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

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC 61800-9-2— 2021

СИСТЕМЫ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ

Часть 9-2

Энергоэффективность систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и электромеханических комплексов на их основе. Показатели энергоэффективности систем силовых электроприводов и пускателей электродвигателя

(IEC 61800-9-2:2017, Adjustable speed electrical power drive systems — Part 9-2: Energy efficiency of power drive systems, electric motor starters, power electronics and electromechanical systems based on them — Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и общие правила проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2 «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») 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 30 июня 2021 г. № 141-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	ЗАО «Национальный орган по стандартизации и метрологии» Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Узбекистан	UZ	Узстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 августа 2021 г. № 676-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 61800-9-2—2021 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2022 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту IEC 61800-9-2:2017 «Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 9-2. Экодизайн систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и ее приводов. Показатели энергоэффективности систем силовых электроприводов и пускателей электродвигателя» («Adjustable speed electrical power drive systems — Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications — Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters», IDT).

Международный стандарт разработан Подкомитетом SC22 G «Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью, включая полупроводниковые преобразователи энергии» Технического комитета TC22 «Системы силовой электроники и оборудование» Международной электротехнической комиссии (IEC).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ 1.5 (подраздел 3.6).

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

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация о введении в действие (прекращении действия) настоящего стандарта и изменений к нему на территории указанных выше государств публикуется в указателях национальных стандартов, издаваемых в этих государствах, а также в сети Интернет на сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации.

В случае пересмотра, изменения или отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации в каталоге «Межгосударственные стандарты»

© IEC, 2017
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2021

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 . . . 2
3 Термины, определения, обозначения и сокращения . . . 3
3.1 Термины и определения . . . 3
3.2 Обозначения и сокращения . . . 5
4 Эталонный комплектный электропривод, эталонный комплектный преобразователь, эталонный двигатель . . . 8
4.1 Общие положения . . . 8
4.2 Опорные рабочие точки эталонных комплектного электропривода, комплектного преобразователя и двигателя . . . 9
4.3 Потери в электроприводе и исполнительный механизм. Алгоритм квазиматематического моделирования . . . 11
4.4 Классы IE двигателей при питании от сети . . . 13
4.5 Классы IE двигателей при питании от преобразователя . . . 13
4.6 Классы IE преобразователей частоты (комплектных преобразователей CDM) . . . 13
4.7 Классы IES комплектных электроприводов . . . 13
4.8 Соответствие классов IE и IES . . . 13
4.9 Определение класса IES комплектного электропривода с использованием эталонного и испытательного оборудования, а также руководства производителя . . . 14
5 Математические модели комплектного преобразователя, двигателя и электропривода . . . 15
5.1 Общие положения . . . 15
5.2 Потери в комплектном преобразователе . . . 15
5.3 Потери в двигателе . . . 23
5.4 Эталонный комплектный электропривод (RPDS) . . . 24
5.5 Потери в рекуперативных режимах комплектного преобразователя . . . 26
5.6 Потери в пускателях электродвигателей . . . 27
6 Предельные значения потерь и КПД классов IE и IES . . . 27
6.1 Общие положения . . . 27
6.2 Комплектный преобразователь . . . 27
6.3 Двигатель . . . 30
6.4 Комплектный электропривод . . . 30
7 Определение потерь . . . 32
7.1 Общие положения . . . 32
7.2 Типовые испытания комплектного преобразователя для классификации IE . . . 32
7.3 Типовые испытания комплектного электропривода для классификации IES . . . 32
7.4 Процедуры определения потерь в преобразователе и электроприводе при работе с частичными нагрузками . . . 33
7.5 Расчет потерь в комплектном преобразователе . . . 34
7.6 Расчет потерь в комплектном электроприводе . . . 34
7.7 Метод измерения вход-выход . . . 34
7.8 Калориметрический метод определения потерь в комплектном преобразователе . . . 37
7.9 Условия испытаний комплектного преобразователя . . . 38
7.10 Условия испытаний комплектного электропривода . . . 39
7.11 Алгоритмы испытаний . . . 39

8 Требования к пользовательской документации 42
8.1 Общие положения 42
8.2 Информация для выбора 42
8.3 Информация для определения класса энергоэффективности 43
8.4 Информация для определения добавочных потерь и условий работы с частичной нагрузкой . . . 43
Приложение А (обязательное) Потери в эталонных преобразователе, двигателе и электроприводе . . . 45
Приложение В (справочное) Описание элементов электромеханического комплекса с электроприводом с точки зрения их влияния на потери 50
Приложение С (справочное) Топология преобразователя 60
Приложение D (справочное) Модель двигателя и интерполяция потерь 62
Приложение Е (справочное) Примеры применения расчета потерь комплектных преобразователей и электроприводов 70
Приложение F (справочное) Погрешность метода определения потерь 76
Приложение G (справочное) Калориметрический метод определения потерь в преобразователе . . 77
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов межгосударственным стандартам 80
Библиография 81

Введение

Настоящий стандарт серии стандартов IEC 61800 разработан для оценки потерь энергии в комплектных преобразователях и комплектных электроприводах.

Требования к измерению энергоэффективности двигателей при несинусоидальном питании лежат в зоне ответственности Технического комитета IEC/TS 2 и публикуются в серии стандартов IEC 60034.

В подкомитете IEC/SC 22 G создана специальная комиссия для проработки этого вопроса, которая работает в тесном сотрудничестве с рядом других технических комитетов (например, IEC/TS 2, IEC/SC 121 A).

Подкомитет IEC/SC 22 G несет ответственность за все аспекты энергоэффективности и требования к экологически эффективному проектированию силовой электроники, коммутационной аппаратуры, устройств управления, комплектных электроприводов и их промышленных применений.

Ключевые принципы в стандартизации энергоэффективности иллюстрируются на рисунке 1. Принято соглашение о необходимости сформулировать приемлемую цель в качестве оптимального компромисса с учетом различных требований.

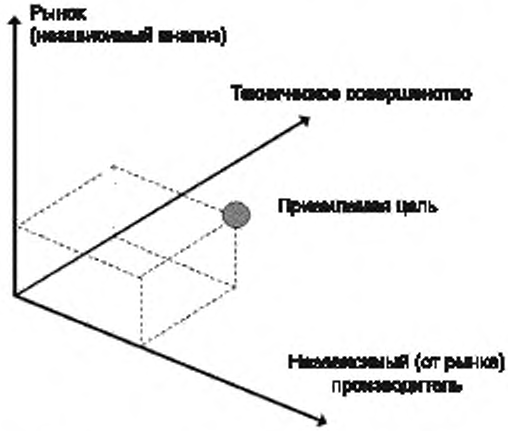


Рисунок 1 — Иллюстрация ключевых требований стандартизации энергоэффективности

Серия стандартов IEC 61800 не распространяется на механические компоненты.

Примечание 1 — Редукторные приводы (двигатель с встроенным редуктором) рассматриваются как комплектный электропривод (двигатель с преобразователем). Для классификации потерь в редукторных приводах можно обратиться к IEC 60034-30-1. Классы энергоэффективности редукторов в настоящее время находятся в рассмотрении.

IEC 61800-9-2 является частью серии стандартов IEC 61800, имеющей следующую структуру:

- часть 1. Общие требования. Номинальные данные низковольтных электроприводов постоянного тока с регулированием частоты вращения;
- часть 2. Общие требования. Номинальные данные низковольтных электроприводов переменного тока с регулированием частоты вращения;
- часть 3. Требования по электромагнитной совместимости и специальные методы испытаний;
- часть 4. Общие требования. Номинальные данные электроприводов переменного тока на напряжение свыше 1000 В и до 35 кВ включительно;
- часть 5. Требования безопасности;
- часть 6. Руководство по определению режима нагружения и соответствия номинальному току;
- часть 7. Многофункциональный интерфейс и пользовательский профиль комплектных электроприводов;
- часть 8. Спецификация напряжений на силовом входе;
- часть 9. Экодизайн систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и ее приводов. Показатели энергоэффективности систем силовых электроприводов и пускателей электродвигателя.

Каждая часть в дальнейшем может быть в свою очередь разделена на отдельные части, публикуемые как международные стандарты, технические спецификации или технические отчеты. Причем некоторые из них к настоящему времени уже изданы; другие будут издаваться с продолжением нумерации, идентифицирующей номер данной отдельной части, например IEC 61800-9-2.

Все ключевые понятия, элементы и требования в настоящем стандарте заимствованы из EN 50598-2 CENELEC, опубликованного 19 декабря 2014 г., и согласованы в соответствующих технических комитетах.

Настоящий стандарт разработан в тесном сотрудничестве с другими техническими комитетами (IEC/TS 2, IEC/SC 121 A), а также комитетом потребительского сообщества CEN/TC 197 с целью обеспечения энергоэффективности и формулирования всеобъемлющих требований к экодизайну.

Ключевые формулировки:

- требования к энергоэффективному проектированию комплектных электроприводов с учетом их нагрузки;
- требования и классификация IE комплектных преобразователей (CDM);
- требования и классификация IES комплектных электроприводов (PDS);
- определение потерь в комплектном электроприводе в сочетании с приводным механизмом для комплексной оценки энергоэффективности конечной продукции;
- требования к проектированию экологически безопасных систем и декларированию совместимости электроприводов с окружающей средой.

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

СИСТЕМЫ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ

Часть 9-2

Энергоэффективность систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и электромеханических комплексов на их основе. Показатели энергоэффективности систем силовых электроприводов и пускателей электродвигателя

Adjustable speed electrical power drive systems. Part 9-2. Energy efficiency of power drive systems, electric motor starters, power electronics and electromechanical systems based on them. Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters

Дата введения — 2022—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет показатели энергоэффективности силовой электроники (комплектных преобразователей, комплектных электроприводов и пускателей электродвигателей), используемой в электроприводе.

Настоящий стандарт содержит методы определения потерь в комплектных преобразователях, комплектных электроприводах и системах движения.

Настоящий стандарт определяет классы IE и IES, граничные значения параметров в них и процедуры испытаний для классификации систем электропривода по общим потерям.

Кроме того, в настоящем стандарте содержится методология оптимального выбора наиболее энергоэффективного решения электропривода. Оно зависит от структуры привода, профиля нагрузки (частота вращения — момент) и рабочих точек во время функционирования.

Методология достижения комплексной энергоэффективности продукции представлена квазианалитическими моделями в IEC 61800-9-1.

Настоящий стандарт имеет следующую структуру:

- учтены потери в стандартизованном эталонном комплектном электроприводе, комплектном преобразователе и математическая модель для их расчета;
- определены эталонный двигатель и эталонный комплектный преобразователь и показано их использование для установления класса энергоэффективности системы электропривода в том случае, когда один из компонентов неизвестен;
- приведены требования к реальным комплектным электроприводам и преобразователям в сравнении с эталонными;
- приведены требования к типовым испытаниям и пользовательской документации;
- указаны потери в отдельных элементах электромеханической системы, которые приведены в приложениях A, D, E;
- представлены сведения о топологии электромеханической системы, приведенные в приложении C.

Конкретные данные по потерям энергии в эталонных двигателях, комплектных преобразователях и электроприводах и классификация IE приведены с учетом низких напряжений (свыше 100 и до 1000 В включительно), однокоординатных трехфазных электроприводов переменного тока. Редукторные двигатели рассмотрены как стандартные при возможности их отделения от редуктора.

Издание официальное

Все нормативные данные получены для электроприводов с асинхронными двигателями. Они также могут быть использованы для всех типов приводов с другими типами двигателей.

Применение настоящего стандарта технически возможно, но не обязательно для следующих видов оборудования:

- высоковольтные комплектные преобразователи и электроприводы переменного тока напряжением свыше 1000 В;
- низковольтные комплектные преобразователи и электроприводы переменного тока напряжением не выше 1000 В;
- комплектные электроприводы большой мощности свыше 1000 кВт;
- комплектные преобразователи большой мощности свыше 1209 кВА;
- комплектные электроприводы малой мощности до 0,12 кВт;
- комплектные преобразователи малой мощности до 0,278 кВА;
- комплектные преобразователи других типов, отличных от преобразующих электроэнергию переменного тока в энергию переменного тока более чем в одной цепи;
- комплектные электроприводы других типов, отличных от преобразующих электроэнергию переменного тока в механическую энергию на более чем одном валу;
- комплектные электроприводы и преобразователи, способные возвращать энергию источнику питания,
- комплектные электроприводы и преобразователи со входным током, имеющим суммарный гармонический ток (в соответствии с определением по IEC 61000-3-12) менее 10 %;
- комплектные редукторные электроприводы, в которых двигатель и редуктор не могут быть разъединены, например ввиду однокорпусного исполнения;
- сервоприводы (состоящие из преобразователя, двигателя и датчика положения);
- комплектные электроприводы, поставляемые на рынок не в качестве отдельной продукции.

Примечание — Все части IEC 61800-9 не относятся к исполнительным механизмам, но обеспечивают базу для глобальной оценки энергоэффективности электромеханического комплекса в целом.

2 Нормативные ссылки

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

IEC 60038:2009, IEC standard voltages (Напряжения стандартные по МЭК)

IEC 60050-161, International electrotechnical vocabulary — Part 161: Electromagnetic compatibility (Международный электротехнический словарь. Глава 161. Электромагнитная совместимость)

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

IEC 60034-2-1:2014, Rotating electrical machines. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) [Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава)]

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 60034-30-1, Rotating electrical machines — Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) [Классы эффективности двигателей переменного тока, работающих от сети (код IE)]

IEC 60947-4-1, Low voltage switchgear and control gear — Part 4-1: Contactors and motor-starters — Electromechanical contactors and motor-starters (Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контакторы и пускатели. Электромеханические контакторы и пускатели)

IEC TS 61800-8, Adjustable speed electrical power drive systems — Part 8: Specification of voltage on the power interface (Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 8. Электрические приводные системы с регулируемой скоростью. Часть 8. Спецификация напряжения на силовом сопряжении).

IEC TS 62578, Power electronics systems and equipment — Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz [Системы и оборудование для силовой электроники. Условия эксплуатации и характеристики преобразователя электрической энергии (AIC), включая требования к конструкции для значений излучения ниже 150 кГц]

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены основные термины и определения, установленные в IEC 60050-161, а также следующие термины с соответствующими определениями.

ИСО и МЭК поддерживают терминологические базы данных для использования в стандартах по следующим адресам:

- Электропедия МЭК, которая доступна на gost.e-ecolog.ru
- Онлайн-платформа просмотра ИСО, которая доступна на gost.e-ecolog.ru

3.1.1 **активный выпрямитель** (active infeed converter, AIC): Автономный силовой электронный преобразователь независимо от технологии производства, топологии, напряжения и типоразмера, который расположен между сетью переменного тока и звеном постоянного тока (со свойствами источника тока или источника напряжения) и может передавать энергию в обоих направлениях, а также управлять реактивной мощностью или коэффициентом мощности.

Примечание 1 — См. IEC TS 62578.

Примечание 2 — Международный электротехнический словарь (IEV) определяет термины «преобразователь со свойствами источника напряжения (VSC)» и «преобразователь со свойствами источника тока (CSC)» как преобразователи переменного тока в постоянный, поддерживающие и регулирующие соответственно напряжение или ток на выходе. Большинство активных выпрямителей представляют собой преобразователи с двунаправленным потоком энергии и имеют источник на стороне постоянного тока.

3.1.2 **альтернативный метод определения КПД** (alternate efficiency determination method, AEDM): Аналитическая модель, используемая производителем для вычисления потерь в целях общей оценки КПД электромеханического комплекса.

3.1.3 **комплектный преобразователь** (complete drive module, CDM): Часть электропривода, состоящая из силового преобразователя, включенного между источником питания и двигателем, а также дополнительные устройства защиты, трансформаторы и вспомогательные устройства.

Примечание 1 — Преобразователь переменного тока в переменный (AC/AC frequency converter), питающий двигатель, в ряде государств обозначается термином «привод (drive)».

3.1.4 **коэффициент амплитуды, пик-фактор** (crest factor): Отношение абсолютного значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению.

3.1.5 **исполнительный механизм** (driven equipment): Механическое оборудование, соединенное с валом двигателя.

3.1.6 **индекс энергоэффективности** (energy efficiency index, EEI): Величина, описывающая энергоэффективность электромеханического комплекса в целом.

Примечание 1 — Если электромеханический комплекс представляет собой насосную систему, индекс энергоэффективности равен отношению требуемой энергии (фактической плюс потери) к теоретически потребляемой всем комплексом.

3.1.7 **электромеханический комплекс** (extended product, EP): Исполнительный механизм вместе с электромашинной системой или комплектным электроприводом.

Примечание 1 — См. рисунок 2.

3.1.8 **класс энергоэффективности** (IE class): Классификация энергоэффективности компонентов электромеханической системы.

Примечание 1 — IE — аббревиатура термина «international efficiency».

3.1.9 **класс энергоэффективности системы** (IES class): Классификация энергоэффективности электромашинной системы (комплектного электропривода или редукторного двигателя).

Примечание 1 — IES — аббревиатура термина «international efficiency of systems».

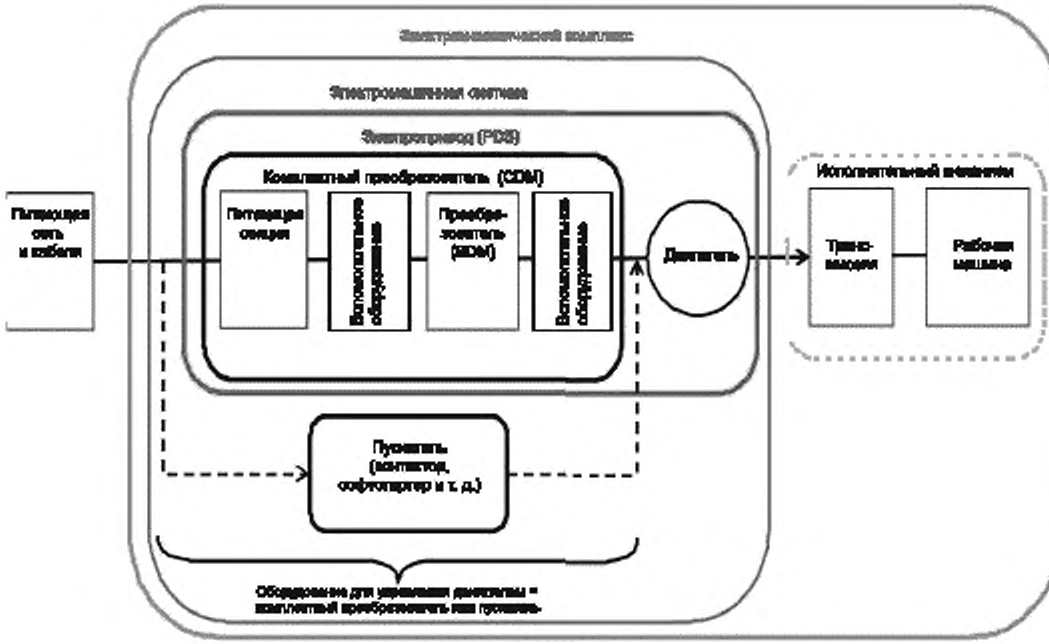


Рисунок 2 — Электромеханический комплекс

3.1.10 **электромашинная система** (motor system): Комплектный электропривод или двигатель, подключенный к источнику питания через пускатель в соответствии с IEC 60947-4-1.

3.1.11 **электропривод** (power drive system, PDS): Система, состоящая из комплектного преобразователя (CDM) и двигателя.

3.1.12 **импульсная диаграмма** (pulse pattern): Диаграмма переключения линейного напряжения или фазного тока на выходных клеммах (без фильтра) преобразователя как результат работы схемы широтно-импульсной модуляции.

3.1.13 **эталонный комплектный преобразователь** (reference complete drive module, RCDM): Комплектный преобразователь с потерями энергии, описанными уравнениями или точечными значениями.

3.1.14 **эталонный двигатель** (reference motor, RM): Двигатель с потерями энергии, описанными уравнениями или точечными значениями.

3.1.15 **эталонный электропривод** (reference power drive system, RPDS): Электропривод с потерями энергии, описанными уравнениями или точечными значениями.

3.1.16 **сервопривод** (servo PDS): Замкнутый регулируемый электропривод для точного и быстродействующего управления угловым или линейным перемещением, скоростью и ускорением исполнительного механизма (сервомеханизма) в таких областях, как ЧПУ-станкостроение, автоматическое производство, робототехника.

Примечание 1 — См. рисунок 3.

Примечание 2 — Сервопривод состоит из преобразователя частоты, двигателя и датчика положения.

Примечание 3 — Для применений сервопривода характерны непериодические режимы работы (типа S9) или периодически меняющиеся нагрузка и скорость в четырехквадрантном диапазоне ($\pm T_{max}$, $\pm n_{max}$) с частыми перегрузками ($T > T_N$), а также работой в зоне ослабленного потока ($n > n_N$), как показано на диаграмме на рисунке 3.

3.1.17 **однокоординатный** (single axis): Имеющий один двигатель с валом.

Примечание 1 — Применяется к комплектным преобразователям, обеспечивающим питание одного двигателя, или к комплектным приводам с одним двигателем.

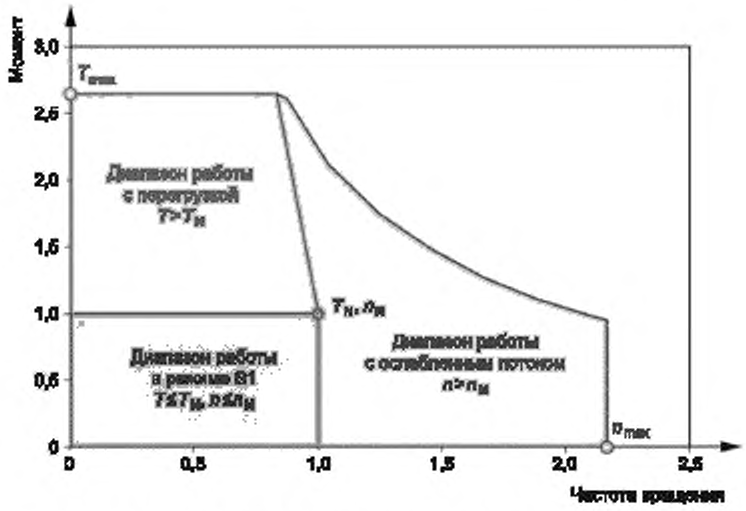


Рисунок 3 — Диаграмма момент — частота вращения сервопривода

3.1.18 **испытательная нагрузка** (test load): Электротехническое устройство, обеспечивающее ток и cos φ основной гармоники на выходе комплектного преобразователя при проведении испытаний или расчетов.

Примечание 1 — В роли испытательной нагрузки может выступать испытательный двигатель или любая другая нагрузка.

3.1.19 **испытательный ток** (test load current): Суммарный ток, подаваемый в испытательную нагрузку для получения требуемого момента на валу (см. таблицу 1).

3.1.20 **моментоопределяющий ток** (torque-producing current): Часть испытательного тока (см. 3.1.19), определяющая необходимый момент (см. рисунок 6, таблицу 1).

Примечание 1 — Для асинхронного двигателя ток, создающий крутящий момент, является током ротора.

3.2 Обозначения и сокращения

3.2.1 c_{liquid} — удельная теплоемкость жидкости.

3.2.2 E_D — коммутационные потери энергии, выраженные в вольтах, В, или амперах, А, в силовом диоде.

3.2.3 E_T — коммутационные потери энергии, выраженные в вольтах, В, или амперах, А, в силовом транзисторе.

3.2.4 f_{sw} — число переключений одного полупроводника в секунду.

Примечание 1 — Это число наряду с диаграммой переключений и топологией преобразователя определяет нижнюю частоту неуправляемых гармоник или интергармоник в местной точке подключения или на двигателе.

Примечание 2 — Включение и отключение полупроводникового ключа — разные события. Так, частота коммутации двухуровневого преобразователя вдвое больше частоты импульсов (называемой также несущей частотой) трехфазного линейного напряжения для модуляции с использованием постоянной коммутации и в 1,33 раза больше частоты импульсов линейного напряжения для модуляции с применением переменной коммутации.

3.2.5 I_{motor_cable} — ток в кабеле двигателя в одном силовом канале (см. IEC 61800-2) комплектного электропривода, используемый для расчета коммутационных потерь.

Примечание 1 — Он обычно представляет емкостной ток утечки, естественный для экранированных кабелей двигателей.

3.2.6 $I_{1\ rCDM}$ — первая гармоника номинального входного тока комплектного преобразователя или электропривода.

3.2.7 I_r — номинальный входной ток комплектного преобразователя или электропривода.

3.2.8 I_{out} — выходной ток.

3.2.9 $I_{r,out}$ — номинальный выходной ток комплектного преобразователя.

3.2.10 I_{rM} — номинальный ток двигателя.

3.2.11 $k1_{DC_link}$ — не зависящий от нагрузки параметр звена постоянного тока, 1/(Ом · А).

3.2.12 $k1_{choke}$ — импеданс фильтра, отнесенный к номинальному импедансу комплектного преобразователя.

3.2.13 $k2_{DC_link}$ — зависящий от нагрузки параметр звена постоянного тока, Ом · А.

3.2.14 $k2_{choke}$ — относительное падение напряжения на активном сопротивлении фильтра.

3.2.15 K_{fe} — добавочные потери в стали двигателя.

3.2.16 K_{fw} — добавочные потери трения и вентиляционные потери в двигателе.

3.2.17 K_{LL} — потери от нагрузки.

3.2.18 k_{VD} — отношение номинального напряжения двигателя к максимальному выходному напряжению комплектного преобразователя.

3.2.19 $P_{L,cooling}$ — потери мощности в охлаждающих элементах комплектного преобразователя (например, вентиляторах) по отношению к потерям в собственно преобразователе (см. IEC 61800-2), если комплектный преобразователь оснащен независимой вентиляцией.

3.2.20 m — коэффициент модуляции — отношение выходной частоты комплектного преобразователя к номинальной частоте питания статора двигателя.

3.2.21 n_i — частота вращения в точке i, об/мин.

3.2.22 n_r — номинальная частота вращения, об/мин.

3.2.23 P_i — потребление энергии в точке i, кВт.

3.2.24 $P_{in,CDM}$ — входная мощность комплектного преобразователя, рассчитанная на основании измерения потерь.

3.2.25 $P_{in.PDS}$ — входная мощность комплектного электропривода, рассчитанная на основании измерения потерь.

3.2.26 P_{Lfe} — потери в стали двигателя.

Примечание 1 — См. IEC 60034-2-1.

3.2.27 P_{Lfw} — потери на трение и вентиляторные потери в двигателе.

Примечание 1 — См. IEC 60034-2-1.

3.2.28 P_{LHL} — добавочные гармонические потери в двигателе от несинусоидального питания.

Примечание 1 — См. IEC 60034-2-3.

3.2.29 P_{LL} — добавочные потери от нагрузки в двигателе.

Примечание 1 — См. IEC 60034-2-1.

3.2.30 p_{LRM} — относительные потери в эталонном двигателе.

3.2.31 P_{LRM} — потери в эталонном двигателе.

3.2.32 P_{LR} — потери в роторе двигателя.

Примечание 1 — См. IEC 60034-2-1.

3.2.33 P_{LS} — потери в обмотке статора двигателя.

Примечание 1 — См. IEC 60034-2-1.

3.2.34 P_{LTsin} — суммарные потери в двигателе при синусоидальном питании.

Примечание 1 — Согласно IEC 60034-2-1:2014, метод 2-1-1B.

3.2.35 $P_{LT,Mot}$ — суммарные потери в двигателе при питании от преобразователя (несинусоидальном питании).

Примечание 1 — Согласно IEC 60034-2-1:2014, метод 2-1-1B.

3.2.36 $P_{out,CDM}$ — выходная мощность комплектного преобразователя, рассчитанная на основании измерения потерь.

3.2.37 $P_{out,PDS}$ — выходная мощность комплектного электропривода, рассчитанная на основании измерения потерь.

3.2.38 P_r — выходная мощность оборудования, заявленная производителем.

3.2.39 P_{proc} — мощность, требуемая для обеспечения механического или гидромеханического процесса.

3.2.40 P_L — электрические потери мощности.

Примечание 1 — В обозначениях $P_{L,CDM}$, $P_{L,Mot}$, $P_{L,PDS}$ и $P_{L,Aux}$: индекс CDM относится к комплектному преобразователю, Mot — к двигателю, PDS — к комплектному электроприводу, Aux — к вспомогательному оборудованию, например к кабелям, трансформаторам, фильтрам.

3.2.41 p_L — относительные потери мощности (по отношению к номинальной мощности устройства).

3.2.42 $P_{L,CDM}$ — потери в комплектном преобразователе.

3.2.43 $P_{L,CDM,\ determined}$ — потери в комплектном преобразователе по расчетному методу определения потерь.

3.2.44 $p_{L,CDM}$ — относительные потери мощности в комплектном преобразователе (по отношению к номинальной кажущейся мощности комплектного преобразователя).

3.2.45 $P_{L,choke}$ — потери в фильтре комплектного преобразователя.

3.2.46 $P_{L,control}$ — потери в звене управления комплектного преобразователя.

3.2.47 P_{L,DC_link} — потери в звене постоянного тока комплектного преобразователя.

3.2.48 $P_{L,inverter}$ — потери в инверторном звене комплектного преобразователя.

3.2.49 $P_{L,PDS,\ determined}$ — потери в комплектном электроприводе по расчетному методу определения потерь.

3.2.50 $P_{L,rectifier}$ — потери в выпрямительном звене комплектного преобразователя.

3.2.51 $P_{L,resistor}$ — измеренные потери в резисторе при сопоставительном калориметрическом измерении.

3.2.52 $P_{L,on,D}$ — потери в силовом диоде во включенном состоянии.

3.2.53 $P_{L,on,D,\ rectifier}$ — потери в диоде выпрямителя во включенном состоянии.

3.2.54 $P_{L,on,T}$ — потери в силовом транзисторе во включенном состоянии.

3.2.55 P_{LSR} — потери в обмотках статора и ротора двигателя.

3.2.56 $P_{L,sw,D}$ — коммутационные потери в силовом диоде.

3.2.57 $P_{L,sw,T}$ — коммутационные потери в силовом транзисторе.

3.2.58 $P_{r,M}$ — номинальная мощность двигателя.

Примечание 1 — Во всех частях IEC 60034 в применении к двигателю эта мощность обозначена P_N.

3.2.59 $P_{L,\ stby}$ — потери в электроприводе, находящемся в режиме ожидания.

Примечание 1 — Потери в режиме ожидания электропривода выделяются в то время, когда электропривод включен, но не создает ток в нагрузке. Эти потери обычно в два — три раза меньше, чем потери во время работы. Их влияние на комплексные потери напрямую зависит от режима работы электромеханического комплекса. Они связаны также с требованиями, сформулированными в терминах «время включенного состояния (wake-uptime)» и «коммуникация».

3.2.60 P_N — относительные потери двигателя.

3.2.61 Q — расход насоса.

3.2.62 Q_{BEP} — расход насоса в точке максимального КПД.

3.2.63 Q_{cooler} — объемный расход охладителя калориметра.

3.2.64 Q_{ISI} — интерполяционная ошибка (показатель стабильности).

3.2.65 r_{HL} — величина дополнительных гармонических потерь при работе двигателя от комплектного преобразователя по сравнению с потерями при работе от синусоидального источника питания.

3.2.66 $S_{r,equ}$ — номинальная кажущаяся мощность элемента оборудования.

3.2.67 $S_{r,RCDM}$ — номинальная кажущаяся мощность эталонного комплектного преобразователя.

3.2.68 T — вращающий момент двигателя.

3.2.69 t_w — время работы оборудования.

3.2.70 T_j — момент в рабочей точке *i*.

3.2.71 $U_{1,r,out}$ — основная гармоника номинального напряжения на выходе комплектного преобразователя.

Примечание 1 — Для эталонного комплектного преобразователя значение этого напряжения равно 400 В, если не установлено иное.

3.2.72 U_{DC} — напряжение звена постоянного тока комплектного преобразователя.

3.2.73 $U_{D,r}$ — напряжение на силовом диоде во включенном состоянии при номинальном токе комплектного преобразователя.

3.2.74 $U_{D,r,rectifier}$ — напряжение на диоде выпрямителя во включенном состоянии при номинальном токе комплектного преобразователя.

3.2.75 $U_{D,th}$ — пороговое напряжение на силовом диоде.

3.2.76 $U_{D.th,rectifier}$ — пороговое напряжение на диоде выпрямителя.

3.2.77 U_{mL1} — напряжение «фаза L1 — нейтраль» системы питания.

3.2.78 $U_{T,r}$ — напряжение на силовом транзисторе во включенном состоянии при номинальном токе комплектного преобразователя.

