МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC 60034-2-1— 2017

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 2-1

Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава)

(IEC 60034-2-1:2014, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2018

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены в ГОСТ 1.0—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ВНИИНМАШ) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 5

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 25 сентября 2017 г. № 103-П)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004 – 97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004 – 97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	Минэкономики Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Узбекистан	UZ	Узстандарт
Украина	UA	Минэкономразвития Украины

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 октября 2018 г. № 871-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 60034-2-1—2017 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июня 2019 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту IEC 60034-2-1:2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава)» («Rotating electrical machines — Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)», IDT).

Международный стандарт разработан Техническим комитетом по стандартизации ТС 2 «Вращающиеся машины» Международной электротехнической комиссии (IEC).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2018

В Российской Федерации настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Обозначения и сокращения 5
4.1 Обозначения 5
4.2 Дополнительные обозначения 6
5 Общие требования 6
5.1 Прямое и косвенное измерение КПД 6
5.2 Погрешности 6
5.3 Основные методы и особые методы по требованию заказчика, эксплуатационные и типовые испытания 7
5.4 Питание 7
5.5 Средства измерений 7
5.6 Единицы измерения величин 8
5.7 Сопротивления 8
5.8 Состояние машины при испытании и категории испытаний 9
5.9 Измерения в цепях возбуждения 10
5.10 Температура окружающей среды при испытании 10
6 Методы испытаний для определения КПД асинхронных машин 10
6.1 Предпочтительные методы испытаний 10
6.2 Методы эксплуатационных и типовых испытаний 20
7 Методы определения КПД синхронных машин 32
7.1 Предпочтительные методы испытаний 32
7.2 Методы эксплуатационных и типовых испытаний 38
8. Методы испытаний для определения КПД машин постоянного тока 45
8.1 Методы эксплуатационных и типовых испытаний 45
Приложение А (обязательное) Расчеты для метода соединения «звезда с несимметричным питанием» 56
Приложение В (справочное) Типы систем возбуждения 58
Приложение С (справочное) Измерение скольжения асинхронных двигателей 59
Приложение D (справочное) Шаблон отчета об испытаниях для метода 2-1-1В 60
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам 62
Библиография 63

М Е Ж Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й С Т А Н Д А Р Т

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ

Часть 2-1

Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава)

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

Дата введения — 2019—06—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методы испытаний для определения потерь и коэффициента полезного действия электрических машин (далее — машин). Стандарт распространяется на машины постоянного тока, синхронные и асинхронные всех типоразмеров в рамках IEC 60034-1.

Примечание — Данные методы могут быть применены к другим типам машин, таким как электромашинные преобразователи, коллекторные двигатели и однофазные асинхронные двигатели.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты. Для датированных ссылок применяют только указанное издание. Для недатированных — последнее издание ссылочного документа (включая все изменения к нему).

IEC 60027-1 Letter symbols to be used in electrical technology — Part 1: General (Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 1. Основные положения)

IEC 60034-1:2010 Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance (Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики)

IEC 60034-4:2008 Rotating electrical machines — Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests (Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин)

IEC 60034-19 Rotating electrical machines — Part 19: Specific test methods for d.c. machines on conventional and rectifier-fed supplies (Машины электрические вращающиеся. Часть 19. Специальные методы испытаний для машин постоянного тока с обычной подачей электропитания и через выпрямитель)

IEC 60034-29 Rotating electrical machines — Part 29: Equivalent loading and superposition techniques — Indirect testing to determine temperature rise (Машины электрические вращающиеся. Часть 29. Эквивалентные методы нагрузки и наложения. Косвенное определение повышения температуры)

IEC 60051 (all parts) Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories ((все части) Приборы электроизмерительные аналоговые показывающие прямого действия и части к ним)

IEC 60051-1 Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories — Part 1: Definitions and general requirements common to all parts (Приборы электроизмерительные аналоговые показывающие прямого действия и части к ним. Часть 1. Определения и основные требования, общие для всех частей)

Издание официальное

3 Терминыи определения

В настоящем стандарте применены термины с соответствующими определениями, установленными в IEC 60034-1 и IEC 60051-1.

3.1 **коэффициент полезного действия; КПД** (efficiency): Отношение выраженных в одинаковых единицах выходной мощности ко входной, обычно выражаемое в процентах.

3.2 **прямое измерение КПД** (direct efficiency determination): Испытания, при которых КПД определяется методами прямых измерений входной и выходной мощности.

3.3 **динамометр** (dynamometer): Устройство для измерения вращающего момента, приложенного к валу испытуемой машины. Оно комплектуется средствами для измерения и визуализации момента и скорости и не ограничивается рамной конструкцией. Оно может быть встроено в передающий вал и может обеспечивать прямое измерение вращающего момента.

3.4 **динамометрическое испытание** (dynamometer test): Испытание, при котором механическая выходная мощность машины, работающей в двигательном режиме, а также входная мощность машины, работающей в генераторном режиме, определяется измерением вращающего момента посредством динамометра.

3.5 **испытания при двойном питании с двухмашинным агрегатом** (dual-supply back-to-back test): Испытание, при котором две идентичные машины соединены механически, а суммарная мощность потерь обеих машин измеряется как разность между электрической мощностью на входе одной из машин и электрической мощностью на выходе другой.

3.6 **косвенное определение КПД** (indirect efficiency determination): Метод, при котором КПД определяется косвенно путем измерения входной или выходной мощности и мощности потерь. Мощность потерь добавляется к выходной мощности, для определения входной, или вычитается из входной мощности для определения выходной.

3.7 **испытание с двухмашинным агрегатом при питании от одной сети** (single-supply back-to-back test): Испытание, при котором две идентичные машины соединены механически и питаются от одного источника. Сумма потерь обеих машин равна мощности, суммарно потребляемой от источника питания.

3.8 **испытание без нагрузки** (no-load test): Испытание, при котором машина в двигательном режиме работает на холостом ходу (без нагрузки на валу) или в генераторном режиме с разомкнутыми выходными клеммами.

3.9 **испытание с нулевым коэффициентом мощности (синхронные машины)** (zero power factor test (synchronous machines)): Испытание перевозбужденной синхронной машины без нагрузки на валу, которая работает с близким к нулю коэффициентом мощности.

3.10 **метод схемы замещения (асинхронные машины)** (equivalent circuit method (induction machines)): Испытание, при котором потери определены с помощью эквивалентной схемы замещения.

3.11 **испытание с вынутым ротором и обратным вращением (асинхронные машины)** (test with rotor removed and reverse rotation test (induction machines)): Комплексное испытание, при котором потери определены сначала при испытании с вынутым ротором, а затем при испытании с ротором, вращающимся в направлении противоположном полю.

3.12 **испытание коротким замыканием (синхронные машины)** (short-circuit test (induction machines)): Испытание, при котором машина работает как генератор с короткозамкнутыми выходными клеммами.

3.13 **испытание с заторможенным ротором** (locked rotor test): Испытание, при котором ротор заблокирован и не вращается.

3.14 **испытание по схеме «звезда с асимметричным питанием»** (eh-star test): Испытание при питании несимметричным напряжением обмотки статора, соединенной в звезду.

3.15 **потери** (losses)

3.15.1 **суммарные потери P_T** (total losses): Суммарные потери представляют собой разницу между входной и выходной мощностью, равную сумме постоянных (см.3.15.2) потерь от нагрузки (см. 3.15.4), добавочных потерь от нагрузки (см. 3.15.5), а также потерь в цепи возбуждения (см. 3.15.3).

3.15.2 **постоянные потери** (constant losses): Потери, включающие вентиляционные потери, потери на трение и потери в стали. Хотя эти потери изменяются в зависимости от напряжения и нагрузки, такое определение сложилось исторически и используется в настоящем стандарте.

3.15.2.1 **постоянные потери P_c** (constant losses): Сумма потерь в стали, трения и вентиляционных потерь.

3.15.2.2 **потери в стали P_{fe}** (iron losses): Потери в активных частях стали и дополнительные потери холостого хода в других металлических деталях.

3.15.2.3 **потери трения и вентиляционные P_{fw}** (friction and windage losses)

3.15.2.3.1 **потери трения** (friction losses): Потери трения (в подшипниках и щеточно-коллекторном узле, если они не возрастают в расчетном режиме), исключая любые потери в независимой системе смазки.

3.15.2.3.2 **вентиляционные потери** (windage losses): Суммарные потери от аэродинамического трения во всех частях машины, включая энергию, потребляемую вентиляторами, установленными на валу, и двигателями независимой вентиляции, установленными на машине.

Примечание 1 — Потери в независимой вентиляционной системе должны быть приведены отдельно.

Примечание 2 — Для машин, косвенно или непосредственно охлаждаемых водородом (см. IEC 60034-1).

3.15.3 **потери в цепи возбуждения** (excitation circuit losses)

3.15.3.1 **потери в цепи возбуждения P_e** (excitation circuit losses): Сумма потерь в обмотке возбуждения (см. 3.15.3.2), потерь в возбудителе (см. 3.15.3.3), а для синхронных машин — электрические потери щеточного узла (см. 3.15.3.5), если они есть.

3.15.3.2 **потери в обмотке возбуждения P_f** (excitation winding losses): Потери в обмотке возбуждения равны произведению тока возбуждения I_e на напряжение возбуждения U_e.

3.15.3.3 **потери в возбудителе P_{Ed}** (exciter losses): Потери в возбудителе для различных систем возбуждения (см. приложение В) определены следующим образом:

a) Возбудитель на валу машины.

Потери в возбудителе — мощность, потребляемая валом возбудителя (за вычетом потерь на трение и сопротивление воздуха), плюс мощность P_{1E}, потребляемая возбудителем от независимого источника, минус полезная мощность, которую возбудитель обеспечивает на своих выходных клеммах. Полезная мощность на выходных клеммах возбудителя равна потерям в обмотках возбуждения питаемой им машины согласно 3.15.3.2 в сумме (в случае синхронной машины) с электрическими потерями в щеточном узле согласно 3.15.3.5.

Примечание 1 — Если возбудитель может быть отсоединен и испытан отдельно, то его потери могут быть определены в соответствии с 7.1.3.2.1.

Если возбудитель использует отдельные вспомогательные источники питания, то их потребляемая мощность должна быть включена в потери возбудителя, если только она не учтена уже в потреблении основной машины.

b) Бесщеточный возбудитель.

Потери в возбудителе равны мощности, потребляемой валом возбудителя, за вычетом потерь на трение и сопротивление воздуха (если соответствующее испытание проведено на соединенной с возбудителем машине), плюс мощность P_{1E}, потребляемая от независимого источника обмоткой возбуждения возбудителя или статора, если возбудитель — асинхронная машина, минус полезная мощность, которую возбудитель обеспечивает на своих выходных клеммах.

Примечание 2 — Во всех случаях, когда возбудитель использует отдельные вспомогательные источники питания, их потребляемая мощность должна быть включена в потери возбудителя, если только она уже не учтена в потреблении основной машины.

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

c) Независимый электромашинный возбудитель.

Потери возбудителя — разница между суммарной мощностью, потребляемой приводным двигателем, всеми вспомогательными источниками питания приводного двигателя и возбудителя, и полезной мощностью возбуждения согласно 3.15.3.2 и 3.15.3.4. Потери возбудителя могут быть определены согласно 7.1.3.2.1.

d) Статическая система возбуждения (статический возбудитель).

Потери системы возбуждения — разница между суммарной мощностью, потребляемой от основного и вспомогательных источников системы возбуждения, и мощностью, подаваемой на возбуждение, согласно 3.15.3.2 и 3.15.3.4.

Примечание 3 — При питании системы возбуждения от трансформатора его потери также должны быть учтены.

e) Возбуждение с помощью дополнительной обмотки (самовозбуждение).

Потери возбуждения — потери в меди вспомогательной (вторичной) обмотки и добавочные потери в стали, производимые высшими гармониками потока. Добавочные потери в стали определяются как разница между потерями, возникающими при нагруженной и ненагруженной вспомогательной обмотке.

Примечание 4 — Ввиду сложности разделения составляющих потерь возбуждения рекомендуется при определении суммарных потерь рассматривать их как часть потерь в статоре.

В случаях c) и d) учитываются потери в источнике питания цепи возбуждения, в соединениях между источником и щетками (для синхронной машины) или между источником и клеммами обмотки возбуждения (для машины постоянного тока).

Если система возбуждения содержит компоненты, перечисленные в случаях b) — e), потери возбуждения будут включать существенные составляющие, представленные по категориям, перечисленным в приложении B.

3.15.3.4 **мощность возбуждения от независимого источника P_{1E}** (separately supplied excitation power): Мощность возбуждения P_{1E}, передаваемая от отдельного источника энергии, представляет собой:

- для возбудителей типов a) и b) — мощность возбудителя (сеть постоянного тока или синхронный возбудитель) или мощность на статорной обмотке (индукционный возбудитель). Она составляет часть потерь возбудителя P_{Ed} (и добавочных потерь в индукционном возбудителе), в то время как большая часть P_e проходит через вал;
- для возбудителей типов c) и d) — потери в цепи возбуждения, $P_{1E} = P_e$;
- для возбудителя типа e) — $P_{1E} = 0$, мощность возбуждения проходит полностью через вал; для машин с возбуждением от постоянного магнита $P_{1E} = 0$.

Типы возбудителя должны соответствовать 3.15.3.3.

3.15.3.5 **щеточные потери (в цепи возбуждения) P_b** (brush losses (excitation circuit)): Электрические потери в щетках (включая потери в контакте) синхронных машин с независимым возбуждением.

3.15.4 **потери от нагрузки** (load losses)

3.15.4.1 **потери от нагрузки P_L** (load losses): Сумма потерь (I^2R) в обмотках (см. 3.15.4.2) и щеточных потерь (см. 3.15.4.3), если они есть.

3.15.4.2 **потери в обмотках** (winding losses): Потери в обмотках I^2R:

- в якорной цепи машин постоянного тока;
- в статорных и роторных обмотках асинхронных машин;
- в статорных обмотках синхронных машин.

3.15.4.3 **щеточные потери (в цепи нагрузки) P_b** (brush losses (load circuit)): Потери в щеточном узле (включая потери в контакте) в якорной цепи машин постоянного тока и в асинхронных машинах с фазным ротором.

3.15.5 **добавочные потери от нагрузки P_{LL}** (additional load losses (stray-load losses)): Потери в стали и конструктивных металлических частях, вызванные током нагрузки, потери от вихревых токов в обмоточных проводах, вызванные зависящими от тока нагрузки пульсациями потока, а также добавочные потери в щеточном узле, вызванные коммутацией.

Примечание — Добавочные потери от нагрузки не включают добавочные потери на холостом ходу по 3.15.2.2.

3.15.6 **потери короткого замыкания P_k** (short-circuit losses): Потери в синхронной машине и в машине постоянного тока при короткозамкнутой якорной обмотке.

3.16 **экспериментальные параметры** (многофазные машины переменного тока) (test quantities (polyphaser A.C. machines))

3.16.1 **линейное напряжение** (terminal voltage): Для многофазных машин переменного тока — среднее арифметическое значение линейных напряжений.

3.16.2 **линейный ток** (line current): Для многофазных машин переменного тока — среднее арифметическое значение линейных токов.

3.16.3 **линейное сопротивление** (line-to-line resistance): Для многофазных машин переменного тока — среднее арифметическое сопротивлений между всеми клеммами фаз питания.

Примечание 1 — Для трехфазных машин при соединении в звезду сопротивление фазы равно половине линейного сопротивления. Для соединения в треугольник сопротивление фазы равно полуторакратному линейному сопротивлению.

Примечание 2 — В разделах 6 и 7 пояснения и уравнения приведены для трехфазных машин, если иное не оговорено.

3.16.4 **превышение температуры** (temperature rise): Температура машины минус температура охлаждающей среды (охладителя), как определено в IEC 60034-1.

4 Обозначения и сокращения

4.1 Обозначения

$\cos\varphi$ — коэффициент мощности[1];
f — частота питающей сети, Гц;
I — средний линейный ток, А;
k_θ — температурный коэффициент;
n — частота вращения, об/с ($с^{-1}$);
p — число пар полюсов;
P — мощность, Вт;
P_0 — потребляемая мощность на холостом ходу, Вт;
P_1 — потребляемая мощность без учета возбуждения[2], Вт;
P_2 — выходная мощность, Вт;
P_b — щеточные потери, Вт;
P_e — потери в цепи возбуждения, Вт;
P_{1E} — мощность цепи возбуждения, питаемой от отдельного источника, Вт;
P_{Ed} — потери в возбудителе, Вт;
P_{el} — электрическая мощность без учета возбуждения, Вт;
P_f — потери в обмотках возбуждения, Вт;
P_{fe} — потери в стали, Вт;
P_{fw} — потери на трение и охлаждение, Вт;
P_c — постоянные потери, Вт;
P_L — потери от нагрузки, Вт;
P_{Lr} — остаточные потери, Вт;
P_{LL} — добавочные потери от нагрузки, Вт;
P_{mech} — механическая мощность, Вт;
P_k — потери короткого замыкания, Вт;
P_T — суммарные потери, Вт,
P_w — потери в обмотках, Вт, при этом подстрочный индекс w обычно заменяется на a, f, e, s или r (см.4.2);
R — сопротивление обмоток, Ом;
R_{eh} — фактическое значение дополнительного резистора используемого в испытании по схеме «звезда» (см 6.4.5.5), Ом;
R'_{eh} — расчетное значение дополнительного резистора, Ом;
R_f — сопротивление обмотки возбуждения, Ом;
R_{11} — среднее значение линейного сопротивления, Ом;
R_{ph} — среднее значение фазного сопротивления, Ом;
s — скольжение;
T — вращающий момент машины, Нм;
T_d — измеренное значение вращающего момента, Нм;
T_c — поправка вращающего момента, Нм;
U — среднее значение напряжения на зажимах, В;
U_0 — напряжение на зажимах без нагрузки, В;
U_N — номинальное напряжение на зажимах, В;
X — реактивное сопротивление, Ом;
$\bar{Z} = R + j \times X$ — полное (комплексное) сопротивление;
$Z = |\bar{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$ — модуль полного сопротивления;
Z — полное сопротивление, Ом;
η — коэффициент полезного действия;
θ_0 — исходная температура обмотки, °С;
θ_a — температура окружающей среды, °С;
θ_c — начальная температура охлаждающей среды, °С;
θ_w — температура обмотки, °С;
τ — постоянная времени, с.

[1] Определение справедливо при синусоидальных токе и напряжении.

[2] В данном документе при испытаниях двигателя под P_1 и P_2 подразумеваются потребляемая мощность и выходная мощность соответственно, если не оговорено иное.

4.2 Дополнительные обозначения

Следующие обозначения могут быть добавлены для уточнения режима работы машины и назначения сокращения.

Компоненты машины:

a — якорь;
e — возбуждение;
f — обмотка возбуждения;
r — ротор;
s — статор;
w — обмотка;
U, *V*, *W* — фазные значения.

Типы машин:

B — стартер, вспомогательный машинный агрегат;
D — динамометр;
E — возбудитель;
G — генератор;
M — двигатель.

Условия эксплуатации:

0 — без нагрузки;
1 — вход;
2 — выход;
av — среднее значение;
d — рассеиваемый;
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 — приведенный к ссылочной температуре охлаждающей среды.

Примечание — Встречающиеся впоследствии дополнительные обозначения разъясняются в соответствующих подпунктах.

5 Общие требования

5.1 Прямое и косвенное измерение КПД

Испытания с целью определения КПД могут быть сгруппированы по трем категориям:

a) испытание одной машины, подразумевающее прямое измерение электрической (на клеммах) или механической (на валу) мощности на входе и механической или электрической мощности на выходе машины;

b) измерение электрической мощности на входе и выходе двух механически связанных идентичных машин, что позволяет устранить измерение механической мощности;

c) измерение фактических потерь в машине в специально организованных режимах; обычно при этом измеряются различные компоненты потерь, а затем вычисляются суммарные.

Методы определения коэффициента полезного действия машин подразумевают использование допущений. Поэтому не следует сравнивать значения КПД, полученные различными методами.

5.2 Погрешности

Погрешности в данном стандарте отражают неточность определения истинной величины КПД. Они отражают влияние процедуры испытаний и испытательного оборудования на результат испытания.

Погрешности должны быть представлены в численном виде, а полученные результаты должны быть представительны и сопоставимы.

5.3 Основные методы и особые методы по требованию заказчика, эксплуатационные и типовые испытания

Установить конкретные правила определения коэффициента полезного действия затруднительно. Выбор метода испытания для определения КПД зависит от требуемой информации, точности, типа и размера испытуемой машины, а также от доступного испытательного оборудования (питание, нагружающий или приводной двигатель).

Впоследствии методы испытаний асинхронных и синхронных машин разделяют на основные, а также специальные приемочные испытания по требованию заказчика, эксплуатационные и типовые испытания.

5.4 Питание

5.4.1 Напряжение

Напряжение должно соответствовать 7.2 (и 8.3.1 для тепловых испытаний) по IEC 60034-1.

5.4.2 Частота

Частота во время измерений должна находиться в пределах ± 0,1% от требуемого в данном испытании значения.

5.5 Средства измерений

5.5.1 Общие положения

Параметры окружающей среды при испытаниях должны находиться в пределах, рекомендованных производителем приборов. В случае необходимости должны быть учтены температурные поправки, рекомендованные производителем.

По возможности следует использовать цифровые приборы.

Поскольку точность аналоговых измерительных приборов обычно выражается в процентах от максимального деления шкалы, диапазон измерений прибора желательно выбирать наименьшим из практически возможных.

Полный диапазон измерения приборов, особенно датчиков тока, должен соответствовать мощности испытуемого двигателя.

Показания аналоговых приборов должны находиться в верхней трети шкалы измерения.

При испытании машин под нагрузкой неизбежны медленные изменения выходной мощности и других измеряемых величин. Поэтому в каждой точке, соответствующей определенной нагрузке, посредством специального цифрового измерителя должно быть автоматически сделано много (обычно несколько сотен) измерений за время не более 15 с, а среднее значение этих измерений должно использоваться для расчета КПД.

5.5.2 Приборы для измерения электрических величин

Измерительные приборы должны иметь класс точности 0,2 при прямых измерениях и 0,5 при косвенных в соответствии с IEC 60051. Измерительное оборудование должно иметь общую погрешность 0,2% при коэффициенте мощности 1,0 с учетом всех ошибок от измерительных трансформаторов и преобразователей, если они используются.

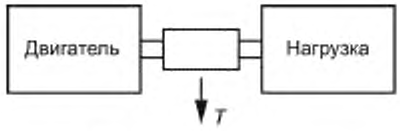
Примечание — При типовых испытаниях в соответствии с IEC 60034-1, п. 9.1, достаточен класс точности 0,5.

Для асинхронных машин используют средние значения линейных токов и напряжений, если отсутствуют иные указания в настоящем стандарте.

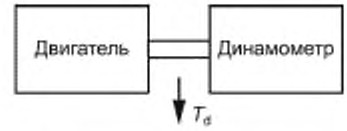
5.5.3 Измерения момента

Приборы для измерения момента должны иметь класс точности не менее 0,2. Измеряемый момент должен составлять не менее 10% от номинального значения момента измерителя. Если используется более точный прибор, соответственно может быть увеличен диапазон измерения.

Примечание — Например, при классе точности 0,1 измеряемый момент должен быть не менее 5% номинального момента измерителя.



Встроенный датчик момента



Динамометр рамной конструкции

Если вращающий момент на валу измеряется посредством динамометра опорной конструкции, необходимо провести коррекцию измеряемого момента для учета потерь в подшипниках нагрузочной машины. Это также следует сделать, если какой-нибудь подшипниковый узел или муфта размещены между валом двигателя и прибором, измеряющим момент.

Вращающий момент T на валу машины рассчитывают по формуле:

$$T = T_d + T_c,$$

где T_d — результат измерения вращающего момента;

T_c — момент корректировки с учетом потерь.

Следует отметить, что температура датчика момента, расположенного вблизи ротора, может превышать температуру окружающей среды и вносить значительный вклад в общую погрешность измерения. Этот вклад не должен превышать 15%. Если это не достижимо, необходимо осуществлять соответствующую температурную коррекцию.

Паразитные нагрузки могут быть минимизированы путем точной центровки валов и применением эластичных муфт.

5.5.4 Измерение частоты вращения и скорости

Приборы для измерения частоты должны иметь погрешность не более ± 0,1% от полной шкалы. Измерение скорости должно производиться с точностью не менее ± 1 об/мин.

Примечание 1 —Частота вращения, измеренная в об/мин, связана с частотой n, измеряемой в об/с или $с^{-1}$, соотношением $n \times 60$.

Примечание 2 — Измерение скольжения асинхронных двигателей каким-либо методом может заменить измерение частоты вращения или угловой скорости (см. приложение С).

5.5.5 Измерение температуры

Приборы для измерения температуры обмотки должны иметь точность не менее ±1°С.

5.6 Единицы измерения величин

Если иное не указано, единицы измерения величин указывают в системе СИ, что соответствует IEC 60027-1.

5.7 Сопротивления

5.7.1 Измеряемое сопротивление

Сопротивление обмотки R измеряют в Ом и определяют соответствующими методами.

Для машин постоянного тока R — полное сопротивление всех обмоток, по которым протекает якорный ток (якорная обмотка, коллекторный узел, компенсационная обмотка, смешанная обмотка возбуждения).

Для машин постоянного тока и синхронных машин R_f — сопротивление цепи возбуждения.

Для многофазных машин переменного тока $R = R_{11}$ — сопротивление между фазами статора или якоря (для синхронных машин) согласно 3.16.3. Для асинхронных машин с фазным ротором $R_{r,11}$ — сопротивление между фазами ротора.

Измеряемое сопротивление в конце испытания на нагрев определяют одним из способов, описанных в IEC 60034-1 (п. 8.6.2.3.3) с помощью экстраполяции к нулю времени измерения, при этом используют наиболее короткие из возможных интервалов времени вместо предлагаемых в таблице 5.

Испытательную температуру обмотки определяют согласно 5.7.2.

5.7.2 Температура обмотки

Измеряемую температуру обмотки определяют одним из следующих методов, перечисленных в порядке предпочтения:

а) температуру определяют при номинальной нагрузке методом сопротивления по величине R_N в соответствии с процедурой экстраполяции, описанной в 5.7.1;

b) температуру определяют непосредственно методом заложенных термопреобразователей или термопарой;

c) температуру определяют согласно a) на другой машине аналогичного типа и конструкции;

d) в случае, если невозможно обеспечить нагрузку, температуру определяют согласно IEC 61986;

e) если сопротивление под нагрузкой R_N не может быть измерено непосредственно, то температура обмотки должна быть принята равной нормативной температуре для соответствующего класса нагревостойкости в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 — Нормативная температура

Класс нагревостойкости изоляции	Нормативная температура, °С
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

Если найденное номинальное превышение температуры или номинальная температура будут соответствовать более низкому классу изоляции, чем используется в двигателе, то нормативная температура должна соответствовать заявленному классу.

5.7.3 Приведение к температуре охлаждающей среды

Если требуется, значения сопротивления обмотки, измеренные при испытании, должны быть приведены к нормативной температуре 25°С. Коэффициент приведения сопротивления обмотки (а также скольжения в случае асинхронных машин) к нормативной температуре 25 °С может быть рассчитан по формуле

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}, \quad (1)$$

где k_θ — температурный коэффициент приведения для обмотки;

θ_c — температура охлаждающей среды на входе во время испытания;

θ_w — температура обмотки согласно 5.7.2.

Температурная постоянная «235» приведена для медной обмотки, для алюминиевой обмотки она должна быть заменена на «225».

Для машин, в которых в качестве первичного или вторичного хладагента используется вода, нормативная температура должна быть принята 25°С, что согласуется с IEC 60034-1. Другие значения могут быть определены дополнительным соглашением.

5.8 Состояние машины при испытании и категории испытаний

Испытание должно проводиться на собранной машине с находящимися на месте всеми основными частями, чтобы условия испытания были идентичны рабочим условиям.

Примечание 1 — Выбор экземпляра машины предпочтительно производить из партии продукции случайным образом без каких-либо предпочтений.

Доступные снаружи уплотнительные элементы могут на время испытания быть сняты, если дополнительные испытания машин подобной конструкции показали, что после достаточного пробега трение незначительно.

Примечание 2 — Двигатели с подшипниками и внутренними уплотнителями, о которых известно, что трение уменьшается после достаточного пробега, могут перед испытаниями быть подвергнуты обкатке.

Отдельные испытания в общей процедуре выполняются в документированной последовательности. Не обязательно проводить последующее испытание сразу вслед за предыдущим, однако, если последующее испытание проводится с задержкой, должны быть восстановлены предшествующие условия испытания.

Для машин с регулируемыми щетками последние должны быть установлены в требуемую позицию. В асинхронных двигателях с фазным ротором, имеющих механизм поднятия щеток, щетки на время испытания должны быть подняты, а роторные обмотки короткозамкнуты. В машинах постоянного тока при испытаниях на холостом ходу щетки должны быть установлены на нейтрали.

Потери в подшипниках зависят от рабочей температуры подшипников, типа и температуры смазки.

Если требуется определять потери независимой системы смазки подшипников, они должны быть задокументированы отдельно.

В случае испытания двигателей с упорными подшипниками в общих потерях должна быть выделена составляющая, обусловленная упорным подшипником при работе двигателя.

Потери на трение, обусловленные осевой нагрузкой, могут быть зарегистрированы по соглашению сторон.

Если в испытуемой машине используется прямое охлаждение подшипников, то потери на охлаждение распределяют между испытуемой машиной и соединенными с ней механическими частями, например, турбиной, пропорционально массам этих частей. Если нет прямого охлаждения, распределение потерь рассчитывают по эмпирическим формулам по соглашению сторон.

5.9 Измерения в цепях возбуждения

Определение напряжения U_e и тока I_e (см. 3.15.3.2) зависит от конфигурации системы возбуждения (см. 3.15.3.3). По возможности, при проведении испытаний следует учитывать следующие обстоятельства.

a) Для машин с системами возбуждения на основе возбудителей на валу машины, независимых электромашинных возбудителей, статических и на основе дополнительной обмотки (см. 3.15.3.3 a), c), d), e)) напряжение U_e и ток I_e измеряют следующим образом:

- на клеммах обмотки возбуждения машины постоянного тока;
- на контактных кольцах обмотки возбуждения синхронных машин.

b) Для машин с системами возбуждения на основе бесщеточных возбудителей (см. 3.15.3.3 b)) напряжение U_e и ток I_e измеряют следующим образом:

- напряжение U_e, измеряют с помощью вспомогательных (временно устанавливаемых) контактных колец, подсоединенных к выводам обмотки возбуждения; по напряжению и сопротивлению R_e определяют ток обмотки возбуждения $I_e = U_e/R_e = U_f/R_f$, а сопротивление обмотки возбуждения определяют после отключения машины с использованием процедуры экстраполяции в соответствии с 5.7.1;
- напряжение U_e и ток I_e измеряют с помощью основных контактных колец, пригодных для прямого измерения тока обмотки возбуждения.

Примечание — Разница между U_e и U_f (падение напряжения) на практике почти незначительна.

Напряжения и токи измеряют при постоянной температуре.

Потери в цепи возбуждения P_e определяют в соответствии с 7.1.3.2.1 (синхронные машины) или 8.1.3.2.1 (машины постоянного тока).

5.10 Температура окружающей среды при испытании

Температура окружающей среды должна находиться в пределах 15°C — 35°C по крайней мере в последний час испытаний на нагревание при номинальной нагрузке и во всех последующих испытаниях.

6 Методы испытаний для определения КПД асинхронных машин

6.1 Предпочтительные методы испытаний

6.1.1 Общие положения

Настоящий стандарт определяет три основных метода, имеющие малую погрешность в рассматриваемой области применения, которые представлены в таблице 2. Выбор конкретного метода зависит от типа и мощности испытуемой машины.

Метод 2-1-1A: Прямое измерение мощностей на входе и выходе с использованием динамометра. Применяется для всех однофазных машин.

Метод 2-1-1B: Суммирование потерь. Добавочные потери от нагрузки определяются методом остаточных потерь. Применяется для всех трехфазных асинхронных машин мощностью до 2 МВт включительно.

Метод 2.1.1C: Суммирование потерь. Добавочные потери от нагрузки определяются эмпирическим методом по мощности двигателя. Применяется для всех трехфазных асинхронных машин мощностью свыше 2 МВт.

Таблица 2 — Предпочтительные методы испытаний

Обозначение	Метод	Описание	Раздел	Применение	Ресурсы
2-1-1A	Прямое измерение: Вход-выход	Измерение момента	6.1.2	Все однофазные машины	Динамометр на полную нагрузку
2-1-1B	Суммирование потерь: Остаточные потери	Измерение P_{LL} по остаточным потерям	6.1.3	Трехфазные машины номинальной мощностью до 2 МВт	Динамометр или нагрузочная машина с измерителем момента на 1,25 полной нагрузки
2-1-1C	Суммирование потерь: по номинальной мощности	Определение P_{LL} по номинальной мощности	6.1.4	Трехфазные машины номинальной мощностью выше 2 МВт	

6.1.2 Метод 2-1-1A Прямое измерение мощностей на входе и выходе

6.1.2.1 Общие положения

В данном разделе приведены методы испытаний, при которых механическую мощность P_{mech} машины определяют по измеренным значениям вращающего момента на валу и скорости и одновременно измеряют электрическую мощность P_{el} (в статоре машины переменного тока или якоре машины постоянного тока).

Входными и выходными мощностями являются:

при работе в режиме двигателя $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$ (см рис. 1); (2)

при работе в режиме генератора $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$. (3)

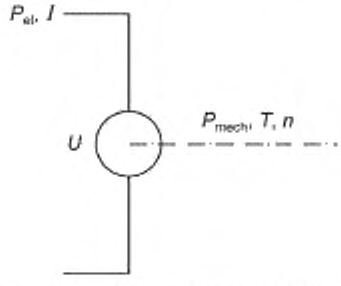


Рисунок 1 — Схема измерения момента

Для наглядности на рисунке 2 представлена блок-схема расчета КПД поданной методике.



Рисунок 2 — Определение КПД по методу 2-1-1A

6.1.2.2 Процедура испытания

Испытуемая машина соединяется с нагрузочной через датчик момента или динамометр. Испытуемая машина нагружается требуемой нагрузкой до тех пор, пока не установится тепловое равновесие (за 0,5 часа температура не изменяется более чем на 1°С).

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

6.1.2.3 Определение КПД

КПД вычисляют по формуле

$$\eta = P_2 / P_1, \quad (4)$$

Потребляемую мощность P_1 и отдаваемую мощность P_2 определяют по формулам:

- для двигательного режима $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$, (5)

- для генераторного режима $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$, (6)

где $P_{mech} = 2\pi Tn$. (7)

6.1.3 Метод 2-1-1B Суммирование потерь, определение добавочных потерь по остаточным потерям

6.1.3.1 Общие положения

В данном методе КПД определяется суммированием отдельных потерь. Рассматриваются следующие компоненты потерь:

потери в стали;

потери вентиляционные и на трение;

потери в меди статора и ротора;

добавочные потери от нагрузки.

На рисунке 3 представлена визуальная интерпретация процедуры определения КПД данным методом.

6.1.3.2 Процедура испытания

6.1.3.2.1 Испытание при номинальной нагрузке

Перед испытанием под нагрузкой измеряют температуру и сопротивление обмоток при нормальной температуре окружающей среды.

Машина нагружается до номинальной выходной мощности любым приемлемым способом и работает до достижения теплового равновесия (пока изменение температуры за полчаса не перестанет превышать 1°С). При этом регистрируют следующие величины: P_1, T, I, U, n, f, θ_c, θ;

$R_N = R$ (сопротивление при испытании с номинальной нагрузкой в соответствии с 5.7.1);

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

Непосредственно после испытания должен быть проверен измеритель момента.

При выходе за рамки допустимого отклонения измеритель должен быть отрегулирован, а испытание повторено.

6.1.3.2.2 Потери от нагрузки

Потери в обмотке статора и температурная коррекция

Нескорректированное значение потерь в обмотке статора составляет

$$P_s = 1{,}5I^2R, \quad (8)$$

где I и R определяют согласно 6.1.3.2.1.

Приведенные к нормативной температуре хладагента 25 °С потери обмотки статора при номинальной нагрузке определяют с использованием сопротивления обмотки статора R_N по формуле

$$P_{s,\theta} = P_s k_\theta, \quad (9)$$

где k_θ — температурный коэффициент приведения сопротивления, определяемый согласно 5.7.3 для обмотки статора.

Потери в обмотке ротора и температурная коррекция

Нескорректированное значение потерь в обмотке ротора определяют по формуле

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe})s, \quad (10)$$

где $$s = 1 - \frac{pn}{f}, \quad (11)$$

P_1, n и f определяют по испытанию с номинальной нагрузкой;
P_s определяют, как показано выше, в соответствии с испытанием под нагрузкой;
P_{fe} определяют согласно 6.1.3.2.5.

Скорректированное значение потерь роторных обмоток определяют с использованием скорректированного значения статорных

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

где P_{fe} определяется согласно 6.1.3.2.5 для нормативной температуры хладагента 25 °С;
$s_\theta = sk_\theta$ — скольжение, приведенное к номинальной температуре хладагента 25 °С (см. 5.7.3);
k_θ — температурный коэффициент приведения (см. 5.7.3).

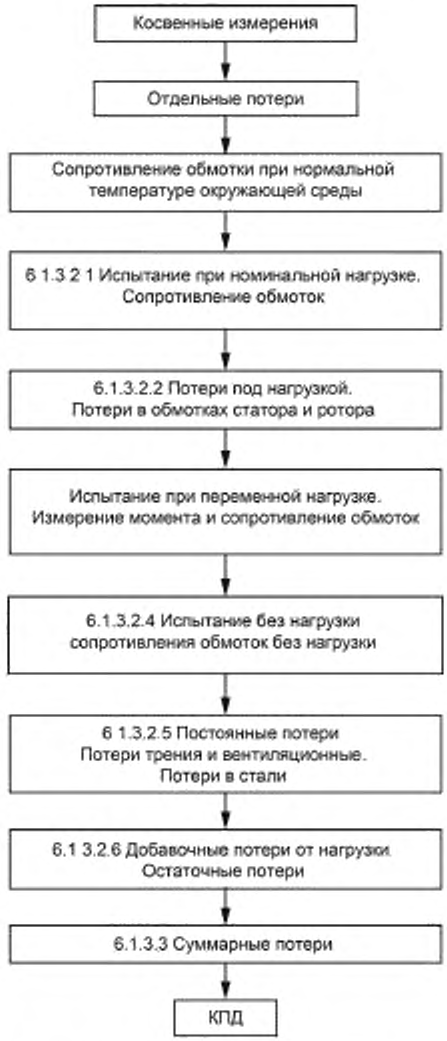


Рисунок 3 — Определение КПД методом 2-1-1В

Температурная коррекция входной мощности (для двигателя)

С учетом скорректированных значений потерь в обмотках статора и ротора скорректированная входная мощность составляет

$$P_{1.\theta} = P_1 - (P_s - P_{s.\theta} + P_r - P_{r,\theta}). \quad (12)$$

6.1.3.2.3 Испытание при различных нагрузках

Данное испытание должно проводиться сразу после испытания при номинальной нагрузке при двигателе, прогретом до рабочей температуры.

Если это невозможно, двигатель должен быть прогрет так, чтобы температура обмотки не отличалась более чем на 5 °С от температуры θ_N, полученной при испытании на нагрев при номинальной нагрузке (см. 6.4.4.1).

Машина должна быть нагружена и испытана при шести значениях нагрузки: примерно 125 %, 115 %, 100 %, 75 %, 50 % и 25 % от номинальной нагрузки. Два значения приблизительно с одинаковым интервалом устанавливают выше 100 %, но не более 150 % номинальной нагрузки. Испытание следует начинать с задания самой высокой нагрузки, затем ее уменьшая. Это испытание должно быть выполнено по возможности быстро, чтобы минимизировать изменение температуры машины.

В машинах переменного тока изменение частоты при испытании не должно превышать 0,1 %.

Перед первым измерением (при наибольшей нагрузке) и после окончания испытания с наименьшей нагрузкой измеряют R. При нагрузке 100 % и более сопротивление принимают равным измеренному при самом высоком значении нагрузки. При нагрузке, меньшей 100 %, сопротивление определяют как линейно зависящее от нагрузки в пределах от самого высокого значения нагрузки до 25 %.

Примечание — Сопротивления могут также быть определены путем измерения температуры обмотки статора с помощью установленных на ней датчиков. Сопротивления для каждого значения нагрузки могут тогда быть определены в зависимости от температуры обмотки по предварительно снятой зависимости сопротивление — температура.

Для каждого значения нагрузки регистрируют: U, I, P_1, R, n, f, T — напряжение, ток, потребляемую мощность, сопротивление, частоту вращения, частоту питающей сети, вращающий момент машины.

Потери в обмотке статора

Нескорректированное значение потерь в обмотке статора составляет

$$P_s = 1{,}5\, I^2 R, \tag{13}$$

где I и R определяют согласно 6.1.3.2.2 для каждой нагрузки.

Потери в обмотке ротора

Потери в обмотке ротора при заданной нагрузке определяют по формуле

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe})\, s, \tag{14}$$

где

$$s \approx 1 - \frac{pn}{f}; \tag{15}$$

P_1, n и f определяют согласно результатам испытаний под нагрузкой;

P_s определяют согласно испытанию при различных нагрузках, как указано выше;

P_{fe} определяют согласно 6.1.3.2.5.

6.1.3.2.4 Испытание без нагрузки

Данное испытание проводится на горячей машине сразу после испытания с различной нагрузкой

Испытания проводят при следующих восьми значениях напряжения, включая номинальное:

- значения напряжения примерно 110 %, 100 %, 95 % и 90 % номинального используют для определения потерь в стали;

- значения напряжения примерно 60 %, 50 %, 40 % и 30 % номинального используют для определения потерь вентиляционных и на трение.

Испытание проводят как можно более быстро при убывающем напряжении.

При каждом уровне напряжения измеряют U_0, I_0, P_0.

Определяют R_0 непосредственно до и после испытания без нагрузки.

Сопротивление обмотки при каждом уровне напряжения рассчитывают путем линейной интерполяции в функции электрической мощности P_0 до и после испытания.

Примечание 1 — Для асинхронных машин, в которых измерение сопротивлений R_0 и $R_{II,0}$ затруднительно ввиду их малой величины, допускается их определение расчетным путем.

Примечание 2 — Сопротивления в машинах переменного тока могут также быть определены путем измерения температуры обмотки статора с помощью установленных на ней датчиков. Сопротивления для каждого значения напряжения могут тогда быть определены по зависимости сопротивления от температуры, измеренной перед началом испытания.

Для присоединенной к приводу машины P_0 определяют по T и n.

6.1.3.2.5 Постоянные потери

Общие положения

Постоянные потери P_c, которые являются суммой потерь трения, вентиляционных и потерь в стали, определяются разностью входной мощности без нагрузки P_0 и потерь в обмотках без нагрузки P_s. Постоянные потери для каждого значения напряжения определяют по формуле

$$P_c = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe}, \quad (16)$$

где

$$P_s = 1{,}5\, I_0^2 R_{ll0}, \quad (17)$$

причем R_{ll0} — интерполированное сопротивление обмотки при каждом уровне напряжения.

Потери трения и вентиляционные

Зависимость постоянных потерь P_c от квадрата напряжения U_0^2, полученная в четырех или более точках с напряжением от 60 % до 30 % номинального, экстраполируется прямой линией. Точка пересечения этой прямой с нулевой осью напряжения представляет собой потери трения и вентиляционные P_{fw0} при скорости, примерно равной синхронной.

Потери в стали

При значениях напряжения от 90 % до 110 % от номинального строится зависимость $P_{fe} = P_c - P_{fw}$ от напряжения U_o.

Для определения потерь в стали при полной нагрузке необходимо использовать U_i, учитывающее значение падения напряжения в первичной активной цепи и вычисляемое по формуле:

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} IR\cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} IR\sin\varphi\right)^2} \quad \text{для двигателя,} \quad (18)$$

$$U_i = \sqrt{\left(U + \frac{\sqrt{3}}{2} IR\cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} IR\sin\varphi\right)^2} \quad \text{для генератора,} \quad (19)$$

где

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI}, \quad \sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}, \quad (20)$$

U, P_1, I и R определяют согласно 6.1.3.2.1.

Примечание 1 — Потери в стали при полной нагрузке могут быть рассчитаны с использованием соотношения $(U_i/U_N)^2$ по потерям в стали без нагрузки.

Примечание 2 — Поскольку индуктивность рассеяния статора неизвестна, падение напряжения на статоре содержит только активную составляющую. Ввиду низкого коэффициента мощности при работе без нагрузки активное падение напряжения весьма мало при измерениях и может приниматься во внимание при работе под нагрузкой.

6.1.3.2.6 Добавочные потери от нагрузки P_{LL}

Остаточные потери P_{Lr}

Остаточные потери определяют для каждой нагрузки путем вычитания из потребляемой мощности следующих компонент: отдаваемой мощности, нескорректированных потерь в обмотках статора, потерь в стали, потерь трения и вентиляционных, а также нескорректированных потерь в обмотках ротора, соответствующих определенному скольжению.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}, \quad (21)$$

$$P_2 = 2\pi Tn \text{ для двигателя и } P_1 = 2\pi Tn \text{ для генератора,} \quad (22)$$

где

$$P_{fw} = P_{fw0}\,(1 - s)^{2,5},\ s = 1 - pn/f. \quad (23)$$

Определение добавочных потерь от нагрузки по остаточным потерям

Экспериментальные значения остаточных потерь должны быть аппроксимированы с использованием линейного регрессионного анализа (см. рисунок 4) зависимостью потерь от квадрата вращающего момента,которую можно представить формулой

$$P_{Lr} = AT^2 + B, \quad (24)$$

где T определяют согласно 8.2.2.5.1.1;

A и B — постоянные, определяющиеся по шести экспериментальным точкам, соответствующим различной нагрузке с использованием следующих уравнений:

наклон

$$A = \frac{i\Sigma(P_{Lr}T^2) - \Sigma P_{Lr}\Sigma T^2}{i\Sigma(T^2)^2 - (\Sigma T^2)^2}, \quad (25)$$

начальное смещение

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A\frac{\sum T^2}{i}, \quad (26)$$

где i — число суммируемых экспериментальных точек при изменении нагрузки.

Начальное смещение B должно быть значительно меньше (< 50 %) добавочных потерь под нагрузкой P_{LL} при номинальном моменте T. В противном случае измерения должны быть признаны некорректными и проверены.

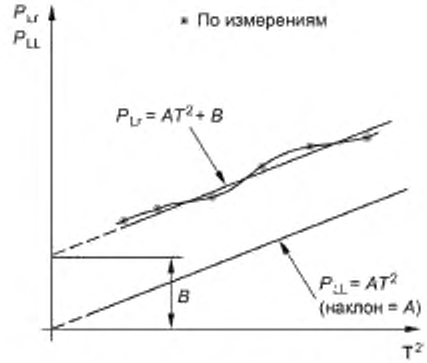


Рисунок 4 — Аппроксимация экспериментальных значений остаточных потерь

Примечание — Значение B может быть как положительным, так и отрицательным. На рисунке изображен пример с положительным B.

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$\gamma = \frac{i\Sigma(P_{Lr}T^2) - (\Sigma P_{Lr})(\Sigma T^2)}{\sqrt{(i\Sigma(T^2)^2 - (\Sigma T^2)^2)(i\Sigma P_{Lr}^2 - (\Sigma P_{Lr}^2)^2)}}. \quad (27)$$

Если коэффициент корреляции γ менее 0,95, то следует удалить наихудший результат и повторить процедуру построения регрессии. Если при этом произойдет увеличение γ до 0,95 и выше, используется вторая регрессия; если нет — испытание нельзя признать удовлетворительным по причине инструментальных или процедурных погрешностей. Источник ошибки должен быть проанализирован и устранен, а испытание должно быть повторено. Коэффициент корреляции 0,98 и выше свидетельствует о благоприятных результатах испытаний.

Когда постоянная A установлена, величина добавочных потерь от нагрузки для каждого значения нагрузки рассчитывается по формуле

$$P_{LL} = AT^2. \quad (28)$$

6.1.3.3 Определение КПД

Суммарные потери

Суммарные потери могут быть найдены как сумма потерь в стали, скорректированных потерь на трение и вентиляционных, потерь под нагрузкой и добавочных потерь под нагрузкой:

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL}, \quad (29)$$

где

$$P_{fw} = P_{fw0}\,(1 - s_\theta)^{2,5} \quad (30)$$

представляют собой скорректированные значения потерь трения и вентиляционных.

КПД

КПД определяется по выражению.

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (31)$$

где $P_{1,\theta}$ — входная мощность при испытании с номинальной нагрузкой после температурной коррекции;
P_2 — выходная мощность при испытании с номинальной нагрузкой.

Примечание — Обычно первое равенство используется для двигателей, а второе — для генераторов.

6.1.4 Метод 2-1-С. Суммирование потерь с определением добавочных потерь от нагрузки оценочным методом

6.1.4.1 Общие положения

Как и метод 2-1-1В, данный метод основан на определении КПД суммированием отдельных потерь. Однако, поскольку выполнение испытания с полной нагрузкой по методу 2-1-1В для машин мощностью более 2 МВт сопряжено с трудностями, в данном методе испытание под нагрузкой проводится с пониженным напряжением и оценочным методом определения добавочных потерь от нагрузки. Таким образом, испытания при полной нагрузке и при различной нагрузке не требуются.

В остальном метод 2-1-1С аналогичен методу 2-1-1В.

На рисунке 5 представлена визуальная интерпретация процедуры определения КПД данным методом.

6.1.4.2 Процедура испытания

6.1.4.2.1 Испытание под нагрузкой при пониженном напряжении

Приемлемым методом испытания больших машин, для которых трудно организовать полную нагрузку, является испытание при пониженном напряжении. При таком испытании требуются следующие режимы: работа машины в двигательном режиме при пониженном напряжении U_{red} и номинальной частоте вращения; работа машины при напряжении U_{red} без нагрузки; работа машины при номинальном напряжении и частоте без нагрузки.

В данном методе предполагается, что при пониженном напряжении и поддержании постоянной скорости значения токов уменьшаются пропорционально напряжению, а значения мощности — квадрату напряжения.

Настраивается такой режим работы с максимальной нагрузкой при пониженном напряжении для того, чтобы получить номинальную частоту вращения. Данный режим сохраняется до достижения установившегося теплового режима.

При пониженном напряжении регистрируются значения:

U_{red}, I_{red}, P_{1red}, I_{0red}, $\cos(\varphi_{0red})$ — напряжения, тока, потребляемой мощности, тока холостого хода, коэффициента мощности.

При номинальном напряжении регистрируют значения:

U_N, I_0, $\cos(\varphi_0)$ — напряжения, тока холостого хода, коэффициента мощности.

По результатам испытания вычисляют значения тока под нагрузкой и потребляемую мощность при номинальном напряжении

$$\overline{I} = \overline{I}_{red}\frac{U_N}{U_{red}} + \Delta\overline{I}_0, \quad (32)$$

где

$$\Delta\overline{I}_0 = -j\left(\left|\overline{I}_0\right|\sin\varphi_0 - \left|\overline{I}_{0,red}\right|\frac{U_N}{U_{red}}\sin\varphi_{0,red}\right), \quad (33)$$

$$P_1 = P_{1,red}\left(\frac{U_N}{U_{red}}\right)^2. \quad (34)$$

Примечание — Символы с чертой сверху обозначают векторы (см. рисунок 6).

Потери при испытании под нагрузкой при номинальном напряжении вычисляют по найденным значениям I, P_1 и при значении скольжения, измеренном при пониженном напряжении.



Рисунок 5 — Определение КПД методом 2-1-1С

6.1.4.2.2 Потери от нагрузки

Определение потерь от нагрузки выполняется в соответствии с 6.1.3.2.2.

6.1.4.2.3 Испытание без нагрузки

Испытание без нагрузки проводится на прогретой машине сразу после испытания под нагрузкой. Данное испытание проводится в соответствии с 6.1.3.2.4.

6.1.4.2.4 Постоянные потери

Определение постоянных потерь производится в соответствии с 6.1.3.2.5.

6.1.4.2.5 Добавочные потери от нагрузки

Величина добавочных потерь P_{LL} при номинальной нагрузке может быть определена в зависимости от потребляемой мощности P_1 с помощью графика, показанного на рисунке 7.

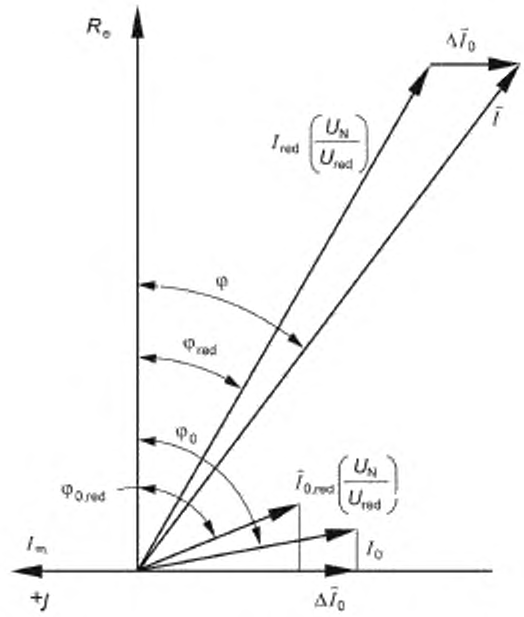


Рисунок 6 — Векторная диаграмма для нахождения вектора тока по испытанию с пониженным напряжением

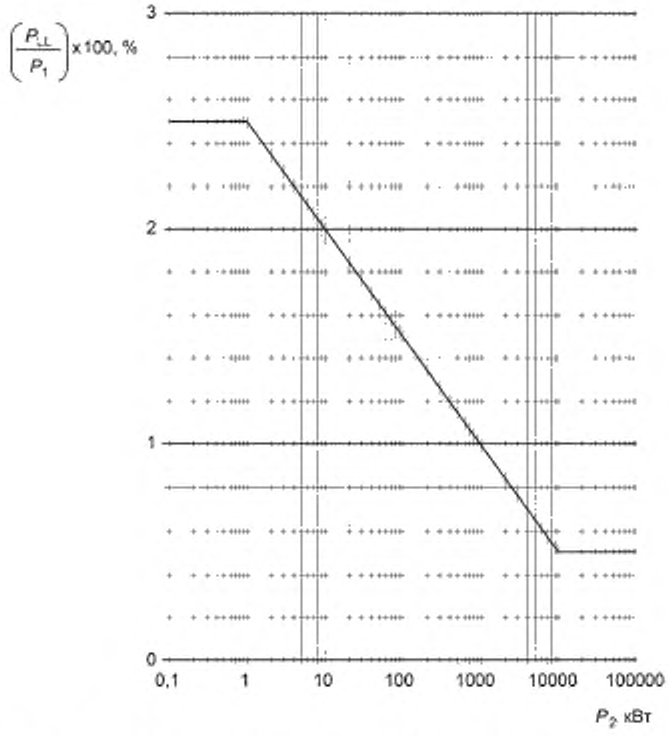


Рисунок 7 — График для определения добавочных потерь

Для асинхронных машин приведенный график описывается следующими формулами:

для $P_2 \le 1$ кВт $P_{LL} = 0{,}025P_1$,

для 1 кВт $< P_2 <$ 10000 кВт $P_{LL} = P_1[0{,}025 - 0{,}005\log P_2/1\text{ кВт}]$,

для $P_2 \ge 10000$ кВт $P_{LL} = 0{,}005P_1$.

Для нагрузок, отличных от номинальных, можно считать, что добавочные потери от нагрузки определяются разностью квадратов первичного тока и тока без нагрузки.

Примечание — Данный метод дает результат, превышающий, как правило, результаты метода оценки добавочных потерь согласно 6.1.3.

6.1.4.3 Определение КПД

Суммарные потери

Суммарные потери определяются как сумма постоянных потерь, потерь под нагрузкой и добавочных потерь под нагрузкой:

$$P_T = P_c + P_s + P_r + P_{LL}. \quad (35)$$

КПД

КПД определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}. \quad (36)$$

Примечание — Обычно первое равенство используется для двигателей, а второе — для генераторов.

6.2 Методы эксплуатационных и типовых испытаний

6.2.1 Общие положения

Данные методы могут быть использованы при любых испытаниях, например эксплуатационных, приемочных по требованию заказчика, типовых.

Кроме того, методы могут применяться вне рамок мощностей, указанных в таблице 2.

Определения данных методов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Обозначение	Метод	Описание	Раздел	Ресурсы
2-1-1D	Испытание в двухмашинном агрегате при питании от двух сетей	2 источника питания	6.2.2	Две одинаковые машины на полную нагрузку
2-1-1E	Испытание в двухмашинном агрегате при питании от одной сети		6.2.3	Две одинаковые машины (фазный ротор)
2-1-1F	Обратное вращение	P_{LL} из испытания с вынутым ротором и обратным вращением	6.2.4	Вспомогательный двигатель мощностью не более 5-кратных суммарных потерь
2-1-1G	Звезда с ассимметричным питанием	P_{LL} из испытания в схеме «звезда»	6.2.5	Обмотки соединены в звезду
2-1-1H	Эквивалентные схемы замещения	Токи мощности и скольжение определяются по методу схемы замещения. Оценка P_{LL} по мощности	6.2.6	Если отсутствует оборудование (нет возможности приложить нагрузку и нет второй машины эквивалентной мощности)

6.2.2 Метод 2-1-1D. Испытание в двухмашинном агрегате при питании от двух сетей

6.2.2.1 Общие положения

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 — Определение КПД по методу 2-1-1D

6.2.2.2 Процедура испытания

Две одинаковые машины соединяются механически так, как показано на рисунке 9.

Питание машин при испытании можно менять, однако приборы и измерительные преобразователи должны оставаться в цепи одной и той же машины.

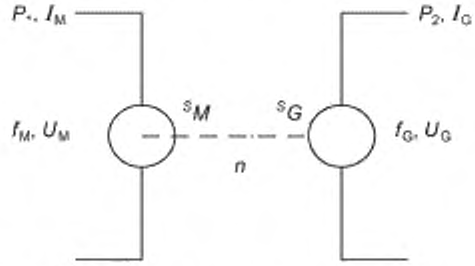


Рисунок 9 — Схема испытания с двухмашинным агрегатом

Клеммы питания испытуемого асинхронного двигателя (или генератора) подключаются к электромашинному или полупроводниковому преобразователю, способному вырабатывать реактивную мощность и потреблять активную. Питание испытуемой машины производится номинальным напряжением и частотой; вторая машина должна питаться более низкой частотой для работы в генераторном режиме (испытуемая — в двигательном) или более высокой, когда работает в двигательном. Напряжение второй машины должно быть таким, чтобы соблюдалось необходимое для нее соотношение напряжения к частоте.

Далее источники питания двигателя и генератора меняются местами и испытание повторяется.

При каждом испытании регистрируются 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.

6.2.2.3 Определение КПД

Если две одинаковые машины работают в номинальном режиме, КПД может быть рассчитан по половине суммарных потерь и средней потребляемой мощности двигателя и генератора *по формуле*

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}}, \quad (37)$$

где

$$P_T = 0{,}5\,(P_1 - P_2). \quad (38)$$

6.2.3 Метод 2-1-1E. Испытание в двухмашинном агрегате при питании от одной сети

6.2.3.1 Общие положения

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 10.



Рисунок 10 — Определение КПД по методу 2-1-1E

6.2.3.2 Процедура испытания

Данное испытание применимо к асинхронным двигателям с фазным ротором. Две одинаковые машины соединяются механически, а клеммы электропитания присоединяются к общей сети, позволяющей питать их номинальным напряжением с номинальной частотой, одну в качестве двигателя, вторую — в качестве генератора.

Фазный ротор испытуемой машины должен быть короткозамкнут, а ротор нагрузочной — подключен к источнику, способному обеспечить номинальный ток при номинальной частоте скольжения. Регулировкой частоты и тока данного низкочастотного источника обеспечивается требуемая мощность двигателя.

При каждом испытании регистрируются значения:

U_1, I_1, P_1 — напряжения, тока и мощности питающей сети;

U_r, I_r, P_r — напряжения, тока и мощности низкочастотной цепи ротора нагрузочной машины;

P_M — мощности, подводимой на клеммы двигателя;

P_G — мощности, передаваемой генератором;

θ_c.

6.2.3.3 Определение КПД

Если две одинаковые машины работают в номинальном режиме, КПД может быть рассчитан по половине суммарных потерь по формуле

$$\eta = 1 - P_T / P_M, \quad (39)$$

где P_M — мощность, потребляемая машиной, работающей в двигательном режиме,

P_T — суммарные потери, определенные как половина общей потребляемой мощности, что для асинхронных машин с фазным ротором составляет

$$P_T = 0{,}5\,(P_1 + P_r).$$

6.2.4 Метод 2-1-1F. Суммирование потерь с добавочными потерями от нагрузки по испытанию с вынутым ротором и обратным направлением вращения

6.2.4.1 Общие положения

Как и метод 2.1.1B, данный метод испытания позволяет определить КПД суммированием отдельных потерь. Однако в данном случае добавочные потери от нагрузки определяются по совокупности двух отдельных испытаний: испытания с вынутым ротором и испытания при обратном направлении вращения. В остальном метод 2-1-1F аналогичен методу 2-1-1B.

На рисунке 11 схематически показана последовательность действий при использовании данного метода.

6.2.4.2 Процедура испытания

В данном методе применяются те же процедуры, что и в 6.1.3.2, за исключением необходимости измерять и записывать значение момента, а также за исключением определения добавочных потерь под нагрузкой.

Определение добавочных потерь производится на основе двух испытаний:

a) с вынутым ротором (для определения добавочных потерь от основной частоты);

b) с машиной, принудительно вращающейся на синхронной скорости против поля (для определения высокочастотных добавочных потерь).

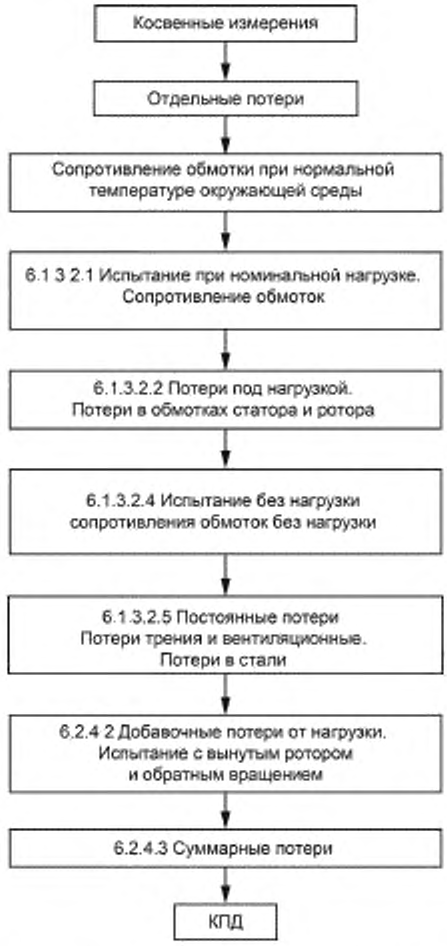


Рисунок 11 — Определение КПД по методу 2-1-1F

Во время обоих испытаний статор должен питаться регулируемым симметричным многофазным напряжением номинальной частоты: для четырех значений токов — между 25 % и 100 % от номинального и для двух — выше, но не больше, чем 150 % от номинального. Значение тока ротора под нагрузкой I_L рассчитывают по формуле

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}\,, \tag{40}$$

где I — величина тока статора во время работы двигателя под нагрузкой,

I_0 — величина тока холостого хода при номинальном напряжении.

Примечание — Ввиду отсутствия охлаждения ток, во избежание перегрева, обычно ограничивается значением 125 % или 110 % для двухполюсных машин.

Испытание с вынутым ротором

При данном испытании все элементы конструкции, в которых могут индуцироваться токи (например, подшипниковые щиты), должны оставаться на месте. Создается ток нагрузки.

Для каждого значения тока нагрузки регистрируются (с индексом rm):

$P_{1,rm}$, $I_{L,rm}$, R_{rm}, $\theta_{w,rm}$.

Испытание с вращением против поля

При данном испытании полностью собранная машина соединяется с приводным двигателем мощностью не меньшей, чем общая сумма номинальных потерь и не большей, чем пятикратные номинальные потери испытуемой машины. Если для определения мощности на валу используется измеритель вращающего момента, максимальный измеряемый момент не должен превышать более чем в десять раз момент, соответствующий номинальным суммарным потерям испытуемой машины. Для машин с фазным ротором клеммы ротора должны быть замкнуты накоротко.

Испытуемая машина вращается с синхронной скоростью в направлении, противоположном нормальному чередованию фаз:

a) измеряется значение мощности P_{0rr}, передаваемой от приводной машины двигателю с отключенным от питания статором;

b) к статору двигателя прикладывается напряжение, при котором величина тока статора равна значениям, полученным при испытании с вынутым ротором.

Для каждого значения тока нагрузки регистрируются с индексом rr:

$I_{L,rr}$, R_{rr}, $P_{1,rr}$, $\theta_{w,rr}$ — ток в нагрузке, сопротивление обмотки, мощность, температура обмотки испытуемого двигателя и $P_{D,rr}$ — мощность приводного двигателя.

Примечание — Низкий коэффициент мощности при испытании может потребовать коррекции показаний ваттметра.

6.2.4.3 Определение КПД

Добавочные потери от нагрузки

Результаты интерполяции измерений мощностей статора $P_{1,rm}$ и $P_{1,rr}$, а также мощность вала $(P_{D,rr} - P_{0,rr})$ с применением процедуры регрессионного анализа с логарифмической связью токов и мощностей приводятся к следующим соотношениям.

$$P_{1,rm} = A_{rm} I^{N1} + B_{L,rm}; \quad P_{1,rr} - A_{rr} I^{N2} + B_{L,rr}; \quad \left(P_{D,rr} - P_{0,rr}\right) = A_{D,rr} I^{N3} + B_{D,rr}. \tag{41}$$

Сглаженные значения мощностей, таким образом, будут следующими:

$$P_{1,rm} = A_{rm} I^{N1}; \quad P_{1,rr} = A_{rr} I^{N2}; \quad \left(P_{D,rr} - P_{0,rr}\right) = A_{D,rr} I^{N3}. \tag{42}$$

Если данные получены правильно, соотношения между мощностью и током имеют квадратичный характер.

Добавочные потери от нагрузки равны $P_{LL} = P_{LL,rm} + P_{LL,rr}$, причем для каждого значения тока добавочные потери на основной частоте рассчитывают по формуле

$$P_{LL,rm} = P_{1,rm} - 3I^2 R_{s,rm}, \tag{43}$$

где $R_{s,rm}$ — сопротивление фазы статора, приведенное к средней температуре $\theta_{w,rm}$;

$$P_{LL,rr} = (P_{D,rr} - P_{0.rr}) - (P_{1,rr} - P_{LL,rm} - 3I^2 R_{s,rr}) \text{ — высокочастотные потери,}$$

где $R_{s,rr}$ — сопротивление фазы статора, приведенное к средней температуре $\theta_{w,rr}$.

Добавочные потери от нагрузки в требуемом режиме работы могут быть определены путем выполнения следующей процедуры.

a) Приблизительную величину тока нагрузки I_{NL}, соответствующую номинальной величине линейного тока статора, рассчитывают по формуле

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}, \tag{44}$$

где I_N — номинальная величина линейного тока статора;

I_0 — величина тока статора холостого хода.

Для тока нагрузки I_{NL} номинальную величину добавочных потерь от нагрузки P_{NLL} рассчитывают по формуле

$$P_{NLL} = A_{Drr} I_{NL}^{N3} + 2A_{rm} I_{NL}^{N1} - A_{rr} I_{NL}^{N2} - 6I_{NL}^2 \left(R_{s,rm} - 0{,}5R_{srr}\right). \tag{45}$$

b) Величину тока нагрузки I_L в любом режиме рассчитывают по формуле

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}, \tag{46}$$

где I — линейный ток статора в данном режиме.

c) Добавочные потери от нагрузки P_{LL} в данном режиме рассчитывают по формуле

$$P_{LL} = P_{NLL}\left(\frac{I_L}{I_{NL}}\right)^2, \quad (47)$$

Суммарные потери

Суммарные потери рассчитывают как сумму постоянных потерь, потерь под нагрузкой и добавочных потерь от нагрузки:

$$P_T = P_c + P_s + P_r + P_{LL}. \quad (48)$$

КПД

КПД определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (49)$$

где P_1 — входная мощность в испытании с номинальной нагрузкой,

P_2 — выходная мощность.

6.2.5 Метод 2-1-1G. Суммирование потерь с добавочными потерями от нагрузки, определяемыми методом звезды с асимметричным питанием

6.2.5.1 Общие **положения**

Как и в методе 2-1-1B, здесь КПД определяется суммированием отдельных потерь. Однако в данном случае добавочные потери от нагрузки определяются в схеме «звезда с асимметричным питанием». В остальном данный метод аналогичен методу 2-1-1B.

Для наглядности на рисунке 12 представлен алгоритм расчета КПД по данному методу.

6.2.5.2 Процедура испытания

При данном испытании двигатель работает на холостом ходу с несимметричным питанием. Схема испытания представлена на рисунке 13. Обмотки двигателя, предназначенные для соединения по схеме «треугольник», во время этого испытания должны быть соединены по схеме «звезда». Чтобы отсутствовали токи нулевой последовательности, нулевая точка «звезды» не должна быть соединена с нейтралью системы питания или с землей.

Одна из фаз двигателя должна быть связана с фазой сети посредством резистора R_{eh} (см. рисунок 7), имеющего приблизительно следующую величину:

- для схемы «звезда»: $$R'_{eh} = 0{,}2\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}, \quad (50)$$

- для схемы «треугольник»: $$R'_{eh} = 0{,}2\frac{\sqrt{3}U_N}{I_N}. \quad (51)$$

Резистор R_{eh}, используемый во время испытания, должен быть выбран таким образом, чтобы значение тока прямой последовательности $I_{(1)}$ было не более 30 % от значения тока обратной последовательности $I_{(2)}$, а частота вращения двигателя была близка к номинальной (см. ниже). Рекомендуется начать испытание с величины резистора R_{eh}, которая отличается не более чем на 20 % от расчетной величины R'_{eh}.

Значения токов при испытаниях I_t рассчитываются по формулам:

- для схемы «звезда»: $$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}, \quad (52)$$

- для схемы «треугольник»: $$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}}. \quad (53)$$

Напряжения при испытаниях U_t рассчитываются по формулам:

- для схемы «звезда»: $$U_t = U_N, \quad (54)$$

- для схемы «треугольник»: $$U_t = U_N\sqrt{3}. \quad (55)$$

Испытания начинаются, когда потери холостого хода стабилизируются согласно 6.1.3.2.4.

Регистрируются значения сопротивлений между зажимами V и W (R_{VW}) до начала и после полного завершения испытания.



Рисунок 12 — Определение КПД по методу 2-1-1G

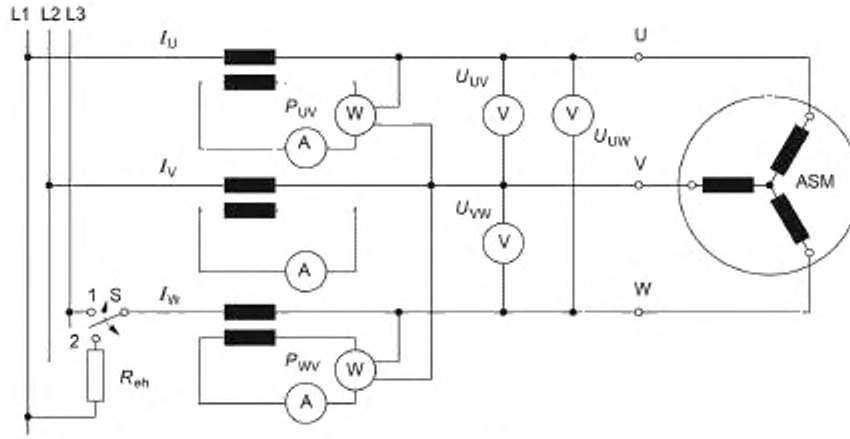


Рисунок 13 — Схема испытания «звезда с асимметричным питанием»

Чтобы избежать чрезмерного и неравномерного нагревания трех фаз, испытание должно быть проведено на холодной машине и как можно быстрее.

Испытание больших двигателей может быть начато без резистора R_{eh} (S переключается в положение 1 на рисунке 13) при пониженном напряжении (25—40 % от U_N). После разогрева присоединяется R_{eh} переводом переключателя S в положение 2.

Двигатели малой мощности запускаются с резистором R_{eh}. В этом случае переключатель S не нужен.

Напряжение питания регулируется для получения шести экспериментальных точек. Экспериментальные точки выбираются таким образом, чтобы значения фазных токов I_V были расположены приблизительно на одинаковом расстоянии от 150 % до 75 % от номинального тока фазы *V*. Испытание начинается с самого высокого тока и продолжается в порядке его убывания.

Линейное сопротивление R_{VW} для 100 %-ного испытательного тока и более низких значений определяется после испытания при самом низком значении тока (в конце испытания). Сопротивление, используемое для токов выше 100 %, должно быть определено как линейная функция тока, используя значения измерения до испытания и после его завершения. Сопротивление в результате испытания определяется путем экстраполяции согласно 5.7.1.

При каждом испытательном напряжении регистрируются значения:

I_U, I_V, I_W, U_{UV}, U_{VW}, U_{WU}, P_{UV}, P_{WV}, n.

Примечание — Значения сопротивления также могут быть определены при измерении температуры обмотки статора, для чего используются датчики температуры, установленные на обмотке. Значения сопротивления для каждого испытательного тока в этом случае могут быть определены по зависимости сопротивления от температуры в данной точке и температуры, измеренной перед началом испытания.

Широко применяемые ваттметры симметрируют три фазы двигателя, образуя виртуальную звезду. Однако при данном испытании используется принципиально несимметричное питание. Поэтому важно гарантировать, что отсутствует заземление нуля звезды и не установлена виртуальная звезда. Должна быть собрана цепь в точном соответствии с рисунком 7.

Для получения точных результатов скольжение не должно превышать двойного номинального для всех значений токов, иными словами, $n>n_{syn} - 2\,(n_{syn} - n_N)$. Если это условие не соблюдается, испытание должно быть повторено с увеличенной величиной R_{eh}. Если двигатель работает нестабильно при значении тока ниже 100 % от номинального тока фазы, данные экспериментальные точки должны быть опущены.

6.2.5.3 Определение КПД

Добавочные потери от нагрузки

Расчет значений измеряемых величин в каждой точке испытания производится в соответствии с формулами приложения А.

Сглаживание данных по добавочным потерям от нагрузки

Данные по добавочным потерям от нагрузки подвергаются процедуре линейного регрессионного анализа (см. рисунок 4).

Потери должны быть выражены как функция квадрата тока обратной последовательности $I_{i(2)}$ относительно тока I_t:

$$P_{Lr} = A\left(I\frac{I_{i(2)}}{I_t}\right)^2 + B. \qquad (56)$$

A и *B* должны быть вычислены по процедуре, описанной в 6.1.3.2.6.

Когда коэффициент *A* будет определен, величина добавочных потерь при номинальной нагрузке рассчитывается по формуле

$$P_{LL} = AT^2.$$

Суммарные потери

Суммарные потери рассчитываются как сумма постоянных потерь, потерь под нагрузкой и добавочных потерь от нагрузки:

$$P_T = P_c + P_s + P_r + P_{LL}. \qquad (57)$$

КПД

КПД определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (58)$$

где P_1 — входная мощность в испытании с номинальной нагрузкой;

P_2 — выходная мощность.

6.2.6 Метод 2-1-1Н. Определение КПД методом схем замещения

6.2.6.1 Общие положения

Этот метод может быть применен в том случае, когда невозможно испытание под нагрузкой. Он основан на Т-образной схеме замещения фазы асинхронной машины, включающей эквивалентное активное сопротивление R_{fe} для учета потерь в стали, параллельное реактивному сопротивлению цепи намагничивания X_m (см. рисунок 14). Сопротивления ротора приведены к статору, что обозначено апострофом в символах, например $X'_{\sigma r}$.

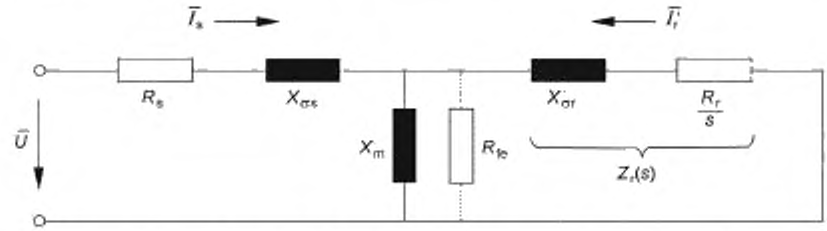


Рисунок 14 — Т-образная схема замещения асинхронного двигателя с эквивалентным сопротивлением R_{fe} для учета потерь в стали

Применение данного метода к асинхронным машинам требует знания следующих величин:

$X_{\sigma s}/X'_{\sigma r}$ — отношение реактивных сопротивлений полей рассеяния статора и ротора;

α_r — температурный коэффициент обмотки ротора (проводимость относительно 0 °С);

$X_{\sigma s}$, X_m — реактивные сопротивления рассеяния статора и цепи намагничивания.

Примечание 1 — При использовании метода схемы замещения все напряжения, токи и полные сопротивления являются фазными для трехфазной машины в схеме «звезда», активные и реактивные мощности относятся к машине в целом.

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

Для наглядности на рисунке 15 представлен алгоритм расчета КПД по данному методу.

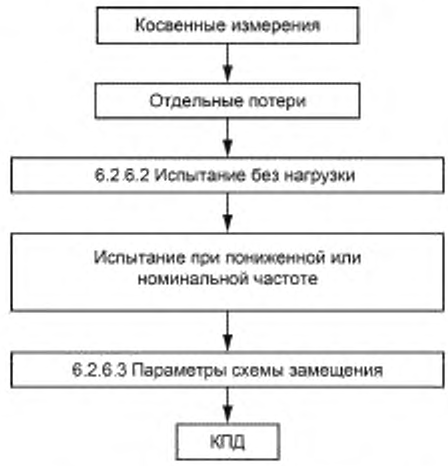


Рисунок 15 — Определение КПД по методу 2-1-1Н

6.2.6.2 Процедура испытания

Испытание без нагрузки

Потери без нагрузки должны принять установившееся значение при номинальной частоте и напряжении.

Потери холостого хода считают установившимися, если подводимая мощность, измеряемая дважды с интервалом 30 мин, изменяется не более чем на 3 %.

Испытание при пониженной частоте

Машина с заторможенным ротором питается от трехфазного регулируемого преобразователя частоты, способного устанавливать частоты до 25 % от номинальной при номинальном токе. Среднее значение сопротивления должно быть получено по результатам измерений при различных положениях ротора относительно статора.

Во время испытаний преобразователь частоты, будь он электромашинный или статический, должен на выходе обеспечивать практически синусоидальный ток.

Обмотка ротора машины с фазным ротором должна быть при испытании короткозамкнута.

При испытании машина питается номинальным током минимум на трех частотах: первой — не менее чем 25 %, а второй и третьей — между 25 % и 50 % от номинальной частоты. Во время этого кратковременного испытания температура статорной обмотки не должна повыситься более чем на 5 °С.

При испытаниях для трех значений частот регистрируют значения:

U, I, f, P_1, R_s, θ_c, θ_w.

Испытания при номинальной частоте

Значение полного сопротивления может быть определено с помощью следующих испытаний.

a) Реактивное сопротивление определяется при испытании при заторможенном роторе, номинальных частоте и токе и пониженном напряжении. Регистрируются значения напряжения, тока, мощности, частоты и температуры.

b) Сопротивление ротора определяется одним из двух испытаний:

1) при номинальной частоте и номинальном напряжении с уменьшенной нагрузкой регистрируются значения напряжения, мощности, тока, скольжения и температуры для каждого значения нагрузки;

2) при отключении от сети двигателя, работавшего на холостом ходу при номинальной частоте и номинальном напряжении, регистрируются значения напряжения разомкнутой цепи статора и температуры обмотки в функции времени.

Примечание — Данное испытание предполагает относительно низкий ток вытеснения в роторе.

6.2.6.3 Определение КПД

Измеряемые величины

Метод основан на Т-образной схеме замещения (см. рисунок 14).

Примечание — При использовании данного метода все напряжения, токи и полные сопротивления являются фазными для трехфазной машины, включенной по схеме «звезда»; активные и реактивные мощности относятся к машине в целом.

Данная процедура основана на методе испытания при пониженной частоте. При использовании метода при номинальной частоте необходимо учесть следующее:

a) реактивные сопротивления вычисляются согласно нижеследующему;

b) приведенное сопротивление ротора определяется:

- при испытании с номинальной частотой, описанном в б), обратным расчетом для схемы замещения на рисунке 14, вычислением R_r'. Величина R_r' привязывается к условию, при котором значение расчетной мощности находится в пределах 0,1 % от измеренной мощности или значение расчетного тока — в пределах 0,1 % от измеренного тока;

- при испытании с номинальной частотой, описанном в б), вычислением постоянной времени по графику, иллюстрирующему темп снижения напряжения при отключении цепи статора. R_r' рассчитывается по формуле

$$R_r' \approx \frac{\left(X_m + X_{\sigma r}'\right)}{2\pi f \tau_0}, \tag{59}$$

где X_m — реактивное сопротивление цепи намагничивания;

$X_{\sigma r}'$ — реактивное сопротивление рассеяния ротора;

f — частота;

τ_0 — постоянная времени разомкнутой цепи.

Величина R_r', найденная при испытании, приводится к сопротивлению при рабочей температуре.

Определение реактивных мощностей

Реактивные мощности определяются:

- при испытании без нагрузки при номинальном напряжении $U_0 = U_N$ и номинальной частоте:

$$P_{Q,0} = \sqrt{(3U_0 I_0)^2 - P_0^2}, \tag{60}$$

- при испытании с заторможенным ротором с уменьшенной частотой:

$$P_{Q,I_r} = \sqrt{(3UI)^2 - P_1^2}, \tag{61}$$

где U_0, I_0 и P_0 — фазные напряжение и ток, а также подводимая мощность при испытании без нагрузки при номинальном напряжении;

U, I и P_1 — фазные напряжение и ток, а также подводимая мощность при испытании с заторможенным ротором при частотах f в данном испытании.

Параметры схемы замещения

Параметры схемы замещения определяются в несколько этапов.

Реактивное сопротивление X_m по результатам испытания без нагрузки и $X_{\sigma s,Lr}$ по испытанию с заторможенным ротором при значении частоты 25 % от номинальной рассчитывают по формулам:

$$X_m = \frac{3U_0^2}{\left(P_{Q,0} - 3I_0^2 X_{\sigma s}\right)\left(1 + \dfrac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}, \quad X_{\sigma s,L_r} = \frac{P_{Q,L_r}}{3I^2\left(1 + \dfrac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \dfrac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)}\left(\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right), \tag{62}$$

$$X_{\sigma s} = \frac{f_N}{f_{L_r}} X_{\sigma s,L_r}, \quad X'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma s}}{X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}}. \tag{63}$$

Расчет проводится с использованием следующих величин в качестве исходных:

$$X_{\sigma s}, X_m \text{ и } X_{\sigma s}/X'_{\sigma r}. \tag{64}$$

Расчет повторяют до тех пор, пока значения $X_{\sigma s}$ и X_m не станут отличаться менее чем на 0,1 % от значений, полученных на предыдущем этапе.

Сопротивление потерь в стали

Сопротивление, характеризующее потери в стали на фазе при номинальном напряжении, рассчитывают по формуле

$$R_{fe} = \frac{3U_{N,ph}^2}{P_{fe}\left(1 + \dfrac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}, \tag{65}$$

где P_{fe} — потери в стали согласно разделу 6.1.3.2.5 по значению P_0 при номинальном напряжении.

Сопротивление ротора

Нескорректированное сопротивление ротора рассчитывается для каждого измерения реактивного сопротивления при проведении испытаний при заторможенном роторе и на различных частотах по формуле:

$$R'_{r,Lr} = \left(\frac{P_1}{3I^2} - R_s\right)\left(1 + \frac{X'_{\sigma r}}{X_m}\right) - \left(\frac{X'_{\sigma r}}{X_{\sigma s}}\right)^2 \frac{X_{\sigma s,Lr}^2}{R_{fe}}, \tag{66}$$

где R_s — сопротивление обмотки фазы статора при температуре испытания θ_W.

Примечание — Температура обмотки ротора может сильно отличаться от температуры обмотки статора, поэтому метод неточен.

Сопротивление ротора приводят к нормативной температуре (см. 5.7.2 и таблицу 1) для каждой частоты и рассчитывают по формуле

$$R''_{r,\mathrm{Lr}} = R'_{r,\mathrm{Lr}} \frac{1 + \alpha_r \theta_{\mathrm{ref}}}{1 + \alpha_r \theta_w}. \qquad (67)$$

После вычисления значения строится график зависимости $R''_{r,\mathrm{Lr}}$ от частоты f_{Lr}. Точка пересечения графика с $f_{\mathrm{Lr}} = 0$ дает значение сопротивления ротора R'_r.

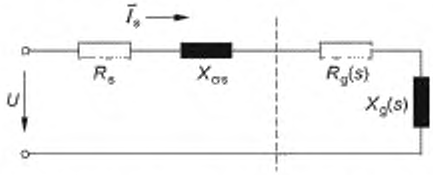


Рисунок 16 — Упрощенная схема замещения асинхронной машины

Для каждого заданного промежуточного значения нагрузки вычисляются значения полного, активного, реактивного сопротивлений и проводимости (см. рисунок 9) в зависимости от скольжения:

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R'_r}{s}\right)^2 + X^2_{\sigma r}}, \quad Y_g = \sqrt{\left(\frac{R'_r / s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{\mathrm{fe}}}\right)^2 + \left(\frac{X'_{\sigma r}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2},$$

$$R_g = \frac{\dfrac{R'_r / s}{Z_r^2} + \dfrac{1}{R_{\mathrm{fe}}}}{Y_g^2}, \quad X_g = \frac{\dfrac{X'_{\sigma r}}{Z_r^2} + \dfrac{1}{X_m}}{Y_g^2}. \qquad (68)$$

Затем вычисляются значения сопротивлений относительно клемм по формулам:

$$R = R_s + R_g, \quad X = X_{\sigma s} + X_g, \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \qquad (69)$$

где s — скольжение;

R_s — сопротивление фазы обмотки статора при нормативной температуре θ_{ref}.

Токи и потери

В следующей последовательности рассчитываются:

- ток фазы статора $I_s = \dfrac{U_{\mathrm{N}}}{Z}$;

- ток фазы ротора $I'_r = I_s \dfrac{1}{Y_g Z_r}$;

- мощность, передаваемая в ротор через зазор, $P_\delta = 3I'^2_r \dfrac{R'_r}{s}$;

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

- потери в обмотках статора и ротора $P_s = 3I_s^2 R_s$, $P_r = 3I'^2_r R'_r$;

- добавочные потери под нагрузкой $P_{\mathrm{LL}} = P_{\mathrm{LL,N}} \left(\dfrac{I'_r}{I'_{r,\mathrm{N}}}\right)^2$, зависящие от величины $P_{\mathrm{LL,N}}$ при номинальной нагрузке, назначенной (согласно методу C), или измеренной в испытании с обратным направлением вращения (метод F), или определенной по методу «звезды» с асимметричной нагрузкой (метод G).

Суммарные потери рассчитываются по формуле

$$P_{\mathrm{T}} = P_s + P_{\mathrm{fe}} + P_r + P_{\mathrm{LL}} + P_{\mathrm{fw}}. \qquad (70)$$

Поскольку входная мощность и мощность на валу равны соответственно $P_1 = 3I_s^2R$, а $P_2 = P_1 - P_T$, то нарушение баланса мощностей должно быть исправлено повторением расчета тока и потерь до тех пор, пока P_2 для двигательного режима или P_1 для генераторного режима не будет обеспечивать баланс.

КПД в двигательном режиме рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (71)$$

7 Методы определения КПД синхронных машин

7.1 Предпочтительные методы испытаний

7.1.1 Общие положения

Данный стандарт предписывает три предпочтительных метода испытаний, обладающих высокой точностью в своей сфере применения, которые представлены в таблицах 4 и 5. Применяемый метод зависит от высоты вала или номинальной мощности испытуемой машины и описан ниже.

Метод 2-1-2A. Прямое измерение мощности на входе и выходе с использованием динамометра. Применяется для всех машин с высотой вала до 180 мм включительно и с возбуждением от постоянных магнитов для всех мощностей.

Метод 2-1-2B. Метод суммирования отдельных потерь испытаниями с полной нагрузкой и коротким замыканием для определения добавочных потерь от нагрузки. Применяется для всех машин с высотой вала более 180 мм и мощностью до 2 МВт включительно.

Метод 2-1-2C. Метод суммирования отдельных потерь без полного нагружения и коротким замыканием для определения добавочных потерь от нагрузки. Применяется для всех машин мощностью более 2 МВт.

Таблица 4 — Синхронные машины с электрическим возбуждением. Предпочтительные методы испытаний

Обозначение	Метод	Описание	Раздел	Применение	Ресурсы
2-1-2A	Прямое измерение: Вход-выход	Измерение момента	7.1.2	Высота вала ≤180 мм	Динамометр на полную нагрузку
2-1-2B	Суммирование потерь с испытанием при номинальной нагрузке и коротком замыкании	Измерение P_{LL} при испытании с коротким замыканием	7.1.3	Высота вала более 180 мм до мощности 2 МВт	Электромашинный агрегат на полную нагрузку
2-1-2C	Суммирование отдельных потерь по номинальной мощности	Определение P_{LL} по номинальной мощности	7.1.4	Трехфазные машины номинальной мощностью более 2 МВт	

Примечание — В данной таблице H — высота оси (расстояние от геометрической оси вала до основания лап) в миллиметрах (предпочтительные числа приведены в IEC 60072-1).

7.1.2 Метод 2-1-2A. Прямое измерение входной и выходной мощности

7.1.2.1 Общие положения

В данном разделе приведен метод испытаний, при котором механическая мощность P_{mech} машины определяется из измеренных величин вращающего момента на валу и скорости. Одновременно измеряется электрическая мощность P_{el} в статоре машины.

Данная процедура применяется также для синхронных машин с постоянными магнитами.

Входными и выходными мощностями являются:

- при работе в режиме двигателя: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$ (см. рисунок 17);
- при работе в режиме генератора: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$.

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 18.

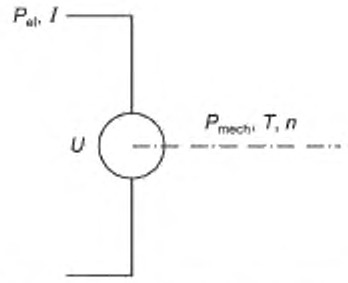


Рисунок 17 — Схема измерения момента



Рисунок 18 — Определение КПД по методу 2-1-2А

7.1.2.2 Процедура испытания

При испытании двигатель соединяется с нагрузочной машиной или генератор с приводным двигателем через измеритель вращающего момента. К испытуемой машине прикладывается требуемая нагрузка.

При каждом испытании регистрируются значения U, I, P_{el} n, T, θ_c.

Измерения в цепи возбуждения, если требуется, проводятся согласно 5.9.

7.1.2.3 Определение КПД

КПД рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}. \quad (72)$$

Потребляемая P_1 и отдаваемая P_2 мощности определяются:

- в двигательном режиме работы $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- в генераторном режиме работы $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$,

где $P_{mech} = 2\pi Tn$;

P_{1E} определяется в соответствии с 5.9.

Примечание — Потери в цепи возбуждения, не покрываемые мощностью P_{1E}, покрываются со стороны вала.

7.1.3 Метод 2-1-2В. Суммирование отдельных потерь испытаниями на нагрев с полной нагрузкой и испытанием при коротким замыкании

7.1.3.1 Общие положения

В данном методе испытаний КПД определяется суммированием отдельных потерь. Рассматриваются следующие составляющие потерь:

- потери в стали;
- потери на трение и вентиляцию;
- потери в меди статора и ротора;
- потери в цепи возбуждения;
- добавочные потери от нагрузки.

Данный метод не применим для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

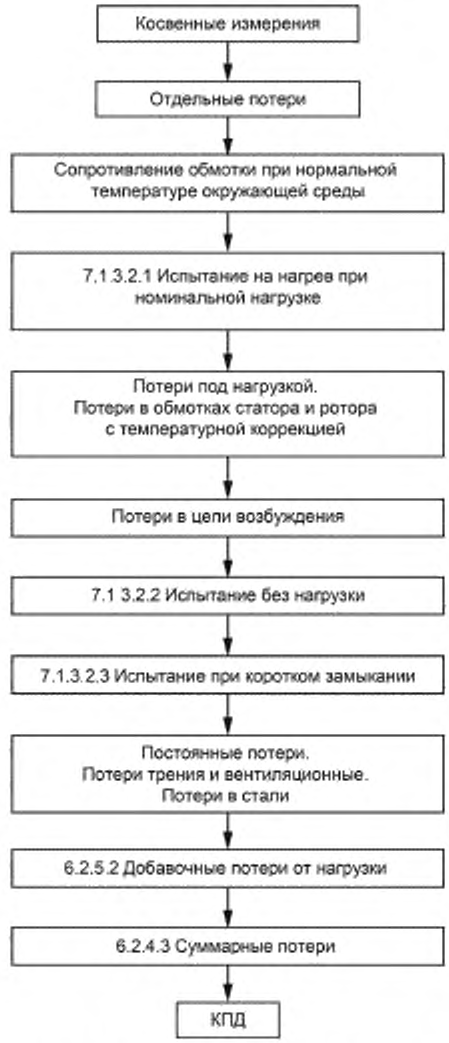


Рисунок 19 — Определение КПД методом 2-1-2В

На рисунке19 представлен алгоритм процедуры определения КПД данным методом.

7.1.3.2 Процедура испытания

7.1.3.2.1 Испытание на нагрев при номинальной нагрузке

Этому испытанию предшествует измерение температуры и сопротивления обмоток при нормальной температуре окружающей среды.

Машина нагружается любым доступным способом и, питаясь от сети в номинальном режиме, работает до достижения температурного равновесия (изменение температуры не более 1 °С за полчаса).

В конце испытания с номинальной нагрузкой регистрируются результаты усреднения как минимум по трем измерениям каждой из следующих величин:

- P_N, I_N, U_N, f, θ_c, θ_N;
- $R_N = R$ (сопротивление в испытании с номинальной нагрузкой по 5.7.1);
- θ_N (температура обмотки в испытании с номинальной нагрузкой по 5.7.1);
- значения параметров системы возбуждения в соответствии с 5.9.

Потери в обмотке статора

Потери в обмотке статора рассчитываются по формуле:

$$P_s = 1{,}5I^2R_{ll}, \quad (73)$$

где R_{ll} — значение линейного сопротивления обмотки, приведенное к нормальной температуре хладагента 25 °С (в соответствии с 5.7.1).

Потери в обмотке возбуждения

Потери в обмотке возбуждения находятся по формуле

$$P_f = I_f U_f. \quad (74)$$

Электрические потери в щетках

Потери в щетках рассчитываются по формуле

$$P_b = 2U_b I_e, \quad (75)$$

где I_e — значение тока, соответствующее полученному при испытании под нагрузкой;

U_b — справочное падение напряжения на щетке в зависимости от ее типа:

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

0,3 В — для металлоуглеродных щеток.

Потери в возбудителе

Возбудитель отсоединяется, если это возможно, от основной машины и присоединяется:

a) к измерителю вращающего момента для определения подводимой механической мощности согласно методу прямого измерения («вход-выход»);

b) тарированному двигателю для измерения потребляемой им электроэнергии.

Возбудитель присоединяется (в случае синхронной машины, возбуждаемой через контактные кольца) к подходящей резистивной нагрузке. На возбудителе устанавливаются значения напряжения U_e и тока I_e для обеспечения номинального значения нагрузки.

При каждом испытании регистрируются значения:

U_e, I_e, P_{1E}, n, T_E — напряжения, тока, потерь, частоты вращения и вращающего момента возбудителя для номинальной нагрузки;

$T_{E,0}$ — вращающего момента с неподключенным возбудителем.

Потери в возбудителе определяются по формуле

$$P_{Ed} = 2\pi n\,(T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f. \quad (76)$$

Если возбудитель не может быть отсоединен от машины, потери возбудителя должны быть сообщены изготовителем.

Суммарные потери в цепи возбуждения рассчитываются по формуле

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b. \quad (77)$$

7.1.3.2.2 Испытание без нагрузки

Машина может быть испытана как при работе со свободным концом вала, так и при соединении с приводным двигателем, работая в генераторном режиме (получая мощность с вала, к которому приложен момент, измеряемый по методу «вход-выход».

Данное испытание следует проводить на разогретой машине непосредственно после испытания при номинальной нагрузке.

Если разогреть машину не представляется возможным, можно начинать испытание с холодной машины, однако потери на холостом ходу должны стабилизироваться при номинальном напряжении и частоте (следует добиться регулировкой тока возбуждения) с единичным коэффициентом мощности (минимальный ток) при работе машины с отсоединенным валом.

Машина с возбудителем на валу (см. 3.15.3.3,a) должна быть возбуждена от отдельного источника, а возбудитель отсоединен от источника питания и обмотки возбуждения.

Потери холостого хода считают установившимися, если подводимая мощность, измеряемая дважды с интервалом 30 мин, изменяется не более чем на 3 %.

Испытание проводится при минимум 8 значениях напряжения, включая номинальное, так, чтобы:

- не менее четырех значений располагались с приблизительно одинаковым интервалом в пределах приблизительно от 110 % до 80 % от номинального напряжения;

- не менее четырех значений располагались с приблизительно одинаковым интервалом в пределах от 70 % до 30 % от номинального напряжения или (для машины со свободным концом вала) до напряжения, при котором ток перестает уменьшаться.

Испытание должно быть выполнено как можно быстрее с изменением значения напряжения в сторону убывания.

При каждом испытании регистрируются значения U_0, I_0, P_0.

Сопротивление R_0 определяется непосредственно перед и после испытаний без нагрузки.

Зависимость сопротивления обмотки от мощности P_0 находится путем линейной интерполяции по всем экспериментальным точкам до и после испытания.

Примечание 1 — R_0 представляет собой $R_{ll,0}$. Если измерение сопротивления затруднительно ввиду малой величины, допустимо его вычисление.

Для двухмашинного агрегата P_0 определяется по моменту T и частоте вращения n.

Измерения в цепи возбуждения проводят согласно 5.9.

Примечание 2 — Для больших синхронных машин рекомендуется записать и другие величины, влияющие на КПД. Например, температуру хладагента, чистоту и давление газа, температуру и вязкость смазки подшипниковых узлов.

Постоянные потери

Для каждого значения напряжения, заданного в 6.4.2.3, постоянные потери рассчитывают по формуле

$$P_c = P_0 - P_s, \tag{78}$$

где

$$P_s = 1{,}5\, I_0^2 R_{ll,0}. \tag{79}$$

Для машин с бесщеточными возбудителями потери в цепи возбуждения рассчитываются по формуле

$$P_c = P_0 - P_s - P_{f,0} - P_{Ed,0} + P_{1E,0}, \tag{80}$$

где $P_{f,0}$ — потери в обмотке возбуждения на холостом ходу;

$P_{Ed,0}$ — потери в возбудителе (см. выше) для соответствующих значений U_e и I_e при испытании;

$P_{1E,0}$ — мощность согласно 5.9 для соответствующих значений U_e и I_e при испытании.

Потери на трение и вентиляционные потери

При испытании без нагрузки по 6.4.2.3 для значений напряжения U_0, при которых отсутствует заметное насыщение, строится зависимость постоянных потерь P_c от квадрата напряжения U_0^2, которая экстраполируется прямой линией до пересечения с осью потерь (при напряжении, равном 0). Точка пересечения соответствует потерям трения и вентиляционным P_{fw}.

Примечание — Предполагается, что найденные потери трения и вентиляционные постоянны при любом значении нагрузки.

Потери в стали

Для каждого значения напряжения по 6.4.2.3 строится кривая постоянных потерь в функции напряжения. Для получения потерь в стали необходимо из значения постоянных потерь вычесть потери трения и вентиляционные:

$$P_{fe} = P_c - P_{fw}. \tag{81}$$

7.1.3.2.3 Испытание при коротком замыкании

Испытание при коротком замыкании в двухмашинном агрегате

Испытуемая машина с короткозамкнутой обмоткой якоря (статора) соединена с приводным двигателем, при этом регистрируется вращающий момент с помощью измерителя момента или динамометра (см. метод 2-1-2А). Машина работает на номинальной скорости при таком возбуждении, чтобы значение тока в короткозамкнутой обмотке было равно номинальному.

Если испытывается машина с возбудителем на валу (см. 3.15.3.3а), то она должна быть возбуждена от независимого источника, а возбудитель отключен от питания и обмотки возбуждения.

Предполагается, что сумма потерь от нагрузки и добавочных потерь не зависит от температуры и приведение к нормативной температуре не требуется. Предполагается также, что добавочные потери изменяются в функции квадрата тока статора.

При проведении испытания регистрируются значения T, n, I.

Измерения в цепи возбуждения проводятся согласно 5.9.

Испытание при коротком замыкании машины со свободным концом вала

Машина работает как синхронная с постоянным напряжением, предпочтительно равным 1/3 номинального или меньшим, при котором достигается устойчивая работа. Ток якоря регулируется потоком

возбуждения. Он устанавливается на шести уровнях в пределах от 125 % до 25 % от номинального, включая одну или две точки с минимальным значением. Максимальное значение выбирается обычно 125 %, если только производитель не ограничивает его по соображениям безопасного нагрева значением 100 % номинального. Начинать следует с максимального значения тока, чтобы обеспечить одинаковые температурные условия на протяжении всего испытания.

Регистрируются значения P_1, I, U.

Измерения в цепи возбуждения проводятся согласно 5.9.

Примечание — Для больших машин максимальный уровень тока может быть ограничен значениями от 60 % до 70 % номинального.

Добавочные потери от нагрузки

Испытание с двухмашинным агрегатом

Добавочные потери от нагрузки при номинальном токе рассчитываются по значению подведенной мощности при коротком замыкании за вычетом потерь на трение, вентиляционных P_{fw} и потерь от нагрузки при номинальном токе по формуле

$$P_{LL,N} = 2\pi n\ T - P_{fw} - P_s. \quad (82)$$

Для машин с бесщеточным возбудителем потери рассчитываются по формуле:

$$P_{LL,N} = 2\pi n\ T + P_{1E} - P_{fw} - P_s - P_f - P_{Eq}. \quad (83)$$

Для отличных от номинального значений нагрузки добавочные потери рассчитываются по формуле:

$$P_{LL} = P_{LL,N}\ (I / I_N)^2. \quad (84)$$

Испытание машины со свободным концом вала

Для определения добавочных потерь от нагрузки при любом токе якоря постоянные потери P_c и потери в обмотке якоря P_s при данном токе должны быть вычтены из входной мощности при том же токе.

7.1.3.3 Определение КПД

КПД определяется по формуле:

$$\eta \approx \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} \approx \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (85)$$

где P_1 — потребляемая мощность, без учета мощности цепи возбуждения, питающейся от отдельного источника;

P_2 — отдаваемая мощность;

P_{1E} — мощность цепи возбуждения, питающейся от отдельного источника,

Примечание 1 — Как правило, первое выражение чаще используется для двигателя, а второе — для генератора.

Примечание 2 — Суммарные потери P_T включают мощность возбуждения P_e (см. 6.2) машины, когда это возможно.

Суммарные потери P_T, включая потери в цепи возбуждения, рассчитываются по формуле

$$P_T = P_c + P_s + P_{LL} + P_e. \quad (86)$$

7.1.4 Метод 2-1-2C. Суммирование отдельных потерь без испытания при полной нагрузке

Метод 2-1-2C может быть применен для машин мощностью более 2 МВт. Процедура, в принципе, аналогична проводимой по методу 2.1.1B. Единственная разница заключается в том, что тепловое испытание при номинальной нагрузке заменяется определением тока возбуждения по методу диаграмм ASA, Шведской или Потье (см. IEC 60034-4).

В остальном процедуры определения потерь и КПД аналогичны применяемым в методе 2-1-2B.

На рисунке 20 представлен алгоритм процедуры определения КПД данным методом.

Перед данным испытанием должны быть получены результаты испытаний по определению насыщения в режиме холостого хода, опыта установившегося трехфазного короткого замыкания и испытания с перевозбуждением при нулевом коэффициенте мощности в соответствии с п.п. 6.4, 6.5 и 6.8 IEC 60034-4:2008.

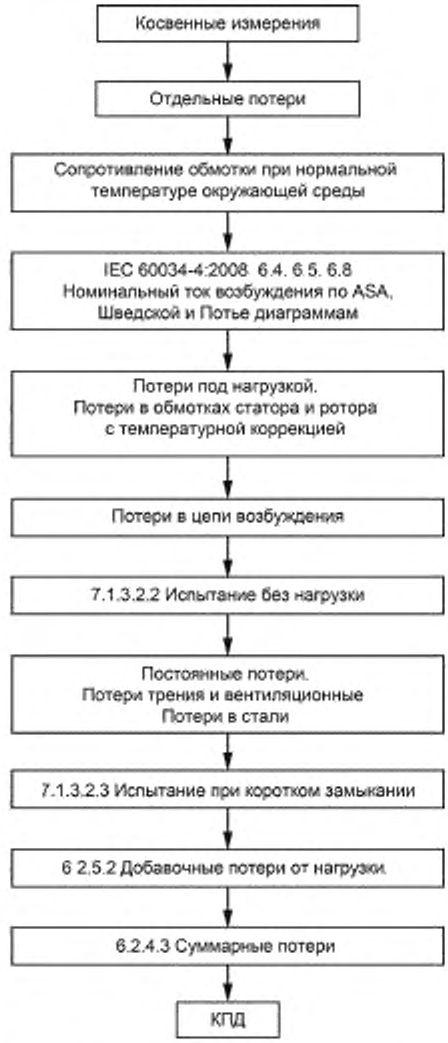


Рисунок 20 — Определение КПД методом 2-1-2С

Определение КПД производится по 7.1.3 методом 2-1-2В.

Данная процедура не применима для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

7.2 Методы эксплуатационных и типовых испытаний

7.2.1 Общие положения

Данные методы используются для любых испытаний, в частности, эксплуатационных, приемочных и типовых.

Кроме того, они могут быть использованы вне рамок мощностей, указанных в таблицах 4 и 5.

Данные методы, регламентированные настоящим стандартом, перечислены в таблице 6.

Таблица 6 — Синхронные машины: другие методы испытаний

Обозначение	Метод	Описание	Раздел	Ресурсы
2-1-2D	Испытание в двухмашинном агрегате при питании от двух сетей	Испытание в двухмашинном агрегате при питании от двух сетей	7.2.2	Две одинаковые машины
2-1-2E	Испытание в двухмашинном агрегате при питании от одной сети	Испытание в двухмашинном агрегате при питании от одной сети	7.2.3	Две одинаковые машины
2-1-2F	Испытание с нулевым коэффициентом мощности и током возбуждения по диаграмме Потье / ASA / Шведской	Ток возбуждения определяется по диаграмме Потье / ASA / Шведской	7.2.4	Источник питания на полное напряжение и ток
2-1-2G	Суммирование за исключением P_{LL}	Без учета P_{LL}	7.2.5	Двухмашинный агрегат на полную нагрузку

7.2.2 Испытание в двухмашинном агрегате при питании от двух сетей

7.2.2.1 Общие положения

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 21.



Рисунок 21 — Определение КПД по методу 2-1-2D

Данная процедура не применима для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

7.2.2.2 Процедура испытания

Две одинаковые машины соединяются механически так, как показано на рисунке 22.

Питание машин при испытании можно менять, однако приборы и измерительные преобразователи должны оставаться в цепи одной и той же машины.

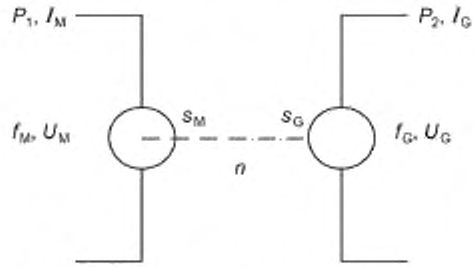


Рисунок 22 — Схема испытания с двухмашинным агрегатом (для синхронных машин $I_M = I_G$, $f_M = f_G$)

Значения напряжения и тока обеих машин должны быть одинаковыми, а испытуемая машина (двигатель или генератор со своими номинальными данными) должна иметь номинальный

коэффициент мощности. Это можно осуществить с помощью агрегата из синхронной машины и машины постоянного тока, отводящей энергию генератора в сеть.

Примечание — Коэффициент мощности и поток возбуждения второй машины будут отличаться от номинальных значений из-за потерь в двухмашинном агрегате.

Далее двигатель и генератор меняются местами, и испытание повторяется.

При каждом испытании регистрируются значения:

$$U, I, f, P_1, P_2\cos\varphi_M, \cos\varphi_G.$$

Измерения в цепи возбуждения проводятся согласно 5.9.

7.2.2.3 Определение КПД

Если две соединенные машины работают в номинальных условиях, КПД должен быть рассчитан, исходя из учета половины суммарных потерь и средней потребляемой мощности двигателя и генератора, по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}}, \quad (87)$$

где P_T, P_{1E} рассчитываются по формулам:

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + P_{1E}, \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G}). \quad (88)$$

P_{1E} определяется в соответствии с 5.9.

7.2.3 Метод 2-1-2E. Испытание в двухмашинном агрегате при питании от одной сети

7.2.3.1 Общие положения

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 23.



Рисунок 23 — Определение КПД по методу 2-1-2E

Данная процедура не применима для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

7.2.3.2 Процедура испытания

Две одинаковые машины соединяются механически, а электрически подключаются к одной сети для работы с номинальным напряжением и скоростью одна в качестве двигателя, а другая — в качестве генератора.

Примечание — Как вариант, потери могут быть созданы калиброванным приводным двигателем.

Две машины соединяются механически (как показано на рисунке 24) с таким угловым сдвигом роторов, что одна из машин работает с заданной нагрузкой, при которой измеряется КПД, а другая — с тем же самым абсолютным значением статорного тока.

Сдвиг роторов представляет собой электрический угол α, примерно равный удвоенному значению угла отставания ротора при необходимом режиме нагрузки. При данном напряжении циркулирующая мощность зависит от угла α и от токов возбуждения двигателя и генератора. Необходимо установить ток возбуждения и коэффициент мощности на одной машине номинальными, а определение отклонения тока возбуждения от номинальной величины на другой машине может потребоваться для уточнения условий.

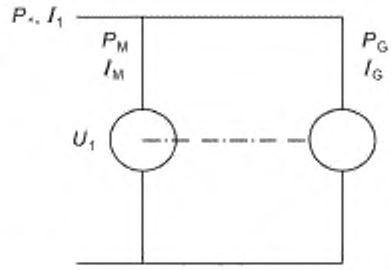


Рисунок 24 — Схема двухмашинного синхронного агрегата с общим питанием

При каждом испытании регистрируются значения:
- U_1, I_1, P_1 — напряжения, тока и мощности питающей сети;
- I_M, P_M — тока и мощности, подводимых на клеммы двигателя;
- I_G,P_G — тока и мощности генератора;
- измерения в цепи возбуждения проводятся согласно 5.9.

7.2.3.3 Определение КПД

Если две соединенные машины работают в номинальных условиях, КПД рассчитывается исходя из учета половины суммарных потерь каждой машины по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}}, \quad (89)$$

где P_M — мощность, потребляемая машиной, работающей в двигательном режиме (без учета мощности возбуждения);

P_T — суммарные потери, определяются как половина общей суммы поглощенной мощности:

P_{1E} — мощность, создаваемая отдельным источником;

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

7.2.4 Метод 2-1-2F.Испытание с нулевым коэффициентом мощности и током возбуждения по диаграмме Потье / ASA / Шведской

7.2.4.1 Общие положения

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 25.

Данная процедура не применима для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

7.2.4.2 Процедура испытания

7.2.4.2.1 Общие положения

Перед началом данного испытания должны быть получены результаты испытания по определению насыщения в режиме холостого хода, по опыту установившегося трехфазного короткого замыкания и испытанию с перевозбуждением при нулевом коэффициенте мощности в соответствии с разделами 6.4, 6.5 и 6.8 IEC 60034-4:2008.

Получение результатов испытания без нагрузки происходит в соответствии с разделом 7.1.3.2.2 настоящего стандарта.

7.2.4.2.2 Испытание с нулевым коэффициентом мощности

Перевозбужденная машина со свободным концом вала работает в двигательном режиме на номинальной скорости. Значение напряжения питания устанавливается таким, чтобы электродвижущая сила E и значение тока якоря I (при близком к нулю коэффициенте мощности) соответствовали требуемой нагрузке.

Примечание 1 — E — векторная сумма напряжения на зажимах и реактивного падения напряжения в соответствии с разделом 7.26.2IEC 60034-4:2008.

Испытание должно проводиться при температуре, близкой к установившейся в номинальном режиме. Коррекции температуры обмотки при этом не требуется.



Рисунок 25 — Определение КПД по методу 2-1-2F

В данном испытании значение напряжения питания должно быть таким, чтобы потери в стали были эквивалентны тем, что имеют место при номинальном напряжении и номинальном коэффициенте мощности под нагрузкой. Если значение напряжения питания не устанавливается и равно номинальному, активные потери в стали значительно отличаются от таковых при полной нагрузке. В принципе, реактивная мощность может вырабатываться (при перевозбужденной машине), но когда это невозможно из-за ограниченного напряжения возбудителя, испытание может проводиться при потреблении реактивной мощности (недовозбужденная машина), если возможен устойчивый режим работы.

Потери в обмотке возбуждения при заданной нагрузке могут быть найдены по значению тока возбуждения согласно разделу 7.26.2 (диаграмма Потье), 7.26.3 (диаграмма ASA), или пункту 7.26.4 (Шведская диаграмма) IEC 60034-4:2008. Определение потерь возбудителя производится согласно разделу 6.4.3.3.

Примечание 2 — Точность данного метода зависит от точности ваттметра и измерительных трансформаторов при малом коэффициенте мощности.

При каждом испытании регистрируются значения:

U_1, f, I, $P_{1,zpf}$ — напряжения, частоты, тока и мощности питающей сети при нулевом коэффициенте мощности;

θ_c, θ_w — начальной температуры охлаждающей среды, температуры обмотки.

Измерения в цепи возбуждения проводятся в соответствии с 5.9.

7.2.4.3 Определение КПД

7.2.4.3.1 Общие положения

Для каждого значения нагрузки рассчитывается КПД в соответствии с 6.4.1.2:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_1 + P_{1E}}, \quad (90)$$

где $P_1 = \sqrt{3} U_N I \cos\varphi_N$ — мощность, потребляемая обмотками якоря;

P_T — суммарные потери, включая потери возбуждения;

P_{1E} — мощность возбуждения, поставляемая отдельным источником.

7.2.4.3.2 Потери возбуждения

Потери в обмотке возбуждения

Потери в обмотке возбуждения определяются формулой

$$P_f = I_e U_f = I_e^2 R_e. \quad (91)$$

С применением температурной коррекции

$$R_e = R_{e,0} \frac{235 + \theta_e}{235 + \theta_0}; \quad \theta_e = 25 + (\theta_w - \theta_c) \left(\frac{I_e}{I_{e,zpf}} \right)^2. \quad (92)$$

где I_e — ток в обмотке возбуждения, определенный по IEC 60034-4;

R_e — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, скорректированное для данной нагрузки;

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

$I_{e,zpf}$ — ток в обмотке возбуждения при испытании с нулевым коэффициентом мощности;

θ_w — температура обмотки возбуждения при испытании с нулевым коэффициентом мощности;

θ_c — температура охлаждающей жидкости при испытании с нулевым коэффициентом мощности;

θ_e — температура обмотки возбуждения, приведенная к току I_e.

Электрические потери в щетках

Потери в щетках рассчитываются исходя из падения напряжения на каждой из щеток:

$$P_b = 2U_b I_e, \quad (93)$$

где I_e — значение тока, соответствующее полученному по IEC 60034-4;

U_b — справочное падение напряжения на щетке в зависимости от ее типа:

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

0,3 В — для металлоуглеродистых щеток.

Потери возбудителя

Возбудитель отсоединяется, если это возможно, от основной машины и присоединяется:

a) к измерителю вращающего момента для определения подводимой механической мощности согласно методу «вход-выход»;

b) тарированному двигателю для измерения потребляемой им электроэнергии.

Возбудитель присоединяется (в случае синхронной машины, возбуждаемой через контактные кольца) к подходящей резистивной нагрузке. На возбудителе устанавливаются значения напряжения U_e и тока I_e для номинальной нагрузки.

При каждом испытании регистрируются значения:

U_e, I_e, P_{Ed}, n, T_E — напряжения, тока, потерь, частоты вращения и вращающего момента возбудителя для номинальной нагрузки (P_{Ed} согласно 3.4.3.3);

$T_{E,0}$ — вращающего момента с неподключенным возбудителем.

Потери возбудителя составляют

$$P_{Ed} = 2\pi n (T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f. \quad (94)$$

Если возбудитель не может быть отсоединен от машины, потери возбудителя должны быть сообщены изготовителем.

Суммарные потери возбуждения определяют по формуле

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b. \quad (95)$$

7.2.4.3.3 Суммарные потери

Для машин с типом возбуждения c) и d) (в соответствии с 3.15.3.3) суммарные потери определяют по формуле:

$$P_T = P_{1,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e, \quad (96)$$

где $P_{1,zpf}$ — потребляемая мощность, равная P_1, в соответствии с 6.4.1.2;

ΔP_{fe} — потери в стали, приведенные ниже;

P_e определяют, как указано выше;

б) для машин с типом возбуждения a) и b) по 3.15.3.3:

P_e, P_{Ed} и P_{1E} должны быть определены как указано выше для тока в обмотке возбуждения при заданной нагрузке согласно с IEC 60034-4 по формулам:

$$P_T = P_{1,zpf} + P_{1E,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e, \quad (97)$$

$$P_e = P_f + P_{Ed} - P_{f,zpf} - P_{Ed,zpf}, \quad (98)$$

где $P_{1,zpf}$, $P_{f,zpf}$ и $P_{1E,zpf}$ — значения, полученные в результате испытания с нулевым коэффициентом мощности,

P_f — потери, найденные для машин с независимым возбуждением,

P_{Ed}, $P_{Ed,zpf}$ — значения, полученные при вышеперечисленных испытаниях для I_e ,R_e и $I_{e,zpf}$, $R_{e,zpf}$;

ΔP_{fe} находится из зависимости потерь в стали от напряжения по 7.1.3.2.2 и вычисляется по разности значений потерь в стали P_{fe} для двух значений электродвижущей силы ЭДС: при заданной нагрузке и при испытании с нулевым коэффициентом мощности.

Примечание — Уравнения приведены для работы в двигательном режиме.

7.2.5 Метод 2-1-2G. Суммирование отдельных потерь по испытанию под нагрузкой без учета добавочных потерь от нагрузки

Данное испытание аналогично испытанию по методу 2-1-2B. Единственным отличием является то, что не учитываются добавочные потери под нагрузкой, т.е. пропускается испытание при коротком замыкании. В результате достигается значительно меньшая точность.

В остальном процедуры определения потерь и КПД в данном испытании аналогичны тем, что проводятся по методу 2-1-2B.

На рисунке 26 представлен алгоритм процедуры определения КПД данным методом

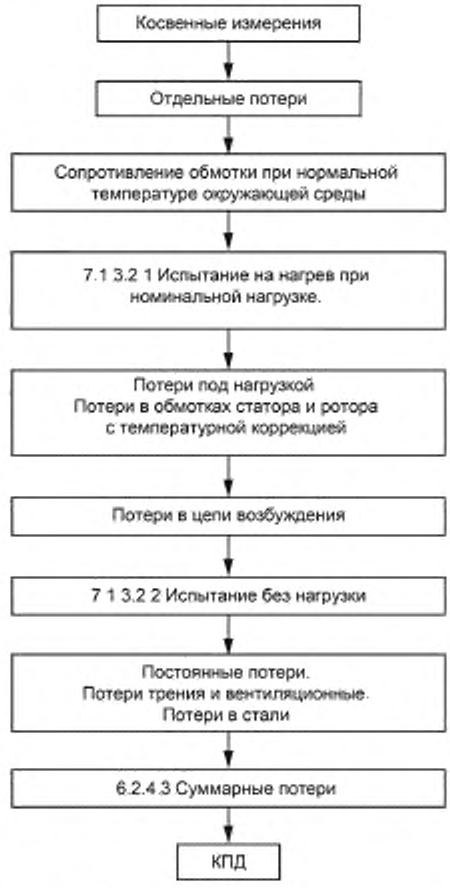


Рисунок 26 — Определение КПД методом 2-1-2G

Для определения КПД применяется метод 2-1-2B (см. раздел 7.1.3) без учета добавочных потерь под нагрузкой.

Данный метод не применяется для синхронных машин с постоянными магнитами.

8. Методы испытаний для определения КПД машин постоянного тока

8.1 Методы эксплуатационных и типовых испытаний

8.1.1 Общие положения

Методы применимы для эксплуатационных, приемочных и типовых испытаний. Регламентированные данным стандартом методы приведены в таблице 7.

Таблица 7 — Машины постоянного тока. Методы испытаний

Обозначение	Метод	Описание	Раздел	Ресурсы
2-1-3A	Прямое измерение вход-выход	Измерение вращающего момента	8.1.2	Динамометр на полную нагрузку
2-1-3B	Суммирование потерь в испытании под нагрузкой и постоянная составляющая добавочных потерь от нагрузки по испытанию	Измерение P_{LL} в двухмашинном агрегате с питанием от одной сети	8.1.3	Две одинаковые машины, вольтодобавочный генератор, специальный выпрямитель
2-1-3C	Суммирование потерь в испытании под нагрузкой и постоянная составляющая добавочных потерь от нагрузки по приближенной оценке	Приближенная оценка P_{LL}	8.1.4	Специальный выпрямитель
2-1-3D	Суммирование потерь в испытании без нагрузки	Потери возбуждения по соотношению нагрузки к возбуждению без нагрузки. Приближенная оценка P_{LL}	8.1.5	Двухмашинный агрегат на полную нагрузку
2-1-3E	Испытание в двухмашинном агрегате с питанием от одной сети	Испытание в двухмашинном агрегате с питанием от одной сети	8.1.6	Две одинаковые машины, вольтодобавочный генератор

8.1.2 Метод 2-1-3A. Прямое измерение входной и выходной мощности

8.1.2.1 Общие положения

В данном разделе приведен метод испытаний, при котором механическая мощность P_{mech} машины определяется из измеренных величин вращающего момента на валу и скорости. Одновременно измеряется электрическая мощность P_{el} в якоре машины постоянного тока.

Входными и выходными мощностями являются:

- при работе в режиме двигателя $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$ (см рисунок 27);
- при работе в режиме генератора $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$.

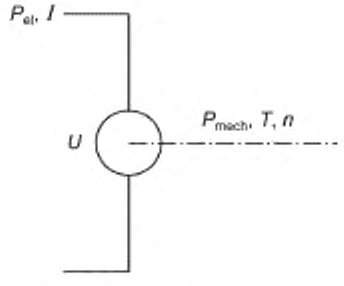


Рисунок 27 — Схема измерения момента

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 28.



Рисунок 28 — Определение КПД по методу 2-1-3А

8.1.2.2 Процедура испытания

При испытании двигатель соединяется с нагрузочной машиной или генератором с приводным двигателем через измеритель вращающего момента. К испытуемой машине прикладывается требуемая нагрузка.

При каждом испытании регистрируются значения $U, I, P_{el}, n, T, \theta_c$.

Измерения в цепи возбуждения, если требуется, проводятся согласно 5.9.

8.1.2.3 Определение КПД

КПД рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}, \quad (99)$$

где потребляемая P_1 и отдаваемая P_2 мощности в определяются как:

- в двигательном режиме работы $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- в генераторном режиме работы $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$;

где $P_{mech} = 2\pi Tn$;

P_{1E} определяется в соответствии с 5.9.

Примечание — Потери в цепи возбуждения, не покрываемые мощностью P_{1E}, покрываются со стороны вала.

8.1.3 Метод определения потерь КПД суммированием отдельных компонентов

8.1.3.1 Общие положения

В данном методе КПД определяется суммированием отдельных потерь. Рассматриваются следующие компоненты потерь:

- потери в стали;
- потери на трение и вентиляционные;
- потери в обмотках якоря и щетках;
- потери в цепи возбуждения и возбудителе;
- добавочные потери от нагрузки.

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 29.

8.1.3.2 Процедура испытания

8.1.3.2.1 Испытание под нагрузкой

Испытание на нагрев при номинальной нагрузке

Перед началом данного испытания определяется температура окружающей среды и сопротивление обмотки при этой температуре.

Машина должна быть нагружена доступным способом, питаясь от источника энергии с номинальными параметрами, до достижения температурного равновесия (предельное изменение температуры за 0,5 часа составляет 1 °С).

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 29.



Рисунок 29 —Определение КПД по методу 2-1-3В

В конце испытания регистрируются средние значения, полученные по крайней мере по трем сериям испытаний, следующих величин:

- P_N, I_N, U_N, θ_c, θ_N;
- $R_N = R$ (сопротивление в испытании с номинальной нагрузкой по 5.7.1);
- θ_N (температура обмотки в испытании с номинальной нагрузкой по 5.7.2);
- данные ситемы возбуждения по 5.9.

В случае питания машины постоянного тока от выпрямленного напряжения должны быть измерены средние I_{av} и среднеквадратичные I значения тока.

В машинах постоянного тока R представляет собой сопротивления всех элементов цепи, по которым течет якорный ток (обмотки якоря, коммутационная, компенсационная, компаундная). Если при малой величине сопротивления якорной цепи его измерение не представляется возможным, допустимо его определение расчетным способом.

Потери в обмотках цепи ротора

Для каждой заданной нагрузки определяют потери в обмотках цепи ротора

$$P_a = I^2R, \quad (100)$$

где R определяют согласно 5.7.2, причем R включает все обмотки в цепи ротора.

Электрические потери в щетках

Потери в щетках определяют с использованием справочного падения напряжения на щетке по формуле

$$P_b = 2U_bI, \quad (101)$$

где I — ток якоря в заданном режиме;

U_b — справочное падение напряжения на щетку в зависимости от ее типа:

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

0,3 В — для металлоуглеродных щеток.

Потери в цепи возбуждения

Потери в обмотке возбуждения рассчитываются по измеренным значениям напряжения и тока по формуле

$$P_f = U_eI_e. \quad (102)$$

Потери в возбудителе

Возбудитель отсоединяется от основной машины (если возможно) и присоединяется:

a) к измерителю момента для определения механической мощности на входе;

b) калиброванному приводному двигателю для определения электрической мощности на входе.

Возбудитель подключается к подходящей резистивной нагрузке. Возбудитель работает с напряжением U_e и током I_e в каждой нагрузочной точке.

Регистрируются значения:

- U_e, I_e, P_{Ed}, n, T_e для каждой нагрузочной точки (P_{Ed} в соответствии с 3.15.3.3);
- $T_{E,0}$ (момент при невозбужденном возбудителе).

Если возбудитель не может быть отсоединен от машины, то его потери должен сообщить производитель.

Потери возбуждения P_{Ed} равны:

$$P_{Ed} = 2\pi n(T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - U_eI_e, \quad (103)$$

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

Во всех других случаях потери должны вычисляться.

8.1.3.2.2 Испытание без нагрузки

Машина испытывается со свободным концом вала или с приводной машиной, работающей в режиме генератора (энергия передается по валу, а момент измеряется методом «вход-выход»).

Испытание без нагрузки проводится на разогретой машине сразу после испытания с номинальной нагрузкой.

Если это невозможно, испытания начинаются на холодной машине, однако потери холостого хода должны достичь установившегося значения. Индикатором этого состояния является изменение входной мощности не более 3 %, измеряемое с интервалом 30 минут.

Испытание проводится как минимум при восьми значениях напряжения, включая номинальное, чтобы:

- не менее четырех значений располагались с приблизительно одинаковым интервалом в пределах от 110 % до 80% от номинального напряжения;
- не менее четырех значений располагались с приблизительно одинаковым интервалом в пределах от 70 % до 30 % от номинального напряжения или (для машины со свободным концом вала) до напряжения, при котором ток перестает уменьшаться.

Для машин постоянного тока со свободным концом вала скорость должна поддерживаться постоянной путем регулировки тока возбуждения.

Испытание должно быть выполнено как можно быстрее с изменением значения напряжения в сторону убывания.

При каждом испытании регистрируются значения: U_0, I_0, P_0.

Сопротивление R_0 определяется непосредственно до и после испытания без нагрузки.

Сопротивление обмотки при каждом напряжении рассчитывается путем линейной интерполяции значения сопротивления до и после испытания в зависимости от электрической мощности P_0.

Если измерение сопротивления затруднительно ввиду его малой величины, то допустимо его вычисление.

Для двухмашинного агрегата P_0 определяется по моменту T и частоте вращения n.

Постоянные потери

Постоянные потери определяются по формуле

$$P_c = P_0 - P_a, \quad (104)$$

где

$$P_a = I_0^2 R_0; \quad (105)$$

I_0 и R_0 регистрируются на каждом уровне напряжения.

Если измерение сопротивления невыполнимо из-за очень низких его значений, допустимо его вычисление, приведенное к ожидаемой температуре обмотки.

Примечание — P_a — потери в роторе, включающие потери в компенсационных обмотках, полюсных коммутационных обмотках и шунтирующих резисторах. При наличии шунтирующих резисторов, включенных параллельно последовательной обмотке, электрические потери в якорной цепи могут быть определены по полному току и эквивалентному сопротивлению цепи.

Трение и вентиляционные потери (дополнительно)

Для каждого значения напряжения, меньшего или равного 70 %, строится кривая постоянных потерь P_c в зависимости от напряжения U_0^2. Прямая линия экстраполируется до нулевого напряжения. Точка пересечения с осью потерь при нуле по оси напряжения представляет собой потери трения и вентиляционные потери P_{fw}.

Потери в стали (дополнительно)

Для каждого значения напряжения в диапазоне от 80 % до 110 % строится кривая постоянных потерь P_c в зависимости от напряжения U_0. Потери в стали зависят от ЭДС U_i, определяемого по формуле:

для двигателя: $U_i = U_0 - (IR)_a - 2U_b$; (106)

для генератора: $U_i = U_0 + (IR)_a + 2U_b$. (107)

где U_0 — приложенное напряжение;

$2U_b$ — падение напряжения в щеточном узле в испытании под нагрузкой;

I — ток при заданной нагрузке;

R — сопротивление всех обмоток цепи якоря при температуре, соответствующей полной нагрузке.

Потери в стали определяются по формуле

$$P_{fe} = P_c - P_{fw}. \quad (108)$$

8.1.3.2.3 Добавочные потери от нагрузки

Потери от постоянной составляющей тока в двухмашинном агрегате при питании от одной сети

Этот метод позволяет определить добавочные потери при наличии двух идентичных машин постоянного тока. Обе машины должны быть соединены механически и питаться от одного источника постоянного тока, причем последовательно с машиной, работающей в генераторном режиме, должен включаться вольтодобавочный генератор (см. рисунок 30).

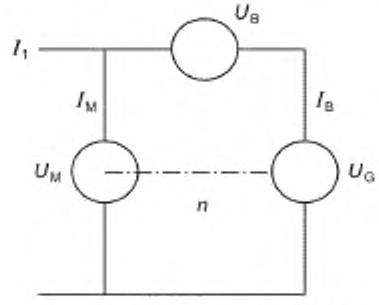


Рисунок 30 — Схема двухмашинного агрегата при питании от одной сети (машины постоянного тока)

Если машина предназначена для работы в двигательном режиме, то ее питание должно осуществляться номинальными для нее напряжением и током. Машины, разработанные как генераторы,

должны питаться номинальным для генератора напряжением и током. Управляя возбуждением, следует добиться соответствия ЭДС испытательной нагрузке.

Примечание 1 — Питающая сеть главным образом покрывает потери холостого хода, а вольтодобавочный источник — потери от нагрузки.

При испытании машины с возбудителем на валу ее обмотка возбуждения должна питаться от отдельного источника.

При достижении теплового равновесия регистрируются значения: U, I, U_B, I_B, $U_{e,M}$, $I_{e,M}$, $U_{e,G}$, $I_{e,G}$, n, θ_c.

Добавочные потери под нагрузкой от постоянной составляющей тока равны

$$P_{LL} = 0{,}5\,(P_1 - \Sigma P_c - \Sigma P_a - P_{con} - 2U_b\,(I + I_B) - 2I_B U_b), \quad (109)$$

где $P_1 = U_M I_1 + U_B I_B$ — мощность от источника питания и вольтодобавочного источника (см. рисунок 30);

ΣP_c — сумма постоянных потерь обеих машин;

ΣP_a — сумма активных потерь якорных цепей обеих машин;

P_{con} — потери в кабельных соединениях.

Для определения потерь при других значениях нагрузки используются коэффициенты из таблицы 8.

Потери от переменной составляющей токов (питание от преобразователя)

При питании двигателей от статических преобразователей в случае, когда коэффициент пульсаций превышает 0,1 (см. IEC 60034-1), добавочные потери, вызываемые переменной составляющей тока якоря, должны суммироваться с определенными выше.

По испытанию под нагрузкой определяются потери в машине, питаемой от преобразователя (см. также IEC 60034-19).

Регистрируются следующие результаты измерений:

- P_1 — переменная составляющая мощности, передаваемой машине;
- I — среднеквадратичное значение переменной составляющей тока;
- θ_W — температура обмоток якорной цепи.

Примечание 2 — Для двигателей с последовательными обмотками в цепи якоря переменная составляющая мощности вызывает увеличение момента. Эта величина столь мала, что ею можно пренебречь.

Добавочные потери от переменной составляющей питающего напряжения составляют

$$P_{LL} = P_1 - I^2 R_a, \quad (110)$$

где R_a — сопротивление якорной цепи при температуре машины с номинальной нагрузкой.

8.1.3.3 Определение КПД

КПД определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (111)$$

где P_1 — входная мощность, исключая мощность возбуждения от независимого источника;

P_2 — выходная мощность;

P_{1E} — мощность возбуждения, подаваемая независимым источником;

P_T — суммарные потери.

Примечание 1 — Обычно первая часть равенства применяется для двигателя, вторая — для генератора.

Примечание 2 — Суммарные потери P_T включают потери от возбуждения P_e (см. 5.9).

Суммарные потери

Суммарные потери вычисляются как сумма отдельных потерь по 7.2.2.3 — 7.2.2.6:

$$P_T = P_c + P_a + P_b + P_{LL} + P_e, \quad (112)$$

$$P_e = P_f + P_{Ed}, \quad (113)$$

где P_a — потери в якорной обмотке;

P_b — потери в щетках;

P_c — постоянные потери;

P_{LL} — добавочные потери от нагрузки;
P_f — потери в обмотке возбуждения;
P_{Ed} — потери в возбудителе.

8.1.4 Метод 2-1-3С. Суммирование потерь в испытании под нагрузкой и постоянная составляющая добавочных потерь от нагрузки по приближенной оценке

8.1.4.1 Общие положения

Данный метод, подобно методу 2-1-3В, определяет КПД суммированием отдельных потерь. Однако в данном случае добавочные потери от постоянной составляющей тока определяются приближенной оценкой.

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 31.

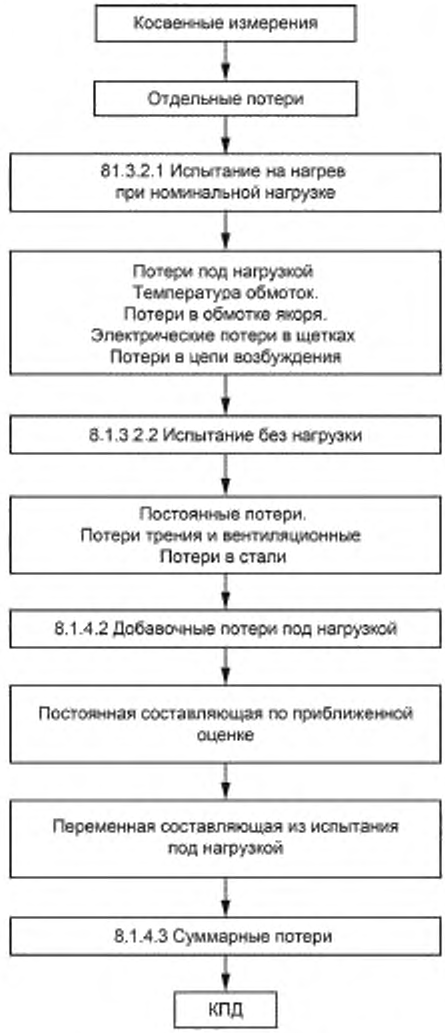


Рисунок 31 — Определение КПД по методу 2-1-3С

8.1.4.2 Процедура испытания

Вся процедура испытания, за исключением определения постоянной составляющей добавочных потерь, аналогична процедуре, описанной в 8.1.3.2.

Приближенная оценка постоянной составляющей добавочных потерь

Предполагается, что потери постоянного тока изменяются как квадрат тока и что их суммарная величина при номинальном токе составляет:

a) для машин без компенсации:

- 1% номинальной подводимой мощности для двигателей,
- 1 % номинальной отдаваемой мощности для генераторов;

b) для машин с компенсацией:

- 0,5 % номинальной входной мощности для двигателей,
- 0,5 % номинальной выходной мощности для генераторов.

Для машин с неизменной частотой вращения номинальная мощность — это мощность с максимальным номинальным током и максимальным номинальным напряжением.

Для двигателей с частотой вращения, регулируемой изменением приложенного напряжения, номинальная подводимая мощность определяется для каждой частоты вращения как произведение напряжения, соответствующего этой частоте вращения, на максимальный номинальный ток, взятый из всего диапазона.

Для двигателей с частотой вращения, регулируемой ослаблением поля, номинальная подводимая мощность определяется как произведение номинального напряжения на максимальный номинальный ток. Для генераторов с изменяющейся скоростью и стабилизацией напряжения полем номинальная отдаваемая мощность определяется как произведение номинального напряжения на максимальный номинальный ток. Добавочные потери при скорости, соответствующей полному потоку, должны определяться по пунктам а) и б). Добавочные потери при других скоростях вычисляются умножением этой величины на соответствующий поправочный коэффициент из таблицы 8.

Диапазон регулирования скорости вращения в первой колонке таблицы 8 представляет собой отношение максимальной частоты вращения в рассматриваемом случае к минимальной номинальной скорости без регулирования.

Для отношений максимальной частоты вращения к номинальной, отличающихся от приведенных в таблице 5, соответствующие поправочные коэффициенты определяются интерполяцией.

Таблица 8 — Поправочные коэффициенты для различных диапазонов регулирования скорости вращения

Диапазон регулирования	Поправочный коэффициент
1,5:1	1,4
2:1	1,7
3:1	2,5
4:1	3,2

8.1.4.3 Определение КПД

КПД определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} - \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (114)$$

где P_1 — входная мощность, исключая мощность возбуждения от независимого источника;

P_2 — выходная мощность;

P_{1E} — мощность возбуждения, подаваемая независимым источником.

Примечание 1 — Обычно первая часть равенства применяется для двигателя, вторая — для генератора.

Примечание 2 — Суммарные потери P_T включают потери от возбуждения P_e (см. 5.9).

Суммарные потери

Общие потери вычисляются как сумма отдельных потерь:

$$P_T = P_c + P_a + P_b + P_{LL} + P_e; \quad (115)$$

$$P_e = P_f + P_{Ed}, \quad (116)$$

где P_a — потери в якорной обмотке;

P_b — потери в щетках;

P_c — постоянные потери;

P_{LL} — добавочные потери;
P_f — потери в обмотке возбуждения;
P_{Ed} — потери в возбудителе.

8.1.5 Метод 2-1-3D. Суммирование потерь без испытания под нагрузкой

8.1.5.1 Общие положения

В данном методе, как и в методе 2-1-3С, КПД определяется с помощью суммирования отдельных потерь. Однако потери в якорной обмотке и в обмотке возбуждения определяются не из испытания под нагрузкой, а по результатам вычислений.

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 32.

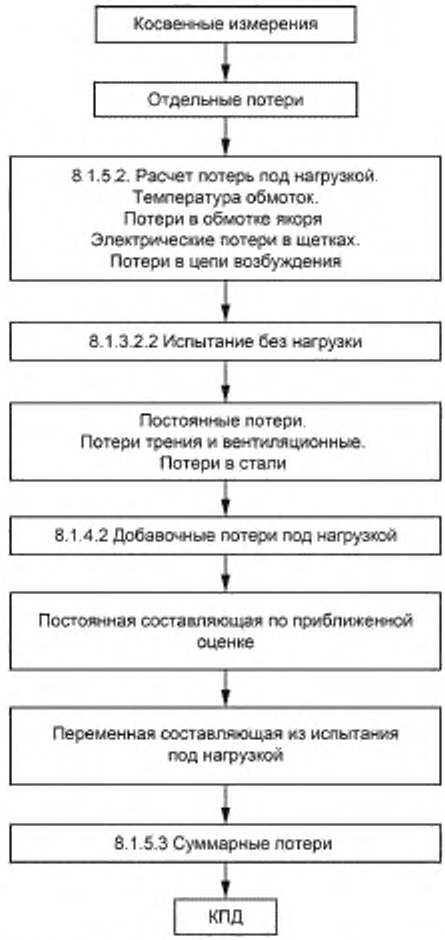


Рисунок 32 — Определение КПД по методу 2-1-3D

8.1.5.2 Процедура испытания

Вся процедура испытания, за исключением определения потерь в цепи возбуждения, аналогична процедуре, описанной в 8.1.4.2.

Потери в цепи возбуждения

При испытании без нагрузки потери возбуждения P_e вычисляются по формуле $P_e = I_e^2 R_f$, где R_f — сопротивление параллельной или независимой обмотки возбуждения, приведенное к нормативной температуре, определенной в 5.7.3, а I_e — ток возбуждения, который определяется одним из следующих способов.

a) Для генераторов с параллельной или независимой обмоткой возбуждения при наличии или отсутствии переключаемых полюсов ток I_e составляет 110 % от соответствующего тока возбуждения без нагрузки при напряжении, равном номинальному напряжению плюс омическое падение напряжения в цепи якоря (якорь, щетки и переключаемые обмотки, если таковые имеются) при соответствующем токе.

b) Для компенсированных генераторов с параллельным или независимым возбуждением ток I_e равен соответствующему току возбуждения без нагрузки при напряжении, равном номинальному напряжению плюс омическое падение напряжения в цепи якоря при соответствующем токе.

c) Для генераторов со смешанным возбуждением (компаундных) ток I_e равен соответствующему току возбуждения при номинальном напряжении без нагрузки.

d) Для перекомпенсированных и недокомпенсированных генераторов, а также специальных типов генераторов, не перечисленных в пунктах a), b) и c), определение тока I_e является предметом отдельного соглашения.

e) Для двигателей с параллельной обмоткой возбуждения ток I_e равен соответствующему току возбуждения без нагрузки при номинальном напряжении.

8.1.5.3 Определение КПД

КПД определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (117)$$

где P_1 — входная мощность, исключая мощность возбуждения от независимого источника;

P_2 — выходная мощность;

P_{1E} — мощность возбуждения, подаваемая независимым источником.

Примечание 1 — Обычно первая часть равенства применяется для двигателя, вторая — для генератора.

Примечание 2 — Суммарные потери P_T включают потери от возбуждения P_e (см. 5.9).

Суммарные потери

Общие потери вычисляются как сумма отдельных потерь:

$$P_T = P_c + P_a + P_b + P_{LL} + P_e; \quad (118)$$

$$P_e = P_f + P_{Ed}, \quad (119)$$

где P_a — потери в якорной обмотке;

P_b — потери в щетках;

P_c — постоянные потери;

P_{LL} — добавочные потери;

P_f — потери в обмотке возбуждения;

P_{Ed} — потери в возбудителе.

8.1.6. Метод 2-1-3E. Испытание в двухмашинном агрегате с питанием от одной сети

8.1.6.1 Общие положения

Последовательность определения КПД этим методом представлена на рисунке 33.



Рисунок 33 — Определение КПД по методу 2-1-3E

Данная процедура не применима для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

8.1.6.2 Процедура испытания

Две одинаковые машины соединяются механически, а электрически подключаются к одной сети для работы с номинальным напряжением и скоростью одна как двигатель, а другая — как генератор.

Примечание — Как вариант, потери могут быть созданы калиброванным приводным двигателем.

Нагрузочная машина подключается к напряжению питания последовательно с вольтодобавочным генератором, как показано на рисунке 34. Обе машины настраиваются таким образом, чтобы ток и напряжение соответствовали режиму, при котором требуется оценить КПД. Для испытания в двигательном режиме питание должно обеспечить номинальное напряжение и необходимую нагрузку на двигатель. Для испытания генератора, которому надо обеспечить номинальное напряжение и необходимую нагрузку, напряжение должно быть отрегулировано вольтодобавочным источником. Питающая сеть главным образом компенсирует потери холостого хода, а вольтодобавочный источник — нагрузочные потери.

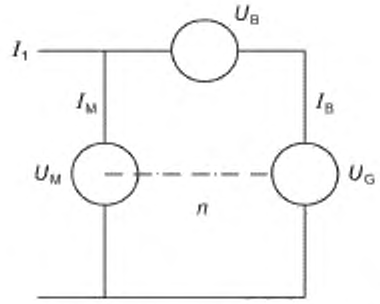


Рисунок 34 — Схема двухмашинного агрегата постоянного тока при питании от одной сети

Если отсутствует вольтодобавочный источник, общее значение напряжения на зажимах машин устанавливается таким, чтобы среднее значение их токов было равно номинальному.

При каждом испытании регистрируются значения:

- U_M, I_1 — напряжения и тока питающей сети;
- P_M — мощности, подводимой на клеммы двигателя;
- U_B, I_B — напряжения и тока через вольтодобавочный источник;
- n — частоты вращения;
- θ_c — начальной температуры охлаждающей среды.

Для системы возбуждения следовать разделу 5.9.

8.1.6.3 Определение КПД

Если две одинаковые машины работают в номинальном режиме, КПД вычисляется исходя из того, что потери в каждой машине равны половине суммарных.

КПД рассчитывается по формуле

$$\eta - 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}}, \quad (120)$$

где P_M — мощность, потребленная из сети машиной, работающей в двигательном режиме (исключая мощность возбуждения), согласно 6.4.1.1;

P_T — общие потери одной машины, определенные как половина суммарных потерь;

P_{1E} — мощность возбуждения, подаваемая от независимого источника.

$$P_T = 0{,}5\,(U_M I_1 + U_B I_B) + P_{1E}; \quad P_{1E} = 0{,}5\,(P_{1E,M} + P_{1E,G}). \quad (121)$$

Приложение А
(обязательное)

Расчеты для метода соединения «звезда с несимметричным питанием»

По результатам испытаний напряжения и токи рассчитываются по формулам:

$$\bar{U}_{UV} = U_{UV},$$

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

$$U''_{WU} = \sqrt{U_{WU}^2 - U'^2_{WU}}, \qquad \text{(A.1)}$$

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

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

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

В приведенном выше уравнении предполагается, что текущее значение I_W находится в фазе с напряжением U_{WU}. Если же сопротивление резистора содержит значительную реактивную составляющую, должны быть применены следующие формулы:

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

где R_{eh} — измеренное значение резистивного компонента.

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

$$k_1 = \frac{1}{2I_V^2}\left(I_W^2 - I_U^2 - I_V^2\right),$$

$$I'_U = k_1 I'_V + \sqrt{\left(k_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2}\right)\left(I'^2_V - I_V^2\right)}, \qquad \text{(A.2)}$$

$$I''_U = \frac{k_1 I_V^2 - I'_U I'_V}{I''_V},$$

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

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

Вектора внутренних линейных напряжений по комплексным линейным напряжениям и токам рассчитываются по формулам:

$$\bar{U}_{iVW} = \bar{U}_{UV} + R_{VW}(\bar{I}_V - \bar{I}_U)/2,$$

$$\bar{U}_{iUV} = \bar{U}_{VW} + R_{VW}(\bar{I}_W - \bar{I}_V)/2, \qquad \text{(A.3)}$$

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

Линейные компоненты разделяются на прямую и обратную последовательности ($\bar{a} = e^{j2\pi/3}$) и рассчитываются по формулам:

$$\bar{U}_{iLL(1)} = (\bar{U}_{iUV} + \bar{a}\,\bar{U}_{iVW} + \bar{a}^2\bar{U}_{iWU})/3,$$

(A.4)

$$\bar{U}_{iLL(2)} = (\bar{U}_{iUV} + \bar{a}^2\bar{U}_{iVW} + \bar{a}\,\bar{U}_{iWU})/3.$$

Прямые и обратные последовательности внутренних фазных напряжений рассчитываются по формуле:

$$\bar{U}_{i(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\pi/6} \bar{U}_{iLL(1)},$$

$$\bar{U}_{i(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\pi/6} \bar{U}_{iLL(2)}. \quad (A.5)$$

Внутренние асимметричные фазные напряжениярассчитываются по формулам:

$$\bar{U}_{iU} = \bar{U}_{i(1)} + \bar{U}_{i(2)},$$

$$\bar{U}_{iV} = \bar{a}^2 \bar{U}_{i(1)} + \bar{a}\, \bar{U}_{i(2)}, \quad (A.6)$$

$$\bar{U}_{iW} = \bar{a}\, \bar{U}_{i(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{i(2)}.$$

Эквивалентное сопротивление потерь в стали рассчитывается по формуле

$$R_{fe} = U_t^2 / P_{fe}, \quad (A.7)$$

где U_t — напряжение при испытании, определяется согласно 6.2.5.2.

P_{fe} — потери в стали, определяются согласно 6.1.3.2.5.

Токи в стали рассчитываются по формулам:

$$\bar{I}_{feU} = \bar{U}_{iU} / R_{fe},$$

$$\bar{I}_{feV} = \bar{U}_{iV} / R_{fe}, \quad (A.8)$$

$$\bar{I}_{feW} = \bar{U}_{iW} / R_{fe}.$$

Входные фазные токи рассчитываются по формулам:

$$\bar{I}_{iU} = \bar{I}_U - \bar{I}_{feU},$$

$$\bar{I}_{iV} = \bar{I}_V - \bar{I}_{feV}, \quad (A.9)$$

$$\bar{I}_{iW} = \bar{I}_W - \bar{I}_{feW}.$$

Прямые и обратные последовательности входных фазных токов рассчитываются по формулам:

$$\bar{I}_{i(1)} = (\bar{I}_{iU} + \bar{a}\bar{I}_{iV} + \bar{a}^2 \bar{I}_{iW}) / 3,$$

$$\bar{I}_{i(2)} = (\bar{I}_{iU} + \bar{a}^2 \bar{I}_{iV} + \bar{a}\bar{I}_{iW}) / 3. \quad (A.10)$$

Для достижения удовлетворительных результатов абсолютная величина тока прямой последовательности $I_{i(1)}$ должна составлять менее 30% от абсолютной величины тока обратной последовательности $I_{i(2)}$. Если это условие не выполняется, то испытание должно быть повторено при другой величине R_{eh}.

Мощность в зазоре рассчитывается по формулам:

$$P_{\delta(1)} = 3\left(U'_{i(1)} I'_{i(1)} + U''_{i(1)} I''_{i(1)}\right),$$

$$P_{\delta(2)} = 3\left(U'_{i(2)} I'_{i(2)} + U''_{i(2)} I''_{i(2)}\right). \quad (A.11)$$

Добавочные потери под нагрузкой рассчитываются по формуле

$$P_{Lr} = k\,[(1\text{-}s)(P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - P_{fw}, \quad (A.12)$$

где $k = \dfrac{1}{1 + \left(I_{i(1)} / I_{i(2)}\right)^2}$.

Приложение В
(справочное)

Типы систем возбуждения

Системы возбуждения с точки зрения определения потерь разделяются на следующие типы:

a) Возбудитель на валу машины

Электромашинный возбудитель, в качестве которого используется машина постоянного или переменного тока, приводится во вращение валом основной машины напрямую или через механическую передачу. Если в качестве основной машины используется синхронная, энергия возбуждения подводится к обмотке через контактные кольца и щетки.

b) Бесконтактный возбудитель

Возбудитель переменного тока без контактных колец и щеток, находящийся на валу основной синхронной машины, обеспечивает энергией обмотку возбуждения через выпрямитель. В качестве возбудителя может использоваться синхронный генератор или асинхронная машина.

Энергия возбуждения синхронного возбудителя поступает как от непосредственно соединенного возбудителя переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов, так и от вспомогательной (вторичной) обмотки, заложенной в пазы статора основной машины, как в типе e), либо от статического преобразователя.

Асинхронный возбудитель питается от сети переменного тока.

c) Независимый электромеханический возбудитель

Генератор постоянного или переменного тока как часть мотор-генераторной установки снабжает энергией обмотку возбуждения основной машины.

d) Статический возбудитель

Обмотка возбуждения основной машины питается от статического источника, например от батареи или через преобразователь от отдельного источника.

e) Возбуждение от дополнительной обмотки.

Энергия возбуждения для генератора переменного тока поступает от дополнительной (вторичной) обмотки, размещенной в пазах статора основной машины. При этом используется поток основной или высших гармоник, наводящий электродвижущую силу, которая через выпрямитель, щетки и контактные кольца подается на обмотку возбуждения.

Приложение С
(справочное)

Измерение скольжения асинхронных двигателей

Потери в роторе асинхронных машин прямо пропорциональны скольжению, которое определяется как отношение разности синхронной скорости вращения и скорости вращения вала к синхронной скорости, определяемой частотой сети и числом пар полюсов.

Измерение скольжения производится в относительных единицах, поэтому необходимо в рамках короткого интервала времени зарегистрировать скорость вращения вала двигателя и частоту его питания. Как пример, можно использовать стробоскопический способ измерения, при котором световые импульсы подаются с частотой питания двигателя и подсчитывается число оборотов скольжения за расчетный период времени.

Метод, основанный на данном принципе, дает высокую точность измерения скольжения, а его результаты автоматически заносятся в систему регистрации данных испытания.

На рисунке С.1 графически представлена другая система измерения, в которой создаются две последовательности импульсов: одна непосредственно связана со скоростью вращения вала испытуемого двигателя, а вторая — с частотой его питания. В данном случае используются 2 энкодера: один — на валу испытуемого двигателя, а другой — на валу специального малого синхронного двигателя, питаемого от того же источника, что и испытуемый.

Дополнительная синхронная машина может рассматриваться как источник нулевого скольжения.

Две последовательности импульсов идут на вход двухканального цифрового счетчика, который может рассчитывать и регистрировать соотношение двух входных частот.

Если в качестве источника питания испытуемого асинхронного двигателя используется электромеханический преобразователь частоты, дополнительный синхронный двигатель может быть установлен непосредственно на его вал. Еще одной возможностью является электронная генерация опорной частоты с помощью замкнутой системы управления фазой переменного тока.

Если соотношение частот, вычисленное двухканальным счетчиком, умножить на номинальную синхронную частоту вращения дополнительного синхронного двигателя (например, 1500 об/мин для 4-полюсного двигателя при частоте питания 50 Гц), то счетчик по схеме на рис С.1 покажет скорость вращения испытуемого асинхронного двигателя в соответствии с частотой питания независимо от числа его пар полюсов.

Скольжение далее может быть рассчитано по измеренной скорости вращения.

Если оба счетчика запускаются и останавливаются синхронно (т.е. в одно и то же время), время их работы не критично. Измерение скольжения должно быть измерено за то же среднее время, за которое проводятся другие измерения напряжения, тока, мощности и вращающего момента.



IM — испытуемый асинхронный двигатель (с любым числом полюсов); SM — малая синхронная машина (например, 4-полюсная) или мотор-генераторная установка; SE1 — энкодер последовательности импульсов вала, например, с 600 имп./оборот, SE2 — энкодер последовательности импульсов вала, с той же частотой, что SE1; f_1 — частота последовательности импульсов SE1. f_2 — частота последовательности импульсов SE2. Выходное соотношение f_1 / f_2 x (синхронная скорость машины SM).

Рисунок С.1 Структура системы измерения скольжения

Приложение D
(справочное)

Шаблон отчета об испытаниях для метода 2-1-1B

Логотип производителя					
Дата испытания		Номер отчета		Дата выпуска отчета	

Описание двигателя						
Номинальная мощность	кВт			Производитель		
Номинальное напряжение	В			Модель		
Номинальный ток	А			Заводской №		
Номинальная частота вращ.	мин$^{-1}$			Режим работы IEC 60034-1		
Частота питания	Гц			Тип исполнения		
Число фаз				Класс изоляции IEC 60085		
IEC 60034-30-1	код IE			Т-ра окружающей среды	^{0}C	

Условия перед испытаниями					6.1.3.2.1 Испытание с ном.нагрузкой			
Испытательное сопротивление	R_i	Ом			Исп.сопротивл.	R_N	Ом	
Температура обмотки	θ_0	°C			Т-ра обмотки	θ_N	°C	
Т-ра окружающей среды	θ_a	°C			Т-ра окр.среды	θ_a	°C	

6.1.3.2.3 Испытание при различных нагрузках			Сопротивление до исп.			R	Ом	
Относительная мощность на валу		%	125%	115%	100%	75%	50%	25%
Момент на валу	T	Нм						
Потребляемая мощность	P_1	Вт						
Линейный ток	I	А						
Рабочая частота вращения	N	мин$^{-1}$						
Напряжение на зажимах	U	В						
Частота питания	f	Гц						
Температура обмотки	θ_W	°C						
Сопротивление после испытания						R	Ом	

6.1.3.2.4 Испытание без нагрузки			Сопротивление до исп.			R	Ом	
Относит.напряжение		%	110%	100%	95%	90%	60%	50%	40%	30%
Потребл.мощность	P_0	Вт								
Линейный ток	I_0	А								
Напряжение на заж.	U_0	В								
Частота питания	f	Гц								
Температура обмотки	θ_W	°C								
Сопротивление после испытания								R	Ом	

6.1.3.3 Определение КПД								
Относит.мощность на валу скоррект.	$P_{2\theta}$	%	125%	115%	100%	75%	50%	25%
Мощность на валу скорректирован.	$P_{2\theta}$	Вт						
Скольжение скорректированное	s_θ	о.е.						
Потребл.мощность скорректирован	$P_{1\theta}$	Вт						

Потери в стали	P_{fe}	Вт						
Потери трения, вентил. скорректир.	$Pf_{W,\theta}$	Вт						
Добавочные потери под нагрузкой	P_{LL}	Вт						
Статорные потери скорректирован	$P_{s,\theta}$	Вт						
Роторные потери скорректирован	$P_{r,\theta}$	Вт						
Коэффициент мощности	cos φ							
КПД	η	%						

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего межгосударственного стандарта
IEC 60027-1	IDT	ГОСТ IEC 60027-1 — 2015 Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 1. Основные положения
IEC 60034-1:2010	IDT	ГОСТ IEC 60034-1—2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики
IEC 60034-4:2008	—	*
IEC 60034-19	—	*
IEC 60034-29	IDT	ГОСТ IEC 60034-29—2013 Машины электрические вращающиеся. Часть 29. Эквивалентные методы нагрузки и наложения. Косвенное определение превышения температуры
IEC 60051 (all parts)	—	*
IEC 60051-1	—	ГОСТ 30012.1—2002 (IEC 60051-1—97) Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 1.Определения и основные требования, общие для всех частей

* Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты.

Библиография

IEC 60034-2-2	Rotating electrical machines — Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests — Supplement to IEC 60034-2-1 (Машины электрические вращающиеся. Часть 2-2. Специальные методы определения отдельных потерь больших машин по испытаниям. Дополнение к IEC 60034-2-1)
IEC/TS 60034-2-3	Rotating electrical machines — Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors (Машины электрические вращающиеся. Часть 2-3. Специальные методы определения потерь и эффективности индукционных двигателей переменного тока с питанием от преобразователя)
IEC 60044 (all parts)	Instrumenttransformers (Трансформаторы измерительные)

УДК 621.313.2:3:006.354 МКС 29.160 Е60

Ключевые слова: машины электрические вращающиеся, методы определения потерь и коэффициента полезного действия, машины постоянного тока синхронные и асинхронные всех типоразмеров (за исключением машин для подвижного состава)

БЗ 10—2017/128

Редактор *М.В. Терехина*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 01.11.2018. Подписано в печать 27.11.2018 Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 7,91. Уч.-изд. л. 7,15.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru