропитании.

Если испытуемая машина не предназначена для работы в режиме двигателя без нагрузки, то в дополнение к трем режимам работы при испытании на самоторможение по D.3.3.1 необходимо провести еще одно испытание методом самоторможения. В этом случае торможение испытуемой машины должно быть обусловлено потерями P, которые могут быть измерены и имеют тот же порядок, что и ожидаемые потери P_{fe} и P_k. Для этих целей могут быть использованы потери холостого хода или потери короткого замыкания присоединенного трансформатора, которые измеряют отдельно. В качестве альтернативы, при наличии установленной на валу испытуемой машины возбудителя или вспомогательного генератора, может быть использовано балластное сопротивление нагрузки.

Если торможение испытуемой машины обусловлено потерями холостого хода трансформатора, а потери короткого замыкания, соответствующие току холостого хода трансформатора, не учитывают, то

$$P_{fw} + P_{fe} + P = -C n_N \left.\frac{dn}{dt}\right|_4 .$$

Следовательно,

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left.\frac{dn}{dt}\right|_4 - \left.\frac{dn}{dt}\right|_2 \right\}} .$$

Если торможение испытуемой машины обусловлено потерями короткого замыкания трансформатора, то потери в стали, соответствующие магнитному потоку в короткозамкнутом трансформаторе, как правило, не учитывают. Следовательно,

$$P_{fw} + P_k + P = -Cn_N \left.\frac{dn}{dt}\right|_5$$

и

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left.\frac{dn}{dt}\right|_5 - \left.\frac{dn}{dt}\right|_3 \right\}}.$$

Если торможение испытуемой машины обусловлено нагрузочным балластным сопротивлением возбудителя или вспомогательного генератора, потери на торможение для испытуемой машины состоят только из механических потерь P_{fw} и нагрузочных потерь P (с учетом коэффициента полезного действия нагрузочной машины, который может быть рассчитан). Следовательно,

$$P_{fw} + P = -Cn_N \left.\frac{dn}{dt}\right|_6$$

и таким образом,

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left.\frac{dn}{dt}\right|_6 - \left.\frac{dn}{dt}\right|_1 \right\}}.$$

D.3.4 Методика испытаний на самоторможение

D.3.4.1 Состояние испытуемой машины при испытаниях на самоторможение

Испытуемая машина должна быть укомплектована так же, как и для нормативной эксплуатации. Подшипники должны быть приработаны до начала проведения испытания. Измерение вентиляционных потерь с регулированием воздушного охлаждающего потока следует проводить, когда это возможно, при температуре окружающего воздуха, соответствующей нормальным условиям испытаний. Путем регулирования потока охлаждающей жидкости температура подшипника должна быть установлена соответствующей нормальным условиям эксплуатации подшипников при номинальной нагрузке.

D.3.4.2 Взаимосвязь испытуемой машины с другими устройствами

В тех случаях, когда это возможно, испытуемая машина должна быть отсоединена от иных вращающихся частей. При невозможности отсоединения машины от вращающихся частей должны быть приняты всевозможные меры для уменьшения механических потерь в этих вращающихся частях, например частичный демонтаж или удаление воды из камеры рабочего колеса турбины (для гидротурбины). Должны быть также приняты меры для исключения возможности поступления воды к гидротурбине из верхнего бьефа и подачи воды вращающимся рабочим колесом в нижний бьеф. Вращение рабочего колеса в воздухе создает вентиляционные потери, которые могут быть определены экспериментально или путем вычислений, что должно быть оговорено между изготовителем и потребителем.

D.3.4.3 Вращение испытуемой машины

В некоторых случаях испытуемая машина может быть запущена с помощью своего стандартного первичного двигателя, например турбины Пелтона, где поступление воды на рабочее колесо может быть мгновенно прекращено. Однако испытуемая машина обычно работает от отдельного источника питания в режиме двигателя без нагрузки с широким диапазоном регулирования скорости. Во всех случаях питание испытуемой машины должно осуществляться от автономного источника с возможностью быстрого и точного регулирования напряжения. Возбуждение испытуемой машины от собственного, механически присоединенного возбудителя не рекомендуется, но может допускаться в случаях, когда отклонение скорости δ относительно мало, например, если оно не превышает 0,05. Во всех этих случаях потери в возбудителях, соединенных с валом испытуемой машины, должны быть учтены.

D.3.4.4 Порядок подготовки к испытаниям

Каждое испытание начинают с быстрого увеличения скорости испытуемой машины до величины, превышающей значение $n_N \cdot (1 + \delta)$ настолько, чтобы за время торможения до этого значения машину можно было бы привести в требуемое состояние, а именно:

– отсоединить машину от источника питания;

– при торможении, обусловленном только механическими потерями, погасить магнитное поле машины;

– при торможении, обусловленном суммой механических потерь и потерь короткого замыкания, погасить магнитное поле машины, замкнуть накоротко выводы якоря и довозбудить машину до заданного значения тока короткого замыкания;

– при торможении, обусловленном потерями трансформатора после гашения поля, соединить испытуемую машину с трансформатором, предварительно установленным в определенное состояние (холостой ход или короткое замыкание), и возбудить до заданных значений силы тока или напряжения холостого хода;

– при торможении, обусловленном нагрузочными потерями возбудителя или вспомогательного генератора, установленного на валу машины, погасить магнитное поле испытуемой машины и одновременно установить заданную нагрузку.

Во всех вышеуказанных случаях напряжение питания должно быть отключено и измерения должны начинаться с задержкой, достаточной для завершения электромагнитных переходных процессов.

При торможении, обусловленном суммой механических потерь и потерь в стали или потерями холостого хода питающего трансформатора, не требуется выполнять никаких действий после отсоединения машины от источника питания, если возбуждение испытуемой машины соответствует заданному напряжению холостого хода и, в случае синхронной машины, при номинальной частоте вращения и коэффициенте мощности, равном единице.

D.3.4.5 Выполнение измерений при испытании на самоторможение

Показания всех приборов, используемых при каждом испытании (значения тока возбуждения и тока короткого замыкания, измеряемые амперметром; значение напряжения холостого хода, измеряемое вольтметром), и всех приборов, необходимых для измерения мощности при проведении дополнительных испытаний на самоторможение, когда момент инерции J неизвестен, должны быть считаны в момент достижения испытуемой машиной значения номинальной частоты вращения. При проведении испытания на самоторможение с невозбужденной машиной считывание показаний может проводиться при значении частоты вращения, отличающемся от ее номинального значения.

Измеренные значения напряжения холостого хода или тока короткого замыкания не должны отличаться от установленных значений более чем на ±2 %. Расчетное итоговое значение производной частоты вращения при каждом испытании должно быть скорректировано пропорционально отношению квадрата заданного значения к измеренному значению.

D.3.4.6 Программа испытаний на самоторможение

По возможности испытания на самоторможение должны быть проведены сериями без перерывов. Рекомендуется, чтобы серии начинались и заканчивались испытаниями на самоторможение невозбужденной машины. Если по каким-либо причинам невозможно провести непрерывные серии испытаний, рекомендуется каждую из последовательных серий начинать и заканчивать испытанием на самоторможение невозбужденной машины.

Испытания могут быть проведены через некоторое время повторно при одинаковых заданных значениях напряжения холостого хода или тока короткого замыкания, например при номинальных значениях или при отличающихся от номинального значениях в интервале от 95 % до 105 % номинального значения. В первом случае по результатам всех измерений рассчитывают средние арифметические значения по фактически измеренным значениям для каждого типа потерь. Во втором случае строят график зависимости напряжения от тока. Фактически измеренные значения определяют по точкам кривых на графике, полученным пересечением с заданными значениями напряжения или тока.

Дополнительные испытания на самоторможение при неизвестном моменте инерции испытуемой машины должны быть проведены при тех же самых значениях напряжения или тока, что и при разомкнутых или короткозамкнутых обмотках. Если это невозможно, то соответствующие значения должны быть определены по кривым, как описано выше.

D.3.5 Проведение измерений

D.3.5.1 Методы измерений

Измерения, проводимые в ходе испытаний на самоторможение, имеют своей целью определение искомого значения производной частоты вращения по времени и могут быть выполнены одним из трех методов:

a) метод тахогенератора – непосредственное измерение торможения в зависимости от времени:

$$\frac{dn}{dt} = f(t).$$

b) метод тахометра – определение зависимости частоты вращения от времени:

$$n = f(t);$$

c) метод хронографа – определение зависимости угла поворота вала испытуемой машины от времени:

$$\gamma = f(t).$$

Во всех случаях самопишущие регистрирующие приборы могут быть использованы как для непрерывной, так и для дискретной регистрации измеряемых значений и времени.

D.3.5.2 Метод тахогенератора

Зависимость частоты вращения от времени для больших машин, имеющих смешанную систему вентиляции, может быть непостоянной. Как следствие, мгновенные значения изменения торможения в процессе самоторможения в момент прохождения через номинальную частоту вращения могут иметь случайный характер. Поэтому истинные значения производной частоты вращения могут быть определены путем построения графика зависимости измеренного изменения торможения от времени или частоты вращения и использования соответствующей аппроксимации кривой или метода корреляции.

D.3.5.3 Метод тахометра

График зависимости частоты вращения от времени строят по результатам измерений. По этому графику определяют моменты времени, при которых частота вращения достигает значений, указанных в случае использования метода хорды или метода предельной секущей. Разность между временем при нижнем и верхнем значениях частоты вращения используют для вычисления изменения торможения.

Если на валу испытуемой машины имеется возбудитель или любое электрическое устройство, то его можно использовать в качестве тахогенератора при условии, что на сигнал напряжения не оказывает влияние частота вращения испытуемой машины. Возбуждение должно подаваться от стабилизированного источника питания постоянного тока, такого как, например, отдельная аккумуляторная батарея.

Если на сигнал напряжения оказывает влияние частота вращения испытуемой машины или на испытуемой машине отсутствует тахогенератор, то может быть использована машина постоянного тока, подсоединенная к испытуемой машине. Она может быть приведена в действие от вала испытуемой машины посредством бесшовного приводного ремня или другим способом, обеспечивающим плавное вращение.

Считывание значений частоты вращения по показателям приборов может быть выполнено в требуемых временных интервалах, установленных соответствующим методом, при котором нет необходимости в специальной регистрации значений времени или сигналов от вала испытуемой машины; в этом случае регистрация значений времени должна быть осуществлена одновременно с регистрацией значений частоты вращения. Осуществлять регистрацию при каждом повороте вала не требуется; обычно вполне достаточно в течение испытания провести 30 – 40 отсчетов.

При наличии высокоточных измерительных приборов вместо измерения частоты вращения проводят измерение мгновенных значений частоты вращения или периода напряжения испытуемой машины переменного тока, расположенной на ее валу; при этом число пар полюсов обеих машин может быть различным.

D.3.5.4 Метод хронографа

Используемые счетчики времени могут представлять собой как визуальный индикатор с непрерывным (неступенчатым) перемещением указателя, так и цифровой индикатор с печатающим устройством (электрическим или механическим).

Считывание значений времени должно быть выполнено по сигналам, поступающим от вала испытуемой машины, или после каждого полного оборота вала, или после установленного числа оборотов.

Примечание – Если при использовании метода тахометра частоту вращения определяют по сигналам от вала испытуемой машины, то регистрация моментов времени может быть использована как для метода тахометра, так и для метода хронографа, обеспечивая таким образом проверку регистрируемых значений.

Если машина имеет плавную кривую изменения торможения, достаточная точность должна быть получена измерением времени самоторможения между двумя значениями частоты вращения, которые отличаются от номинального значения на одно и то же значение.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\Delta t}.$$

Измерение частоты напряжения на статоре обеспечивает оптимальный способ определения частоты вращения синхронной машины.

D.3.5.5 Измерение потерь в подшипниках

Определение потерь в подшипниках и подпятниках при необходимости осуществляют путем вычитания механических потерь из полной суммы потерь. Потери могут быть определены калориметрическим методом по IEC 60034-2A. Если в испытуемой машине используется проточное охлаждение подшипников, эти потери распределяют между испытуемой машиной и любой другой, соединенной с ней механически, такой как, например, турбина, пропорционально массам их вращающихся частей. Если проточное охлаждение отсутствует, то по соглашению между изготовителем и потребителем распределение потерь должно быть вычислено по эмпирическим формулам.

Примечание – Раздел D.3 повторяет без технического изменения требования IEC 60034-2:1972 (подраздел 4.7) и IEC 60034-2 с изменением A1:1995 (раздел 15).

D.4 Калориметрический метод

D.4.1 Определение

Метод испытания, при котором потери в машине определяют по количеству теплоты, выделяемой машиной. Потери рассчитывают в зависимости от количества хладагента и повышения его температуры, а также теплоты, рассеиваемой в окружающую среду.

Примечание – Подраздел D.4.1 повторяет требования стандарта IEC 60034-2:1972 (подраздел 4.8).

D.4.2 Метод

В соответствии со стандартом IEC 60034-2A:1974, на который дана ссылка в IEC 60034-2 с изменением A1:1995 (раздел 17).

Приложение Д.А
(справочное)

Сведения о соответствии государственных стандартов ссылочным международным стандартам

Таблица Д.А.1 – Сведения о соответствии государственных стандартов ссылочным международным стандартам

Обозначение и наименование международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование государственного стандарта
IEC 60034-2A:1974 Машины электрические вращающиеся. Часть 2. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава). 1-е дополнение. Измерение потерь калориметрическим методом	IDT	СТБ МЭК 60034-2A-2005 Машины электрические вращающиеся. Часть 2. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин при испытаниях (исключая машины для тяговых транспортных средств). Измерение потерь калориметрическим методом
IEC 60051-1:1997 Приборы электроизмерительные аналоговые показывающие прямого действия и комплектующие принадлежности к ним. Часть 1. Определения и общие требования, присущие всем деталям	MOD	ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97)* Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 1. Определения и основные требования, общие для всех частей
* Внесенные технические отклонения обеспечивают выполнение требований настоящего стандарта.		

Таблица Д.А.2 – Сведения о соответствии государственного стандарта ссылочному международному стандарту другого года издания

Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта	Обозначение и наименование международного стандарта другого года издания	Степень соответствия	Обозначение и наименование государственного стандарта
IEC 60034-1:2010 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные и эксплуатационные характеристики	IEC 60034-1:2004 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные и рабочие характеристики	IDT	ГОСТ МЭК 60034-1-2007 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные и рабочие характеристики (IEC 60034-1:2004, IDT)
IEC 60034-4:2008 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин	IEC 60034-4:1985 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин	IDT	СТБ МЭК 60034-4-2006 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин (IEC 60034-4:1985, IDT)
IEC 60044-1:2003 Трансформаторы измерительные. Часть 1. Трансформаторы тока	IEC 60044-1:1996 Трансформаторы измерительные. Часть 1. Трансформаторы тока	MOD	ГОСТ 7746-2001* Трансформаторы тока. Общие технические условия (IEC 60044-1:1996, MOD)
IEC 60044-2:2003 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Индуктивные трансформаторы напряжения	IEC 60044-2:1997 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Индуктивные трансформаторы напряжения	MOD	ГОСТ 1983-2001* Трансформаторы напряжения. Общие технические условия (IEC 60044-2:1997, MOD)
* Внесенные технические отклонения обеспечивают выполнение требований настоящего стандарта в части электромагнитных трансформаторов напряжения.			

Ответственный за выпуск *В. Л. Гуревич*

Сдано в набор 20.10.2011. Подписано в печать 02.11.2011. Формат бумаги 60×84/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Arial. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 6,74 Уч.- изд. л. 4,95 Тираж экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации» (БелГИСС)
ЛИ № 02330/0552843 от 08.04.2009.
ул. Мележа, 3, комн. 406, 220113, Минск.

gost.e-ecolog.ru