3.2.79 $U_{T,th}$ — пороговое напряжение силового транзистора.

3.2.80 W_w — электрическая энергия, потребляемая электромеханическим комплексом во время работы.

3.2.81 λ — коэффициент мощности входного тока и напряжения ($\lambda = P_{equ}/S_{r,equ}$).

3.2.82 $\Delta\rho_{L,CDM}$ — относительная погрешность метода определения потерь в комплектном преобразователе, %.

3.2.83 $\Delta P_{L,CDM}$ — абсолютная погрешность метода определения потерь в комплектном преобразователе, Вт.

3.2.84 $\Delta\rho_{L,PDS}$ — относительная погрешность метода определения потерь в комплектном электроприводе, %.

3.2.85 $\Delta P_{L,PDS}$ — абсолютная погрешность метода определения потерь в комплектном электроприводе, Вт.

3.2.86 θ_{in} — температура охлаждающего агента (воздух, жидкость) на входе при калориметрическом измерении.

3.2.87 θ_{inside} — температура охлаждающего воздуха между двумя калориметрическими камерами.

3.2.88 θ_{out} — температура охлаждающего агента (воздух, жидкость) на выходе при калориметрическом измерении.

3.2.89 φ — угол фазового сдвига между основной гармоникой напряжения и основной гармоникой тока на входе комплектного преобразователя.

3.2.90 Φ — угол фазового сдвига между основной гармоникой напряжения и основной гармоникой тока на выходе комплектного преобразователя.

3.2.91 Φ_r — угол фазового сдвига между основной гармоникой напряжения и основной гармоникой тока на выходе комплектного преобразователя при номинальном моменте и частоте вращения двигателя.

4 Эталонный комплектный электропривод, эталонный комплектный преобразователь, эталонный двигатель

4.1 Общие положения

Для выбора наиболее эффективного электромеханического комплекса для конкретного применения требуется сравнение различных структур электропривода и различных принципов управления. Комплексный подход к решению этой задачи представлен в IEC 61800-9-1.

В рамках этого подхода в настоящем стандарте представлена концепция эталонного электропривода (RPDS). Стандартизованный электропривод, состоящий из эталонного комплектного преобразователя (RCDM) и эталонного двигателя (RM), питаемого от преобразователя, позво-

ляет сравнить потребление энергии проектируемого комплекса с существующей на текущее время усредненной технологией производства электропривода.

Определение эталонного комплектного электропривода универсально и не зависит от специфики продукции или производителя. Оно позволяет:

установить граничные значения для классификации;

классифицировать реальный комплектный электропривод в сравнении с эталонным;

классифицировать комплектный преобразователь;

применить IEC 60034-30-2;

классифицировать двигатели, предназначенные для питания от преобразователя и классифицированные по IEC 60034-30-1,

ограничить оценку только доступными измерениями или расчетами в нескольких рабочих точках;

оценить потребление энергии электроприводом в различных применениях.

Ниже приведены примеры подходящих задаваемых режимов (рабочих точек) при классификации для различных применений.

Нагрузки с квадратичной зависимостью момент—частота вращения, характерные для насосных установок, обычно требуют определения относительных потерь или входной мощности P_1 в рабочих точках $p_{L,\ PDS(50,25)}$, $p_{L,\ PDS(100,50)}$ и $p_{L,\ PDS(100,100)}$ для расчета потерь в электромеханической системе. Допустимая погрешность составляет ±10 % в каждой расчетной точке.

Нагрузки с постоянным моментом, характерные для грузоподъемного оборудования, потребуют дополнительных рабочих точек $p_{L,\ PDS(0,25)}$, $p_{L.\ PDS(0,50)}$ и $p_{L,\ PDS(0,100)}$ для расчета потерь в системе.

4.2 Опорные рабочие точки эталонных комплектного электропривода, комплектного преобразователя и двигателя

Все исполнительные механизмы могут быть охарактеризованы в каждом рабочем режиме требуемой мощностью, определяемой как произведение момента на скорость вращения в данной рабочей точке. Данной точке соответствуют определенные потери в электромеханическом комплексе.

Набор рабочих точек (момент, скорость), в которых потенциально возможна работа механизма, бесконечен. Теоретически, надо подсчитать потери во всех точках. На практике, однако, достаточно знать потери в нескольких (восьми) точках, представленных для эталонного комплектного электропривода на рисунке 4, эталонного двигателя — на рисунке 5 и эталонного преобразователя — на рисунке 6.

Для рабочих точек с частотой вращения более нуля потери даны в процентах от выходной механической мощности. Номинальный КПД η определяют как отношение номинальной механической мощности на валу к электрической потребляемой мощности на входе (включая потери).

В настоящем стандарте потери, отнесенные к номинальной выходной мощности электропривода p, %, рассмотрены вместо КПД с целью достижения универсальности глобальной оценки энергоэффективности электромеханического комплекса в целом.

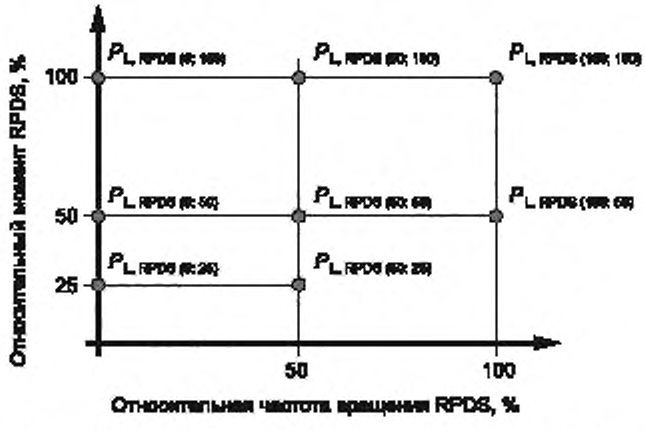


Рисунок 4 — Опорные рабочие точки (относительные частота вращения и момент на валу) для определения относительных потерь эталонного комплектного электропривода (RPDS)

Существуют исполнительные механизмы, в которых требуется поддерживать момент во время паузы. Для таких механизмов КПД не является представительной характеристикой.

Как уже определено, абсолютные потери эталонного комплектного электропривода являются суммой потерь эталонных преобразователя и двигателя, поэтому данные потери могут быть рассчитаны от точки к точке по следующей формуле:

$$P_{L,\,RPDS} = P_{L.\,RM} + P_{L.\,RCDM}. \quad (1)$$

Относительные потери эталонного электропривода рассчитывают по относительным потерям эталонных преобразователя и двигателя по формуле

$$P_{L,RPDS} = \frac{P_{L,RM} \cdot P_{r,RM} + P_{L,RPDS} \cdot S_{r,RPDS}}{P_{r,RM}}. \quad (2)$$

При номинальных частоте вращения и моменте должна быть использована модифицированная формула в соответствии с уравнением (19).

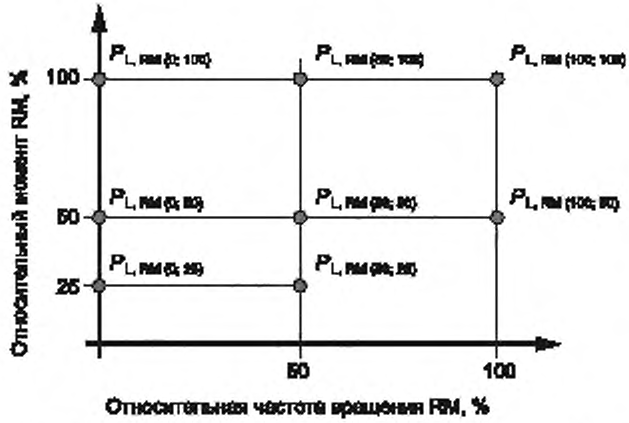


Рисунок 5 — Опорные рабочие точки (относительные частота вращения и момент на валу) для определения относительных потерь эталонного двигателя (RM)

Рабочие точки эталонного преобразователя RCDM не могут быть заданы в координатах частоты вращения и момента, поскольку комплектный преобразователь обеспечивает только ток и напряжение на выходе. Чтобы обеспечить воспроизводимое сравнение и необходимую модуляцию, основная гармоника выходного переменного напряжения должна составлять 90 % переменного напряжения на входе.

Примечание 1 — Потери в RCDM при 90 % выходного напряжения близки к потерям при 100 % выходного напряжения (в инверторе потери несколько выше, в то время как в выпрямителе — ниже), поэтому могут быть использованы как потери при частоте 100 % частоты вращения.

Примечание 2 — Для асинхронных двигателей моментообразующим током является ток ротора. Соотношение между этим током и током статора двигателя приведено в таблице 1.

Примечание 3 — На рисунке 6 рабочие точки $p_{L,\,RCDM(0,n)}$ на оси абсцисс достижимы лишь при отличном от нуля значении выходного напряжения преобразователя, чтобы обеспечить падение напряжения на активном сопротивлении обмоток.

Относительное значение основной гармоники выходного напряжения комплектного преобразователя, %, не должно быть ниже относительного значения выходной частоты, %.

Потери в промежуточных рабочих точках следует вычислять по одному из расчетных методов, представленных в приложении Е (Е.2.1):

a) по максимальным потерям в соседней предыдущей рабочей точке;

b) методом двумерной линейной интерполяции между соседними рабочими точками;

c) расчетом потерь в преобразователе по математической модели, представленной в 5.2.

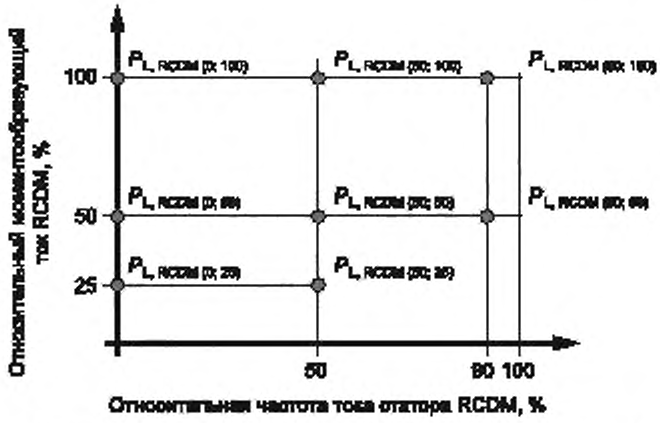


Рисунок 6 — Опорные рабочие точки (относительные частота тока статора и ток статора) для определения относительных потерь эталонного комплектного преобразователя (RCDM)

Потери в двигателе находят в соответствии с приложением D.

Допускаются отклонения относительной частоты вращения ротора от опорных рабочих точек (см. рисунок 4) в пределах номинального скольжения. При частоте 0 Гц допустимо отклонение до 12 %.

Оценка отклонений в дополнительных рабочих точках, при частичных нагрузках и уменьшении числа рабочих точек приведена в 8.4 и приложении D (D 4.3).

4.3 Потери в электроприводе и исполнительный механизм. Алгоритм квазиматематического моделирования

Модель для определения потерь и индекса энергоэффективности электромеханического комплекса (EEI), далее именуемая «квазиматематическая модель, КММ» (semi analytical model, SAM), включает физические и математические параметры и алгоритмы расчета потерь в компонентах комплекса.

Последовательность действий при определении индекса энергоэффективности представлена диаграммой на рисунке 7.

Диаграмма также иллюстрирует связь модели электропривода (левая часть диаграммы) с моделью исполнительного механизма (правая часть). Эта связь реализована в опорных рабочих точках комплектного электропривода при допустимых отклонениях. Для использования модели исполнительного механизма КММ необходимы данные о его рабочих точках.

Данные электромашинной системы, содержащие потери в комплектном электроприводе (см. рисунок 2), определены в настоящем стандарте, тогда как квазианалитические модели потребления энергии исполнительного механизма, приводимого в движение электромашинной системой, должны быть разработаны соответствующим комитетом. Пример электромеханического комплекса насоса приведен в IEC 61800-9-1. На рисунке 8 показано, как совместно используются источники информации.

Стандартизация квазианалитических моделей исполнительных механизмов для различных применений лежит в зоне ответственности соответствующих технических комитетов.

Настоящий стандарт устанавливает, как определить потери энергии в электромашинной системе. Комитет по стандартизации соответствующей категории продукции установит допустимые пределы отклонений данных оценок.

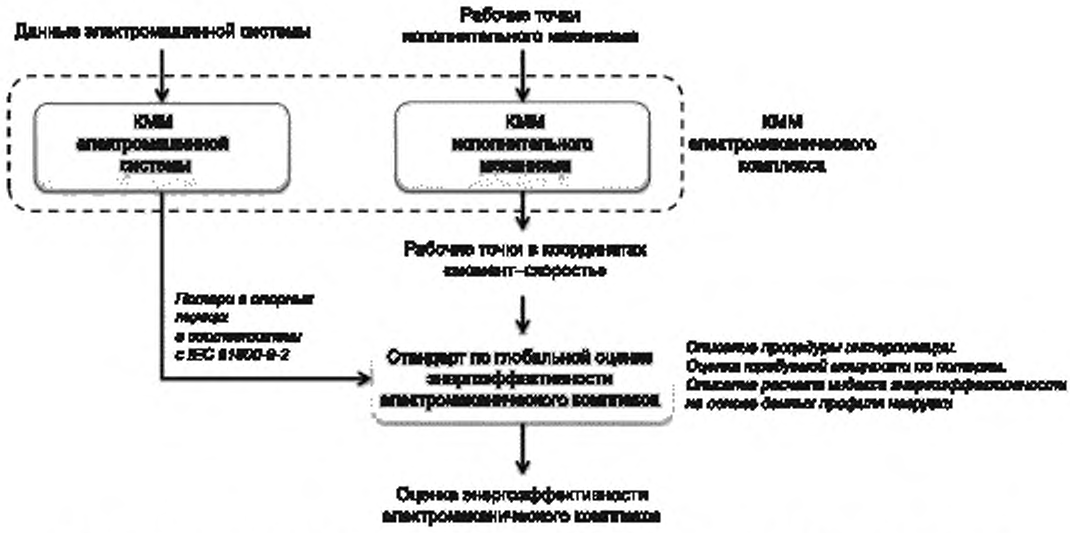
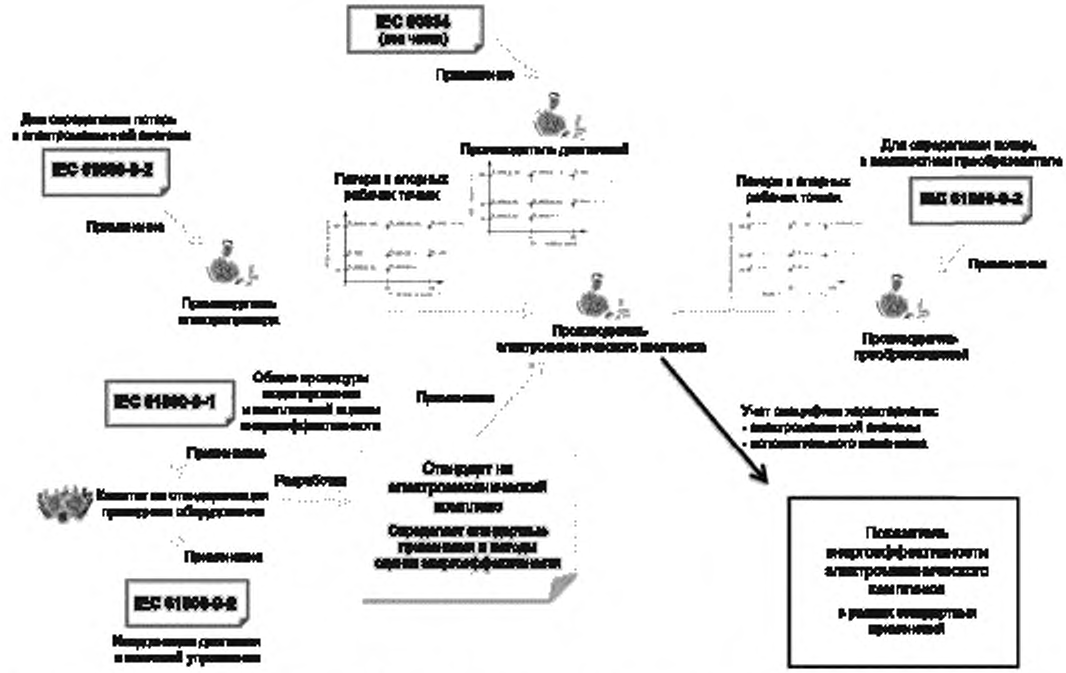


Рисунок 7 — Диаграмма последовательности действий при оценке индекса энергоэффективности электромеханического комплекса



Производители двигателей и компактных преобразователей могут передавать данные непосредственно производителю электромашинной системы (компактного электропривода).

Если электромашинная система основана на пускателе, для оценки энергоэффективности электромеханического комплекса достаточно данных о потерях двигателя.

Рисунок 8 — Диаграмма использования источников информации при оценке индекса энергоэффективности электромеханического комплекса

4.4 Классы IE двигателей при питании от сети

В IEC 60034-30-1 определены классы IE двигателей при питании от сети в пределах от IE1 до IE4 (или IE5 соответственно изданию). Классы выше IE5 в настоящее время не используют.

4.5 Классы IE двигателей при питании от преобразователя

В соответствии с IEC 60034-30-1 гармонический состав напряжения комплектного преобразователя вызывает увеличение потерь в двигателе на 15 %—25 %.

Двигатели, не спроектированные для работы непосредственно от сети, должны быть классифицированы кодами IE по их потерям при работе с номинальным моментом и частотой вращения (при номинальной мощности) в соответствии с IEC TS 60034-30-2.

Коды IE двигателей, которые допускают работу непосредственно от сети, определены по IEC 60034-30-1, а для двигателей, которые могут питаться от комплектного преобразователя, — по IEC TS 60034-30-2. Потери в семи опорных рабочих точках могут быть экстраполированы по приложению D. Потери в этих точках могут быть даны производителем по оценке альтернативным методом в соответствии с IEC 60034-2-3.

4.6 Классы IE преобразователей частоты (комплектных преобразователей CDM)

Эталонный комплектный преобразователь (RCDM) должен иметь класс IE1.

Для того чтобы заявить класс энергоэффективности комплектного преобразователя, не рассматривая результаты испытаний комплектного электропривода в целом, и отразить технологическое влияние наиболее существенных параметров, должна быть реализована так называемая «тестовая нагрузка».

Рабочие точки для определения класса IE должны быть взяты в соответствии с 4.2.

Активные преобразователи, соответствующие IEC TS 62578, являющиеся преобразователями, способными возвращать энергию, запасенную инерционными элементами, могут быть исключены из классификации IE. Относительные потери в таких активных преобразователях вдвое превышают потери в преобразователях без режима рекуперации. Поэтому существенный общий вклад активного выпрямителя в энергоэффективность не может быть адекватно оценен его классом IE, а сам активный выпрямитель с рекуперацией рассматривается как опция для электромеханического комплекса.

Комплектные преобразователи, имеющие суммарный гармонический ток THC 10 % и менее (в соответствии с IEC 61000-3-12), например преобразователи с коррекцией коэффициента мощности, могут быть исключены из классификации IE. Относительные потери в таких активных выпрямителях вдвое превышают потери в преобразователях с диодными выпрямителями. Однако основной вклад этих преобразователей выражается в более эффективном использовании сетей путем уменьшения потерь и пульсаций в их элементах.

4.7 Классы IES комплектных электроприводов

Комплектные электроприводы могут быть классифицированы в диапазоне от IES0 до IES2.

В настоящем стандарте классификация ограничена классами IES0, 1 и 2. Классы от IES3 до IES9 могут быть представлены в следующих изданиях настоящего стандарта.

Относительные потери в комплектном электроприводе могут быть определены методом расчета или эксперимента. Расчет может состоять в арифметическом суммировании абсолютных потерь в двигателе при питании от преобразователя и преобразователя со вспомогательным оборудованием.

Эталонный преобразователь (RPDS) (см. рисунок 4) классифицирован классом IS1.

4.8 Соответствие классов IE и IES

Следует учитывать, что классы энергоэффективности IE отдельных компонентов не могут суммироваться для определения класса IES комплектного электропривода.

Классификация IES комплектного электропривода может быть получена в соответствии с подразделом 4.9 только на основе детального выяснения потерь во всех компонентах.

Индивидуальные классы IE требуются для классификации компонентов без предварительного знания класса электромеханического комплекса.

В общем случае чем больше класс IE, тем выше энергоэффективность и меньше относительные потери.

Повышение эффективности и снижение относительных потерь	Класс двигателей с питанием от сети Энергоэффективность	Класс двигателей с питанием от преобразователя Энергоэффективность	Преобразователь Потери, отнесенные к номинальной мощности	Электропривод Потери, отнесенные к номинальной мощности
	IE0 не используются	IE0 рассматривается	IE0 – более чем на 25 % выше нормативного значения	IES0 – более чем на 20 % выше нормативного значения
	IE1 техническим достижением	IE1 рассматривается	IE1 – нормативное значение ±25 %	IES1 – нормативное значение ±20 %
	IE2 достижимы при усовершенствованной технике	IE2 рассматривается	IE2 – более чем на 25 % ниже нормативного значения	IES2 – более чем на 20 % ниже нормативного значения
	IE3 требует коренного усовершенствования	IE3 рассматривается	IE3 рассматривается	IES3 рассматривается
	IE4 требует новой техники	IE4 рассматривается	IE4 рассматривается	IES4 рассматривается
	IE5 требует экспериментальные новые технологии	IE5 рассматривается	IE5 рассматривается	IES5 рассматривается
	IE6 не используется	IE6 рассматривается	IE6 рассматривается	IES6 рассматривается
	IE7 не используется	IE7 рассматривается	IE7 рассматривается	IES7 рассматривается
	IE8 не используется	IE8 рассматривается	IE8 рассматривается	IES8 рассматривается
	IE9 не используется	IE9 рассматривается	IE9 рассматривается	IES9 рассматривается

Примечания – Классы IE двигателей при питании от сети определены в IEC 60034-30-1; классы IE двигателей при питании от преобразователей – в IEC 60034-30-2.

Рисунок 9 — Соотношение классов IE и IES

4.9 Определение класса IES комплектного электропривода с использованием эталонного и испытательного оборудования, а также руководства производителя

Методы определения потерь и классы IE двигателей приведены в IEC 60034-30 (все части) и на рисунке 9. Производитель также может установить класс IES электропривода, в котором используется его двигатель: в этом случае производитель должен определить относительные потери в данном двигателе при его питании от эталонного преобразователя.

Производитель комплектного преобразователя может получить информацию из той документации, в которой использованы методы, описанные в разделе 7. Это включает получение ожидаемых классов IES электропривода, состоящего из различных сочетаний преобразователя и двигателя с использованием методов, представленных в настоящем стандарте.

Любые или все возможные способы управления комплектным преобразователем могут быть использованы для получения минимальных потерь при эксплуатации электропривода, при этом они должны быть указаны в протоколе оценки энергоэффективности.

На рисунке 10 показана таблица применения испытательных и эталонных устройств для определения классов IE и IES. Она также позволяет производителю преобразователя или производителю двигателя установить класс IES электропривода при использовании сочетания испытательных и эталонных устройств.

Для производителя электропривода применима верхняя левая ячейка полей «Двигатель» и «Преобразователь».

Сочетание	Преобразователь	Испытательный преобразователь	Эталонный преобразователь	
Двигатель	Определение класса IES электропривода	Определение класса IE данного двигателя	Определение класса IES электропривода	Руководство производителя двигателей
Испытательная нагрузка	Определение класса IE данного преобразователя	Сочетание не используется	Сочетание не используется	
Эталонный двигатель	Определение класса IES электропривода	Сочетание не используется	Расчетная модель эталонного электропривода	
	Руководство производителя преобразователя			

Рисунок 10 — Руководство для производителей преобразователей и двигателей при применении испытательных и эталонных устройств для определения классов IE и IES

Данный подход позволяет определить класс IES для окончательного варианта комплектного электропривода даже в случае доступности лишь одного из компонентов (двигателя или преобразователя).

5 Математические модели комплектного преобразователя, двигателя и электропривода

5.1 Общие положения

Математические модели, представленные в настоящем разделе, описывают процедуры определения потерь в преобразователе, двигателе и электроприводе. Они позволяют рассчитать потери в устройствах без измерений.

Модели состоят из формул, переменных и параметров. Формулы описывают известные, общепринятые на сегодня и описанные в литературе процедуры расчета частичных потерь. Переменные зависят от выбранной рабочей точки рассматриваемого преобразователя, двигателя или электропривода. Параметры — физические величины, описывающие реальное изделие и установленные в соответствии с индивидуальным дизайном данной продукции.

Если комитету по стандартизации данной категории продукции необходимо определить типичные для нее CDM или PDS, могут быть использованы типичные параметры CDM или PDS для этих конкретных приложений. Отклонения должны быть указаны в стандарте на продукцию.

Для эталонного преобразователя (RCDM), эталонного двигателя (RM) и эталонного электропривода (RPDS) эталонные параметры определены соответственно в 5.2, 5.3.3 и 5.4.

Процедура определения потерь представлена в разделе 7.

5.2 Потери в комплектном преобразователе

5.2.1 Общая процедура и определение комплектного преобразователя и испытательной нагрузки

Комплектный преобразователь и испытательная нагрузка изображены на рисунке 11.

Цель — описать потери в комплектном преобразователе как функцию момента и частоты вращения вала электропривода. Однако потери зависят также от значений основных гармоник напряжения и тока на выходе преобразователя, в том числе от угла сдвига фаз между ними.

Относительное значение выходного напряжения на выходе преобразователя примерно равно относительному значению частоты. Это действительно, по крайней мере, при частоте вращения, близкой к номинальной. В зоне управления с пониженным потоком относительное значение напряжения остается равным 1,00 для всех частот вращения выше номинальной.

На первом этапе частота вращения двигателя преобразуется в частоту тока на выходе преобразователя, а момент на валу — в ток на выходе преобразователя и фазовый сдвиг между ним и напряжением на выходе.

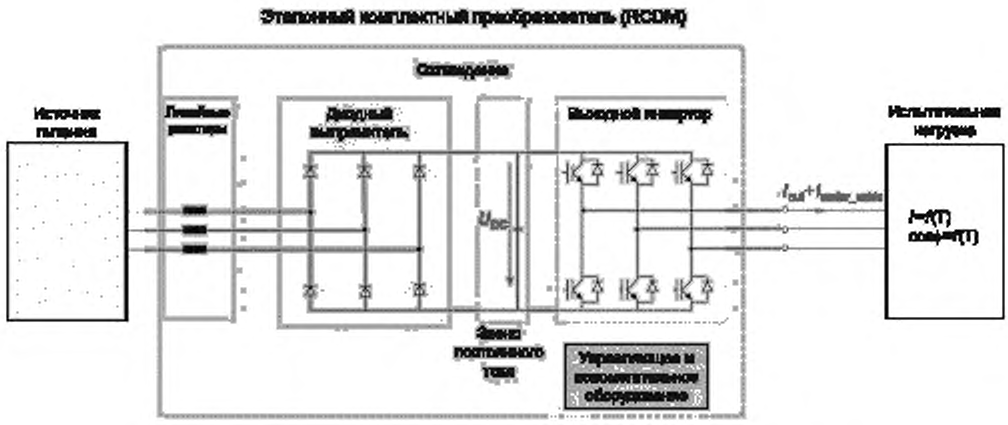


Рисунок 11 — Комплектный преобразователь и испытательная нагрузка

В первом приближении относительная частота вращения вала равна относительной частоте тока на выходе преобразователя.

Для оценки преобразователя необходимы результаты измерений на реальных двигателях, которые будут использованы как данные нагрузки преобразователя для всех частот в диапазоне регулирования.

Таблица 1 — Минимальные токи нагрузки в различных рабочих точках

Моментообразующий ток, %	Нагрузочный ток I_{out} / $I_{r,out}$ для диапазонов кажущейся мощности $S_{r,equ}$				
	От 0,278 кВА (0,12 кВт) до <1,29 кВА (0,75 кВт)	От 1,29 кВА (0,75 кВт) до <7,94 кВА (5,5 кВт)	От 7,94 кВА (25,5 кВт) до <56,9 кВА (45 кВт)	От 56,9 кВА (45 кВт) до <245 кВА (200 кВт)	От 245 кВА (200 кВт) до <1209 кВА (1000 кВт)
25	0,79	0,58	0,45	0,42	0,39
50	0,81	0,71	0,60	0,58	0,56
75	0,89	0,82	0,79	0,78	0,77
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 2 — Коэффициент мощности нагрузки преобразователя cosФ в различных рабочих точках

Моментообразующий ток, %	Коэффициент мощности для диапазонов кажущейся мощности $S_{r,equ}$				
	От 0,278 кВА (0,12 кВт) до <1,29 кВА (0,75 кВт)	От 1,29 кВА (0,75 кВт) до <7,94 кВА (5,5 кВт)	От 7,94 кВА (5,5 кВт) до <56,9 кВА (45 кВт)	От 56,9 кВА (45 кВт) до <245 кВА (200 кВт)	От 245 кВА (200 кВт) до <1209 кВА (1000 кВт)
25	0,34	0,38	0,49	0,54	0,57
50	0,51	0,60	0,71	0,75	0,78
75	0,64	0,72	0,80	0,83	0,85
100	0,73	0,79	0,85	0,86	0,87

Примечание — Для испытаний комплектных преобразователей допустимая погрешность в определении коэффициента мощности испытательной нагрузки приведена в таблице 2 на уровне 0,08 (см. 7.9).

Ток и фазовый угол испытательной нагрузки, соответственно, в таблицах 1 и 2 для различных относительных значений момента зависят от номинальной мощности. С целью ограничить количество

требующихся данных двигатели в некотором диапазоне мощностей объединены в одну группу. Погрешность в определении потерь энергии при этом достаточно мала, что оправдывает это упрощение. Данные по испытательной нагрузке в таблицах 1 и 2 могут быть использованы для любой относительной выходной частоты. Если значения моментообразующих токов отличаются от приведенных в таблицах 1 и 2, для них табличные данные могут быть преобразованы путем линейной интер- или экстраполяции.

Для использования математической модели комплектного преобразователя должен быть приведен номинальный выходной ток. Если он не указан в спецификации данного комплектного преобразователя, то может быть найден по номинальной мощности электропривода (на валу) $P_{r,M}$, выходному напряжению преобразователя $U_{1,r,out}$, коэффициенту мощности на выходе cosΦ (см. таблицу 2) и по КПД двигателя класса IE2 η_{nMotor}, определенному по IEC 60034-30-1 в соответствии со следующей формулой:

$$I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot \cos\Phi \cdot \eta_{nMotor}}. \quad (3)$$

Номинальная кажущаяся выходная мощность комплектного преобразователя:

$$S_{r,adu} = \sqrt{3} \cdot U_{1r,out} \cdot I_{1r,out} = \frac{P_{r,M}}{\cos\Phi \cdot \eta_{nMotor}}. \quad (4)$$

Для расчета потерь в комплектном преобразователе по данным, полученным исходя из таблиц 1 и 2, могут быть использованы формулы (5) и (16), приведенные ниже. Для расчета потерь в конкретном преобразователе должны быть применены реальные значения его параметров.

Результаты расчетов для эталонного преобразователя (RCDM) приведены в таблице 18 для определения класса IE и в приложении А (таблица А.1) для восьми опорных точек, определенных на рисунке 6. Эталонный преобразователь рассчитан на питание напряжением 400 В.

В противоположность приложению В, которое описывает отдельные части электропривода от источника питания до нагрузки, в 5.2 сначала рассмотрены компоненты, вносящие основной вклад в потери, а затем переходит к элементам с незначительным влиянием.

5.2.2 Потери на выходе инвертора

5.2.2.1 Общие положения

Основная часть потерь преобразователя генерируется в его инверторной части. Эти потери определены изложенными ниже формулами, положительно зарекомендовавшими себя в литературе. Согласно данным формулам выходной ток преобразователя представляет собой синусоиду, а пульсации широтно-импульсной модуляции (ШИМ) случайным образом распределены поверх ее первой гармоники. Случайное распределение имеет место в том случае, если частота ШИМ по крайней мере в 20 раз превышает частоту основной гармоники тока двигателя и используется стандартный алгоритм пространственно-векторной модуляции. Эталонный комплектный преобразователь спроектирован в точном соответствии с этими условиями. Для расчета потерь в реальном преобразователе значения параметров силовых ключей должны быть приведены как при реальной температуре, с которой работает преобразователь, так и при табличном значении максимальной рабочей температуры.

Значения параметров силовых полупроводников и других комплектующих реального комплектного преобразователя можно принять типовыми. Модели, представленные в 5.2, могут быть использованы для оценки потерь в преобразователе расчетным методом. Производитель может применять различные расчетные алгоритмы и различные модели для оценки потерь. Причем производители несут ответственность за применение правильной точности в формуле (21).

5.2.2.2 Потери в транзисторе в открытом состоянии

Потери в транзисторе в открытом состоянии рассчитывают по следующей формуле:

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{T,th}\left(\left(\frac{1}{2\pi}\right) + \frac{1{,}22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{8}\right) + \frac{U_{TJ} - U_{T,th}}{I_{t,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1{,}22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{3\pi}\right). \quad (5)$$

Параметры эталонного преобразователя (RCDM) для этой формулы приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Параметры для формулы (5)

Сокращение	Описание	Значения параметров эталонного преобразователя	Единица измерения
$U_{T,th}$	Пороговое значение напряжения на силовом транзисторе	1,0	В
$U_{T,r}$	Падение напряжения на открытом силовом транзисторе при номинальном выходном токе CDM	2,3	В
$I_{r,out}$	Среднеквадратичное значение номинального выходного тока преобразователя		А

Переменные для формулы (5) приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Переменные для формулы (5)

Сокращение	Описание	Единица измерения
I_{out}	Среднеквадратичное значение выходного тока преобразователя в соответствии с таблицей 1	А
φ	Фазовый угол между основными гармониками выходных напряжения и тока преобразователя в соответствии с таблицей 2	°
m	Коэффициент модуляции как отношение выходной частоты преобразователя к номинальному ее значению	

5.2.2.3 Разрядный диод в открытом состоянии

Потери в диоде в открытом состоянии рассчитывают по следующей формуле:

$$P_{l,on,D} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{D,th}\left(\left(\frac{1}{2\pi}\right) + \frac{1{,}22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{8}\right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}{}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1{,}22 \cdot m \cdot \cos\varphi}{3\pi}\right). \quad (6)$$

Параметры эталонного преобразователя (RCDM) для этой формулы приведены в таблице 5.

Таблица 5 — Параметры для формулы (6)

Сокращение	Описание	Значения параметров эталонного преобразователя	Единица измерения
$U_{D,th}$	Пороговое значение напряжения на силовом диоде	1,1	В
$U_{D,r}$	Падение напряжения на открытом силовом диоде при номинальном выходном токе CDM	2,4	В

Переменные в формуле (6) идентичны переменным в формуле (5).

5.2.2.4 Коммутационные потери в транзисторах

На практике принято для силовых транзисторов IGBT энергию переключения выражать как функцию выходного тока инвертора. Как правило, для определения этой величины регистрируются напряжение коллектор — эмиттер и коллекторный ток транзистора в момент переключения, а затем произведение данных графиков интегрируется по времени коммутации, образуя значение потерь энергии. В первом приближении результирующие кривые показывают линейную зависимость этих потерь от тока коллектора и напряжения звена постоянного тока преобразователя. Соотношение между энергией коммутации и произведением напряжения звена постоянного тока на коллекторный ток транзистора в литературе обычно обозначен фактором E_T. Такой фактор отражает сумму потерь энергии на включение и отключение силового транзистора.

При малых токах нагрузки существенный для определения коммутационных потерь ток превышает выходной ток преобразователя, так как данное увеличение необходимо для соединительных кабелей

двигателя. Для учета этого эффекта введен термин «I_{motor_cable}», который добавляют к выходному току инвертора для расчета потерь коммутации. Простой алгоритм оценки этого тока для эталонного инвертора представлен в таблице 6.

Учитывая, что инвертор вырабатывает основную гармонику выходного тока значительно более низкой частоты, нежели частота коммутации, коммутационные потери могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot \left(I_{out} + I_{motor_cable}\right) \cdot f_{sw}. \quad (7)$$

Параметры эталонного преобразователя для формулы (7) приведены в таблице 6.

Таблица 6 — Параметры для формулы (7)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
E_T	Коммутационные потери энергии силового транзистора, выраженные в вольтах и амперах	$7{,}5 \cdot 10^{-7}$	Дж/В · А
U_{DC}	Напряжение звена постоянного тока преобразователя	540	В
I_{motor_cable}	Ток кабеля двигателя, ответственный за увеличенные коммутационные потери	$I_{motor_cable} = 4$ при $I_{r,out} \le 4$ А $I_{motor_cable} = I_{r,out}$ при 4 А < $I_{r,out}$ < 10 А $I_{motor_cable} = 10$ при $I_{r,out} \ge 10$ А	А
f_{sw}	Частота коммутации преобразователя	4000 для преобразователей св. 90 кВт 2000 для CDM до 90 кВт	Гц

Переменная в формуле (7) — выходной ток инвертора. Коммутационные потери не зависят от частоты вращения двигателя.

Если выходная частота инвертора остается 0 Гц в течение всего рабочего времени преобразователя, формула (7) не работает. Однако этой формулой можно пользоваться практически для всех применений при достаточно малых частотах, например 0,05 Гц.

5.2.2.5 Коммутационные потери в разрядном диоде

Коммутационные потери в разрядном диоде могут быть вычислены по формуле

$$P_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot \left(I_{out} + I_{motor_cable}\right) \cdot f_{sw}. \quad (8)$$

Параметры эталонного преобразователя для формулы (8) приведены в таблице 7.

Таблица 7 — Параметры для формулы (8)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
E_D	Коммутационные потери энергии силового диода, выраженные в вольтах и амперах	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$	Дж/В·А

5.2.2.6 Суммарные потери выходного инвертора

Потери, рассчитанные по формулам (5)—(8), относят к отдельным силовым полупроводникам. Суммарные потери выходного трехфазного инвертора на шести транзисторно-диодных модулях рассчитывают по формуле

$$P_{L,inverter} = 6 \cdot (P_{L,on,T} + P_{L,on,D} + P_{L,sw,T} + P_{L,sw,D}). \quad (9)$$

5.2.3 Потери на входных элементах преобразователя

5.2.3.1 Активный выпрямитель

Если входное звено преобразователя представляет собой активный выпрямитель, его потери могут быть рассчитаны аналогично потерям выходного инвертора. В этом случае выходной ток активного выпрямителя в качестве части преобразователя можно считать равным входному току преобразователя.

Частота основной гармоники на стороне переменного тока активного выпрямителя такая же, как и частота источника питания. Это ограничивает возможные пределы коэффициента модуляции значениями, близкими к единице. Коэффициент сдвига фаз cosφ между основными гармониками тока и напряжения на входе близок к плюс 1 в двигательных режимах и к минус 1 в режимах рекуперации. Благодаря этому входной ток преобразователя ниже выходного для преобразователя с активным выпрямителем и соответствует $I_{out} \cdot m \cdot \cos\varphi$.

Эталонный преобразователь основан не на активном, а на диодном выпрямителе.

5.2.3.2 Диодный выпрямитель

Основная гармоника входного тока комплектного преобразователя пропорциональна его активной мощности на выходе и рассчитывается как произведение выходного тока инвертора на коэффициенты сдвига фаз и модуляции. Среднеквадратичное значение входного тока преобразователя, кроме того, пропорционально величине 1/λ. Фактор λ, определяемый по формуле (B.2) приложения B как отношение активной мощности на входе преобразователя к кажущейся, пропорциональный коэффициенту сдвига между входным током преобразователя и уменьшающийся с гармоническим составом формы входного тока. Стандартные значения для различных топологий выпрямителей приведены в приложении B (B.4.2).

В итоге для расчета потерь в выпрямителе используют следующую формулу:

$$P_{L,inverter} = 6 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out} \cdot U_{D,r,rectifier} + \frac{U_{D,r,rectifier} - U_{D,th,rectifier}}{\cos\varphi_r \cdot I_{r,out}} \cdot \frac{\left(\frac{m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{2} \right). \quad (10)$$

Параметры эталонного преобразователя для формулы (10) приведены в таблице 8.

Таблица 8 — Параметры для формулы (10)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
$U_{D,th,rectifier}$	Пороговое значение напряжения на силовом диоде выпрямителя	0,9	В
$U_{D,r,rectifier}$	Падение напряжения на открытом силовом диоде при номинальном выходном токе CDM	2,2	В
λ	Коэффициент мощности на входе преобразователя	0,7	

Переменная для формулы (10) приведена в таблице 9.

Таблица 9 — Переменная для формулы (10)

Сокращение	Описание	Единица измерения
φ_r	Фазовый угол между основными гармониками напряжения и тока преобразователя при номинальном моменте в соответствии с таблицей 2	°

5.2.4 Потери на входных реакторах

Для подавления гармоник иногда используют входные реакторы. Индуктивность этих реакторов тем меньше, чем больше входная мощность преобразователя. Обычно полное сопротивление входного реактора выбирается как часть (с коэффициентом $k1_{choke}$) номинального полного сопротивления инвертора U_{mL1}/I_{equ}. Учитывая падение напряжения на активной части сопротивления реактора, которое составляет $k2_{choke}$ часть полного падения напряжения на входном реакторе, потери в нем можно рассчитать по следующей формуле:

$$P_{L,choke} = k1_{choke} \cdot k2_{choke} \cdot 3 \cdot \frac{\left(\frac{m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{\cos\varphi_r \cdot I_{r,out}} \cdot U_{mL1}. \quad (11)$$

Параметры эталонного преобразователя для формулы (11) приведены в таблице 10.

Таблица 10 — Параметры для формулы (11)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
$k1_{choke}$	Полное сопротивление реактора, отнесенное к номинальному полному сопротивлению преобразователя	0,02	
$k2_{choke}$	Относительное падение напряжения на активном сопротивлении реактора	0,25	
U_{mL1}	Напряжение фаза — земля питающей сети	230	В

Потери реакторов в цепи постоянного тока рассчитывают аналогично потерям реакторов переменного тока.

Потери в линейных гармонических фильтрах низких частот рассчитывают аналогичным образом, так как основная часть этих потерь выделяется в реакторах и только незначительная, которой можно пренебречь, — в конденсаторах фильтров.

5.2.5 Потери в звене постоянного тока

Как пояснено в приложении В (В.5), потери в звене постоянного тока в основном выделяются в резисторах, необходимых для обеспечения требуемого распределения напряжения между конденсаторами в данном звене и их внутренними эквивалентными последовательными сопротивлениями. В первом приближении емкость звена постоянного тока пропорциональна номинальной мощности инвертора. Соответственно, независимые от нагрузки потери в резисторах, параллельных конденсаторам, пропорциональны номинальному выходному току инвертора. Они также пропорциональны квадрату напряжения звена постоянного тока. Потери в эквивалентных последовательных сопротивлениях конденсаторов зависят от квадрата переменной составляющей выходного тока выпрямителя. Потери, вызванные высокочастотными токами инвертора, пренебрежимо малы. Таким образом, потери в звене постоянного тока могут быть определены по формуле

$$P_{L,dc_link} = k1_{DC_link} \cdot I_{r,out} \cdot U_{DC}^2 \cdot k2_{DC_link} \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{1,35} \cdot \frac{m \cdot \cos\varphi \cdot I_{out}}{1 + 50 \cdot k1_{choke}}\right)^2}{I_{r,out}} \cdot U_{mL1}, \quad (12)$$

Параметры эталонного преобразователя для формулы (12) приведены в таблице 11.

Таблица 11 — Параметры для формулы (12)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
$k1_{DC_link}$	Независимый от нагрузки коэффициент потерь звена постоянного тока	$8 \cdot 10^{-7}$	1/Ом·А
$k2_{DC_link}$	Зависимый от нагрузки коэффициент потерь звена постоянного тока	2	Ом·А

Определение коэффициентов потерь звена постоянного тока пояснено в приложении В (В.5).

5.2.6 Потери в проводниках

Омические потери выделяются, в частности, в токоведущих проводниках преобразователя. В математической модели они зависят от амплитуды выходного тока преобразователя и омического сопротивления проводников. Это сопротивление линейно уменьшается при увеличении номинального тока преобразователя, поскольку преобразователи большой мощности требуют проводников большего диаметра. Соответственно, падение напряжения на проводниках остается независимым от номинального тока преобразователя

$$P_{L,rails} = \frac{U_{rails}}{I_{r,out}} \cdot I_{out}^2, \quad (13)$$

Параметры эталонного преобразователя для формулы (13) приведены в таблице 12.

Таблица 12 — Параметры для формулы (13)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
U_{rails}	Падение напряжения на проводниках при номинальном токе преобразователя	0,7	В

5.2.7 Потери на управление и в режиме без нагрузки

В приложении В (раздел В.10) даются пояснения по независимым от нагрузки потерям. Для получения сопоставимых результатов эти потери рассчитаны при отсутствии дополнительных компонентов, таких как датчики положения, коммуникационная электроника и тормозные устройства. Для эталонного преобразователя эти потери приведены в таблице 13.

Таблица 13 — Параметр для формулы (15)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
$P_{L,control}$	Потери на управление и в режиме без нагрузки	50	Вт

5.2.8 Коэффициент потерь на охлаждение

Современные комплектные преобразователи для удаления энергии в окружающую среду используют системы охлаждения. Часто для этого используется вентилятор, являющийся составной частью преобразователя. Он создает дополнительные потери. В математической модели данные потери представлены пропорциональными всем остальным потерям в комплектном преобразователе, работающем в рабочей точке с максимальными потерями.

$$P_{L,cooling} = k_{L.cooling} \cdot (P_{L,inverter(90;100)} + P_{L.rectifier(90;100)} + P_{L,rails(90:100)} + P_{L,DC_link(90;100)} + P_{L,choke(90;100)} + P_{L.control}). \quad (14)$$

Для эталонного преобразователя эти потери приведены в таблице 14.

Таблица 14 — Параметр для формулы (14)

Сокращение	Описание	Параметры эталонного преобразователя	Единица измерения
$k_{L,cooling}$	Коэффициент потерь на охлаждение	2	

5.2.9 Другие потери в комплектном преобразователе

Все остальные потери не учтены в математической модели, поскольку они пренебрежимо малы по сравнению с описанными выше.

5.2.10 Суммарные потери в комплектном преобразователе

Все потери в преобразователе должны быть оценены для режима работы с номинальной кажущейся мощностью, когда на его выходе сформированы номинальные выходной ток и напряжение. Окончательный результат настоящего пункта выражен формулой

$$P_{L,CDM} = P_{L,inverter} + P_{L,rectifier} + P_{L,choke} + P_{L,rails} + P_{L,DC_link} + P_{L\ control} + P_{L,cooling}. \quad (15)$$

При этом относительные потери вычисляют по формуле

$$P_{L,CDM} = \frac{P_{L,CDM}/кВт}{S_{rated}/кВ{\cdot}А}. \quad (16)$$

На рисунке 12 показано соотношение между моментообразующим током, относительной частотой питания статора и относительными потерями в эталонном преобразователе мощностью 9,95 кВА, работающем при напряжении 400 В.

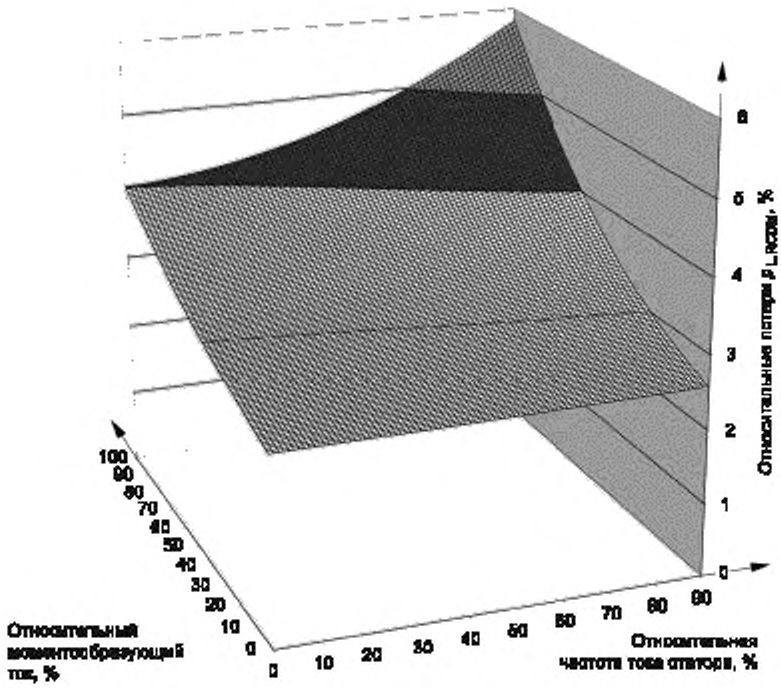


Рисунок 12 — Относительные потери $p_{L,CDM}$ в преобразователе 9,95 кВА

В таблице 15 показаны относительные потери в эталонном комплектном преобразователе на 400 В, 9,95 кВА в рабочих точках, соответствующих рисунку 6.

Таблица 15 — Относительные потери в эталонном комплектном преобразователе на 400 В, 9,95 кВА в рабочих точках, соответствующих рисунку 6

$S_{r,edu}$, кВА	I_{rout}, А	$p_{L,RCDM}$, %							
		(0;25)	(0;50)	(0.100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(90;50)	(90;100)
9,95	14,4	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

Значение 5,84 %, относящееся к номинальной кажущейся выходной мощности 9,95 кВт, — это абсолютное значение потерь 581 Вт. Относительные потери комплектных эталонных преобразователей различных номинальных мощностей для рабочей точки (90, 100) приведены в таблице 18, а для всех рабочих точек, показанных на рисунке 6, — в приложении А (таблица А.1).

5.3 Потери в двигателе

5.3.1 Общие положения

Трехфазные асинхронные двигатели широко представлены в промышленном масштабе. Они являются стандартными массовыми изделиями, способными работать как напрямую от сети, так и питаясь регулируемыми частотой и напряжением от преобразователя.

Для определения потерь, КПД и класса энергоэффективности комплектного электропривода пользователю необходима информация о потерях в двигателе. Для этих целей можно использовать следующие источники.

- информация производителя;
- потери эталонного двигателя (см. приложение А);
- стандартные потери машин класса IE2 (см. приложение D).

Для того чтобы оценить потери и КПД в любой требуемой рабочей точке, как в примере подраздела 4.2, можно воспользоваться процедурой интерполяции, описанной в приложении D, по семи опорным точкам, заданным производителем (см. приложение F, таблица F.2).

5.3.2 Добавочные гармонические потери трехфазного асинхронного двигателя при питании от преобразователя

Как правило, потери в трехфазном асинхронном двигателе известны лишь для режима питания от сети с синусоидальным напряжением. При питании такого двигателя от преобразователя к ним добавляются потери PLHL, обусловленные несинусоидальной формой питающего напряжения.

Для определения этих потерь предпочтительно испытать двигатель в режиме питания от преобразователя (см. приложение D).

Альтернативный способ — оценка добавочных гармонических потерь с помощью постоянного коэффициента r_{HL}, который характеризует отношение добавочных потерь при питании от преобразователя к потерям при питании от номинального напряжения синусоидальной формы номинальной частоты.

Таким образом, добавочные гармонические потери определяют следующим образом:

$$P_{LHL} = r_{HL} \cdot P_{LTsin}, \quad (17)$$

где P_{LTsin} — общие потери при синусоидальном питании в определенной рабочей точке;

P_{LHL} — добавочные потери при синусоидальном питании в той же рабочей точке.

Дополнительные потери при питании от преобразователя при таком подходе не зависят ни от частоты вращения, ни от нагрузки и определяются лишь частотой коммутации инвертора.

Пока не произведены измерения согласно IEC 60034-2-3, могут быть использованы следующие приближенные данные:

- r_{HL} = 0,15 (15 %) для двигателей номинальной выходной мощностью до 90 кВт и частотой коммутации 4 кГц;
- r_{HL} = 0,25 (25 %) для двигателей номинальной выходной мощностью свыше 90 кВт и частотой коммутации 2 кГц.

5.3.3 Данные эталонного двигателя

Потери в эталонном двигателе приведены в приложении A.

Табличные данные приведены для 4-полюсного двигателя класса IE2 на частоту 50 Гц в соответствии с IEC 60034-30-1 исходя из коэффициента r_{HL} по 5.3.2, коэффициентов K_{fe}, K_{II} и K_{fw}, равных по 0,5 каждый, как указано в приложении D, и коэффициента падения напряжения 400/360 = = 1,11 при номинальной частоте вращения (см. приложение D).

Табличные значения для эталонного двигателя на частоте 50 Гц могут быть использованы и для применений на частоте 60 Гц.

5.4 Эталонный комплектный электропривод (RPDS)

5.4.1 Потери в эталонном электроприводе

Результирующие электрические потери в комплектном электроприводе в рабочей точке при конкретной частоте вращения (n) и моменте (T) равны сумме потерь в его комплектующих в соответствии с формулой

$$P_{L,PDS(n;T)} = P_{L,CDM(n,T)} + P_{L,Aux(n;T)} + P_{L,Mot(n;T)}, \quad (18)$$

где $P_{L,CDM}$ — потери в комплектном преобразователе согласно методам 5.2;

$P_{L,Mot}$ — потери в двигателе по методам 5.3;

$P_{L,Aux}$ — потери во вспомогательном оборудовании по методам приложения B.

Эталонный комплектный электропривод определен как один эталонный двигатель и один эталонный преобразователь. Вспомогательное оборудование не входит в его комплект.

Выбор соответствующих эталонного двигателя и эталонного преобразователя для эталонного комплектного электропривода выполняется в зависимости от мощности (см. приложение A).

Расчет потерь в общем случае производят по формуле (18). Однако потери при частоте вращения 100 % и моменте 100 % определяют по формуле (19) с использованием данных рабочей точки эталонного преобразователя 90 % частоты и 100 % тока, а рабочей точки двигателя 100 % частоты вращения и 100 % момента.

Для эталонного преобразователя используется 90 % частоты во избежание сверхмодуляции, характерной для 100 % частоты. Сверхмодуляция уменьшает потери в преобразователе, однако увеличивает гармонические потери в двигателе из-за повышенного содержания высоких гармоник напряжения и тока.

Расчет потерь в эталонном преобразователе основан на допущении, что потери в нем в точке 100 % частоты и 90 % напряжения такие же, как и при 90 % частоты и 90 % напряжения. Далее следует учитывать, что основные потери эталонного двигателя увеличиваются с коэффициентом падения напряжения k_{VD} = 1,11 [в соответствии с 10 %-ным падением напряжения по приложению D (D.4) в сравнении с формулой (18)]

$$P_{L,RPDS(100,100)} = P_{L,RCDM(90;100)} + k_{VD} \cdot P_{L,RM(100,100)}. \quad (19)$$

Эталонный параметр для формулы (19) приведен в таблице 16.

Таблица 16 — Параметр для формулы (19)

Сокращение	Описание	Значение	Единица измерения
k_{VD}	Коэффициент падения напряжения для эталонного электропривода (см. приложение F, F.3.1)	1,11	

Поставщик комплектного электропривода несет ответственность за учет потерь во всех элементах электропривода, таких как преобразователь, двигатель, дополнительное оборудование (фильтр, кабели и пр.), при расчете потерь конкретной поставки.

В таблице 17 приведены относительные потери в эталонном комплектном электроприводе на напряжение 400 В и мощность 7,5 кВт в рабочих точках, определенных на рисунке 6.

Таблица 17 — Относительные потери в эталонном комплектном электроприводе на напряжение 400 В и мощность 7,5 кВт

$P_{r,M}$, кВт	$P_{L,RPDS}$, %							
	(0;25)	(0;50)	(0;100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(100;50)	(100;100)
7,0	6,21	7,80	14,63	7,79	9,65	17,36	13,45	24,01

Относительные потери в эталонном комплектном электроприводе при различных номинальных мощностях приведены в приложении А (таблица А.3).

Пример относительных потерь представлен на рисунке 13. Все значения отнесены к соответствующим номинальным значениям электропривода.

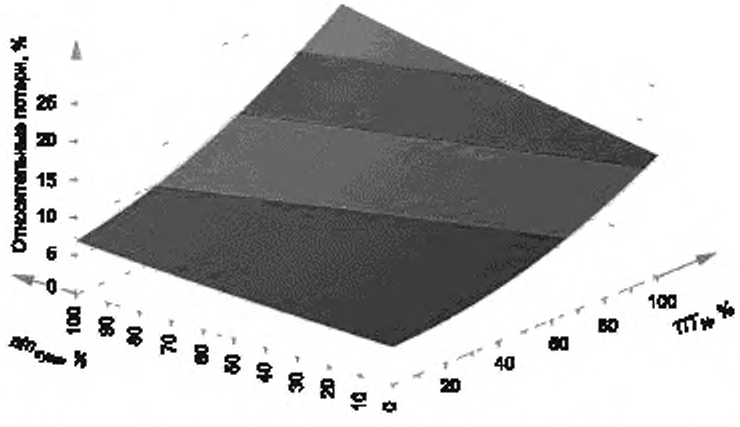


Рисунок 13 — Пример относительных потерь в функции частоты вращения и момента

5.4.2 Потери в комплектном электроприводе при различных частотах коммутации

Комплектный электропривод часто имеет параметры, отличные от используемых в эталонном электроприводе. Одним из значимых для оценки потерь параметров является частота коммутации. При возрастании частоты коммутации увеличиваются потери в преобразователе, однако гармонические потери в двигателе уменьшаются.

Результирующие потери в электроприводе при конкретной частоте коммутации f_{sw} равны сумме потерь в комплектующих при данной частоте, как записано в формуле (20) и показано на рисунке 12 для одной и той же рабочей точки

$$P_{L,\,PDS(f_{sw})} = P_{L,\,CDM(f_{sw})} + P_{L,\,Aux(f_{sw})} + P_{L,\,Mot(f_{sw})}. \quad (20)$$

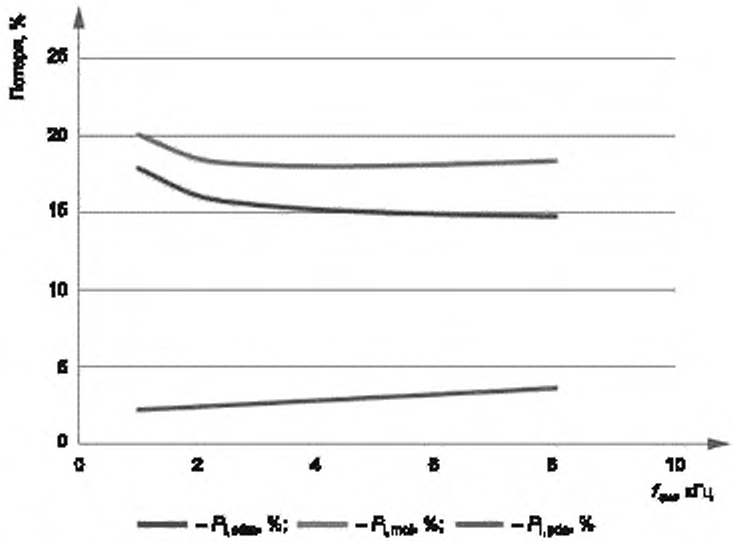


Рисунок 14 — Пример относительных потерь в функции частоты коммутации

5.5 Потери в рекуперативных режимах комплектного преобразователя

Некоторые электроприводы способны работать с нагрузками в генераторном режиме, т. е. в процессе работы генерировать электроэнергию. Мощность от нагрузки может переходить в электропривод при торможении инерционных масс или при моменте, приложенном к валу двигателя со стороны нагрузки в направлении его скорости вращения (например, самоход вентилятора или опускание груза).

Некоторые преобразователи позволяют передавать вырабатываемую электроэнергию источнику питания, используя активный выпрямитель. Переданная источнику питания энергия равна выработанной за вычетом потерь.

Преобразователь также может обратить выработанную электроэнергию в тепловую, рассеяв ее внутри или снаружи, например с помощью резистора, как показано на рисунке 15. Рассеянная в резисторе энергия рассмотрена как потери во вспомогательном оборудовании при расчете потерь в преобразователе по формуле (18).

Преобразователь также может накапливать энергию, вырабатываемую в генераторном режиме в аккумуляторах, конденсаторах или других накопителях. В дальнейшем эта энергия может быть использована при работе электропривода в двигательном режиме. В любом накопителе при передаче и хранении энергии имеют место ее потери, и они учитываются как потери во вспомогательном оборудовании.

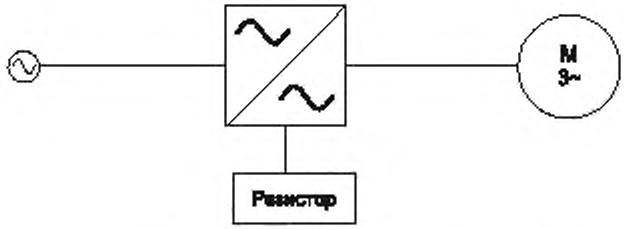


Рисунок 15 — Преобразователь с резистором для рассеяния энергии в генераторном режиме

5.6 Потери в пускателях электродвигателей

При расчете общих потерь в электроприводе потери мощности в пускателях электродвигателей (включая потери на управление) в соответствии с IEC 60947-4-1 принимают равными 0,1 % от номинальной мощности двигателя.

Устройства плавного пуска (софт-стартеры) в соответствии с IEC 60947-4-2 обычно при длительной работе оборудования (в режиме S1) шунтируются (режим bypass), поэтому потери в них рассчитывают так, как в пускателях.

Потери в пускателях настолько малы, что для классификации двигателя используют тот же код IE, что и для двигателя с пускателем.

6 Предельные значения потерь и КПД классов IE и IES

6.1 Общие положения

Потери и КПД эталонных комплектного преобразователя, двигателя и комплектного электропривода используются как основа для оценки соответствия классам IE и IES конкретного двигателя, преобразователя или электропривода.

Эталонные устройства привязаны к классам IE1 и IES1. Конкретным устройствам, имеющим потери ниже эталонных (т. е. более высокий КПД), может быть присвоен более высокий класс. Значения и отклонения для каждого класса приведены в подразделах 6.2—6.4.

Соответствие классам IE и IES может быть установлено путем измерений или расчетов, как описано в разделе 7. Для определения потерь и КПД в электромеханическом комплексе конкретного применения следует использовать опорные точки, представленные на рисунке 4.

Для того чтобы упростить процедуру проверки соответствия преобразователя определенному классу, его испытания можно проводить при номинальном токе и 90 % номинальной частоты относительно номинального напряжения двигателя.

Соответствие электропривода определенному классу проверяют при номинальном моменте на валу и номинальной частоте вращения.

Работу в тормозных режимах не рассматривают при определении класса энергоэффективности комплектного преобразователя и комплектного электропривода.

Примечание — Номинальный выходной ток преобразователя — это его максимальный длительный выходной ток.

6.2 Комплектный преобразователь

Эталонный комплектный преобразователь представлен параметрами согласно 5.2, а его потери приведены в таблице 18.

Шкала мощностей преобразователей составлена на основе выходной кажущейся мощности, оказывающей основное влияние на их потери.

Так как преобразователи, как правило, характеризуются выходным током чаще, чем выходной мощностью, в таблице 18 также указаны выходные токи для различных уровней напряжений. Соответствие стандартным номинальным данным двигателей, определенным IEC 60072-1 и IEC 60034-30-1, приведены в приложении А (таблица А.1).

Таблица 18 — Потери эталонных комплектных преобразователей класса IE1

Кажущаяся выходная мощность $S_{r,edu}$	Относительные потери $P_{L,RCDM(90;100)}$	Абсолютные потери $P_{L,RCDM(90,100)}$	Примеры выходного тока преобразователя при различном линейном напряжении $I_{1r,out}=\frac{S_{r,edu}}{\sqrt{3}\cdot U_{1r,out}}$			
			$U_{1r,out}$ = 200 В	$U_{1r,out}$ = 400 В	$U_{1r,out}$ = 460 В	$U_{1r,out}$ = 690 В
кВА	%	кВт	А			
0,278	35,85	0,100	0,803	0,401	0,349	0,233
0,381	27,30	0,104	1,10	0,550	0,478	0,319
0,500	21,80	0,109	1,44	0,722	0,627	0,418
0,697	16,84	0,117	2,01	1,01	0,875	0,583
0,977	13,21	0,129	2,82	1,41	1,23	0,818
1,29	11,02	0,142	3,73	1,86	1,62	1,08
1,71	9,51	0,163	4,94	2,47	2,15	1,43
2,29	8,21	0,188	6,62	3,31	2,88	1,92
3,30	7,20	0,237	9,54	4,77	4,15	2,76
4,44	6,72	0,299	12,8	6,41	5,58	3,72
5,85	6,39	0,344	16,9	8,44	7,34	4,89
7,94	6,01	0,477	22,9	11,5	9,96	6,64
9,95	5,84	0,581	28,7	14,4	12,5	8,32
14,4	5,43	0,781	41,6	20,8	18,1	12,1
19,5	5,18	1,01	56,2	28,1	24,4	16,3
23,9	5,05	1,21	68,9	34,4	30,0	20,0
28,3	4,97	1,41	81,6	40,8	35,5	23,6
38,2	4,87	1,86	110	55,2	48,0	32,0
47,0	4,79	2,25	136	67,8	58,9	39,3
56,9	4,75	2,70	164	82,1	71,4	47,6
68,4	4,74	3,24	197	98,7	85,8	57,2
92,8	4,69	4,35	268	134	116	77,6
111	4,66	5,17	321	160	139	93,0
135	4,11	5,55	391	195	170	113
162	4,10	6,65	468	234	203	136
196	4,09	8,02	566	283	246	164
245	4,07	10,0	706	353	307	205
302	4,10	12,4	872	436	379	253
381	4,09	15,6	1099	550	478	319
429	4,09	17,5	1239	619	539	359
483	4,09	19,8	1396	698	607	405
604	4,08	24,7	1745	872	758	506

Окончание таблицы 18

Кажущаяся выходная мощность $S_{r,edu}$	Относительные потери $P_{L,RCDM(90;100)}$	Абсолютные потери $P_{L,RCDM(90,100)}$	Примеры выходного тока преобразователя при различном линейном напряжении $I_{1r,out}=\frac{S_{r,edu}}{\sqrt{3}\cdot U_{1r,out}}$			
			$U_{1r,out}$ = 200 В	$U_{1r,out}$ = 400 В	$U_{1r,out}$ = 460 В	$U_{1r,out}$ = 690 В
кВА	%	кВт	А			
677	4,08	27,6	1954	977	850	566
761	4,08	31,1	2198	1099	956	637
858	4,08	35,0	2477	1239	1077	718
967	4,08	39,4	2791	1396	1214	809
1088	4,08	44,3	3140	1570	1365	910
1209	4,08	49,3	3489	1745	1,517	1011

Примечание 1 — Изменение частоты коммутации от 4 кГц при мощности 111 кВА до 2 кГц при мощности 135 кВА ведет к скачкообразному изменению относительных потерь $p_{L,RCDM}$ между этими номиналами.

Если номинальная кажущаяся выходная мощность преобразователя находится между значениями в таблице 18, для классификации IE должно быть использовано более высокое значение мощности при определении относительных потерь $p_{L,RCDM}$. Потери в эталонных комплектных преобразователях, приведенные в таблице 18, применяют для всех низковольтных преобразователей (свыше 200 В и до 1000 В включительно). Для приведенных кажущихся номинальных мощностей преобразователи на напряжения до 200 В включительно предполагают более значительные потери, чем преобразователи на более высокие напряжения. Чтобы это учесть, значения в таблице 18 следует умножить на 1,35 (согласно IEC/TS 61800-8), присваивая класс IE преобразователю на напряжение не выше 200 В.

Преобразователю присваивают класс IE1, если его относительные потери находятся в пределах ±25 % от потерь эталонного комплектного преобразователя.

Преобразователю присваивают класс IE0, если его относительные потери более чем на 25 % выше потерь эталонного комплектного преобразователя.

Преобразователю присваивают класс IE2, если его относительные потери более чем на 25 % меньше потерь эталонного комплектного преобразователя.

Эти правила проиллюстрированы на рисунке 16.

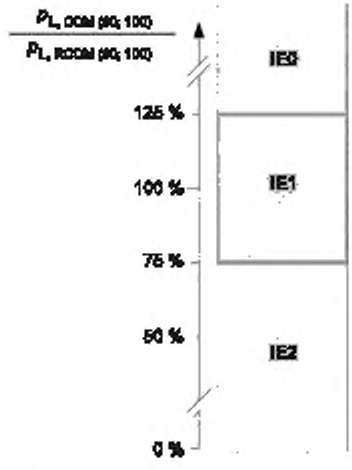


Рисунок 16 — Иллюстрация классификации преобразователей

Примечание 2 — В настоящем стандарте классификация преобразователей ограничена классом IE2. Классы от IE3 до IE9 зарезервированы с учетом будущего технологического прогресса.

В настоящем стандарте определение классов IE нормировано только для преобразователей, конвертирующих входную энергию переменного тока в выходную энергию переменного тока.

6.3 Двигатель

Классы IE двигателей, питающихся от преобразователей, определены в IEC 60034-30 (все части).

6.4 Комплектный электропривод

Классы энергоэффективности комплектных электроприводов IES определены относительно потерь в эталонном электроприводе. Класс IES1 определен потерями эталонного электропривода. Иллюстрация приведена на рисунке 17.

Электропривод классифицирован как IES1, если его относительные потери находятся в пределах ±20 % от значения, приведенного в таблице 19.

Электропривод классифицирован как IES0, если его относительные потери более чем на ±20 % выше значения, приведенного в таблице 19.

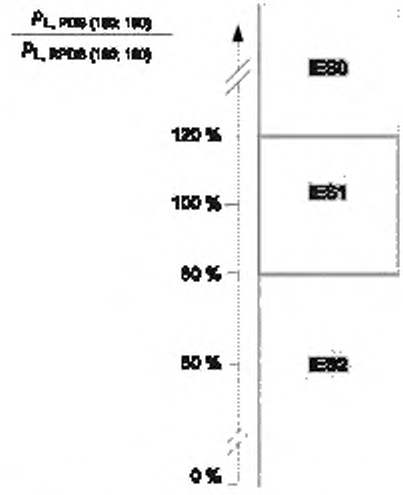


Рисунок 17 — Иллюстрация классификации преобразователей

Электропривод классифицируется как IES2, если его относительные потери более чем на ±20 % меньше значения, приведенного в таблице 19.

Потери в эталонном электроприводе описаны в 5.4.1.

Таблица 19 — Потери эталонных комплектных электроприводов класса IES1

$P_{r,M}$, кВт	$P_{L,RCDM(100:100)}$, % от $P_{r,M}$	$P_{L,RCDM(100;100)}$, кВт
0,12	171,41	0,206
0,18	127,38	0,229
0,25	102,32	0,256
0,37	79,67	0,295
0,55	61,43	0,338
0,75	51,70	0,388

Окончание таблицы 19

$P_{r,M}$, кВт	$p_{L,RCDM(100,100)}$, % от $P_{r,M}$	$P_{L,RCDM(100,100)}$, кВт
1,1	43,98	0,484
1,5	39,06	0,586
2,2	34,55	0,760
3	31,59	0,948
4	29,10	1,16
5,5	26,55	1,46
7,5	24,06	1,80
11	21,65	2,38
15	19,94	2,99
18,5	18,85	3,49
22	18,05	3,97
30	16,86	5,06
37	16,19	5,99
45	15,44	6,95
55	14,77	8,13
75	13,91	10,4
90	13,63	12,3
110	13,15	14,5
132	12,80	16,9
160	12,45	19,9
200	12,09	24,2
250	12,06	30,1
315	12,05	38,0
355	12,05	42,8
400	12,04	48,2
500	12,03	60,2
560	12,04	67,4
630	12,03	75,8
710	12,03	85,4
800	12,04	96,3
900	12,04	108
1000	12,04	120

Если номинальная мощность электропривода находится между значениями в таблице 19, для классификации IE следует использовать более высокое значение мощности при определении относительных потерь $p_{L,RPDS(100,100)}$.

7 Определение потерь

7.1 Общие положения

Цель раздела 7 — определить типовые испытания, которые должны быть выполнены, чтобы верифицировать класс IE комплектного преобразователя и класс IES для комплектного электропривода. Методы определения потерь для классификации преобразователей по IE и электроприводов — по IES в настоящем стандарте рассмотрены как типовые испытания. Кроме того, определены процедуры испытаний преобразователей и электроприводов при частичных нагрузках.

Если для преобразователя установлена только активная номинальная мощность, его выходной ток может быть рассчитан по формуле (3), а кажущаяся номинальная мощность — по формуле (4).

Потери и классы IE/IES рассчитывают и измеряют при номинальном входном напряжении в соответствии с таблицей 1 IEC 60038:2009. Кроме того, номинальное выходное напряжение и номинальная частота вращения двигателя в случае электропривода должны быть указаны в документации.

7.2 Типовые испытания комплектного преобразователя для классификации IE

Для определения класса IE энергоэффективности преобразователя должны быть проведены испытания. Классы энергоэффективности определяют в одной рабочей точке в соответствии с операцией, описанной в 6.1. Потери в этой точке устанавливают одним из следующих способов:

- определение потерь в отдельных компонентах, как описано в 7.5;
- проведение измерений вход-выход в соответствии с 7.7 (процедура испытания рассмотрена в 7.7.3.4, а условия испытаний описаны в 7.9);
- применение метода калориметрических измерений в соответствии с 7.8 (условия испытаний описаны в 7.9).

Производитель вправе выбрать любой из трех способов.

Примечание — Испытательные лаборатории должны использовать способы, основанные на измерениях, т. е. калориметрический метод или метод вход-выход.

Выходной ток комплектного преобразователя и коэффициент сдвига фаз определены в таблицах 1 и 2.

Если преобразователь предназначен для питания иного типа двигателя, нежели асинхронный, он должен быть испытан с соответствующей нагрузкой, а отклонения от условий испытания должны быть указаны в документации пользователя и отчете об испытаниях.

Потери, требуемые для определения класса энергоэффективности, должны быть вычислены по найденным потерям $P_{L,CDM,determined}$ и погрешности измерений в соответствии со следующей формулой:

$$P_{L,CDM} = P_{L,\,CDM,determined} + \Delta P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined}(1 + \Delta p_{L,\,CDM}). \quad (21)$$

Данное скорректированное значение потерь используют для нахождения относительных потерь комплектного преобразователя.

Погрешность использованного метода добавляют к найденному значению потерь, что проиллюстрировано на рисунке 18.

7.3 Типовые испытания комплектного электропривода для классификации IES

Для определения класса IES энергоэффективности электропривода производитель должен проводить типовые испытания. Классы энергоэффективности устанавливают в одной рабочей точке в соответствии с операцией, описанной в 6.1. Потери в этой точке определяются одним из следующих способов:

- расчет потерь, как описано в 7.6;
- измерения вход-выход в соответствии с 7.7 (процедура испытания рассмотрена в 7.7.3.5, а условия испытаний описаны в 7.10).

Производитель вправе выбрать любой из двух способов.

Примечание — Испытательные лаборатории должны использовать метод вход-выход.

Калориметрический метод не рекомендован ввиду трудности испытания двигателя при его применении.

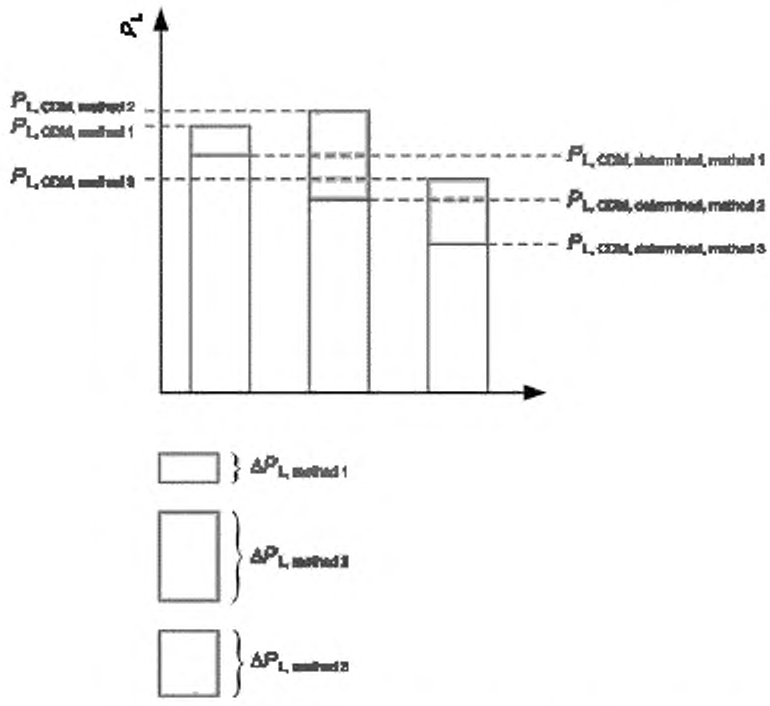


Рисунок 18 — Иллюстрация к определению потерь в преобразователе

Потери, необходимые для определения класса энергоэффективности, следует вычислять по найденным потерям $P_{L,PDS,determined}$ и погрешности измерений в соответствии со следующей формулой:

$$P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} + \Delta P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined}(1 + \Delta p_{L,PDS}). \quad (22)$$

Данное скорректированное значение потерь используют для нахождения относительных потерь комплектного электропривода.

Погрешность использованного метода добавляют к найденному значению потерь, что проиллюстрировано на рисунке 18.

Производитель должен определить погрешность выбранного метода, так как он несет ответственность за правильное определение погрешности. Использованная погрешность должна базироваться на случайном распределении ошибок по нормальному закону. Типичные погрешности для различных методов и вычислительных процедур оценки потерь приведены в приложении F.

7.4 Процедуры определения потерь в преобразователе и электроприводе при работе с частичными нагрузками

Производитель должен определить потери энергии в точках частичных нагрузок, как это указано в 4.2.

Для определения потерь в преобразователе использован подход, аналогичный описанному в 7.2 для определения класса IE. Производитель должен установить потери при частичных нагрузках преобразователя и соответствующие погрешности по формуле (21).

Для определения потерь в электроприводе использован подход, аналогичный описанному в 7.3 для определения класса IES. Производитель должен установить потери при частичных нагрузках преобразователя и соответствующие погрешности по формуле (22).

Примечание — Испытательные лаборатории должны использовать способы, основанные на измерениях, т. е. калориметрический метод или метод вход-выход.

7.5 Расчет потерь в комплектном преобразователе

Для расчета потерь в комплектном преобразователе может быть использована представленная в подразделе 5.2 модель. Производитель может применять любую расчетную модель для оценки потерь в преобразователе. Он несет ответственность за точность расчетов по формуле (21).

Расчеты потерь в преобразователе должны быть выполнены с предельным вниманием к предоставленным производителями комплектующим параметрам силовых полупроводников при реальных рабочих температурах или максимальных рабочих температурах, представленных в документации.

Параметры, влияющие на потери в компонентах преобразователей, должны соответствовать рабочим точкам. Если эти данные недоступны, потери следует определять по результатам измерений.

Примечание — Для некоторых компонентов преобразователей измерение потерь представляет сложности. Один из возможных выходов в этой ситуации — комбинация расчетных и экспериментальных методов.

В итоге после расчета или измерения потерь в элементах преобразователя отдельные потери суммируются для определения общих потерь $P_{L,CDM,determined}$ комплектного преобразователя.

7.6 Расчет потерь в комплектном электроприводе

Потери в комплектном электроприводе могут быть определены расчетом по формулам (18) и (19). Если расчет потерь в электроприводе проводят с помощью эталонного преобразователя, погрешность не добавляют к потерям преобразователя. Если расчет потерь в электроприводе проводят посредством эталонного двигателя, погрешность в соответствии с IEC 60034-1 добавляют к потерям преобразователя.

7.7 Метод измерения вход-выход

7.7.1 Измерение потерь преобразователя по методу вход-выход

Измерение потерь в комплектном преобразователе по методу вход-выход основано на измерениях электрической мощности на входе и выходе преобразователя, как представлено на рисунке 19. Потери вычисляют по формуле

$$P_{L,CDM,determined} = P_{in,CDM} + P_{out,CDM}. \quad (23)$$

Входную мощность вычисляют анализатором мощности по регистрируемым значениям тока I_{in} и напряжения U_{in} на входе преобразователя. Выходную мощность вычисляют анализатором мощности по регистрируемым значениям тока I_{out} и напряжения U_{out} на выходе преобразователя. Выходные переменные измеряют непосредственно на выходных клеммах преобразователя. Точность метода ограничена точностью примененных средств измерений.

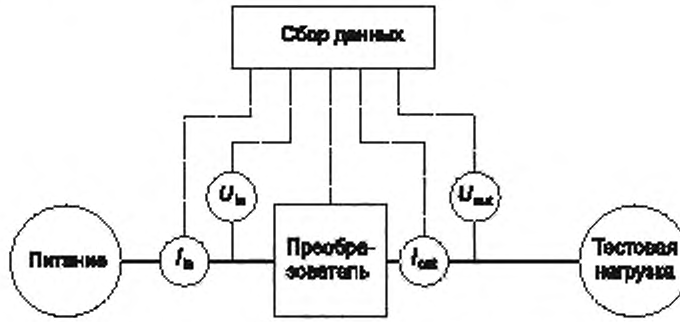


Рисунок 19 — Определение потерь в преобразователе методом вход-выход

7.7.2 Измерение потерь электропривода по методу вход-выход

Измерение потерь в комплектном электроприводе по методу вход-выход основано на измерениях электрической мощности на входе и механической мощности на выходе электропривода, как представлено на рисунке 20. Потери вычисляют по формуле

$$P_{L,PDS,determined} = P_{in,PDS} - P_{out,PDS}. \quad (24)$$

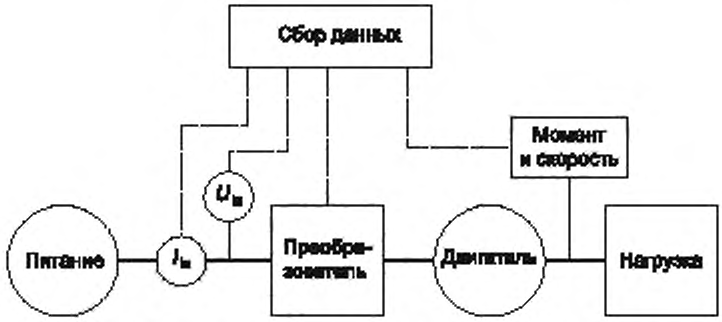


Рисунок 20 — Определение потерь в электроприводе методом вход-выход

Входную мощность P_{in} вычисляют анализатором мощности по регистрируемым значениям тока I_{in} и напряжения U_{in} на входе электропривода. Выходную мощность P_{out} вычисляют по регистрируемым значениям момента и скорости на валу двигателя. Точность метода ограничена точностью применённых средств измерений.

7.7.3 Требования к методам измерения вход-выход

7.7.3.1 Общие положения

При испытаниях преобразователей и электроприводов под нагрузкой неизбежны медленные изменения выходной мощности и других измеряемых переменных. Поэтому при каждой нагрузке необходимо проводить несколько измерений, повторяемых через определенный промежуток времени (в несколько периодов изменения, обычно от 1 до 3 мин), и за результат принимать среднее значение этих измерений потерь.

Принимая во внимание гармонический состав выходного напряжения преобразователя, необходимо измерительное оборудование выбирать по диапазону частот и требуемой точности.

7.7.3.2 Анализатор мощности и датчики

Средства для измерений мощности и тока на входе и выходе комплектных преобразователей должны удовлетворять требованиям IEC 60034-2-1.

Погрешность, заявленная производителем измерителя мощности, должна составлять не более 0,2 % от S_{equ} для суммарной активной мощности при частоте 50/60 Гц. Это — общая погрешность, включая возможные датчики.

Полоса пропускания измерителей мощности и датчиков должна быть достаточно широкой, чтобы обеспечить погрешность измерения общей активной мощности не более 0,3 % от S_{equ}.

Примечание 1 — Кажущаяся выходная мощность преобразователя на частоте коммутации, как правило, не превышает 5 % общей номинальной выходной мощности. Выходная мощность при увеличении частоты уменьшается пропорционально квадрату частоты. Поэтому полоса пропускания от 0 Гц до 10-кратной частоты коммутации подходит для измерения выходной мощности преобразователя с ШИМ.

Диапазон измерения приборов должен быть адекватен измеряемым токам и напряжениям.

Рекомендуется подавать токи и напряжения непосредственно в анализатор мощности. Если требуется применять внешний преобразователь, могут быть использованы индуктивные датчики, широкополосные шунты или измерительные преобразователи с нулевым полем.

Примечание 2 — Индуктивные датчики не применяют для компонентов на постоянном токе.

Примечание 3 — Индуктивные датчики на низких частотах имеют более высокие погрешности и/или амплитудные ограничения, чем на номинальной частоте.

Все кабели, передающие измеряемые сигналы, по возможности должны быть правильно установлены и экранированы.

7.7.3.3 Механический выход двигателя

Приборы для измерения момента и частоты вращения на выходе двигателя должны удовлетворять требованиям IEC 60034-2-1:2014.

7.7.3.4 Определение потерь преобразователя по методу вход-выход

Потери в преобразователе в восьми опорных точках нагрузки определены в соответствии со следующей процедурой.

Сначала организуют нагрев двигателя до установившейся температуры в режиме работы при номинальной частоте вращения и номинальной нагрузке. Далее проводят три цикла испытаний при определенном токе с изменением частоты в каждом. Последовательность испытаний обозначена цифрами в квадратных скобках на рисунке 21.

Во всех опорных точках относительное выходное напряжение преобразователя (в процентах) должно быть не меньше выходной частоты преобразователя (в процентах).

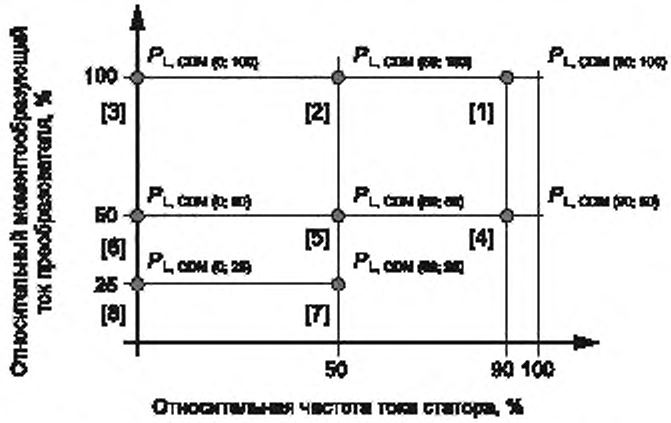


Рисунок 21 — Порядок проведения измерений от [1] до [8]

Сначала преобразователь работает при 90 % частоты и 100 % тока [1] до достижения температурной стабильности (устанавливаемой, например, по температуре радиатора, выходящего потока воздуха или по монитору). О достижении стабильности свидетельствует скорость подъема температуры не выше 1 К за 30 мин.

При достижении температурной стабильности измеряют и записывают значения напряжения, тока, мощности и коэффициента мощности на входных и выходных клеммах преобразователя.

Непосредственно после этого в указанном порядке проводят измерения в остальных опорных точках с записью тех же данных, что и в точке [1]. Все измерения проводят с повторениями для нахождения средних значений переменных, как указано в 7.7.3.1.

Рабочие точки при 50 % [2] и 0 % [3] номинальной частоты устанавливают при неизменной нагрузке.

Далее нагрузку снижают до 50 % номинальной величины для того, чтобы установить точки с 90 % [4], 50 % [5] и 0 % [6] номинальной частоты.

Наконец, нагрузку снижают до 25 % номинальной величины для того, чтобы установить точки с 50 % [7] и 0 % [8] номинальной частоты.

В некоторых случаях может быть более приемлемым сначала испытать все точки с одной частотой, переходя затем к другим. В этом случае последовательность испытаний можно записать как [1]—[4]—[2]—[5]—[7]—[3]—[6]—[8].

Чтобы избежать коммерческих трудностей, связанных с измерительной техникой на низких частотах, можно испытывать преобразователь при частотах выше 0 Гц вплоть до 12 Гц, а в дальнейшем результаты в данных точках [3], [5] и [8] без экстраполяции использовать как в опорных. Они также могут содержаться в документации производителя.

7.7.3.5 Определение потерь в электроприводе методом вход-выход

Потери комплектного электропривода в восьми опорных точках определяют в соответствии с описанной ниже процедурой.

Процедуру начинают с нагрева двигателя до установившейся температуры в режиме работы при номинальной частоте вращения и номинальном моменте. Далее проводят три цикла испытаний при определенном токе с изменением частоты в каждом. Последовательность испытаний обозначена цифрами в квадратных скобках на рисунке 22.

Сначала преобразователь работает при номинальных частоте вращения и моменте в точке [1] до достижения температурной стабильности (устанавливаемой, например, по измерению температуры на внешней поверхности корпуса статора, но не на крышке вентилятора и не на клеммной коробке минус температура окружающей среды). О достижении стабильности свидетельствует скорость подъема температуры не выше 1 К в течение 30 мин. Ввиду меньшей постоянной времени нагрева устройств силовой электроники можно считать, что установившейся температуры они достигнут одновременно с двигателем.



Рисунок 22 — Порядок проведения измерений от [1] до [8]

При достижении температурной стабильности измеряют и записывают значения напряжения, тока, мощности и коэффициента мощности на входе, а также момента и частоты вращения двигателя.

Непосредственно после этого в указанном порядке проводят измерения в остальных опорных точках с записью всех тех данных, что и в точке [1]. Все измерения проводят с повторениями для нахождения средних значений переменных, как указано в 7.7.3.1.

Рабочие точки при 50 % [2] и 0% [3] номинальной частоты вращения устанавливают при неизменном моменте.

Далее момент нагрузки снижают до 50 % номинальной величины для того, чтобы установить точки с 100 % [4], 50 % [5] и 0 % [6] номинальной частоты вращения.

Наконец, момент снижается до 25 % номинальной величины, чтобы установить точки с 50 % [7] и 0 % [8] номинальной частоты вращения.

В некоторых случаях может оказаться удобнее сначала испытать все точки с одной частотой, переходя затем к другим. В этом случае последовательность испытаний можно записать как [1]—[4]—[2]—[5]—[7]—[3]—[6]—[8].

Электродвигатели проявляют нестабильное распределение тока и нагрева обмоток при частотах питания, близких к нулю. Поэтому испытание электропривода можно проводить при частотах выше 0 Гц вплоть до 12 Гц, а в дальнейшем результаты в данных точках [3], [6] и [8] без экстраполяции использовать как в опорных.

7.8 Калориметрический метод определения потерь в комплектном преобразователе

При калориметрическом методе определения потерь в преобразователе они вычисляются по измеренным значениям потока и температуры охлаждающей среды.

Установка для калориметрических измерений представлена на рисунке 23. Условия испытаний описаны в 7.9, а подробности метода — в приложении G.

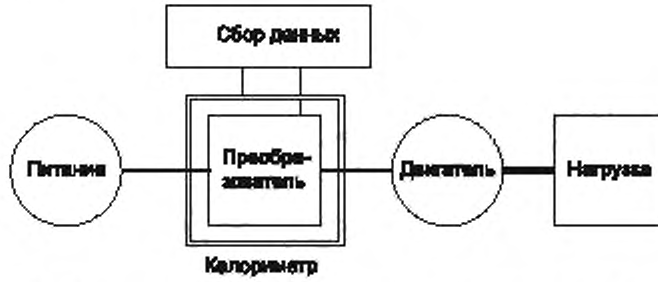


Рисунок 23 — Калориметрическая установка для измерения потерь преобразователя

7.9 Условия испытаний комплектного преобразователя

Условия и процедуры испытаний имеют существенное значение для достижения воспроизводимости и сопоставимости результатов, получаемых различными производителями и испытательными лабораториями. Следующие ниже требования являются обязательными. Все условия испытаний должны быть записаны и документированы, как указано в 8.4.

- Частота коммутации и форма импульсов должны быть определены производителем и зафиксированы в заводских установках по умолчанию.

- Опорные рабочие точки должны соответствовать рисунку 21.

- Во всех точках испытаний относительное выходное напряжение преобразователя (в процентах) не должно быть ниже его относительной выходной частоты (в процентах).

- Измерения следует проводить в соответствии с процедурой, описанной в 7.7.3.4.

- Входное напряжение и частота должны быть равны номинальным значениям.

- Пик-фактор (коэффициент амплитуды) питающего напряжения должен находиться в пределах от 1,35 до 1,44.

- Относительный ток короткого замыкания преобразователя к питающей сети должен быть в пределах от 50 до 200 для преобразователей с номинальной кажущейся выходной мощностью до 111 кВА включительно и от 5 до 50 для преобразователей номинальной выходной мощностью выше 111 кВА.

- Выходной ток преобразователя должен быть не меньше значений, указанных в таблице 1, так как меньшие токи вызывают меньшие потери.

- Вместо двигателя в качестве нагрузки можно использовать электронные устройства.

- Коэффициент смещения основной гармоники тока по отношению к основной гармонике напряжения должен соответствовать данным таблицы 2 с погрешностью ±0,08. Иногда невозможно использовать данный в таблице коэффициент смещения в точках частичной нагрузки. В этом случае может быть использовано и включено в документацию как можно более близкое его значение, полученное при том же габарите двигателя.

- В том случае, если номинальный выходной ток преобразователя не меньше указанного в таблице 18, должен быть использован следующий по габариту двигатель.

- Испытательная нагрузка при измерении потерь преобразователя должна быть выбрана таким образом, чтобы полный коэффициент гармонических искажений (THD) основной гармоники выходного тока был менее или равен 5 %. Более сильные искажения увеличивают потери в преобразователе.

- Если не указано иное, испытания преобразователей с номинальной кажущейся выходной мощностью менее 8 кВА следует проводить с экранированным кабелем длиной не менее 15 м. Если производитель заявил максимальную длину кабеля менее 15 м, должен быть использован более длинный кабель.

- Преобразователь должен быть оборудован и установлен с учетом требований IEC 61800-5-1 по электробезопасности.

- Потери следует определять в длительном режиме работы.

- Испытания могут быть проведены при любой температуре.

- Измерения следует проводить при полностью работающей системе охлаждения. Если система охлаждения управляемая (дискретно или непрерывно), в каждой опорной точке осуществляют измерения с интервалом 10 мин с последующим вычислением среднего.

7.10 Условия испытаний комплектного электропривода

- Опорные рабочие точки должны соответствовать рисунку 22.

- Измерения следует проводить в соответствии с процедурой, описанной в 7.7.3.5.

- Входное напряжение преобразователя и частота должны быть равны номинальным значениям преобразователя.

- Пик-фактор (коэффициент амплитуды) питающего напряжения должен находиться в пределах от 1,35 до 1,44.

- Относительный ток короткого замыкания преобразователя к питающей сети должен быть в пределах от 50 до 200 для преобразователей с номинальной выходной мощностью до 90 кВт включительно и от 5 до 50 для преобразователей номинальной выходной мощностью выше 90 кВт.

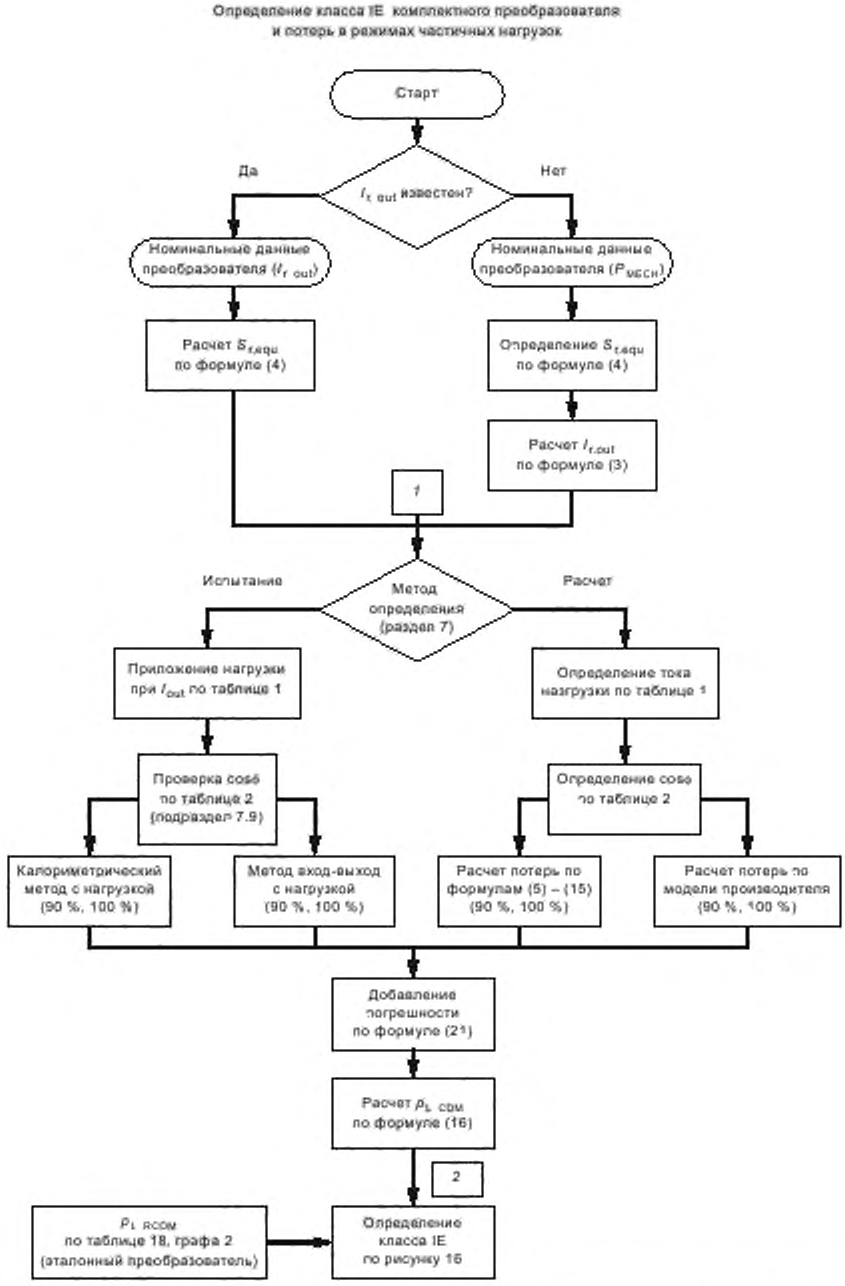
- Если не указано иное, испытания электроприводов с номинальной мощностью менее 7,5 кВт следует проводить с экранированным кабелем длиной не менее 15 м. Если производитель электропривода или преобразователя заявил максимальную длину кабеля менее 15 м, должен быть использован более длинный кабель. Это требование не распространяется на интегрированные электроприводы.

- Испытания следует проводить при окружающей двигатель температуре от плюс 15 °С до плюс 30 °С, в противном случае для потерь в двигателе должна быть проведена температурная коррекция.

- Измерения следует проводить при полностью работающей системе охлаждения. Если система охлаждения управляемая (дискретно или непрерывно), в каждой опорной точке осуществляют измерения с интервалом 10 мин с последующим вычислением среднего.

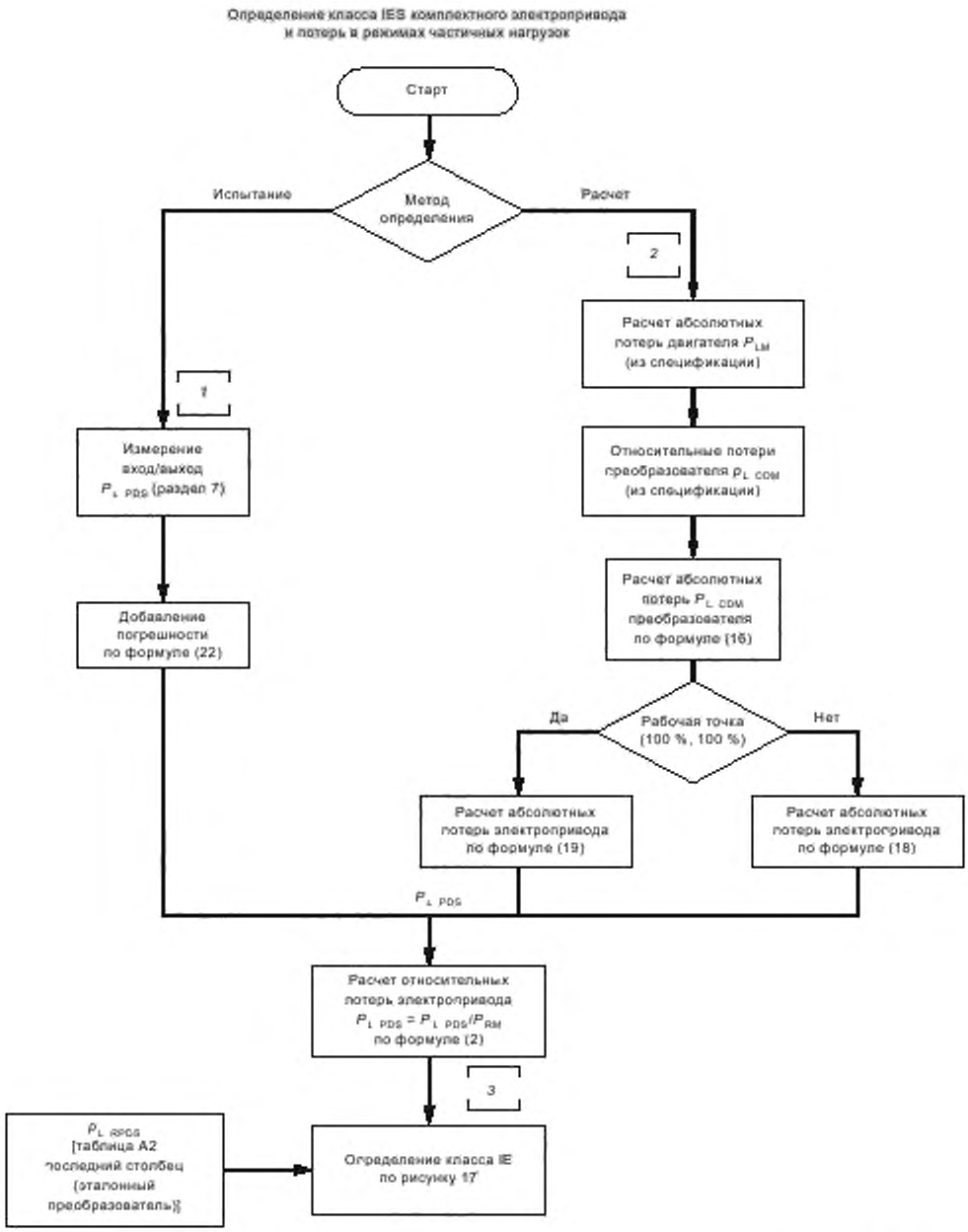
7.11 Алгоритмы испытаний

Алгоритмы испытаний представлены диаграммами на рисунках 24 и 25.



Примечание — При работе с частичными нагрузками последовательность действий повторяется от узла *1* к узлу *2* диаграммы для каждой из 8 точек частичной нагрузки с установкой I_{OUT} и cosФ в соответствии с таблицами 1 и 2 (относительный момент 25 %, 50 % и 90 % и относительная скорость 0 %, 50 % и 90 % в соответствии с рисунком 21).

Рисунок 24 — Определение класса IE и потерь в опорных точках преобразователя



a) Конкретный двигатель может быть заменен на эталонный по данным приложения А (таблица А.2).

b) Конкретный преобразователь может быть заменен на эталонный по данным приложения А (таблица А.2).

c) При работе с частичными нагрузками последовательность действий повторяется от узла *1* к узлу *3* диаграммы для каждой точки с установкой момента и скорости в соответствии с рисунком 4.

d) При работе с частичными нагрузками последовательность расчетов для каждой точки повторяется от узла *2* к узлу *3* диаграммы с установкой момента и скорости в соответствии с рисунками 5 и 6 для двигателя и преобразователя.

Рисунок 25 — Определение класса IES и потерь в опорных точках электропривода

8 Требования к пользовательской документации

8.1 Общие положения

Цель данного раздела — предоставить информацию, необходимую для определения потерь энергии в комплектных преобразователе и электроприводе. Расположение требуемой информации указано в таблице 20.

Обозначения класса энергоэффективности продукции должны содержаться в пользовательской документации.

Требования данного раздела касаются комплектных преобразователей и комплектных электроприводов, если иное не оговорено.

Предоставляемая информация должна гарантировать принадлежность комплектных преобразователя и электропривода определенному классу, а также обеспечивать достаточный объем информации для классификации энергоэффективности электромеханического комплекса, в котором преобразователь и электропривод являются компонентами.

Производитель должен указать в документации, какая частота статора (50 Гц или 60 Гц) использовалась при проведении испытаний.

Таблица 20 — Требуемая информация

Вид информации	Раздел	Локализация[a, b]			Технический раздел
	Ссылка	1	2	3	Ссылка
Для выбора	8.2				
Для определения класса энергоэффективности	8.3				
Общие сведения	8.3			x	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Питающее напряжение	8.3			x	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Частота питания	8.3			x	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Частота питания статора нагрузочного двигателя для преобразователя и номинальная частота вращения для электропривода	8.3			x	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Класс IE для преобразователя и класс IES для электропривода	8.3			x	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Максимальное выходное напряжение преобразователя	8.3			x	5.3, Приложение D
Для определения добавочных потерь и условий частичных нагрузок	8.4			x	
Общие сведения	8.4.1			x	Приложение B, 4.2, 7
Потери при частичных нагрузках	8.4.2			x	4.2, 7
Потери во вспомогательном и опциональном оборудовании	8.4.3			x	
Потери в спящем режиме	8.4.4			x	5.2, 7
Потери в рекуперативном режиме	8.4.5			x	B.4.3, 5.5

[a] Локализация: 1 — продукция; 2 — упаковка; 3 — документация.

[b] Документация по требованиям 8.4 может быть предоставлена в электронном виде. Если массовую идентичную продукцию поставляют одному заказчику, в случае его согласия каждый экземпляр продукции не надо сопровождать документацией.

8.2 Информация для выбора

Каждая часть комплектного преобразователя, как и комплектного электропривода, которая поставляется как отдельный продукт, должна сопровождаться информацией, касающейся ее функций и электрических характеристик, как этого требуют соответствующие ей стандарты.

Примечание — Типичные примеры стандартов на продукцию:

- IEC 61800-2 для систем электроприводов с регулированием скорости;
- IEC 60947-4-1 для контакторов и пускателей — электромеханические контакторы и пускатели для электродвигателей;
- IEC 60947-4-2 для контакторов и пускателей — полупроводниковые контроллеры и пускатели переменного тока.

8.3 Информация для определения класса энергоэффективности

Производитель должен предоставить информацию о классе энергоэффективности (IE/IES) комплектного преобразователя и комплектного электропривода, как это определено в 4.6, 4.7, 6.2 и 6.4 и верифицировано по разделу 7.

Класс IES комплектного электропривода должен быть определен, если двигатель и комплектный преобразователь физически объединены в одно изделие или они предназначены только для совместного использования. В этом случае не требуется определять классы IE преобразователя и двигателя в отдельности.

Для комплектных преобразователей общего пользования, не предназначенных для питания конкретных двигателей, требуется только указать класс IE преобразователя, однако класс IES для комбинации преобразователя с двигателем может быть уже приведен.

Вместе с классом IE/IES должна быть предоставлена следующая информация:

- среднеквадратичное (RMS) значение линейного питающего напряжения U_{mL1};
- частота питающего напряжения (например, 50, 60 Гц);
- номинальная частота питания статора испытательной нагрузки в случае комплектного преобразователя или номинальная частота вращения, об/мин, двигателя в случае электропривода;
- максимальное среднеквадратичное значение основной гармоники выходного напряжения преобразователя.

8.4 Информация для определения добавочных потерь и условий работы с частичной нагрузкой

8.4.1 Общие положения

Для определения класса энергоэффективности конечной продукции — электромеханического комплекса (см. 4.9 и рисунок 7), в котором преобразователь и/или электропривод использованы как компоненты в соответствии с приложением В, — необходимо иметь достоверные данные о потерях в преобразователе или электроприводе, что предполагает информацию о потерях при частичных нагрузках и в дополнительном оборудовании, требующемся для функционирования комплекса в целом.

8.4.2 Потери в режимах с частичной нагрузкой

Производитель должен установить потери в преобразователе в опорных точках измерения частичной нагрузки, как указано в 4.2 и проверено по разделу 7. В настоящем стандарте регламентирована информация по потерям только для преобразователей переменного тока в переменный (AC/ACCDM).

Производитель должен установить потери в преобразователе в рабочих точках частичной нагрузки, как указано в 4.2 и проверено по разделу 7.

Количество рабочих точек частичной нагрузки может быть уменьшено, если применение электромеханического комплекса не предусматривает работу во всех 8 точках. В этом случае производитель должен указать в руководстве пользователя, какие точки для данного применения использованы.

8.4.3 Потери во вспомогательном и опциональном оборудовании

Потери в дополнительных ЭМС фильтрах, сетевых реакторах, трансформаторах, внешних вентиляторах, выходных реакторах и фильтрах или другом дополнительном силовом оборудовании, которое устанавливается вместе с комплектным преобразователем или электроприводом в полной комплектации электромеханического комплекса, которые превышают:

0,1 % номинальной мощности комплектного преобразователя или

0,5 Вт.

Эти потери должны быть приведены в документации для номинальной рабочей точки с погрешностью ±25 %, если они не учтены в потерях преобразователя или электропривода.

То же самое касается контроллеров или дополнительного технологического оборудования, которое должно быть использовано при работе электропривода.

8.4.4 Потери в спящем режиме

Производитель должен установить потери в спящем режиме преобразователя и электропривода с точностью ±25 %.

8.4.5 Потери в рекуперативном режиме

В документации пользователя должно быть указано, может или не может преобразователь или электропривод передавать энергию от нагрузки к источнику питания.

Производитель должен обеспечить системного интегратора необходимой информацией для определения тех потерь, которые сопровождают передачу энергии от нагрузки к источнику питания, на базе конфигурации рекуперативных цепей преобразователя или электропривода.

Приложение А
(обязательное)

Потери в эталонных преобразователе, двигателе и электроприводе

А.1 Таблицы относительных потерь

Таблицы А.1, А.2 и А.3 представляют относительные потери в процентах эталонных комплектных преобразователей, эталонных двигателей и эталонных электроприводов соответственно

Таблица А.1 — Относительные потери, %, эталонных преобразователей для различных номинальных мощностей в опорных рабочих точках согласно рисунку 6

$P_{r,M}$, кВт справочно	$S_{r,edu}$, кВА	$p_{L,RCDM}$, относительные							
		(0,25)	(0;50)	(0,100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(90,50)	(90;100)
0,12	0,278	33,79	33,84	34,30	33,89	34,04	34,84	34,39	35,85
0,18	0,381	25,24	25,28	25,75	25,34	25,48	26,28	25,83	27,30
0,25	0,5	19,74	19,78	20,25	19,84	19,99	20,78	20,34	21,80
0,37	0,697	14,77	14,82	15,29	14,87	15,02	15,82	15,37	16,84
0,55	0,977	11,14	11,19	11,66	11,24	11,39	12,19	11,74	13,21
0,75	1,29	8,96	9,00	9,47	9,06	9,20	10,00	9,55	11,02
1,1	1,71	6,86	7,13	7,82	6,93	7,33	8,40	7,68	9,51
1,5	2,29	5,56	5,83	6,52	5,63	6,03	7,10	6,38	8,21
2,2	3,3	4,54	4,82	5,51	4,61	5,02	6,09	5,37	7,20
3	4,44	4,07	4,35	5,04	4,14	4,55	5,62	4,90	6,72
4	5,85	3,74	4,02	4,71	3,82	4,22	5,29	4,57	6,39
5,5	7,94	3,35	3,63	4,32	3,42	3,83	4,90	4,18	6,01
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84
11	14,4	2,39	2,68	3,61	2,46	2,87	4,23	3,20	5,43
15	19,5	2,15	2,44	3,37	2,22	2,63	3,99	2,96	5,18
18,5	23,9	2,02	2,32	3,24	2,09	2,51	3,86	2,83	5,05
22	28,3	1,94	2,23	3,16	2,01	2,43	3,78	2,75	4,97
30	38,2	1,83	2,12	3,05	1,90	2,31	3,67	2,64	4,87
37	47	1,76	2,05	2,98	1,83	2,24	3,60	2,57	4,79
45	56,9	1,71	2,01	2,93	1,78	2,20	3,55	2,52	4,75
55	68,4	1,62	1,93	2,90	1,70	2,13	3,53	2,47	4,74
75	92,8	1,58	1,88	2,85	1,65	2,08	3,48	2,42	4,69
90	111	1,55	1,86	2,82	1,62	2,05	3,45	2,39	4,66
110	135	1,24	1,48	2,27	1,32	1,68	2,91	2,02	4,11
132	162	1,23	1,47	2,26	1,30	1,67	2,89	2,01	4,10
160	196	1,22	1,46	2,25	1,29	1,66	2,88	2,00	4,09
200	245	1,21	1,45	2,24	1,28	1,65	2,87	1,98	4,07
250	302	1,17	1,42	2,24	1,24	1,61	2,88	1,95	4,10

Окончание таблицы А.1

$P_{r,M}$, кВт справочно	$S_{r,edu}$, кВА	$p_{L,RCDM}$, относительные							
		(0;25)	(0;50)	(0;100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(90;50)	(90;100)
315	381	1,17	1,41	2,23	1,23	1,61	2,87	1,94	4,09
355	429	1,17	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
400	483	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
500	604	1,16	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,94	4,08
560	677	1,16	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
630	761	1,16	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
710	858	1,16	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
800	967	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
900	1088	1,15	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08
1000	1209	1,14	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08
Примечание — Таблица А.1 применяется для оценки преобразователей на частоте 50 и 60 Гц.									

Таблица А.2 — Относительные потери, %, эталонных двигателей для различных номинальных мощностей в опорных рабочих точках согласно рисунку 5

P_N, кВт	$p_{L,RM}$							
	(0,25)	(0,50)	(0;100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(100;50)	(100,100)
0,12	28,9	32,8	59,9	36,5	40,5	66,8	51,5	79,6
0,18	23,8	27,1	47,3	30,6	33,8	53,4	44,4	62,7
0,25	19,5	22,4	38,0	25,3	28,1	43,2	37,5	52,9
0,37	15,0	17,6	30,7	19,5	22,1	34,4	28,9	43,2
0,55	11,7	14,4	27,7	15,0	17,7	30,1	21,8	34,2
0,75	9,3	11,7	22,8	12,1	14,5	24,7	19,2	29,5
1,1	7,4	9,7	20,5	10,0	12,3	22,2	16,2	26,3
1,5	6,0	8,2	17,9	8,3	10,8	19,7	14,0	23,9
2,2	5,2	7,2	15,5	7,4	9,4	17,9	12,7	21,4
3	4,5	6,3	13,8	6,5	8,3	16,2	11,4	19,5
4	3,8	5,4	12,2	5,6	7,3	14,4	10,2	17,8
5,5	3,0	4,4	10,5	4,7	6,1	12,6	8,8	16,1
7,5	2,5	3,7	9,3	4,0	5,3	11,2	7,8	14,7
11	2,2	3,4	8,7	3,6	4,9	10,4	7,2	13,1
15	1,8	3,0	7,5	3,1	4,3	9,2	6,4	11,9
18,5	1,7	2,8	7,1	2,9	4,0	8,7	5,9	11,1
22	1,6	2,6	6,8	2,8	3,8	8,3	5,7	10,5
30	1,5	2,3	6,2	2,5	3,4	7,5	5,2	9,6
37	1,3	2,1	5,6	2,4	3,2	6,9	4,9	9,1

Окончание таблицы А.2

P_N, кВт	$P_{L,RM}$							
	(0;25)	(0;50)	(0;100)	(50,25)	(50;50)	(50,100)	(100;50)	(100;100)
45	1,2	1,9	5,0	2,2	2,9	6,3	4,7	8,5
55	1,1	1,7	4,3	2,1	2,7	5,6	4,6	8,0
75	1,0	1,3	3,5	2,0	2,4	4,8	4,4	7,3
90	1,0	1,3	3,5	1,9	2,2	4,6	4,1	7,1
110	1,0	1,4	3,2	2,2	2,7	4,7	4,7	7,3
132	1,0	1,4	3,2	1,9	2,5	4,6	3,9	7,0
160	1,0	1,4	3,1	1,8	2,4	4,6	3,9	6,7
200	1,0	1,4	3,1	1,8	2,3	4,5	3,8	6,4
250	1,0	1,4	3,0	1,8	2,3	4,4	3,8	6,4
315	0,9	1,3	3,0	1,8	2,3	4,3	3,8	6,4
355	0,9	1,3	2,9	1,8	2,3	4,3	3,8	6,4
400	0,9	1,3	2,9	1,8	2,3	4,2	3,8	6,4
500	0,9	1,3	2,8	1,8	2,3	4,2	3,8	6,4
560	0,9	1,3	2,7	1,8	2,3	4,1	3,8	6,4
630	0,9	1,3	2,6	1,8	2,3	4,1	3,8	6,4
710	0,9	1,3	2,6	1,8	2,3	4,1	3,8	6,4
800	0,9	1,3	2,5	1,8	2,3	4,0	3,8	6,4
900	0,9	1,3	2,4	1,8	2,3	3,9	3,8	6,4
1000	0,9	1,3	2,4	1,8	2,3	3,8	3,8	6,4

Примечание 1 — Коэффициент добавочных потерь в двигателе за счет питания от преобразователя изменяется в соответствии с 5.3.2 с 15 % до 25 % при увеличении мощности от 90 до 110 кВт, что обусловливает скачкообразное изменение значений.

Примечание 2 — Таблица А.2 применяется для оценки двигателей на частоте 50 и 60 Гц.

Примечание 3 — Абсолютные потери рассчитывают путем умножения относительных потерь на номинальную мощность.

Таблица А.3 — Относительные потери, %, эталонных электроприводов для различных номинальных мощностей в опорных рабочих точках согласно рисунку 4

$P_{r,M}$, кВт	$P_{L,PDS}$, относительные							
	(0;25)	(0;50)	(0;100)	(50,25)	(50;50)	(50;100)	(100;50)	(100;100)
0,12	107,18	111,20	139,36	115,11	119,36	147,51	131,17	171,41
0,18	77,22	80,61	101,80	84,24	87,73	109,03	99,07	127,38
0,25	58,98	61,96	78,50	64,98	68,08	84,76	78,18	102,32
0,37	42,82	45,52	59,50	47,51	50,39	64,20	57,85	79,67
0,55	31,49	34,28	48,41	34,97	37,93	51,75	42,65	61,43
0,75	24,71	27,18	39,09	27,68	30,32	41,90	35,63	51,70
1,1	18,06	20,78	32,66	20,77	23,69	35,26	28,14	43,98

Окончание таблицы А.3

$P_{r,M}$, кВт	$P_{L,PDS}$, относительные							
	(0;25)	(0;50)	(0;100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(100;50)	(100;100)
1,5	14,49	17,10	27,85	16,90	20,01	30,54	23,74	39,06
2,2	12,01	14,43	23,77	14,32	16,93	27,04	20,76	34,55
3	10,52	12,74	21,26	12,63	15,03	24,52	18,65	31,59
4	9,27	11,28	19,09	11,19	13,47	22,14	16,88	29,10
5,5	7,84	9,64	16,74	9,64	11,63	19,67	14,83	26,55
7,5	6,21	7,80	14,63	7,79	9,65	17,36	12,59	24,06
11	5,33	6,91	13,43	6,82	8,66	15,94	11,39	21,65
15	4,60	6,17	11,88	5,99	7,72	14,39	10,25	19,94
18,5	4,31	5,80	11,29	5,60	7,24	13,69	9,56	18,85
22	4,10	5,47	10,86	5,39	6,93	13,16	9,24	18,05
30	3,83	5,00	10,08	4,92	6,34	12,17	8,56	16,86
37	3,54	4,70	9,39	4,72	6,05	11,47	8,16	16,19
45	3,36	4,44	8,70	4,45	5,68	10,79	7,89	15,44
55	3,11	4,10	7,91	4,21	5,35	9,99	7,67	14,77
75	2,95	3,63	7,03	4,04	4,97	9,11	7,39	13,91
90	2,91	3,59	6,98	3,90	4,73	8,86	7,05	13,63
110	2,52	3,22	5,99	3,82	4,76	8,27	7,18	13,15
132	2,51	3,20	5,97	3,50	4,55	8,15	6,37	12,80
160	2,49	3,19	5,86	3,38	4,43	8,13	6,35	12,45
200	2,48	3,18	5,84	3,37	4,32	8,02	6,23	12,09
250	2,41	3,12	5,71	3,30	4,24	7,88	6,16	12,06
315	2,30	3,01	5,70	3,29	4,25	7,77	6,15	12,05
355	2,30	3,00	5,59	3,29	4,23	7,77	6,14	12,05
400	2,30	3,00	5,59	3,29	4,23	7,67	6,14	12,04
500	2,29	2,99	5,48	3,27	4,23	7,65	6,14	12,03
560	2,29	2,99	5,38	3,27	4,23	7,56	6,13	12,04
630	2,29	2,99	5,28	3,27	4,23	7,55	6,13	12,03
710	2,29	2,99	5,28	3,27	4,22	7,56	6,13	12,03
800	2,29	2,99	5,18	3,27	4,22	7,46	6,13	12,04
900	2,29	2,98	5,07	3,26	4,22	7,35	6,13	12,04
1000	2,28	2,98	5,07	3,26	4,22	7,25	6,13	12,04

Примечание 1 — При расчете потерь эталонного электропривода при частоте вращения 100 % суммируют потери в преобразователе и двигателе. При расчете точки электропривода (100, 100) используют точку (90, 100) преобразователя.

Примечание 2 — Таблица А.3 применяется для оценки электроприводов на частоте 50 и 60 Гц.

Пример расчета для эталонного преобразователя (PDS) 400 кВт по формуле (19)

$$P_{LPDS(100;100)} = \frac{4,08 \cdot 483 + 1,11 \cdot 8,4 \cdot 400}{400} = 12,04. \quad (A.1)$$

Пример расчета для эталонного преобразователя (PDS) 400 кВт по формуле (18)

$$P_{LPDS(50;50)} = \frac{1,60 \cdot 483 + 2,3 \cdot 400}{400} = 4,23. \quad (A.2)$$

Приложение В
(справочное)

Описание элементов электромеханического комплекса с электроприводом с точки зрения их влияния на потери

В.1 Общие положения

Электропривод используют для передачи энергии от источника питания к двигателю с целью регулирования его частоты вращения. Электропривод может управлять скоростью и/или моментом, как этого требует механизм.

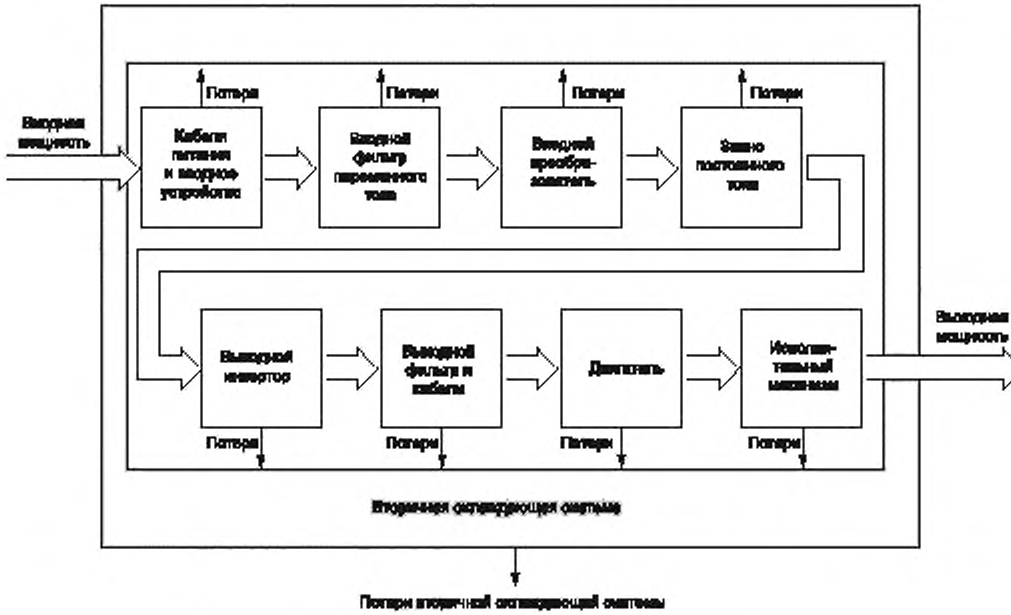


Рисунок В.1 — Потоки энергии в электромеханическом комплексе

Рисунок В.1 иллюстрирует передачу энергии от сети к нагрузке. Питающие кабели и исполнительный механизм не относятся к комплектному электроприводу, хотя их потери могут быть значимыми для комплексной оценки энергоэффективности электромеханического комплекса, как указано в приложении А. Для такой комплексной оценки должны быть оценены потери всей системы. В частности, оптимизация отдельных составляющих системы может привести к ухудшению энергоэффективности комплекса в целом. Основные взаимозависимости описаны в данном приложении.

В.2 Потери в питающих кабелях и вводном устройстве

Базовая эквивалентная схема трехфазных цепей питания в общей точке подключения представлена на рисунке В.2.

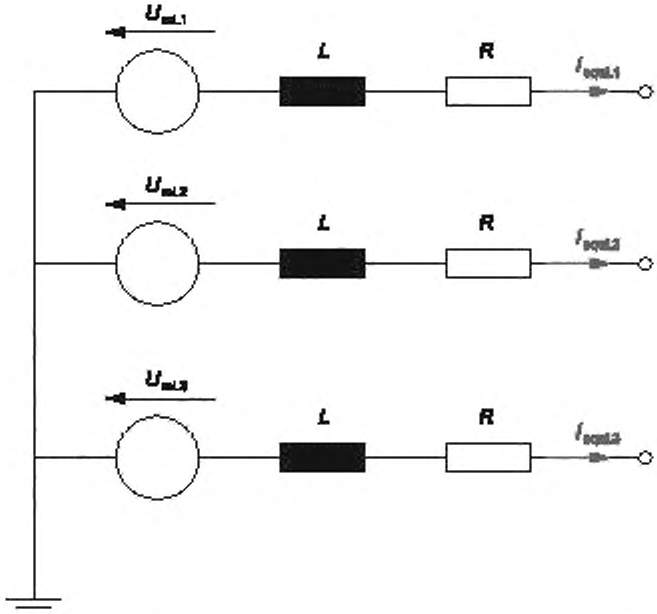


Рисунок B.2 — Эквивалентная схема питания и питающих кабелей

На рисунке B.2 представлена трехфазная система питания с заземленной нулевой точкой звезды. Если потери энергии определены в других конфигурациях схем питания, например треугольник или однофазная, они идентичны. В первом приближении сеть может быть источником питания идеальной синусоидой частотой 50 или 60 Гц. Этот источник имеет последовательный импеданс, определяемый, в основном, индуктивным и активным сопротивлениями. Омическая составляющая представлена сопротивлениями питающих кабелей, выключателей и предохранителей.

Потери энергии сосредоточены в омической части эквивалентной схемы. Эти потери пропорциональны квадрату тока источника питания. С учетом того, что токи равны и сдвинуты по фазе на 120°, потери источника составляют

$$P_{Lmains} = 3 \cdot R \cdot I_{L1}^2. \quad \text{(B.1)}$$

Учитывая, что преобразователь соединен с источником питания, как показано на рисунке B.2, потери в последнем зависят от входного тока преобразователя. Как минимум, преобразователь должен обеспечить активную мощность на нагрузке и собственные потери. Однако преобразователь потребляет более значительную кажущуюся мощность ввиду реактивной мощности и гармоническим токам. Отношение активной мощности к кажущейся определено коэффициентом мощности

$$\lambda = \frac{P_{equ}}{S_{equ}} = \frac{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{Lequ} \cdot \cos\varphi_{equ}}{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{equ}} = \frac{I_{Lequ} \cdot \cos\varphi_{equ}}{I_{equ}}. \quad \text{(B.2)}$$

Преобразователь с коэффициентом мощности, близким к 1, приведет к минимальным потерям в источнике питания. Величина λ определена главным образом входным фильтром и входным преобразователем электропривода.

B.3 Входные фильтры

B.3.1 Высокочастотный ЭМС фильтр

Высокочастотный ЭМС фильтр используется для ограничения высокочастотной эмиссии электропривода в соответствии с IEC 61800-3 с целью ограничения помех радиопередаче. Максимальная допустимая электромагнитная эмиссия электропривода зависит от той среды, в которой он используется.

В общем случае проектное решение высокочастотного фильтра ЭМС зависит от соответствующих параметров совместимого оборудования, рассмотрение которых включает следующие обстоятельства:

- малые токи утечки в соответствии с IEC 61800-5-1 (например, при использовании приборов токов утечки или с пределом тока 3,5/10 мА для проверки требований к размерам проводника защитного заземления);
- длина экранированного кабеля на двигатель;
- требования в различных условиях использования по IEC 61800-3.

Это потребует различного дизайна ЭМС фильтра, включая катушку, следовательно повлияет на потери в фильтре.

Потери в радиочастотных фильтрах могут оказывать ощутимое влияние на потери в электроприводе, особенно при его малых мощностях.

B.3.2 Низкочастотный линейный гармонический фильтр

Низкочастотный линейный гармонический фильтр в ряде случаев используют для уменьшения искажений напряжения источника питания, чтобы обеспечить совместимость с другими нагрузками, подключенными к этому же источнику (см. рисунок B.3).

Входной линейный гармонический фильтр, как правило, содержит по крайней мере один последовательный реактор L_2. Более совершенные конструкции фильтра включают дополнительно параллельный конденсатор и 2-й реактор L_1.

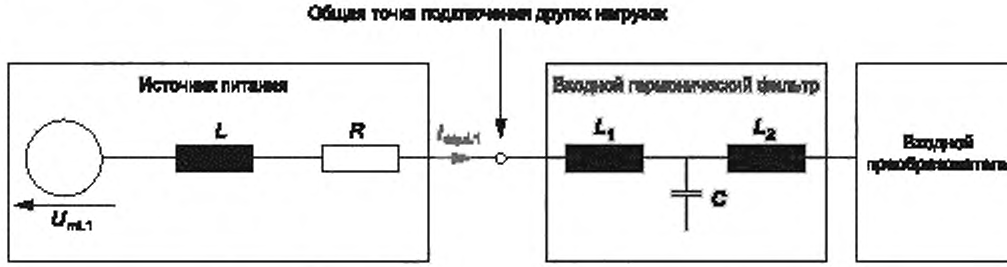


Рисунок B.3 — Однофазный линейный гармонический фильтр

Как описано в B.2, ослабление гармоник ведет к сокращению потерь в источнике питания. С другой стороны, индуктивные компоненты фильтра увеличивают реактивную мощность электропривода, повышая потери в источнике. Дополнительные потери создаются в самих компонентах фильтра. Эти позитивные и негативные эффекты растут с увеличением мощности фильтров.

B.4 Входной преобразователь

B.4.1 Общие положения

Входной преобразователь передает энергию от трехфазного источника питания к звену постоянного тока. В настоящее время известны два схемотехнических решения входного преобразователя: диодный выпрямитель и активный выпрямитель.

B.4.2 Диодный выпрямитель

Диодные выпрямители — наиболее экономичное решение входного преобразователя. Прямая передача энергии от источника к нагрузке сопровождается низким уровнем потерь благодаря малому прямому падению напряжения на диодах и низкой частоте коммутации, равной частоте питания. Стандартная схема представлена на рисунке B.4.

С другой стороны, диодные выпрямители создают довольно большие гармоники в токе источника, которые обусловливают увеличение потерь в источнике. Как показано в 8.3.2, эти гармоники могут быть снижены линейными реакторами, катушками в звене постоянного тока или линейными гармоническими фильтрами, каждый из которых, в свою очередь, имеет потери.

При обратном потоке энергии от нагрузки диодный преобразователь не может рекуперировать энергию в источник питания. Энергия, генерируемая нагрузкой, при торможении, например, должна быть рассеяна в резисторах. В тех применениях, где часто востребованы подобные режимы, существенно снижается общая энергоэффективность системы (см. 5.5). Если несколько инверторов подключены к общему звену постоянного тока, генерируемая ими энергия от нагрузки может перераспределяться между ними через это звено.

В частном случае диодного выпрямителя некоторые или все диоды могут быть заменены тиристорами. Поскольку эти тиристоры в основном используют для предварительного заряда конденсаторов звена постоянного тока, поведение данного выпрямителя идентично работе диодного в обычных рабочих режимах. Прямое падение напряжения на тиристорах незначительно выше, чем на диодах, поэтому потери при использовании тиристоров во входном преобразователе несущественно превышает потери в диодном.

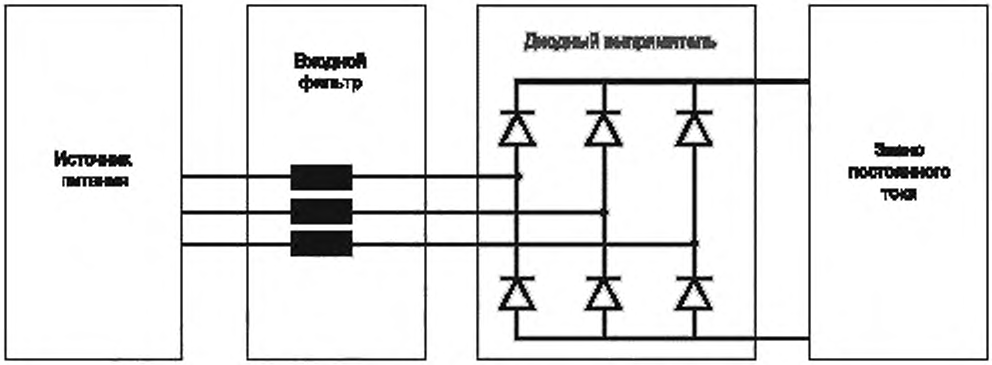


Рисунок В.4 — Диодный преобразователь на входе электропривода

В.4.3 Активный выпрямитель

В.4.3.1 Активный выпрямитель с высокой частотой коммутации

Поведение активного выпрямителя (active infeed converter, AIC) детально описано в IEC TS 62578. В отличие от диодного, активный выпрямитель способен в генераторных режимах работы двигателя передавать энергию источнику, значительно повышая благодаря этому энергоэффективность системы в целом. Кроме того, данные выпрямители имеют и другие преимущества, например позволяют компенсировать сетевые гармоники и реактивную мощность, стабилизировать напряжение звена постоянного тока. Структура активного выпрямителя представлена на рисунке В.5.

Стандартные активные выпрямители содержат на входе IGBT мост. Полупроводниковые ключи работают с высокой частотой, позволяя преобразователю потреблять практически синусоидальный ток из сети с управляемым фазовым углом между током и напряжением. Реактивная мощность и гармоники тока сводятся к минимуму и, как следствие, снижают потери в источнике питания.

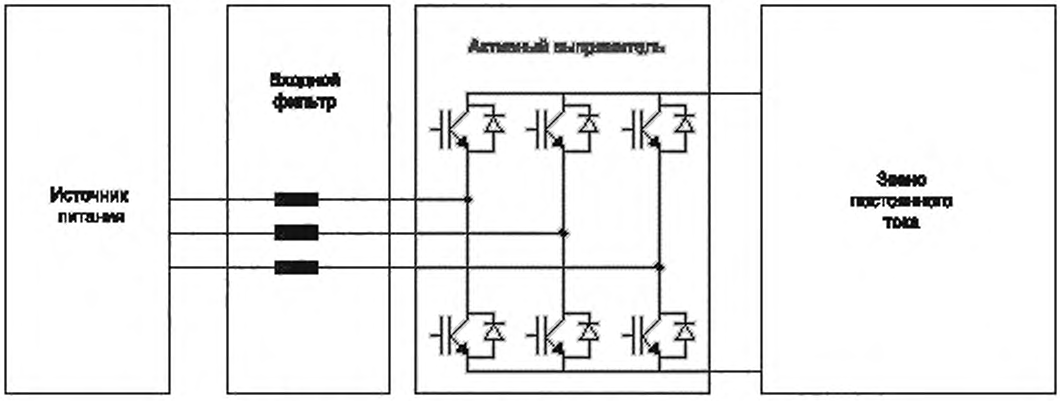


Рисунок В.5 — Электропривод со стандартным активным выпрямителем

Однако полупроводники имеют дополнительные коммутационные потери из-за высокой частоты переключения, а схемотехника включает реакторы или высокочастотные фильтры, также увеличивающие потери. Кроме того, напряжение в звене постоянного тока в случае применения активных выпрямителей с высокой частотой коммутации выше, чем в пассивных выпрямителях, за счет чего потери в этом звене, а также потери в спящем режиме также растут.

Однофазные схемы коррекции коэффициента мощности (power factor correction circuits, PFC) аналогичны по поведению стандартным активным выпрямителям. Они также позволяют потреблять из сети практически синусоидальный ток с оптимальным фазовым углом, требуя в то же время линейных реакторов и имея потери. Основная разница заключается в том, что они не позволяют возвращать энергию в сеть.

В.4.3.2 Активный выпрямитель с коммутацией на основной частоте

Особая разновидность активных выпрямителей имеет входной мост IGBT, управляемый на частоте питающей сети. Благодаря такому способу управления импульсами на основной частоте (fundamental frequency frontend,

F3E-AIC) потери уменьшаются до уровня подобных в диодном выпрямителе и сохраняется способность отдавать энергию нагрузки источнику питания. Кроме того, данный способ не приводит к увеличению напряжения звена постоянного тока и не требует в обязательном порядке применения линейных реакторов.

Данный тип активных выпрямителей, представленный на рисунке В.6, имеет весьма высокую энергоэффективность.

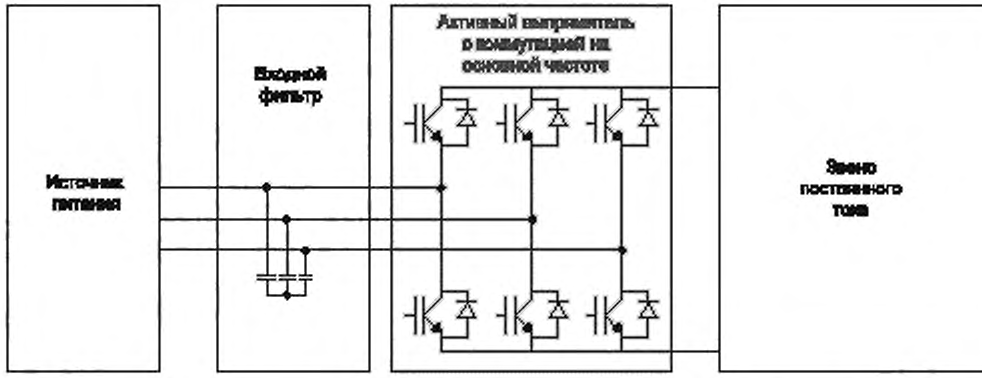


Рисунок В.6 — Электропривод с активным выпрямителем с коммутацией на основной частоте

В.4.4 Коэффициент мощности входного преобразователя

Коэффициент мощности λ входного тока определяют как отношение активной входной мощности к кажущейся входной мощности комплектного преобразователя. При синусоидальном входном напряжении он зависит от формы тока.

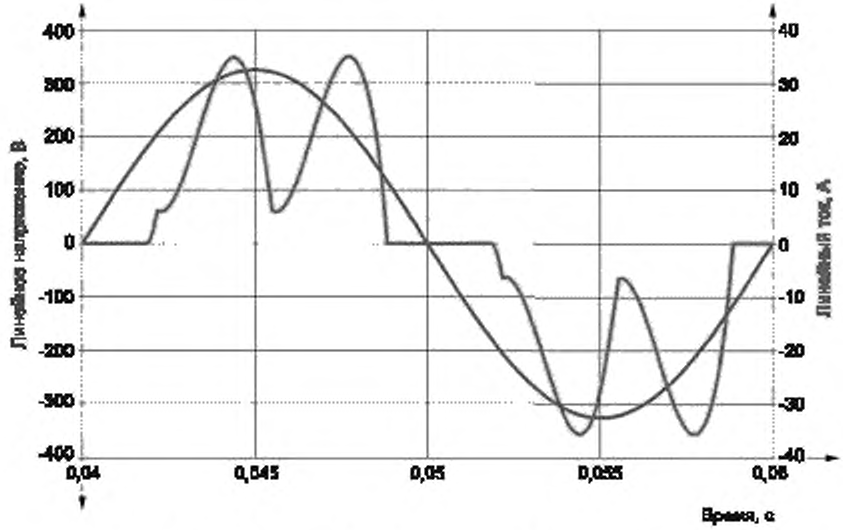


Рисунок В.7 — Типичная форма тока на входе диодного выпрямителя

Если звено постоянного тока содержит большую емкость для снижения входных пульсаций, увеличиваются пики потребляемого выпрямителем тока и, соответственно, уменьшается коэффициент мощности. С уменьшением емкости пульсации снижаются.

Более подробная информация о топологиях входных звеньев преобразователя имеется в IEC/TS 62576. Значения λ для различных топологий представлены в таблице В.1.

Таблица В.1 — Значения λ для различных топологий входных звеньев преобразователя

Топология входного звена	Значения λ
Большая емкость конденсатора, подавление на входе 0,5 %	0,6
Большая емкость конденсатора, подавление на входе 4 %	0,7
Малая емкость конденсатора в соответствии с IEC/TS 62576	0,9
На входе высокочастотный активный выпрямитель	1,0

В.5 Звено постоянного тока

Звено постоянного тока преобразователя со свойствами источника напряжения содержит емкость, которая обычно образуется включением большого количества электролитических конденсаторов. В 400-вольтном трехфазном преобразователе напряжение звена постоянного тока выше допустимого напряжения стандартных легкодоступных по коммерческим соображениям электролитических конденсаторов. По этой причине конденсаторы соединяют последовательно, а для выравнивания напряжения на них параллельно им устанавливают резисторы.

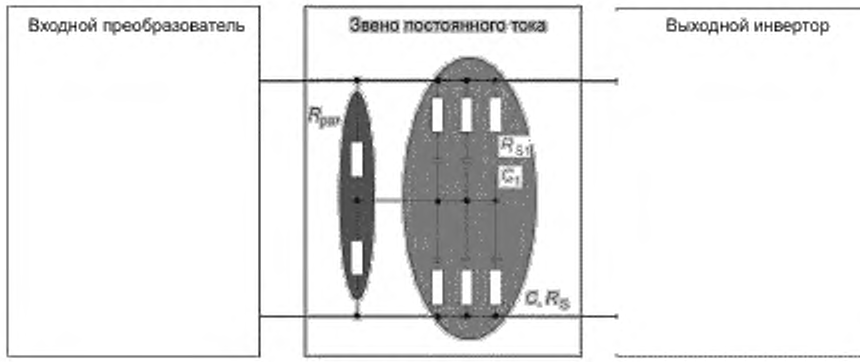


Рисунок В.8 — Звено постоянного тока

Совокупное эквивалентное сопротивление R создает одну из составляющих потерь в звене постоянного тока. В математической модели эта составляющая выражена в 1-м слагаемом формулы (12). Поскольку каждый конденсатор требует определенного сопротивления для симметрирования, эта часть потерь пропорциональна номинальному выходному току комплектного преобразователя. Кроме того, она пропорциональна квадрату напряжения звена постоянного тока. Коэффициент $k1_{DC_link}$ может быть вычислен по формуле

$$k1_{DC_link} = \frac{1}{R_{par} \cdot I_{r,out}}. \quad (B.3)$$

Вторая часть потерь в звене постоянного тока создается эквивалентными внутренними сопротивлениями конденсаторов R_{s1}. Потери выделяются в основном на шестикратной частоте основной гармоники сетевого напряжения и пропорциональны квадрату входного тока выпрямителя. Коэффициент $k2_{DC_link}$ может быть рассчитан по нижеприведенному алгоритму.

1) Потери в конденсаторе обычно указывают в таблицах, и они зависят от тангенса угла потерь tgδ на частоте ω/2π (50 или 60 Гц). Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора рассчитывают по следующей формуле:

$$R_{S1} = \frac{tg\delta}{\omega \cdot C_1}. \quad (B.4)$$

2) Общее результирующее сопротивление R_s комплекта конденсаторов звена постоянного тока рассчитывают исходя из схемы последовательно и параллельно соединенных конденсаторов C_1.

3) Коэффициент $k2_{DC_link}$ определяют по формуле

$$k2_{DC_link} = R_S \cdot I_{r,out}. \quad (B.5)$$

В звене постоянного тока могут быть использованы реакторы постоянного тока. При их эксплуатации обычно не применяются сглаживающие фильтры переменного тока во входном фильтре. Если имеют значение энергоэффективность и стоимость капитальных вложений, реакторы постоянного тока и реакторы переменного тока имеют равноправное значение.

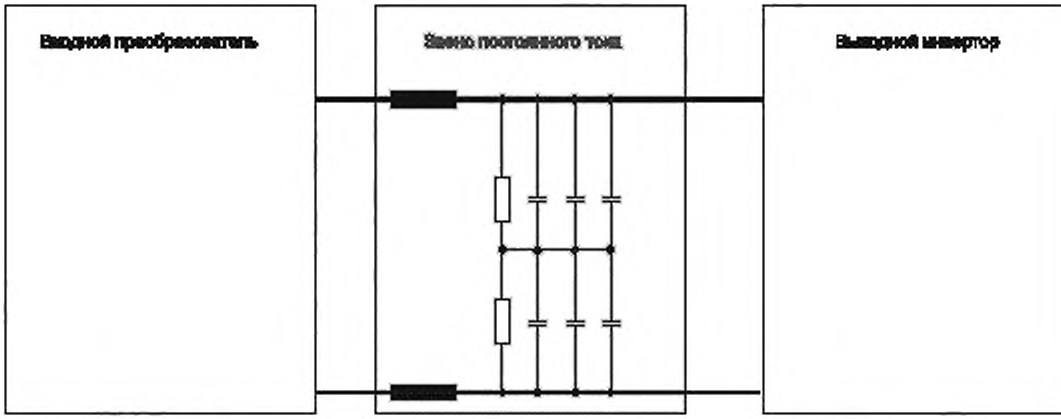


Рисунок В.9 — Звено постоянного тока с дополнительными реакторами

В некоторых типах преобразователей значение емкости в звене постоянного тока незначительное. В таких случаях целесообразно использовать конденсаторы на более высокое напряжение, но меньшей емкости, избегая последовательных звеньев, что позволяет обойтись без балластных сопротивлений и уменьшить тем самым потери.

В.6 Выходной инвертор

Выходные инверторы в комплектных преобразователях со свойствами источника напряжения обычно представляют собой трехфазный мост. Переключение полупроводников с высокой частотой по принципу широтно-импульсной модуляции (см. рисунок В.10) позволяет получить требуемую частоту вращения вала двигателя, подключенного к инвертору.

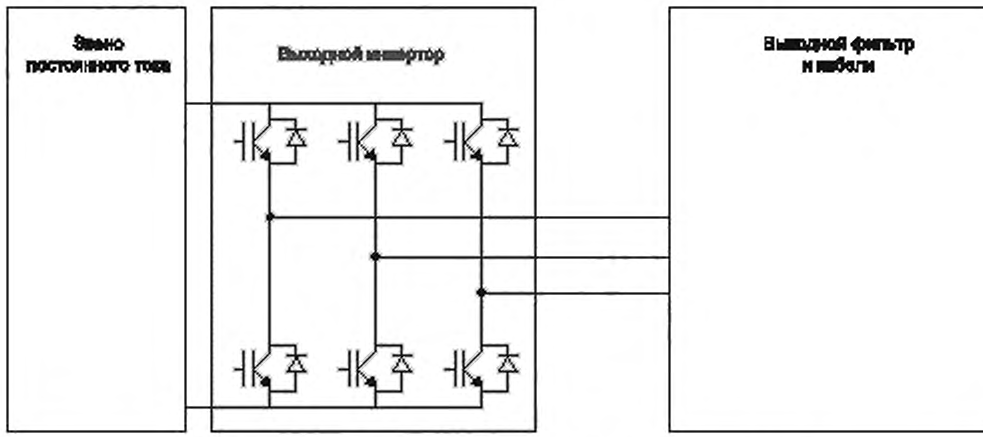


Рисунок В.10 — Выходной инвертор комплектного электропривода

Потери инвертора можно рассматривать как совокупность потерь включенного состояния и коммутационных потерь. Оба типа снижаются с развитием технологии полупроводников — как их структуры, так и материалов.

С точки зрения пользователя, потери в выходном инверторе зависят от частоты коммутации. Ее уменьшение приводит к снижению потерь в инверторе, однако в то же время увеличивает потери в двигателе и опциональных цепях выходного фильтра. Оптимальное по энергоэффективности решение может быть достигнуто разработкой правильной комбинации данных подсистем (см. рисунок 14).

В.7 Выходной фильтр и кабели двигателя

В.7.1 Общие положения

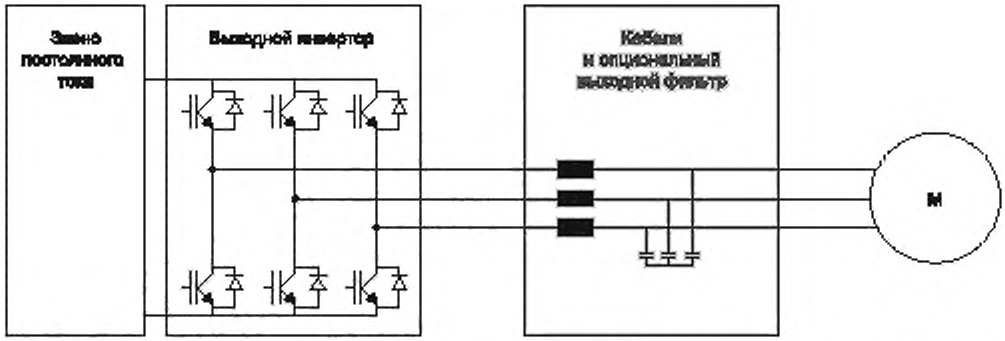


Рисунок В.11 — Кабели к двигателю и опциональный выходной фильтр комплектного электропривода

Выходной инвертор обычно работает с высокой частотой коммутации во избежание больших потерь. Если не установить дополнительный фильтр, показанный на рисунке В.11, пики перенапряжения, возникающего на клеммах двигателя из-за отраженной волны напряжения, могут достигать двукратного напряжения звена постоянного тока и становиться опасными для изоляции. Данный эффект возникает при длине кабеля (который соединяет инвертор с двигателем), превышающей критическое значение, вычисляемое по формуле

$$l_{crit} \geq \frac{v \cdot t_r}{2}. \quad (B.6)$$

При типичном времени нарастания напряжения t_r = 200 нс и скорости волны напряжения v = 150 м/мс критическая длина кабеля составляет l_{crit} = 15 м.

Указанные перенапряжения наносят повреждения изоляции, однако заметно не увеличивают потери.

В некоторых случаях выходные фильтры используют для уменьшения уровня перенапряжения и уменьшения длины кабеля. Некоторые типы фильтров, оказывающие влияние на энергоэффективность, описаны ниже.

В.7.2 Синусные фильтры

Синусные фильтры используют для отсечения частоты коммутации в выходном напряжении инвертора. Они обычно содержат по крайней мере одну индуктивность и одну емкость для формирования фильтра 2-го порядка. Резонансную частоту синусного фильтра выбирают ниже частоты коммутации инвертора.

При работе без синусного фильтра импульсы напряжения создают пульсации тока двигателя, создавая дополнительные потери, описанные в IEC/TS 60034-25. Синусный фильтр значительно снижает эти потери.

Однако синусный фильтр создает некоторые потери, выделяющиеся в меди и стали реактора фильтра. Известно, что эти потери при номинальной частоте вращения двигателя не превышают 0,5 % номинальной мощности инвертора для мощных электроприводов и 0,8 % — для электроприводов малой мощности. При уменьшении частоты вращения двигателя данные потери также уменьшаются.

Синусный фильтр также создает дополнительное падение напряжения и может вызвать снижение диапазона регулирования, особенно при низких частотах коммутации, в связи с чем данный тип фильтра в ряде случаев неприменим.

В.7.3 Фильтры dV/dt и реакторы двигателя

Фильтры dV/dt используют в целях уменьшения фронта нарастания напряжения, ослабляя тем самым нагрузку на изоляцию двигателя. По схемотехнике они близки к синусным фильтрам, однако их резонансную частоту выбирают значительно выше частоты коммутации, что определяет небольшие габариты данных фильтров. Форму напряжения на двигателе эти фильтры не меняют, она остается подобной форме выходного напряжения инвертора на рисунке В.12. На потери двигателя фильтры dV/dt также не влияют.

Потери в фильтрах dV/dt пропорциональны частоте коммутации инвертора и могут достигать 1 % от номинальной мощности электропривода. При частоте коммутации 500 Гц обычно потери в фильтре dV/dt не превышают 0,25 % от номинальной мощности. Точное значение потерь может быть получено при конкретной рабочей частоте коммутации.

В комплектных электроприводах с высокой частотой коммутации вместо фильтров dV/dt для уменьшения нагрузки на изоляцию могут быть использованы реакторы. Потери в них примерно равны потерям в синусных фильтрах, однако положительное влияние на изоляцию не так значительно, как при применении фильтров. На потери в двигателе они также не влияют.

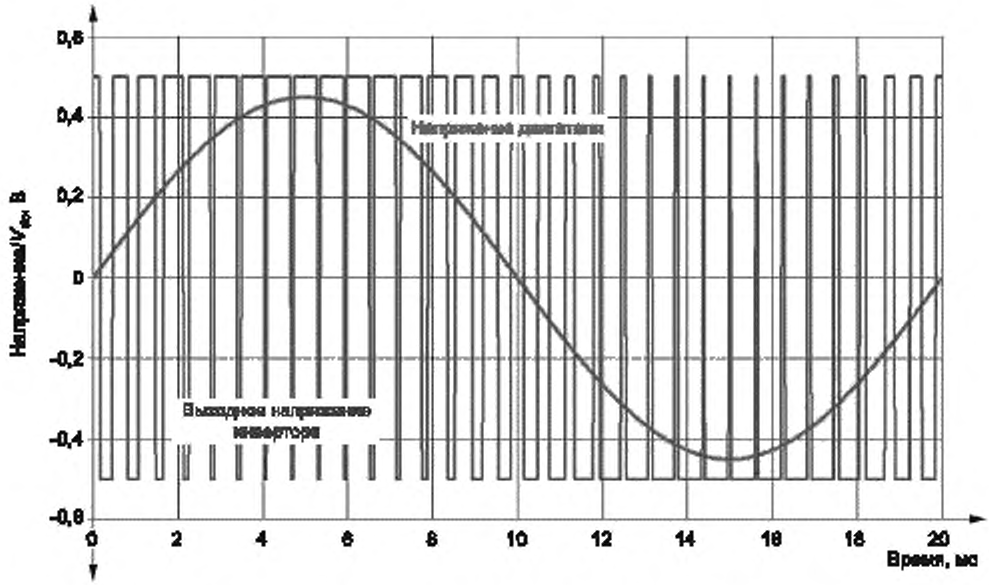


Рисунок В.12 — Типичная форма выходного напряжения инвертора и напряжения на двигателе при использовании синусного фильтра

В.7.4 Высокочастотные ЭМС фильтры двигателя

Высокочастотные ЭМС фильтры двигателя подобные, но не идентичные фильтрам, описанным в В.3.1, и могут быть также использованы на выходе инвертора. Их влияние на потери подобно влиянию входных ЭМС фильтров.

В.7.5 Кабели двигателя

Данные кабели соединяют комплектный преобразователь с двигателем. Резистивный характер их сопротивления определяет потери, требующие учета при значительной длине кабеля. Поскольку она различна при разных применениях, потери не могут привязываться к комплектному электроприводу, а должны быть учтены в каждом конкретном случае. Как правило, потерями в кабелях можно пренебречь, если их длина не превышает 25 м. Большая часть потерь обусловлена основной гармоникой тока двигателя, а влиянием высших потерь можно пренебречь. Если вместо трехжильных кабелей используют одножильные с индивидуальным экранированием, возникают дополнительные потери в оболочке кабеля.

В.8 Двигатель

Методика расчета потерь в двигателе как при питании от источника синусоидального напряжения, так и импульсами от инвертора изложена в IEC 60034-2-1 и IEC TS 60034-2-3. Дополнительные вентиляторы и тормоза являются частью электромеханической системы.

В.9 Механическая нагрузка

Потери в нагрузке зависят от того механизма, в котором применен электропривод. Потенциал энергосбережения путем оптимизации движения механизма обычно гораздо выше потерь в комплектном электроприводе, поэтому основное внимание при проектировании электромеханического комплекса должно быть уделено организации движения с минимумом потерь, как показано в приложении А.

В.10 Потери на управление и спящий режим

Потери на управление не зависят заметно от номинальной мощности преобразователя. Для оценки этого типа потерь целесообразно рассматривать систему управления и автоматизации в целом как выполняющую функции управления электроприводом, коммуникации, управления дополнительным оборудованием, например датчиками положения или тормозами. В электроприводах малой мощности (не более 500 Вт) данные потери могут быть одного порядка с потерями в силовом канале, представляя все меньшую долю при увеличении мощности электропривода.

Кроме потерь в системе управления собственно преобразователем присутствуют потери на управление вспомогательными устройствами во включенном режиме, такими как вентиляторы в системе принудительного охлаждения. Данные потери, как и в предыдущем случае, не зависят от мощности преобразователя.

Потери на управление и спящий режим $P_{L,control}$ выделяются и в том случае, когда преобразователь включен, а двигатель не работает. Как правило, они в один — три раза меньше потерь в рабочем режиме. Их влияние на суммарные потери жестко связано с режимом работы исполнительного механизма. Кроме того, они зависят от требований к механизму в части времени пробуждения и коммуникаций.

B.11 Потери на охлаждение

B.11.1 Потери первичной охладительной системы

Первичное охлаждение компонентов электропривода, показанное на рисунке 11, обеспечивается в основном первичной охладительной системой (воздушное или жидкостное охлаждение), интегрированной в комплектный преобразователь или электропривод. Охлаждение может включаться и отключаться в функции температуры или управляться от преобразователя, а также быть неуправляемым.

B.11.2 Потери вторичной охладительной системы

Все компоненты электромеханического комплекса, показанные на рисунке B.1, выделяют потери в виде тепла. Во многих применениях это тепло требуется отводить, для чего предназначена вторичная охладительная система.

Типичным примером вторичной охладительной системы является система кондиционирования, поддерживающая температуру в обслуживаемом помещении ниже определенного значения. Все потери, выделяемые в помещении, включая и потери системы управления, должны быть нейтрализованы охлаждением. Как минимум, вторичная охладительная система должна нейтрализовать потери самого комплектного преобразователя. В этом случае потребление энергии вторичной охладительной системой может составить до 20 % от потерь комплектного преобразователя.

В ряде применений охлаждения могут потребоваться также двигатель и исполнительный механизм. Эти потери должны быть приняты во внимание разработчиком электромеханического комплекса и не отражены в настоящем стандарте.

Приложение С
(справочное)

Топология преобразователя

С.1 Общие положения

Как правило, при применении преобразователей используют схемные решения, приведенные в приложении В. Особенно это касается преобразователей с линейным напряжением питания не выше 1000 В. Для таких случаев достаточно точными являются представленные в разделе 5 математические модели, описывающие потери в преобразователях и электроприводах.

Однако в некоторых случаях применяют иные схемотехнические решения, влияние которых на потери качественно описано в настоящем приложении.

С.2 Схемы выходных инверторов со свойствами источника напряжения, имеющих отличное от представленного в 5.2.2 математическое описание

Математическая модель, представленная в 5.2.2, описывает потери в двухуровневом инверторе со свойствами источника напряжения. В ряде случаев, особенно в преобразователях на средние напряжения, используют инверторы, имеющие большее число уровней. Наиболее простым решением в данном случае является трехуровневый инвертор, реже встречаются более сложные схемы многоуровневых инверторов.

В зависимости от частоты коммутации и диапазона напряжения многоуровневые решения позволяют уменьшить потери в преобразователе. Кроме того, они способствуют сокращению потерь в двигателе, поскольку уменьшают гармоники тока при той же частоте коммутации полупроводниковых приборов. Соответственно, расчет по математической модели, представленной в 5.2.2, дает более существенное значение потерь, следовательно, для ранее выбранного класса энергоэффективности решение будет более надежным.

Поскольку расчет потерь в многоуровневом инверторе более сложен, чем для двухуровневого инвертора, он не включен в настоящий стандарт.

С.3 Схемы входных преобразователей со свойствами источника напряжения, имеющих отличную от представленной в 5.2.3 модель

Если входной преобразователь представляет собой многоуровневый активный выпрямитель, к нему применимы все положения, представленные в С.2.

Топология пассивных входных преобразователей, выполненных по шестипульсной схеме, представлена в приложении В (см. рисунок В.4), форма тока и напряжения — в приложении В (см. рисунок В.7). В тех случаях, когда требуется снизить уровень пульсаций выходного тока, применяют 12-, 18- и 24-пульсные схемы. Так как входной ток по форме значительно не меняется, может быть использована математическая модель потерь, описанная в 5.2.3.

Другие топологии активных выпрямителей применяют значительно реже, поэтому они будут описаны в следующих изданиях настоящего стандарта.

С.4 Топологии комплектных преобразователей, не являющихся источниками напряжения

Топологии комплектных преобразователей, имеющих свойства, отличные от свойств источника напряжения, например преобразователей со свойствами источника тока или непосредственных преобразователей частоты, используют относительно редко, в основном в электроприводах мощностью свыше 1 МВт или при напряжении свыше 1000 В переменного тока. Расчет потерь для таких схемных решений значительно отличается от приведенного в подразделе 5.1. Математическая модель, если потребуется, будет представлена в следующих изданиях настоящего стандарта, а качественное описание приведено ниже.

Комплектные преобразователи со свойствами источника тока имеют повышенные потери по сравнению с преобразователями со свойствами источника напряжения по следующим причинам:

- преобразователи со свойствами источника тока требуют применения силовых полупроводников с реверсивной запирающей способностью, которые имеют большее прямое падение напряжения по сравнению с полупроводниками с несимметричным запиранием. Соответственно, потери прямой проводимости выше;
- в звене постоянного тока вместо параллельной емкости использована последовательная индуктивность. Потери в реакторах, создающих индуктивность, выше потерь в конденсаторах.

Однако преобразователи со свойствами источника тока имеют форму выходного напряжения, более приближенную к синусоиде, чем преобразователи со свойствами источника тока. Это позволяет снизить гармонические потери в двигателе. В итоге общие потери в комплектных электроприводах с преобразователями со свойствами источника тока и источника напряжения имеют аналогичные показатели.

Преобразователи с непосредственной связью обеспечивают подключение каждой фазы на входе к соответствующей фазе на выходе. Применяют две топологии такого типа преобразователей.

1) Матричные преобразователи используют полупроводниковые приборы, как и выходные инверторы со свойствами источника напряжения, управляя ими с частотой коммутации. Потери в таких преобразователях по отчетам пользователей имеют общие черты с потерями преобразователей со свойствами источника напряжения, хотя их математическая модель отличается. По разным причинам матричные преобразователи применяют достаточно редко, и основания предполагать, что это изменится в ближайшем будущем, отсутствуют.

2) Тиристорные циклоконвертеры используют для применения на диапазоны большой мощности свыше 10 МВт в основном при малых частотах на выходе преобразователя. С одной стороны, тиристоры работают на достаточно низкой частоте коммутации, равной частоте питания, имеют сравнительно низкое прямое падение напряжения и, соответственно, малые потери. С другой стороны, потери в двигателе и цепях питания выше за счет большого содержания гармоник напряжения.

Приложение D
(справочное)

Модель двигателя и интерполяция потерь

D.1 Обзор

В настоящем приложении изложены технические подробности потерь в двигателе и приведены интерполяционные формулы для определения потерь и КПД внутри диапазонов изменения момента и частоты вращения на основе измерений в конечном числе рабочих точек.

Примечание — Предусмотрено использовать данную информацию для первого издания IEC/TS 60034-30-2, а также в следующих изданиях настоящего стандарта.

Дополнительно предусмотрены интерполяционные данные по КПД двух- и четырехполюсных асинхронных двигателей.

В данном приложении частота питания f и момент T выражены в относительных единицах (в диапазоне 0… 1) по отношению к номинальным значениям. Относительная номинальная выходная мощность таким образом равна $P_N = f \cdot T = 1$.

D.2 Потери в двигателях переменного тока

D.2.1 Общие положения

В этом подразделе представлена детальная информация по физическим явлениям, определяющим потери в электрических машинах. Это может быть использовано как основа для расчета потерь при различных частотах вращения и нагрузках (моментах), если из расчетов или измерений найдены потери в отдельных компонентах.

D.2.2 Потери I^2R в обмотках статора и ротора (P_{LS} + P_{LR} для асинхронных машин и машин с обмотками на роторе)

Эти потери не зависят от частоты, а изменяются пропорционально квадрату тока, связанному с моментом. Однако в случае асинхронных или синхронных реактивных двигателей следует учитывать ток намагничивания (ток холостого хода). Следовательно, потери в обмотках в любой рабочей точке $P_{LSR}(f, T)$ могут быть интерполированы по P_{LSR} при номинальной частоте f_N и номинальном моменте T_N и вычислены по формуле

$$P_{LS}(f,T) = P_{LS}(f_N,T_N)\cdot\left[\left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2+\left(1-\left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2\right)\cdot T^2\right]. \quad (D.1)$$

D.2.3 Добавочные потери P_{LL}

Добавочные потери выделяются в элементах конструкции (оболочке, фланцах) и связаны с краевыми эффектами (токи утечки между стержнями ротора, вихревые токи и т. п.).

Добавочные потери могут быть разделены на две части:

- добавочные потери $P_{LL} \cdot K_{LL}$, состоящие из потерь, пропорциональных частоте и квадрату тока;
- $P_{LL} \cdot (1 - K_{LL})$, которые связаны с вихревыми токами и поэтому пропорциональны квадрату частоты и моменту.

Если не известно точное распределение составляющих добавочных потерь, принимается их распределение поровну, при этом $K_{LL} = 0{,}5$.

Примечание 1 — Интерполяционная формула, приведенная в D.3, позволяет не иметь точного соотношения между добавочными потерями на холостом ходу и под нагрузкой, так как применима при любом соотношении составляющих компонент потерь.

Примечание 2 — Небольшая часть добавочных потерь имеет место без нагрузки. Эти потери обычно включают в потери на трение и вентиляционные потери, хотя их природа обусловлена вихревыми токами и они пропорциональны квадрату частоты.

$$P_{Lfw}(f, T) = c_{fw} \cdot P_{Lfw}(f_N, T_N) \cdot n + (1 - c_{fw}) \cdot P_{Lfw}(f_N, T_N) \cdot n^2. \quad (D.2)$$

D.2.4 Потери в стали P_{Lfe}

Потери в стали могут быть разделены на две составляющие:

- гистерезисные потери $P_{Lfe} \cdot K_{fe}$, пропорциональные частоте;
- потери от вихревых токов $P_{Lfe} \cdot (1 - K_{fe})$, пропорциональные квадрату частоты.

Если не известно точное распределение этих двух составляющих потерь, принимается их распределение поровну, при этом $K_{fe} = 0{,}5$, что на практике обеспечивает удовлетворительную точность.

Примечание — Интерполяционная формула, приведенная в D.3, позволяет не иметь точного соотношения между добавочными потерями на гистерезис и вихревые токи, так как применима при любом соотношении составляющих компонент потерь.

В асинхронных двигателях в режимах работы при постоянном потоке (основной диапазон регулирования частоты вращения) потери в стали не зависят от потока.

В синхронных машинах магнитный поток жестко привязан к моменту, особенно в двигателях с постоянными магнитами.

Общая интерполяционная формула имеет следующий вид:

$$P_{Lfe}(f, T) = K_{fe} \cdot P_{Lfe}(f_N, T_N) \cdot T^2 f + (1 - K_{fe}) \cdot P_{Lfe}(f_N, T_N) \cdot T^2 f^2. \quad (D.3)$$

Известно, что двигатели с питанием от инвертора имеют повышенные потери в стали, что обусловлено коэффициентом модуляции. Имеется теоретическое обоснование данного явления. Однако эти добавочные потери не доминируют в большинстве случаев, поэтому не учтены в данной интерполяции, что может привести к некоторому снижению точности для высокоскоростных двигателей.

D.2.5 Потери на трение и вентиляционные потери P_{Lfw}

Потери на трение и вентиляционные потери могут быть разделены на две составляющие:

- потери на трение $P_{Lfw} \cdot K_{fw}$, пропорциональные частоте;
- потери на вентиляцию $P_{Lfw} \cdot (1 - K_{fw})$, пропорциональные 3-й степени частоты (и частоты вращения).

В таблице D.1 приведены рекомендуемые значения K_{fw} самовентилируемых двигателей для применения в том случае, когда точное распределение потерь не определено в ходе испытаний.

Таблица D.1 — Рекомендуемое распределение потерь на трение и вентиляцию для самовентилируемых двигателей IC 411

Количество полюсов	K_{fw}	$(1 - K_{fw})$
2	0,7	0,3
4	0,5	0,5
6	0,3	0,7
>6	0,2	0,8

Для двигателей, оборудованных дополнительным вентилятором (IC 416), потери на вентиляцию не зависят от частоты вращения и могут быть рассчитаны по номинальной мощности вентилятора и его КПД.

Примечание — Интерполяционная формула, приведенная в D.3, позволяет не иметь точного соотношения между добавочными потерями на трение и вентиляцию, так как применима при любом соотношении составляющих компонент потерь. Она также содержит постоянную составляющую, учитывающую потери от независимого вентилятора.

$$P_{Lfw}(f,T) = c_{fw} \cdot P_{Lfw}(f_N,T_N) \cdot n + (1 - c_{fw}) \cdot P_{Lfw}(f_N,T_N) \cdot n^2. \quad (D.4)$$

D.2.6 Добавочные гармонические потери P_{LHL}

Причиной добавочных гармонических потерь является несинусоидальное питание от широтно-импульсного преобразователя частоты. Гармоники напряжения, зависящие от частоты коммутации и схемы управления преобразователем, создают дополнительные гармоники тока в обмотках двигателя, вызывающие вихревые токи и потери I^2R.

Добавочные гармонические потери могут быть приняты постоянными во всем диапазоне изменения частоты и момента, пока остается постоянной частота коммутации.

$$P_{LHL}(f,T) = P_{LHL}(f_N,T_N). \quad (D.5)$$

D.3 Интерполяционная формула

Основываясь на формулах, представленных в D.2, общие потери в любой рабочей точке (при любом относительном значении частоты f и момента T от 0 до 1) можно определить по выражению

$$P_L(f, T) = P_{LSR}(f, T) + P_{Lfe}(f, T) + P_{LL}(f, T) + P_{Lfw}(f, T) + P_{LHL}. \quad (D.6)$$

КПД в любой рабочей точке вычисляют по формуле

$$\eta(f,T) = \frac{f \cdot T}{f \cdot T + P_L(f,T)}. \quad (D.7)$$

Потери могут также вычислены через КПД по формуле

$$P_L(f,T) = f \cdot T\left(\frac{1}{\eta(f,T)} - 1\right). \quad (D.8)$$

Относительные потери в любой рабочей точке могут быть найдены по формуле

$$P_L(f, T) = A + B \cdot f + C \cdot f^2 + D \cdot f \cdot T^2 + E \cdot f^2 \cdot T^2 + F \cdot T + G \cdot T^2. \quad (D.9)$$

Примечание 1 — Потери в обмотках [формула (D.4)] обусловливают появление еще одного слагаемого в формуле (D.9), пропорционального частоте вращения в 3-й степени. Однако на практике оно не существенно на фоне более значительных ошибок измерений. Поэтому данное слагаемое в формуле отсутствует.

Примечание 2 — Семь постоянных коэффициентов *A*, ..., *G* не имеют физической интерпретации. Они обеспечивают полноту и правильный учет физических зависимостей, выраженных уравнениями (D.1)...(D.5). Интерполяционная формула (D.9) математически сходна с формулой (D.6) (с учетом примечания 1).

Примечание 3 — Интерполяционная формула может быть использована в полном основном диапазоне регулирования частоты вращения ($f = 0, ..., 1$) и момента ($T = 0, ..., 1$). Экстраполяция на повышенные нагрузки ($T > 1$) также возможна, хотя и с большей ошибкой. Экстраполяция на повышенные частоты вращения в диапазоне ослабленного потока ($f > 1$) недопустима.

Для синхронных машин относительная частота вращения *n* может быть заменена на относительную частоту *f* без потери точности.

Для асинхронных машин относительная частота питания *f* вращения для заданной частоты вращения *n* может быть определена по измерению основной гармоники напряжения питания при заданной частоте вращения.

Относительная частота вращения *n* может также быть использована для интерполяции вместо относительной частоты питания *f* без учета скольжения. Это незначительно снизит точность интерполяции, однако допустимо на практике.

D.4 Аналитическое определение интерполяционных коэффициентов

D.4.1 Общие положения

Рабочие точки, представленные в таблице D.2 и изображенные на рисунке D.1, являются опорными для аналитического определения интерполяционных коэффициентов *A*, ..., *G* из подраздела D.3.

Таблица D.2 — Опорные рабочие точки для графической интерпретации

	f	*T*	*P*
P_1	0,9	1	0,9
P_2	0,5	1	0,5
P_3	0,9	0,5	0,45
P_4	0,5	0,5	0,25
P_5	0,25	1	0,25
P_6	0,5	0,25	0,125
P_7	0,25	0,25	0,0625

Частоты *f*, моменты *T* и мощности *P* представлены в виде относительных величин в отношении к соответствующим номинальным значениям.

Эти точки намеренно отличаются от точек в разделах 4 и 7.

Для определения интерполяционных коэффициентов использованы уравнения (D.10).

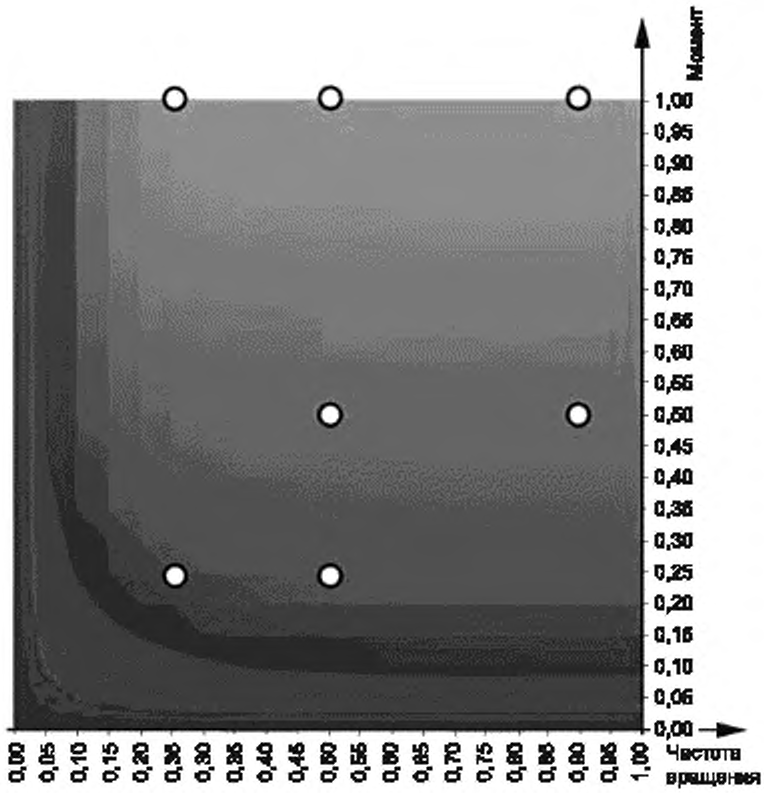


Рисунок D.1 — Опорные рабочие точки

$$A=\frac{25}{156}\cdot P_1+\frac{529}{780}\cdot P_2+\frac{25}{39}\cdot P_3-\frac{103}{39}\cdot P_4-\frac{12}{65}\cdot P_5-\frac{56}{195}\cdot P_6+\frac{192}{65}\cdot P_7;$$

$$B=\frac{25}{26}\cdot P_1-\frac{599}{390}\cdot P_2-\frac{50}{13}\cdot P_3+\frac{50}{13}\cdot P_4+\frac{112}{195}\cdot P_5+\frac{1792}{195}\cdot P_6-\frac{1792}{195}\cdot P_7;$$

$$C=-\frac{50}{39}\cdot P_1+\frac{22}{13}\cdot P_2+\frac{200}{39}\cdot P_3-\frac{200}{39}\cdot P_4-\frac{16}{39}\cdot P_5-\frac{256}{39}\cdot P_6+\frac{256}{39}\cdot P_7;$$

$$D=-\frac{50}{13}\cdot P_1+\frac{2542}{195}\cdot P_2+\frac{50}{13}\cdot P_3-\frac{50}{13}\cdot P_4-\frac{1792}{195}\cdot P_5-\frac{1792}{195}\cdot P_6+\frac{1792}{195}\cdot P_7; \quad (D.10)$$

$$E=\frac{200}{39}\cdot P_1-\frac{152}{13}\cdot P_2-\frac{200}{39}\cdot P_3+\frac{200}{39}\cdot P_4+\frac{256}{39}\cdot P_5+\frac{256}{39}\cdot P_6-\frac{256}{39}\cdot P_7;$$

$$F=-2\cdot P_2+10\cdot P_4-8\cdot P_5;$$

$$G=\frac{25}{39}\cdot P_1-\frac{181}{195}\cdot P_2-\frac{25}{39}\cdot P_3-\frac{287}{39}\cdot P_4+\frac{192}{65}\cdot P_5+\frac{1618}{195}\cdot P_6-\frac{192}{65}\cdot P_7.$$

D.4.2 Дополнительные потери от падения напряжения в преобразователе частоты

Часто преобразователи частоты не могут обеспечить полное (номинальное) напряжение основной гармоники двигателя, которое необходимо для получения полного потока при номинальной частоте вращения. В этом случае из-за повышенного тока растут потери в двигателе. С помощью опорных рабочих точек, представленных в таблице D.2, можно решить эту задачу, но необходимо проведение испытаний при максимум 90 % номинальной частоты вращения.

Увеличение потерь при 100 % номинальной частоты вращения по отношению к интерполяционным потерям может быть рассчитано пропорционально соотношению $U_{r,motor}/U_{fundamental,CDM}$.

К примеру, если преобразователь частоты в состоянии поддерживать основную гармонику напряжения на уровне 360 В, а номинальное напряжение двигателя 400 В, потери при номинальной частоте вращения вырастут на 11 % (400/360 = 1,11) по сравнению с интерполяционными потерями при работе с напряжением 400 В.

D.4.3 Дополнительные рабочие точки для нахождения интерполяционных коэффициентов

Рабочие точки, представленные в таблице D.3, могут быть использованы как альтернативные рабочим для аналитического определения интерполяционных коэффициентов *A*, …, *G* из подраздела D.3.

Таблица D.3 — Дополнительные рабочие точки

	f	*T*	*P*
P_1^*	1	1	1
P_2	0,5	1	0,5
P_3^*	1	0,5	0,5
P_4	0,5	0,5	0,25
P_5	0,25	1	0,25
P_6	0,5	0,25	0,125
P_7	0,25	0,25	0,0625
Примечание — Звездочки в обозначении рабочих точек P_1^* и P_3^* указывают только то, что значения частоты *f*, момента *T* и мощности *P* в этих точках отличаются от значений в таблице D.2.			

Частоты *f*, моменты *T* и мощности *P* приведены как относительные значения по отношению к соответствующим номинальным.

Примечание — Измерения при номинальной частоте с полным магнитным потоком могут быть выполнены с напряжением питания преобразователя частоты более высоким, чем номинальное для компенсации внутреннего падения напряжения транзисторов IGBT. Если измерение проведено с напряжением питания преобразователя, равным номинальному напряжению двигателя, потери в двигателе в данных рабочих точках вырастут из-за снижения основной гармоники напряжения.

Для определения интерполяционных коэффициентов используют следующие уравнения:

$$
\begin{aligned}
A &= -\frac{1}{9}\cdot P_1^* + \frac{28}{45}\cdot P_2 + \frac{4}{9}\cdot P_3^* - \frac{22}{9}\cdot P_4 - \frac{8}{45}\cdot P_5 - \frac{8}{45}\cdot P_6 + \frac{128}{45}\cdot P_7;\\
B &= \frac{2}{3}\cdot P_1^* - \frac{6}{5}\cdot P_2 - \frac{8}{3}\cdot P_3^* + \frac{8}{3}\cdot P_4 + \frac{8}{15}\cdot P_5 + \frac{128}{15}\cdot P_6 - \frac{128}{15}\cdot P_7;\\
C &= -\frac{8}{9}\cdot P_1^* + \frac{56}{45}\cdot P_2 + \frac{32}{9}\cdot P_3^* - \frac{32}{9}\cdot P_4 - \frac{16}{45}\cdot P_5 - \frac{256}{45}\cdot P_6 + \frac{256}{45}\cdot P_7;\\
D &= -\frac{8}{3}\cdot P_1^* + \frac{56}{5}\cdot P_2 + \frac{8}{3}\cdot P_3^* - \frac{8}{3}\cdot P_4 - \frac{128}{15}\cdot P_5 - \frac{128}{15}\cdot P_6 + \frac{128}{15}\cdot P_7;\\
E &= \frac{32}{9}\cdot P_1^* - \frac{416}{45}\cdot P_2 - \frac{32}{9}\cdot P_3^* + \frac{32}{9}\cdot P_4 + \frac{256}{45}\cdot P_5 + \frac{256}{45}\cdot P_6 - \frac{256}{45}\cdot P_7;\\
F &= -2\cdot P_2 + 10\cdot P_4 - 8\cdot P_6;\\
G &= \frac{4}{9}\cdot P_1^* - \frac{28}{45}\cdot P_2 - \frac{4}{9}\cdot P_3^* - \frac{88}{9}\cdot P_4 + \frac{128}{45}\cdot P_5 + \frac{368}{45}\cdot P_6 - \frac{128}{45}\cdot P_7.
\end{aligned}
\qquad \text{(D.11)}
$$

D.4.4 Двигатели для применений, имеющих вентиляторную характеристику

Для двигателей, предназначенных исключительно для работы в механизмах с квадратичной зависимостью момента от частоты вращения (вентиляторы, насосы, компрессоры), определяются только три рабочие точки: P_1^*, P_3^* и P_6.

В этом случае не могут быть определены интерполяционные коэффициенты и применена интерполяционная формула (D.11). Однако данная информация может быть использована для электромеханического комплекса, как показано в IEC 61800-9-1.

Примечание — IEC 61800-9-1 до настоящего времени не опубликован.

D.5 Определение интерполяционной ошибки

Ошибка интерполяции может быть определена по среднеквадратичному отклонению действительных (измеренных) значений потерь $P_L^{measured}$ от интерполяционных потерь $P_L^{interpolated}$ в рабочих точках.

Рекомендуется использовать 16 измерений при относительных частотах f = 0,25; 0,5; 0,75 и 0,9 номинальной частоты и при относительных моментах T = 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 номинального момента.

Ошибку интерполяции Q_{ISI} (коэффициент интерполяционной стабильности) определяют по формуле

$$Q_{ISI} = \sqrt{\frac{1}{16}\sum_{f}\sum_{T}\left(\frac{P_{L(f,T)}^{measured} - P_{L(f,T)}^{interpolated}}{P_{L(f,T)}^{measured}}\right)^2}. \quad (D.12)$$

D.6 Численное определение интерполяционных коэффициентов

Как вариант, интерполяционные коэффициенты, представленные в D.3, могут быть найдены в том случае, когда измерения потерь проведены в более чем семи опорных рабочих точках.

В этом случае формула (D.12) может быть использована как минимизируемая функция в цифровом алгоритме поиска. Такие алгоритмы приведены в стандартных математических прикладных программах, а также в электронных таблицах.

Независимо от того, как получены семь интерполяционных коэффициентов (см. D.3 и D.6), применение интерполяционной формулы (D.9) не меняется.

D.7 Типичная энергоэффективность асинхронных двигателей класса IE2

В таблицах D.4 и D.5 представлены интерполяционные коэффициенты по формулам, приведенным в D.3, для типичных асинхронных двигателей класса энергоэффективности IE2.

Эти значения получены по измерениям на реальных машинах и не идентичны значениям для эталонных двигателей, представленных в 5.3 и приложении А.

Таблица D.4 — Интерполяционные коэффициенты типичных четырехполюсных эталонных асинхронных двигателей класса IE2

Номинальная мощность	Коэффициенты						
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
0,12	0,324316	0,116588	0,076506	0,002987	0,003914	–0,292 825	0,551857
0,18	0,250225	0,094236	0,061948	0,002082	0,002949	–0,119 516	0,316624
0,25	0,195658	0,083798	0,060563	0,005959	0,006785	–0,100 213	0,249350
0,37	0,137100	0,062496	0,042114	0,004064	0,004561	–0,042 812	0,204367
0,55	0,111483	0,047330	0,031814	0,000010	0,000416	–0,026 457	0,161360
0,75	0,085781	0,041660	0,026726	0,001532	0,001856	–0,029 927	0,152402
1,1	0,069172	0,038244	0,027240	0,000872	0,001317	–0,016 191	0,140765
1,5	0,059580	0,034760	0,022242	0,001155	0,001639	–0,018 775	0,138279
2,2	0,036978	0,031347	0,021183	0,009877	0,008447	–0,016 190	0,091365
3	0,038845	0,026351	0,015957	0,004417	0,004606	–0,008 363	0,110668
4	0,034853	0,027515	0,019177	0,004163	0,004691	–0,012 966	0,098248
5,5	0,029206	0,024540	0,018285	0,007272	0,007664	–0,009 436	0,084946
7,5	0,023744	0,022 127	0,015 244	0,006 753	0,007 196	–0,016 095	0,091 724
11	0,019 974	0,020 315	0,014 864	0,005 763	0,005 965	–0,009 032	0,072 826

Окончание таблицы D.4

Номинальная мощность	Коэффициенты						
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
15	0,016 536	0,018 496	0,013 898	0,006 173	0,006 388	–0,007 766	0,064 775
18,5	0,014 915	0,017 047	0,012 419	0,005 559	0,005 729	–0,005 309	0,063 114
22	0,014 521	0,016 611	0,012 614	0,002 568	0,002 826	–0,005 610	0,060 415
30	0,010 356	0,013 976	0,008 611	0,006 561	0,009 284	–0,000 337	0,048 029
37	0,022 059	0,003 052	0,014 537	0,009 029	-0,002 562	–0,008 081	0,053 231
45	0,010 470	0,013 126	0,011 908	0,004 668	0,004 768	–0,002 944	0,045 438
55	0,007 953	0,013 335	0,012 556	0,004 899	0,005 128	–0,001 053	0,033 639
75	0,008 147	0,012 746	0,012 559	0,006 868	0,007 747	–0,006 249	0,030 899
90	0,007 422	0,012 923	0,011 440	0,006 342	0,006 353	–0,002 174	0,027 528
110	0,009 988	0,015 774	0,012 799	0,006 196	0,006 242	–0,002 418	0,023 835
132	0,009 150	0,012 524	0,008 713	0,007 001	0,007 230	–0,004 418	0,029 462
160	0,008 685	0,013 137	0,008 347	0,007 411	0,007 595	–0,003 358	0,025 062
200	0,008 253	0,012 361	0,009 287	0,006 432	0,006 646	–0,003 310	0,024 648
250	0,007 973	0,011 493	0,008 782	0,005 903	0,006 134	–0,002 659	0,022 575
315	0,007 726	0,010 630	0,008 266	0,005 373	0,005 622	–0,002 170	0,020 633
355	0,007 304	0,010 197	0,008 104	0,005 290	0,005 473	–0,001981	0,019 849
400	0,006 549	0,009 745	0,007 804	0,005 259	0,005 507	–0,000 335	0,018 033
500	0,006 472	0,009 322	0,007 784	0,005 142	0,005 156	–0,001 640	0,018 292
560	0,006 368	0,009 195	0,008 457	0,005 010	0,004 850	–0,001 882	0,016 170
630	0,005 987	0,008 960	0,009 242	0,005 104	0,005 158	–0,000 826	0,012 893
710	0,006 027	0,008 993	0,009 864	0,005 123	0,005 155	–0,000 825	0,012 505
800	0,006 070	0,009 023	0,010 484	0,005 128	0,005 150	–0,000 833	0,012 126
900	0,005 714	0,008 565	0,009 440	0,005 122	0,005 144	–0,000 887	0,011 977
1000	0,005 341	0,008 110	0,008 397	0,005 107	0,005 132	–0,000 872	0,011 765

Таблица D.5 — Интерполяционные коэффициенты типичных двухполюсных эталонных асинхронных двигателей класса IE2

Номинальная мощность	Коэффициенты						
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
0,12	0,309 215	0,111 623	0,110 781	0,001 322	0,002 960	–0,383 548	0,721 923
0,18	0,273 998	0,083 806	0,115 291	0,002 587	0,004 709	–0,348 918	0,561 115
0,25	0,167 541	0,073 171	0,088 958	0,003 867	0,007 011	–0,189 190	0,440 915
0,37	0,110 359	0,055 126	0,073 582	0,009 097	0,011 939	–0,121 045	0,311 147
0,55	0,078 950	0,048 581	0,063 063	0,010 411	0,013 178	–0,090 696	0,259 010
0,75	0,070 365	0,034 987	0,032 732	0,008 746	0,013 292	–0,049 085	0,238 701

Окончание таблицы D.5

Номинальная мощность	Коэффициенты						
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
1,1	0,056 385	0,031 303	0,030 860	0,005 793	0,007 114	–0,035 794	0,180 159
1,5	0,060 191	0,030 829	0,040 748	0,000 904	0,001 593	–0,022 733	0,136 693
2,2	0,059 162	0,031 190	0,033 312	0,001 914	0,002 587	–0,028 384	0,137 223
3	0,043 406	0,026 104	0,028 245	0,005 760	0,006 097	–0,011 705	0,111 514
4	0,031 784	0,023 241	0,027 211	0,012 913	0,013 211	–0,012 423	0,095 823
5,5	0,028 954	0,021 007	0,030 026	0,002 759	0,003 151	–0,010 740	0,088 128
7,5	0,024 566	0,016 511	0,089 141	0,001 612	0,016 584	–0,016 383	0,019 202
11	0,016 563	0,013 228	0,014 879	0,006 138	0,006 295	–0,007 512	0,067 897
15	0,016 368	0,013 568	0,025 610	0,005 575	0,005 848	–0,004 907	0,059 672
18,5	0,014 745	0,011 859	0,024 222	0,005 110	0,005 264	–0,005 436	0,052 023
22	0,011 104	0,011 228	0,019 121	0,006 070	0,006 207	–0,004 175	0,047 999
30	0,010 892	0,010 729	0,023 913	0,006 792	0,006 959	–0,001 668	0,040 827
37	0,009 844	0,009 115	0,020 941	0,006 641	0,006 957	–0,006 646	0,044 980
45	0,007 975	0,011 238	0,019 297	0,004 000	0,004 373	–0,002 912	0,031 165
55	0,008 080	0,009 476	0,021 905	0,004 978	0,004 839	–0,000 467	0,030 347
75	0,008 174	0,009 524	0,026 133	0,002 245	0,002 546	–0,001 471	0,025 651
90	0,010 468	0,012 436	0,020 174	0,004 593	0,004 592	–0,000 849	0,024 230
110	0,008 463	0,010 116	0,019 400	0,004 050	0,004 079	–0,001 251	0,019 566
132	0,007 975	0,008 928	0,017 852	0,004 602	0,004 641	–0,001 160	0,019 363
160	0,007 489	0,007 738	0,016 304	0,005 148	0,005 203	–0,001 081	0,019 173
200	0,007 513	0,008 009	0,013 136	0,005 785	0,006 285	–0,003 641	0,020 405
250	0,007 336	0,007 431	0,015 691	0,005 161	0,005 183	–0,001 111	0,016 732
315	0,006 501	0,006 990	0,012 831	0,005 141	0,005 161	–0,001 165	0,016 420
355	0,006 197	0,006 633	0,012 262	0,005 128	0,005 149	–0,001 157	0,015 445
400	0,005 887	0,006 273	0,011 683	0,005 127	0,005 153	–0,001 124	0,014 452
500	0,005 571	0,005 915	0,011 114	0,005 114	0,005 140	–0,001 054	0,013 422
560	0,005 426	0,005 839	0,011 092	0,005 071	0,005 185	–0,001 009	0,012 458
630	0,005 222	0,005 734	0,011 155	0,005 072	0,005 145	–0,000 678	0,011 237
710	0,005 226	0,005 655	0,012 328	0,005 095	0,005 142	–0,000 577	0,009 848
800	0,005 216	0,005 593	0,013 485	0,005 074	0,005 162	–0,000 435	0,008 439
900	0,005 054	0,005 307	0,012 116	0,005 090	0,005 136	–0,000 653	0,009 444
1000	0,004 875	0,005 040	0,010 724	0,005 098	0,005 121	–0,000 814	0,010 403

Приложение Е
(справочное)

Примеры применения расчета потерь комплектных преобразователей и электроприводов

Е.1 Общие положения

В данном приложении приведены примеры расчетов потерь реальных комплектных преобразователей и электроприводов по опорным рабочим точкам. Рабочие точки электропривода выбраны при 80 % номинального момента и 75 % номинальной частоты вращения для экземпляра электропривода мощностью 7,5 кВт.

Для этих целей сначала рассчитывают потери в комплектном преобразователе, затем в двигателе и на последней стадии — потери в электроприводе.

Е.2 Определение потерь в комплектном преобразователе

Е.2.1 Общие положения

Для нахождения относительных потерь комплектного преобразователя в требуемых рабочих точках может быть использован один из следующих методов:

a) по максимальным потерям в соседних предварительно определенных опорных рабочих точках;

b) с помощью двумерной интер- или экстраполяции по соседним опорным точкам;

c) по математическим моделям, представленным в 5.2.

Для использования методов согласно перечислениям a) и b) необходимо разделить рабочую область, представленную на рисунке 6, на четыре сегмента, как показано на рисунке Е.1.

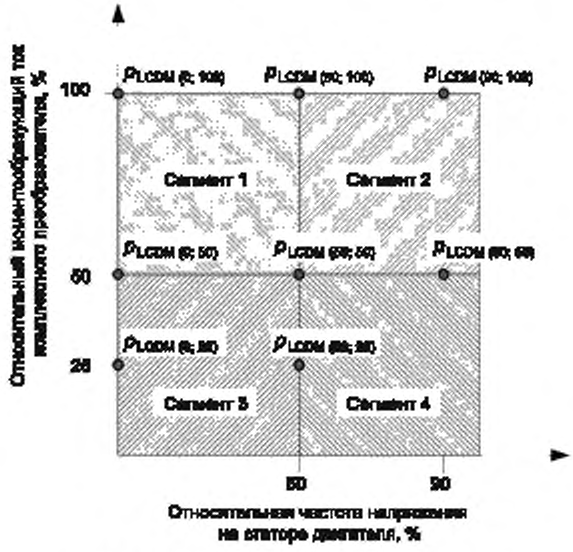


Рисунок Е.1 — Сегменты рабочих точек

Сегмент 1 перекрывает рабочие точки до 50 % относительной частоты статора f и выше 50 % относительного моментообразующего тока i_q.

Сегмент 2 перекрывает рабочие точки выше 50 % относительной частоты статора f и до 50 % относительного моментообразующего тока i_q.

Сегмент 3 перекрывает рабочие точки до 50 % относительной частоты статора f и выше 50 % относительного моментообразующего тока i_q.

Сегмент 4 перекрывает рабочие точки выше 50 % относительной частоты статора f и до 50 % относительного моментообразующего тока i_q.

В следующих пунктах будет показано, как найти потери при 75 % относительной частоты статора и 80 % относительного моментообразующего тока. Преобразователь, используемый в электроприводе в качестве примера, имеет номинальную кажущуюся мощность 9,9 кВА. Предварительно определенные потери в опорных рабочих точках представлены в таблице Е.1.

Таблица Е.1 — Предварительно определенные потери в опорных рабочих точках преобразователя 400 В/9,95 кВА

$P_{r,M}$, кВт	$S_{r,edu}$, кВА	$P_{L,CDM}$							
		(0;25)	(0,50)	(0;100)	(50,25)	(50;50)	(50;100)	(90;50)	(90;100)
7,5	9,95	2,56	2,88	3,89	2,64	3,09	4,58	3,45	5,91

Е.2.2 Определение потерь по максимальным потерям в соседних рабочих точках

Данный метод определения потерь отличается простотой, однако он дает более сильные отклонения от точного результата, чем другие методы.

Определяемая рабочая точка с 75 % относительной частоты статора и 80 % относительного моментообразующего тока находится во 2-м сегменте, как показано на рисунке Е.1, соседние опорные рабочие точки $p_{L,CDM\ (50,50)}$, $p_{L,CDM\ (50,100)}$, $p_{L,CDM\ (90,50)}$ и $p_{L,CDM\ (50,50)}$. Из этих точек наибольшие потери имеет точка $p_{L,CDM\ (90,100)}$. Следовательно, потери в рабочей точке с 75 % относительной частоты статора и 80 % относительного моментообразующего тока составляют 5,91 %.

Е.2.3 Определение потерь по двумерной интерполяции потерь в соседних рабочих точках

Е.2.3.1 Общая двумерная интерполяционная модель

Интерполяция функции двух аргументов, значение которой определено в четырех точках A, B, C, D для указания значения функции в точке Z, производится в три этапа, как показано на рисунке Е.2.

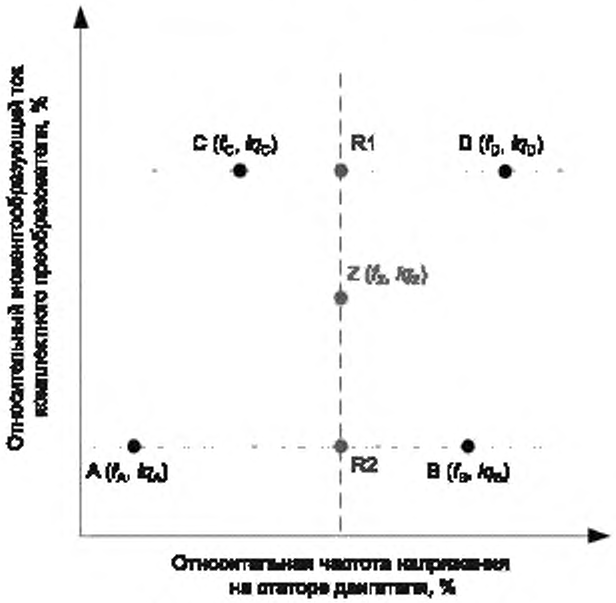


Рисунок Е.2 — Двумерная интерполяция

На 1-м этапе проводится линейная интерполяция между точками C и D для нахождения потерь в точке R1. Горизонтальную координату f точки R1 выбирают равной координате f_Z искомой точки Z. Если вертикальная координата точек C и D одинакова ($i_{qC} = i_{qD}$), потери в точке R1 являются функцией только горизонтальной координаты f_Z и могут быть определены по формуле

$$P_{LR1}(f_Z) = P_{LC} + \frac{P_{LD} - P_{LC}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C). \quad (E.1)$$

На 2-м этапе потери интерполируются аналогичным образом для точки R2 и вычисляются по формуле

$$P_{LR2}(f_Z) = P_{LA} + \frac{P_{LB} - P_{LA}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A). \quad (E.2)$$

На 3-м этапе потери в рабочей точке Z вычисляют путем интерполяции между точками R1 и R2. Так как R1 и R2 имеют одну и ту же горизонтальную координату f_Z, эта интерполяция производится только по вертикальной координате i_{qZ} и вычисляется по формуле

$$P_{LZ}(iq_Z) = P_{LR2} + \frac{P_{LR1} - P_{LR2}}{iq_{R1} - iq_{R2}} \cdot (iq_Z - iq_{R2}). \quad (E.3)$$

Используя формулы (E.1) и (E.2) в формуле (E.3), получают окончательный расчет потерь в рабочей точке Z по формуле

$$P_{LZ}(f_Z iq_Z) = P_{LA} + \frac{P_{LB} - P_{LA}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) + \frac{\left(P_{LC} + \frac{P_{LD} - P_{LC}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C)\right) - \left(P_{LA} + \frac{P_{LB} - P_{LA}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A)\right)}{iq_C - iq_A} \cdot (iq_Z - iq_A). \quad (E.4)$$

Учитывая предварительно определенные точки (см. рисунок 6), расчет в сегментах по рисунку E.1 для сегмента 1 проводят по формуле

$$P_{LZ}(f_Z iq_Z) = P_{LCDM(0,50)} + \frac{P_{LCDM(50,50)} - P_{LCDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z + \left(\frac{\left(P_{LCDM(0,100)} + \frac{P_{LCDM(50,100)} - P_{LCDM(0,100)}}{50} \cdot f_Z\right)}{50} - \frac{\left(P_{LCDM(0,50)} + \frac{P_{LCDM(50,50)} - P_{LCDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z\right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50). \quad (E.5)$$

Для сегмента 2 расчеты выполняют по выражению

$$P_{LZ}(f_Z iq_Z) = P_{LCDM(50,50)} + \frac{P_{LCDM(50,50)} - P_{LCDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) + \left(\frac{\left(P_{LCDM(50,100)} + \frac{P_{LCDM(50,100)} - P_{LCDM(50,100)}}{40} \cdot (f_Z - 50)\right)}{50} - \frac{\left(P_{LCDM(50,50)} + \frac{P_{LCDM(50,50)} - P_{LCDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50)\right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50). \quad (E.6)$$

Для сегмента 3 расчеты выполняют по выражению

$$P_{LZ}(f_Z iq_Z) = P_{LCDM(0,25)} + \frac{P_{LCDM(50,25)} - P_{LCDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z + \left(\frac{\left(P_{LCDM(0,50)} + \frac{P_{LCDM(50,50)} - P_{LCDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z\right)}{25} - \frac{\left(P_{LCDM(0,25)} + \frac{P_{LCDM(50,25)} - P_{LCDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z\right)}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25). \quad (E.7)$$

Для сегмента 4 расчеты выполняют по выражению

$$P_{LZ}(f_Z iq_Z) = P_{LCDM(0,25)} + \frac{P_{LCDM(50,25)} - P_{LCDM(0,25)}}{40} \cdot f_Z + \left(\frac{\left(P_{LCDM(50,50)} + \frac{P_{LCDM(50,50)} - P_{LCDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50)\right)}{25} - \frac{\left(P_{LCDM(0,25)} + \frac{P_{LCDM(50,25)} - P_{LCDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z\right)}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25). \quad (E.8)$$

Е.2.3.2 Пример расчета для определяемой рабочей точки

Определяемая рабочая точка с 75 % относительной частоты статора и 80 % относительного моментообразующего тока находится в сегменте 2. Соответственно применяют формулу (Е.6), и результирующие потери определяют по формуле

$$A_z(75,50) = 3,09 + \frac{3,45-3,09}{40}\cdot(75-50) + \\ + \left(\frac{\left(4,58+\frac{5,01-4,58}{40}\cdot(75-50)\right)-\left(3,09+\frac{3,45-3,09}{40}\cdot(75-50)\right)}{50}\right)\cdot(80-50) = 4,57. \quad (Е.9)$$

Таким образом, потери в рабочей точке с 75 % относительной частоты статора и 80 % относительного моментообразующего тока составляют 4,57 %.

Е.2.4 Определение потерь по математической модели, приведенной в 5.2

Данный метод определения потерь является самым точным. Однако он требует знания всех технических данных, входящих в формулы (5) и (16). Так как эти данные, как правило, отсутствуют в технической документации на комплектный преобразователь, данный метод доступен главным образом производителю преобразователя.

В примере использования данного метода значения необходимых параметров преобразователя представлены в таблице Е.2.

Таблица Е.2 — Параметры оцениваемого примера преобразователя

Обозначение	Описание	Параметры оцениваемого преобразователя	Единица измерения
$U_{T,th}$	Пороговое напряжение силового транзистора	1,0	В
$U_{T,r}$	Напряжение на силовом транзисторе во включенном состоянии при номинальном токе комплектного преобразователя	2,6	В
$U_{D,th}$	Пороговое напряжение на силовом диоде	1,1	В
$U_{D,r}$	Напряжение на силовом диоде во включенном состоянии при номинальном токе комплектного преобразователя	2,7	В
$U_{D,th,rectifier}$	Пороговое напряжение на диоде выпрямителя	0,9	В
$U_{D,r,rectifier}$	Напряжение на диоде выпрямителя во включенном состоянии при номинальном токе комплектного преобразователя	2,0	В
E_T	Коммутационные потери энергии, выраженные в вольтах или амперах, в силовом транзисторе	$6,5\cdot10^{-7}$	Дж/В·А
E_D	Коммутационные потери энергии, выраженные в вольтах или амперах, в силовом диоде	$3,5\cdot10^{-7}$	Дж/В·А
U_{DC}	Напряжение звена постоянного тока комплектного преобразователя	540	В
f_{sw}	Частота коммутации инвертора	4000	Гц
I_{cable}	Ток в кабеле двигателя при наибольших коммутационных потерях	10	А
$k1_{choke}$	Импеданс фильтра, отнесенный к номинальному импедансу комплектного преобразователя	0,03	
$k2_{choke}$	Относительное падение напряжения на активном сопротивлении фильтра	0,25	
λ	Коэффициент мощности на входе преобразователя	0,7	
$k1_{DC_link}$	Не зависящий от нагрузки параметр звена постоянного тока	$7\cdot10^{-7}$	1/Ом·А
$k2_{DC_link}$	Зависящий от нагрузки параметр звена постоянного тока	1,7	Ом·А

Окончание таблицы Е.2

Обозначение	Описание	Параметры оцениваемого преобразователя	Единица измерения
U_{rails}	Напряжение на активных сопротивлениях проводящих элементов преобразователя при номинальном токе	0,7	В
$k_{L.cooling}$	Коэффициент потерь на охлаждение	0,15	
$P_{L,control}$	Потери в звене управления преобразователя	45	Вт

Относительное линейное напряжение питания преобразователя в примере — 400 В, номинальный ток нагрузки — 14 А. Линейная интерполяция по таблице 1 при 80 % моментообразующего тока имеет значение выходного тока 83,2 % номинального выходного тока, составляющее 11,65 А; линейная интерполяция при аналогичном моментообразующем токе по таблице 2 — значение коэффициента мощности 0,81 на выходе инвертора.

На основе этих данных можно рассчитать математическую модель, описанную в 5.2, 5.1, и получить результаты, приведенные в таблице Е.3.

Таблица Е.3 — Результаты расчета по математической модели потерь преобразователя

	Формула	Потери	Единица измерения
Потери в транзисторе инвертора в открытом состоянии	(5)	10,8	Вт
Потери в диоде инвертора в открытом состоянии	(6)	2,72	Вт
Коммутационные потери в транзисторе инвертора	(7)	13,9	Вт
Коммутационные потери в диоде инвертора	(8)	7,48	Вт
Общие потери выходного инвертора	(9)	209	Вт
Потери в выпрямителе	(10)	46,8	Вт
Потери на входном реакторе	(11)	45,9	Вт
Потери в звене постоянного тока	(12)	4,59	Вт
Потери на проводниках	(13)	6,98	Вт
Потери на охлаждение	(14)	76,7	Вт
Общие абсолютные потери преобразователя	(15)	435	Вт
Общие относительные потери преобразователя	(16)	4,37	%

В таблице Е.4 приведены результаты оценки относительных потерь выбранного образца преобразователя, полученные тремя описанными методами.

Таблица Е.4 — Сравнение результатов оценки потерь различными методами

Метод оценки относительных потерь	Относительные потери
Максимальные потери в соседних точках	5,91 %
Двумерная интерполяция соседних точек	4,57 %
Математическая модель	4,37 %

Е.3 Определение потерь в двигателе

Для электропривода, приведенного в качестве примера, могли бы быть измерены потери реального двигателя. В настоящем примере использованы данные эталонного двигателя мощностью 7,5 кВт, приведенные в таблице А.2 приложения А.

Таблица Е.5 — Данные по потерям эталонного двигателя мощностью 7,5 кВт

$P_{r,M}$, кВт	$p_{L,RM}$, относительные							
	(0;25)	(0;50)	(0;100)	(50;25)	(50;50)	(50;100)	(100;50)	(100;100)
7,5	2,5	3,7	9,3	4,0	5,3	11,2	7,8	14,7

Для расчета потерь применен метод двумерной интерполяции по формуле (Е.4) с учетом предварительно определенных данных рабочих точек по таблице Е.5:

$$p_{L,M}(75,80) = 5,3 + \frac{7,8-5,3}{50}\cdot(75-50) + \left(\frac{\left(11,2+\frac{14,7-11,2}{50}\cdot(75-50)\right)-\left(5,3+\frac{7,8-5,3}{50}\cdot(75-50)\right)}{50}\right)\cdot(80-50) = 10,39. \quad (Е.10)$$

Е.4 Определение потерь комплектного электропривода

Для определения потерь электропривода сначала рассчитывают абсолютные потери в преобразователе и в двигателе по следующим формулам:

$$P_{L,CDM}(75\ \%, 80\ \%) = p_{L,CDM(75,80)} \cdot S_{r,edu} = 0,0437 \cdot 9,95\ кВА = 435\ Вт; \quad (Е.11)$$

$$P_{L,Mot}(75\ \%, 80\ \%) = p_{L,M(75,80)} \cdot P_{r,M} = 0,1083 \cdot 7,5\ кВт = 812\ Вт. \quad (Е.12)$$

Оцениваемая рабочая точка не является номинальной ни по скорости, ни по моменту, поэтому коэффициент k_{VD} не применяется, и расчет потерь в электроприводе проводят по формуле (18)

$$P_{L,PDS}(75\ \%, 80\ \%) = 435 + 812 = 1247\ Вт; \quad (Е.13)$$

$$p_{L,PDS}(75\ \%, 80\ \%) = \frac{1247\ Вт}{7500\ Вт} = 16,63\ \%. \quad (Е.14)$$

Приложение F
(справочное)

Погрешность метода определения потерь

F.1 Общие положения

Погрешность метода определения потерь может быть оценена значением допустимого отклонения потерь ΔP_L. Целью является выражение потерь в виде $P_L = P_{L,\ determined} + \Delta P_L$. Для расчета погрешности необходимо знание всех погрешностей примененного метода оценки потерь. Допустимые отклонения могут характеризоваться относительными или абсолютными значениями.

F.2 Расчет погрешности при случайном характере ошибок

В статистических расчетах в предположении случайного характера ошибок используется понятие среднеквадратичного отклонения. Предположительно, функция y, представляющая потери преобразователя или электропривода, зависит от факторов x_i. Тогда среднеквадратичное отклонение s_y при случайном характере ошибок и независимости между собой факторов x_i, имеющих каждый среднеквадратичное отклонение s_i, будет равно

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\delta y}{\delta x_i} s_i\right)^2}. \qquad (F.1)$$

Если предположить, что равновероятны как положительные, так и отрицательные отклонения, относительное среднеквадратичное отклонение может быть представлено как

$$\Delta p_L = \frac{\Delta P_L}{P_L} = \frac{s_y}{y} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\delta y}{\delta x_i} s_i\right)^2}}{y}. \qquad (F.2)$$

F.3 Сравнение погрешностей различных методов определения потерь

Погрешность определения потерь энергии между входом и выходом устройства растет с уменьшением этих потерь, что связано с малым значением разности между большими значениями входной и выходной мощности. В такой ситуации большое внимание должно быть уделено выбору испытательного и измерительного оборудования.

Например, при относительных потерях ниже 3 % расчеты должны демонстрировать не меньшую точность, чем измерения на входе и выходе.

Калориметрический метод измерения потерь позволяет достичь высокой точности даже при малых потерях. Однако этот метод требует больших затрат.

Приложение G
(справочное)

Калориметрический метод определения потерь в преобразователе

G.1 Общие положения

Калориметрический метод определения потерь основан на калориметрических измерениях выделяющейся мощности потерь. Измерения следует проводить в условиях термического равновесия, а компоненты должны быть термически изолированы для обеспечения передачи всего выделившегося тепла охлаждающему агенту (воде или воздуху). В следующих разделах описаны три типа методов.

G.2 Двухкамерный калориметр с воздушным охладителем

В 1-м методе измерение потерь проводят в один этап. Испытательная конфигурация изображена на рисунке G.1. Установка представляет собой термически изолированную конструкцию, состоящую из двух камер, в одной из которых размещен преобразователь, потери в котором измеряют, а в другой — нагреваемый резистор. Метод предусматривает нахождение преобразователя для измерений и резистора для калибровки в одном воздушном потоке, сопротивление которому в обеих камерах должно быть одинаковым. При этом благодаря одновременности измерений достигается идентичность физических условий.

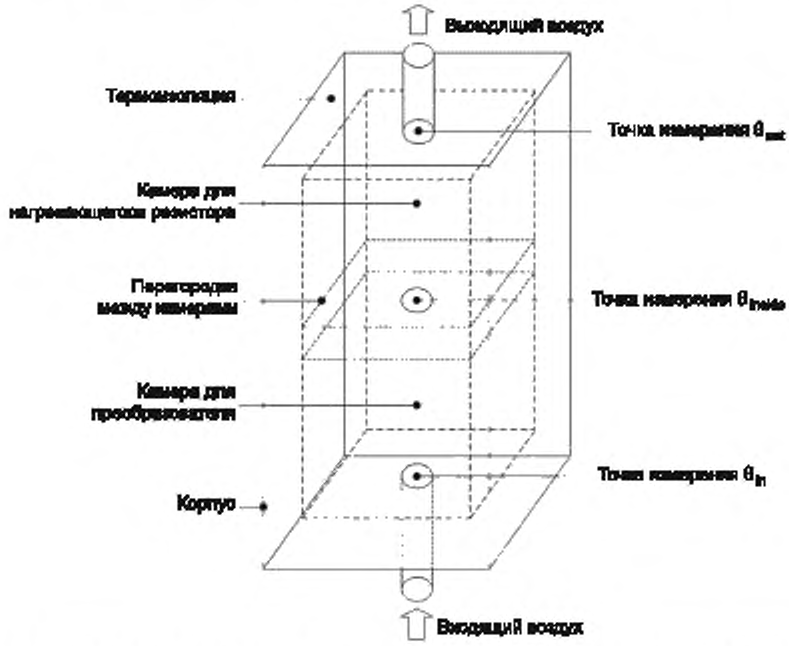


Рисунок G.1 — Установка для одноэтапного калориметрического сравнительного метода измерения потерь (одновременный нагрев преобразователя и резистора)

По измерениям температуры охлаждающего воздуха на входе, выходе и между камерами, а также по калиброванным потерям в резисторе можно найти потери в преобразователе. Резистор питается от источника электроэнергией, мощность которой измеряют. Измерения проводят при достижении теплового равновесия. Потери преобразователя определяют по формуле

$$P_{L_COM,determined} = P_{L_resistor} \frac{\theta_{inside} - \theta_{in}}{\theta_{out} - \theta_{inside}}. \quad (G.1)$$

Изменения в скорости, давлении и температуре охлаждающего воздуха, как и наружной температуры, влияют на точность результата. Очевидно также, что и напряжение питания не остается постоянным при измерениях. Эти факторы определяют ошибки в измерениях потерь данным методом так же, как и другими методами, в которых присутствуют неконтролируемые источники.

G.3 Однокамерный калориметр с воздушным охладителем

Установка для калориметрических измерений альтернативным методом представлена на рисунке G.2. Она состоит из корпуса, вмещающего одну термоизолированную камеру, в которой поочередно размещены испытуемый преобразователь и нагреваемый резистор, функционирующие в одинаковом воздушном потоке. На 1-м этапе испытуемый преобразователь работает с определенной нагрузкой. При этом в установившемся состоянии теплового равновесия фиксируют температуры на входе и выходе калориметра и скорость воздушного потока. На 2-м этапе в камере размещают резистор, в который передают и измеряют такую мощность, чтобы в состоянии теплового равновесия температура на входе и выходе, а также скорость потока воздуха стали такими же, как и при нагреве преобразователя на 1-м этапе. Потери в преобразователе определяют по питающей мощности нагреваемого резистора по формуле

$$P_{L,CDM,determined} = P_{L,resistor}. \quad (G.2)$$

Изменения в скорости, давлении и температуре охлаждающего воздуха, как и наружной температуры, влияют на точность результата. Очевидно также, что и напряжение питания не остается постоянным при измерениях. Эти факторы определяют ошибки в измерениях потерь данным методом, как и другими, в которых присутствуют неконтролируемые источники.

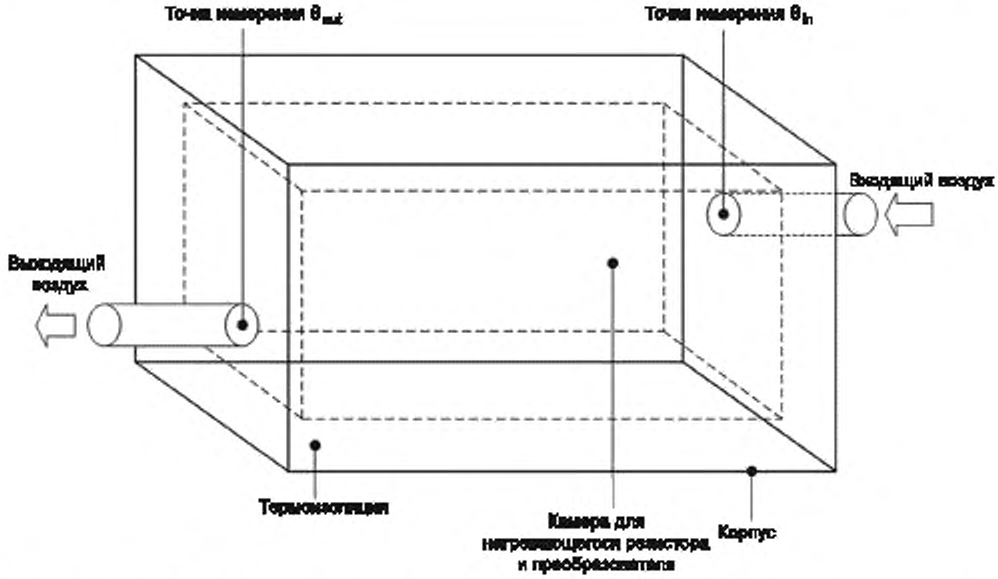


Рисунок G.2 — Установка для двухэтапного калориметрического сравнительного метода измерения потерь (поочередный нагрев преобразователя и резистора)

G.4 Калориметр с жидкостным охладителем

Калориметрическая установка для измерений с жидкостным охладителем представлена на рисунке G.3. Она состоит из корпуса, вмещающего одну термоизолированную камеру, через которую протекает хладагент, передающий тепло, выделяемое испытуемым преобразователем. Преобразователь работает в требуемом режиме, и в состоянии теплового равновесия измеряют объемный расход жидкости и температуры на входе и выходе из камеры. Выделенную преобразователем мощность рассчитывают по формуле

$$P_{L,CDM,determined} = Q_{cooler} \cdot \rho_{linquid} \cdot c_{liquid} \cdot (\theta_{out} - \theta_{in}). \quad (G.3)$$

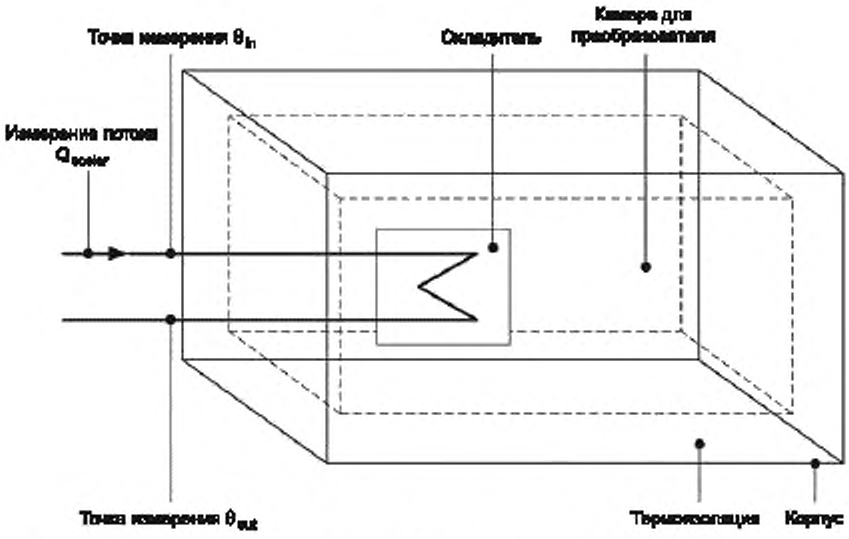


Рисунок G.3 — Установка для калориметрического метода измерения потерь с жидкостным охладителем

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 60038:2009	IDT	ГОСТ 29322—2014 (IEC 60038:2009) «Напряжения стандартные»
IEC 60050-161	MOD	ГОСТ 30372—2017 (IEC 60050-161:1990) «Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения»
IEC 60034-1	IDT	ГОСТ IEC 60034-1—2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики»
IEC 60034-2-1:2014	IDT	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 TS 60034-2-3	IDT	ГОСТ IEC/TS 60034-2-3—2015 «Машины электрические вращающиеся. Часть 2-3. Специальные методы определения потерь и коэффициента полезного действия асинхронных двигателей переменного тока с питанием от преобразователя»
IEC 60034-30-1	IDT	ГОСТ IEC 60034-30-1—2016 «Машины электрические вращающиеся. Часть 30-1. Классы КПД двигателей переменного тока, работающих от сети (код IE)»
IEC 60947-4-1	IDT	ГОСТ 30011.4.1—96 (МЭК 947-4-1—90) «Низковольтная аппаратура распределения и управления. Часть 4. Контакторы и пускатели. Раздел 1. Электромеханические контакторы и пускатели»
IEC TS 61800-8	IDT	ГОСТ IEC/TS 61800-8—2017 «Электрические приводные системы с регулируемой скоростью. Часть 8. Спецификация напряжения на силовом сопряжении»
IEC TS 62578	NEQ	ГОСТ 28167—89 «Преобразователи переменного напряжения полупроводниковые. Общие технические требования»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты;
- NEQ — неэквивалентные стандарты.

Библиография

IEC 60034 (all parts)	Rotating electrical machines (Машины электрические вращающиеся)
IEC TS 60034-25	Rotating electrical machines. Part 25. AC electrical machines used in power drive systems. Application guide (Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Электрические машины переменного тока, используемые в системах силового привода. Руководство по применению)
IEC 60034-30 (all parts)	Rotating electrical machines (Машины электрические вращающиеся)
IEC TS 60034-30-2	Rotating electrical machines. Part 30-2. Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code) [Машины электрические вращающиеся. Часть 30-2. Классы эффективности двигателей переменного тока с регулированием частоты вращения (код IE)]
IEC TS 60034-31	Rotating electrical machines. Part 31. Selection of energy efficient motors including variable speed applications. Application guide (Машины электрические вращающиеся. Часть 31. Выбор энергоэффективных двигателей включая перемены скоростей. Руководство по применению)
IEC 60072-1	Dimensions and output series for rotating electrical machines. Part 1. Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080 (Машины электрические вращающиеся. Размеры и ряды выходных мощностей. Часть 1. Габаритные номера от 56 до 400 и номера фланцев от 55 до 1080)
IEC 60146-1-1	Semiconductor converters. General requirements and line commutated converters. Part 1-1. Specification of basic requirements (Преобразователи полупроводниковые. Общие требования и преобразователи с линейной коммутацией. Часть 1-1. Технические условия на основные требования)
IEC 60947-4-2	Low voltage switchgear and controlgear. Part 4-2. Contactors and motor-starters. AC semiconductor motor controllers and starters (Аппаратура коммутационная и механизмы управления низковольтные. Часть 4-2. Контакторы и пускатели электродвигателей. Полупроводниковые контроллеры и пускатели для электродвигателей переменного тока)
IEC 61000-3-12	Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-12. Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase (Электромагнитная совместимость. Часть 3. Пределы. Раздел 12. Пределы. Пределы для гармоничных токов, генерируемых оборудованием, связанным с бытовыми низковольтными системами с входным током 16 А и менее или равным 75 А на фазу)
IEC 61800-2	Adjustable speed electrical power drive systems. Part 2. General requirements. Rating specifications for low voltage adjustable speed AC power drive systems (Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 2. Общие требования. Номинальные технические характеристики низковольтных систем силовых электроприводов переменного тока с регулируемой скоростью)
IEC 61800-3	Adjustable speed electrical power drive systems. Part 3. EMC requirements and specific test methods (Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 3. Требования к электромагнитной совместимости и специальные методы испытаний)
IEC 61800-5-1	Adjustable speed electrical power drive systems. Part 5-1. Safety requirements. Electrical, thermal and energy (Системы силовых электрических приводов с регулируемой скоростью. Часть 5-1. Требования к электрической, термической и энергетической безопасности)
IEC TS 61800-8	Adjustable speed electrical power drive systems. Part 8. Specification of voltage on the power interface (Электрические приводные системы с регулируемой скоростью. Часть 8. Спецификация напряжения на силовом сопряжении)
IEC 61800-9 (all parts)	Adjustable speed electrical power drive systems. Part 9. Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications (Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 9. Экодизайн систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и ее приводов. Все части)
IEC 61800-9-1	Adjustable speed electrical power drive systems. Part 9-1. Energy efficiency of power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications — General requirements for setting energy efficiency standards for power drive equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM) [Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 9-1. Экодизайн систем силовых электроприводов, пускателей электродвигателя, силовой электроники и ее приводов. Общие требования к стандартизации энергоэффективности оборудования с электроприводом, используя расширенный подход к продукту (EPA) и полуаналитическую модель (SAM)]

IEEE 112	Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (Стандартная процедура испытаний для многофазных асинхронных двигателей и генераторов)
CSA 838-13	Energy efficiency test methods for three-phase variable frequency drive systems (Методы испытаний энергоэффективности для трехфазных систем с частотно-регулируемым приводом)
EN 50598-2	Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics & their driven applications. Part 2. Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters (Экодизайн для систем силового привода, пускателей двигателей, силовой электроники и их приводных устройств. Часть 2. Индикаторы энергоэффективности для систем силовых приводов и пускателей двигателей)

УДК 621.313:006.354 IDT МКС 29.130, 29.160/30, 29.200

Ключевые слова: машины электрические вращающиеся; полупроводниковые преобразователи, силовые электроприводы, энергоэффективность

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 04.08.2021. Подписано в печать 20.08.2021. Формат 60×84¼. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 9,26.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru