РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

# ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2871836**

## СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ ИНВЕРТОРА В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)***

Авторы: ***Шклярский Ярослав Элиевич (RU), Скворцов Иван Владимирович (RU), Королёв Николай Александрович (RU)***

Заявка № **2026111282**
Приоритет изобретения **14 апреля 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **13 октября 2026 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **14 апреля 2046 г.**

*Руководитель Федеральной службы*
*по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 871 836**(13) **C1**

(51) МПК
*G01R 31/327* (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

# (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
*G01R 31/3275 (2026.08)*

(21)(22) Заявка: **2026111282, 14.04.2026**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
**14.04.2026**

Дата регистрации:
**13.10.2026**

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **14.04.2026**

(45) Опубликовано: **13.10.2026** Бюл. № **29**

Адрес для переписки:
**199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2, Санкт-Петербургский Горный Университет, Патентно-лицензионный отдел**

(72) Автор(ы):
**Шклярский Ярослав Элиевич (RU),**
**Скворцов Иван Владимирович (RU),**
**Королёв Николай Александрович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2766917 C1, 16.03.2022. RU 2346829 C1, 20.02.2009. UA 21582 A, 06.01.1998.**

## (54) СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ ИНВЕРТОРА В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оценки технического состояния силовых полупроводниковых ключей автономного инвертора напряжения электропривода переменного тока, которое позволяет выявлять технические неисправности полупроводников, приводящие к аварийному останову электроприводов с рабочим механизмом. Способ оценки технического состояния силовых полупроводниковых ключей инвертора в электроприводах переменного тока включает регистрацию сигналов, пропорциональных фазным токам от датчиков тока, установленных в каждой фазе питающей сети, регистрацию сигналов кривых мгновенных значений фазных токов, сравнение гармоник фазных токов между собой, регистрацию мгновенных значений напряжения, поступающих с датчика напряжения, при этом способ согласно изобретению позволяет системе аварийной сигнализации предприятия самостоятельно производить остановку электродвигателя и уведомлять оператора о предаварийных и аварийных ситуациях. Техническим результатом изобретения является повышение точности оценки технического состояния каждого силового полупроводникового ключа преобразователя. 5 ил., 12 табл.

RU 2871836 C1

RU 2871836 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 871 836**(13) **C1**

(51) Int. Cl.
*G01R 31/327* (2006.01)

## (12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
*G01R 31/3275 (2026.08)*

(21)(22) Application: **2026111282, 14.04.2026**

(24) Effective date for property rights:
**14.04.2026**

Registration date:
**13.10.2026**

Priority:
(22) Date of filing: **14.04.2026**

(45) Date of publication: **13.10.2026** Bull. № **29**

Mail address:
**199106, g. Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, 2, Sankt-Peterburgskij Gornyj Universitet, Patentno-litsenzionnyj otdel**

(72) Inventor(s):
**Shkliarskii Iaroslav Elievich (RU),**
**Skvortsov Ivan Vladimirovich (RU),**
**Korolev Nikolai Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):
**federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Sankt-Peterburgskii gornyi universitet imperatritsy Ekateriny II» (RU)**

## (54) METHOD FOR ASSESSING TECHNICAL CONDITION OF POWER SEMICONDUCTOR INVERTER SWITCHES IN AC ELECTRIC DRIVES

(57) Abstract:

FIELD: electric drives.

SUBSTANCE: invention relates to the field of assessing the technical condition of power semiconductor keys of an autonomous voltage inverter of an AC electric drive, which makes it possible to identify technical faults in semiconductors that lead to an emergency stop of electric drives with a working mechanism. A method for assessing the technical condition of power semiconductor inverter keys in AC electric drives includes recording signals proportional to phase currents from current sensors installed in each phase of the power supply network, recording signals of instantaneous phase current values, comparing harmonics of phase currents with each other, recording instantaneous voltage values coming from a voltage sensor, wherein the method according to the invention allows the enterprise's alarm system to independently stop the electric motor and notify the operator of pre-emergency and emergency situations.

EFFECT: increase the accuracy of assessing the technical condition of each power semiconductor switch of the converter.

1 cl, 5 dwg, 12 tbl

RU 2871836 C1

RU 2871836 C1

Изобретение относится к области оценки технического состояния силовых полупроводниковых ключей автономного инвертора напряжения электропривода переменного тока, которое позволяет выявлять технические неисправности полупроводников, приводящие к аварийному останову электроприводов с рабочим механизмом.

Известен способ определения аварийной стойки выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока (патент РФ № 2766917, опубл. 16.03.2022), согласно которому методом сравнения вычисленных интеграла отрицательной составляющей выпрямленного напряжения за полупериод напряжения сети, мощности за полупериод напряжения сети, а также отношений первой, третьей и пятой амплитуд гармонических составляющих к амплитуде нулевой составляющей с заранее заданными величинами параметров нормального режима работы и с теми же параметрами в предыдущем полупериоде определяют неисправную стойку полупроводникового преобразователя.

Недостатком данного способа является ограниченная информативность результатов сравнительного анализа вычисляемых параметров.

Известен способ диагностики состояния ключей полупроводникового инвертора на базе IGBT транзисторов с ШИМ-модуляцией (Trabelsi, M. Multiple criteria for high performance real-time diagnostic of single and multiple open-switch faults in ac-motor drives: Application to IGBT-based voltage source inverter / M. Trabelsi, M. Boussak, M. Benbouzid // Electric Power Systems Research. - 2017. - Vol. 144. - pp. 136-149), согласно которому на основе анализа годографов, преобразованных в α-β координаты фазных токов инвертора и расчета введенных авторами вспомогательных переменных, идентифицирующих состояние ключей, определяют стойку инвертора, в которой произошел дефект типа «разрыв», а также конкретный неисправный транзистор в данной стойке, который вышел из строя.

Недостатком способа является то, что выход из строя полупроводникового ключа в инверторе напряжения может происходить не только по причине дефекта типа «разрыв», но и при наступлении дефекта типа «короткое замыкание». Несвоевременное обнаружение такой неисправности ключа может привести к раннему выходу из строя всего преобразовательного устройства, а ложное обнаружение может привести к остановке всего технологического процесса.

Известен способ диагностики и оценки остаточного ресурса электропривода переменного тока (патент РФ № 2532762, опубл. 10.11.2014), согласно которому с помощью специализированной программы посредством обработки сигналов, снятых с датчиков тока и напряжения, потребляемых электродвигателем, производятся вычисления расхождения амплитуд сигналов токов, напряжений, мощности каждой фазы, коэффициентов несимметрии тока, напряжения, мощности, коэффициентов гармонических составляющих, при этом оценивается влияние питающего напряжения на систему с точки зрения нарушения показателей качества электроэнергии, на основе чего определяется техническое состояние системы электропривода переменного тока и производится оценка остаточного ресурса электропривода.

Недостатком данного способа является то, что оценка остаточного ресурса не является информативной для определения конкретного узла, из-за которого наблюдается ухудшение состояния агрегатов системы электропривода переменного тока.

Известен способ диагностики неисправностей типа «короткое замыкание» силовых транзисторов в трехфазных инверторах на основе образов пространственного напряжения (Alavi, M. Short-circuit fault diagnosis for three-phase inverters based on voltage-

space patterns / M. Alavi, D. Wang, M. Luo // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2014. - Vol. 61. - No. 10 - pp. 5558-5569), согласно которому на основе непрерывного анализа мгновенных значений трехфазных напряжений, отображаемых в виде вектора в трехмерном пространстве дискретных состояний, и вычисления принадлежности наблюдаемых состояний к запрещенным зонам, соответствующим недоступным граням куба вектора напряжения, идентифицирующим тип неисправности, определяют фазную стойку инвертора, в которой произошел дефект типа «короткое замыкание», а также конкретный неисправный силовой ключ в данной стойке.

Недостатком является то, что в способе не учитывается возможность наступления дефекта типа «разрыв» полупроводниковых ключей инвертора.

Известен способ диагностики трехфазного тиристорного выпрямителя (патент РФ № 2310877, опубл. 20.11.2007), основанный на сопоставлении с заданными положительными направлениями направлений мгновенных значений фазных токов питающей сети, сравнении между собой амплитуд первых гармоник фазных токов, а также совместном анализе форм кривых фазных токов и выходного напряжения, принятый за прототип. Сравнение заданных направлений фазных токов с фактическими, а также анализ форм тока позволяет судить о наличии разрыва в ветви, т. е. выхода из строя одного из ключей. При этом также произойдет изменение гармонического состава в кривых фазных токов: в поврежденной фазе амплитуда основной гармоники окажется меньше амплитуд основных гармоник остальных фаз, в таком случае с учетом направления протекания тока, можно определить ту стойку, в которой произошла неисправность. Совместный анализ кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения позволяет определить углы управления тиристоров для каждого периода протекания тока и соответственно сделать вывод о симметрии или асимметрии углов управления тиристорами.

Недостатком данного способа является то, что не учитывается режим, при котором в трехфазном тиристорном выпрямителе возникает неисправность полупроводниковых ключей типа «короткое замыкание». Также, формы фазных токов не являются достаточно информативными для точного определения поврежденного ключа в стойке.

Техническим результатом является повышение точности оценки технического состояния каждого силового полупроводникового ключа преобразователя.

Технический результат достигается тем, что в начале определяют эталонные характеристики работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, к которым относят векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения и тока статора и спектры гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом, затем спектры гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом рассчитывают быстрым преобразованием Фурье мгновенных значений трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом, непрерывного измерения сигналов трехфазного напряжения и тока статора, далее, измеренные сигналы трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом с выхода датчиков напряжения и датчиков тока поступают на входы блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора и блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, сигналы которые сформированы обобщенными векторами напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом с выхода блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора поступают на вход блока формирования сигналов

состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора, где векторно-пространственные диаграммы напряжения и тока статора на комплексной плоскости формируют сигналы состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, сигналы состояния процесса преобразования энергии силовыми полупроводниковыми ключами формируют в соответствии с полученными векторно-пространственными диаграммами напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом в результате сравнения векторно-пространственных диаграмм при неноминальных параметрах с векторно-пространственными диаграммами, соответствующими эталонному состоянию работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, далее производят расчет сигнала рассогласования в блоке формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора, быстрое преобразование Фурье мгновенных значений трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом в блоке вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора формирует частотные составляющие сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом, затем с выхода блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора эти сигналы передают на вход блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, эти сигналы состояния работы силовых полупроводниковых ключей, в двухуровневом трехфазном мостовом автономном инверторе напряжения преобразователя частоты, формируют в соответствии с полученными спектрами сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом в результате сравнения спектров при неноминальных параметрах с эталонными спектрами, относящимися к эталонному состоянию работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, после этого производя расчет сигнала рассогласования в блоке формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, на основе количественной и качественной оценки сигналов рассогласования, которые поступили на вход блока оценки технического состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, формируют сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, полученный сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах передают в систему управления преобразователем частоты, на сопряженные по аналоговым или дискретным каналам с преобразователем частоты программируемые логические контроллеры, интегрированные в общую систему SCADA предприятия и в систему аварийной сигнализации, которая самостоятельно производит остановку электродвигателя и уведомляет оператора о предаварийных и аварийных ситуациях.

Способ оценки технического состояния полупроводниковых ключей преобразователя поясняется следующими фигурами:

фиг. 1 - структурная схема системы оценки технического состояния силовых полупроводниковых ключей двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты автоматизированного электропривода;

фиг. 2 - векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» в первой стойке;

фиг. 3 - векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «обрыв» в первой стойке;

фиг. 4 - векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» во второй стойке;

фиг. 5 - векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «обрыв» во второй стойке, где:

1 - силовой полупроводниковый ключ;

2 - блок управления силовыми полупроводниковыми ключами с генератором широтно-импульсной модуляции;

3 - двухуровневый трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения преобразователя частоты;

4 - датчики тока;

5 - датчики напряжения;

6 - электродвигатель с рабочим механизмом;

7 - блок расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора;

8 - блок вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора;

9 - блок формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора;

10 - блок формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора;

11 - блок оценки технического состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты.

Способ осуществляется следующим образом. На вход электродвигателя с рабочим механизмом 6 (фиг. 1) подают напряжение с выхода двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3, состоящего из соединенных в мостовую схему шести силовых полупроводниковых ключей 1 и блока управления силовыми полупроводниковыми ключами с генератором широтно-импульсной модуляции 2.

В начале определяют эталонные характеристики работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3, к которым относят векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения и тока статора и спектры гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом 6. Векторно-пространственные диаграммы получают математическим преобразованием Парка переходя из трехфазной системы координат напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$

электродвигателя с рабочим механизмом 6 в двухфазную систему координат d-q с векторами напряжений статора $U_d$ и $U_q$ и векторами токов статора $I_d$ и $I_q$ электродвигателя с рабочим механизмом 6, вычисления обобщенных векторов напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 в алгебраической форме комплексных чисел. Спектры гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом 6 рассчитывают быстрым преобразованием Фурье мгновенных значений трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом 6.

Под эталонным состоянием двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 принимают процесс преобразования постоянного напряжения DC в переменное AC, при котором отсутствуют такие паразитные воздействия тока и напряжения как, например, высокочастотные, импульсные или тепловые, которые негативно сказываются на функционировании силовых полупроводниковых ключей 1 двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3.

Входы датчиков напряжения 5 и датчиков тока 4 подключены между двухуровневым трехфазным мостовым автономным инвертором напряжения преобразователя частоты 3 и электродвигателем с рабочим механизмом 6 для непрерывного измерения сигналов трехфазного напряжения и тока статора. Далее, измеренные сигналы трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом 6 с выхода датчиков напряжения 5 и датчиков тока 4 поступают на входы блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора 7 и блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора 8.

В блоке расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора 7, преобразованные сигналы линейных напряжений в фазные, а также сигналы фазных токов, пересчитывают из трехфазной системы напряжений и токов в двухфазную систему координат d-q математическим преобразованием Парка и затем рассчитывают обобщенные векторы напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 в алгебраической форме комплексных чисел.

Сигналы сформированных обобщенных векторов напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 с выхода блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора 7 поступают на вход блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора 9, где векторно-пространственные диаграммы напряжения и тока статора на комплексной плоскости формируют сигналы состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3. Сигналы состояния процесса преобразования энергии силовыми полупроводниковыми ключами 1 формируют в соответствии с полученными векторно-пространственными диаграммами напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 в результате сравнения векторно-пространственных диаграмм при неноминальных параметрах с векторно-пространственными диаграммами, соответствующими эталонному состоянию работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3. Далее производят расчет сигнала рассогласования в блоке формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным

диаграммам напряжения и тока статора 9.

Быстрое преобразование Фурье мгновенных значений трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом 6 в блоке вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора 8 формирует частотные составляющие сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом 6, затем с выхода блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора 8 эти сигналы передают на вход блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора 10. Эти сигналы состояния работы силовых полупроводниковых ключей 1, в двухуровневом трехфазном мостовом автономном инверторе напряжения преобразователя частоты 3, формируют в соответствии с полученными спектрами сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом 6 в результате сравнения спектров при неноминальных параметрах с эталонными спектрами, относящимися к эталонному состоянию работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3. Производится расчет сигнала рассогласования в блоке формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора 10.

С выходов блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора 9 и блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора 10 на вход блока оценки технического состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 11 поступают сигналы рассогласования состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3. На основе количественной и качественной оценки сигналов рассогласования, поступивших на вход блока оценки технического состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 11, формируют сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах 1 двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3. Полученный сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах 1 передают в систему управления преобразователем частоты, на сопряженные по аналоговым или дискретным каналам с преобразователем частоты программируемые логические контроллеры, интегрированные в общую систему SCADA предприятия и в систему аварийной сигнализации. Система управления самостоятельно производит останов электродвигателя с рабочим механизмом 6 при возникновении дефекта в силовых полупроводниковых ключах 1 и уведомляет оператора о предаварийных и аварийных ситуациях.

Способ поясняется следующими примерами. В результате приведения в работу двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 и подключенного к нему электродвигателя с рабочим механизмом 6, фиксируются данные изменения трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 в течение

одной секунды с шагом дискретизации 0,000025 с. Сигналы трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ количественно оцениваются по векторно-пространственным диаграммам, характеристики которых для представлены в таблицах 1, 4, 7 и 10, сигналы трехфазных токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ качественно оцениваются по векторно-пространственным диаграммам. Также быстрым преобразованием Фурье производится спектральный анализ как трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$, характеристики которых представлены в таблицах 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11 и 12.

Состояние двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 2 при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа 1 «короткое замыкание» в первой стойке, при котором верхний силовой полупроводниковый ключ 1 в первой стойке непрерывно находится в состоянии «открыт», оценивается положениями на векторно-пространственной диаграмме обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в координатах d-q с характеристиками изменения координат начала и конца этого вектора для эталонного и дефектного состояния в таблице 1, а также качественной характеристикой векторно-пространственной диаграммы обобщенного вектора тока статора $I_s$ и характеристиками амплитуд высших гармоник сигналов трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 для эталонного и дефектного состояния в таблице 2 и 3.

Состояние характеризуется смещением координаты начала обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ для положений $u_1$, $u_3$ и $u_5$, изменением длины вектора напряжения статора $U_s$ в положениях $u_1$ и $u_4$, а также смещение координат конца обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в положениях $u_3$, $u_4$ и $u_5$ на 179 В вправо по оси $u_d$. Векторно-пространственная диаграмма тока статора $I_s$ в рассматриваемом состоянии изменяет форму с круга на овал и смещается в зоны $+i_d$ и $+i_q$, а также $+i_d$ и $-i_q$ комплексной плоскости относительно эталонного состояния (фиг. 2).

Таблица 1 - Характеристика сигнала напряжения в виде обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» в первой стойке

| № положения вектора | Координаты начала вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | | Координаты конца вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Изменение | Эталон | Дефект | Изменение |
| $u_1$ | 0; j0 | 179; j0 | +179; j0 | 358; j0 | 358; j0 | без измен. |
| $u_2$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 179; j310 | 179; j310 | без измен. |
| $u_3$ | 0; j0 | 179; j0 | +179; j0 | -179; j310 | 0; j310 | +179; j0 |
| $u_4$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -358; j0 | -179; j0 | +179; j0 |
| $u_5$ | 0; j0 | 179; j0 | +179; j0 | -179; -j310 | 0; -j310 | +179; j0 |
| $u_6$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 179; -j310 | 179; -j310 | без измен. |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте верхнего силового

полупроводникового ключа 1 «короткое замыкание» в первой стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 5 процентов. Существенное изменение амплитуд высших гармоник сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, как показано в таблице 2, происходит на частотах 0 Гц, 1000 Гц и 1850 Гц.

Таблица 2 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» в первой стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник напряжения $U_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $U_a$ | $U_b$ | $U_c$ |
| 0 | 0 | 50,8 | 0 | 18,1 | 0 | 18,1 | +50,8 | +18,1 | +18,1 |
| 900 | 31,8 | 32 | 30,7 | 30,5 | 30,7 | 30,5 | +0,2 | -0,2 | -0,2 |
| 1000 | 0,1 | 31 | 0 | 11 | 0 | 11 | +30,9 | +11 | +11 |
| 1100 | 31,6 | 31,8 | 31 | 30,9 | 31 | 30,9 | +0,2 | -0,1 | -0,1 |
| 1850 | 0,91 | 9 | 0,5 | 3,2 | 0,5 | 3,2 | +8,09 | +2,7 | +2,7 |
| 1950 | 19,6 | 19,7 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | +0,1 | 0 | 0 |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа 1 «короткое замыкание» в первой стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 2 процентов. Существенное изменение амплитуд высших гармоник сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$, как показано в таблице 3, происходит на частотах 0 Гц и 1000 Гц.

Таблица 3 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» в первой стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник тока $I_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $I_a$ | $I_b$ | $I_c$ |
| 0 | 0 | 81,7 | 0 | 29,1 | 0 | 29,1 | +81,7 | +29,1 | +29,1 |
| 900 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 0 | 0 | 0 |
| 1000 | 0 | 1,96 | 0 | 0,7 | 0 | 0,7 | +1,96 | +0,7 | +0,7 |
| 1100 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 0 | 0 | 0 |

Таким образом, описываемое состояние характеризуется увеличением амплитуд выделенных высших гармоник как в сигналах трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и в сигналах трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$, при этом амплитуды этих гармоник не превышают амплитуду основной частоты сигналов, а также имеют большее увеличение амплитуды в той фазе, в которой произошло изменение состояния силового полупроводникового ключа 1.

Состояние двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора

напряжения преобразователя частоты 2 при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» в первой стойке, при котором верхний силовой полупроводниковый ключ 1 в первой стойке непрерывно находится в состоянии «закрыт», оценивается положениями на векторно-пространственной диаграмме обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в координатах d-q с характеристиками изменения координат начала и конца этого вектора для эталонного и дефектного состояния в таблице 4, а также качественной характеристикой векторно-пространственной диаграммы обобщенного вектора тока статора $I_s$ и характеристиками амплитуд высших гармоник сигналов трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 для эталонного и дефектного состояния в таблице 5 и 6.

Состояние характеризуется изменением координат конца обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в положениях $u_1$, $u_2$ и $u_6$. Положения $u_2$ и $u_6$ характеризуются смещением координаты конца вектора напряжения статора $U_s$ влево на 179 В по оси $u_d$, а для положения $u_1$ на 358 В в том же направлении по той же оси. Векторно-пространственная диаграмма обобщенного вектора тока статора $I_s$ в рассматриваемом состоянии из формы круга эталонного состояния вырождается в прямую линию, расположенную вдоль оси мнимых значений комплексной плоскости как в отрицательной области, так и в положительной, с небольшими колебаниями значений вектора тока статора $I_s$ в сторону положений $u_3$, $u_4$ и $u_5$ обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ (фиг. 3).

Таблица 4 - Характеристика сигнала напряжения в виде обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «обрыв» в первой стойке

| № положения вектора | Координаты начала вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | | Координаты конца вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Изменение | Эталон | Дефект | Изменение |
| $u_1$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 358; j0 | 0; j0 | -358; j0 |
| $u_2$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 179; j310 | 0; j310 | -179; j0 |
| $u_3$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -179; j310 | -179; j310 | без измен. |
| $u_4$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -358; j0 | -358; j0 | без измен. |
| $u_5$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -179; -j310 | -179; -j310 | без измен. |
| $u_6$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 179; -j310 | 0; -j310 | -179; j0 |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» в первой стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 40 процентов. По сравнению с типом дефекта верхнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» в первой стойке, количество увеличивших амплитуду относительно основной частоты высших гармоник в частотном спектре сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, как показано

в таблице 5, расширяется.

Таблица 5 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «обрыв» в первой стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник напряжения $U_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $U_a$ | $U_b$ | $U_c$ |
| 0 | 0 | 45,3 | 0 | 2,2 | 0 | 2,4 | +45,3 | +2,2 | +2,4 |
| 100 | 1,3 | 62,6 | 0,8 | 2,8 | 0,8 | 3,8 | +61,3 | +2 | +3 |
| 850 | 0,5 | 109,2 | 0,7 | 5 | 0,6 | 6,4 | +108,7 | +4,3 | +5,8 |
| 900 | 31,8 | 93,7 | 30,7 | 33,8 | 30,7 | 26,5 | +61,9 | +3,1 | -4,2 |
| 950 | 0,2 | 350,8 | 0,9 | 16,6 | 0,8 | 20 | +350,6 | +15,7 | +19,2 |
| 1000 | 0,1 | 626,6 | 0 | 31,4 | 0 | 33,7 | +626,5 | +31,4 | +33,7 |
| 1050 | 0,6 | 425,4 | 0,8 | 20,4 | 0,9 | 24 | +424,8 | +19,6 | +23,1 |
| 1100 | 31,6 | 221,9 | 31 | 19,4 | 31 | 43,4 | +190,3 | -11,6 | +12,4 |
| 1150 | 0,3 | 168 | 0,5 | 8,1 | 0,6 | 9,4 | +167,7 | +7,6 | +8,8 |
| 1700 | 0 | 48 | 0,8 | 2,1 | 0,8 | 3,2 | +48 | +1,3 | +2,4 |
| 1800 | 0,6 | 121,2 | 1,2 | 6,6 | 1,2 | 6,1 | +120,6 | +5,4 | +4,9 |
| 1850 | 0,9 | 195,8 | 0,5 | 10 | 0,5 | 10,3 | +194,9 | +9,5 | +9,8 |
| 1900 | 0 | 345,5 | 0,2 | 17 | 0,2 | 18,9 | +345,5 | +16,8 | +18,7 |
| 1950 | 19,6 | 490,2 | 19,4 | 25,5 | 19,4 | 38 | +470,6 | +6,1 | +18,6 |
| 2000 | 0 | 556,4 | 0,6 | 28,5 | 0,6 | 29,3 | +556,4 | +27,9 | +28,7 |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» в первой стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 5 процентов. Для спектра сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ происходят аналогичные спектру сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «обрыв» в первой стойке изменения в составе высших гармоник.

Таблица 6 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ при дефекте верхнего силового полупроводникового ключа «обрыв» в первой стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник тока $I_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $I_a$ | $I_b$ | $I_c$ |
| 0 | 0 | 67,2 | 0 | 3,2 | 0 | 3,4 | +67,2 | +3,2 | +3,4 |
| 100 | 0,7 | 38,4 | 0,5 | 1,6 | 0,5 | 2,2 | +37,7 | +1,1 | +1,7 |
| 150 | 0,1 | 6,7 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | +6,6 | 0 | +0,3 |
| 850 | 0 | 8 | 0 | 0,3 | 0 | 0,4 | +8 | +0,3 | +0,4 |
| 900 | 2,2 | 6,5 | 2,1 | 2,6 | 2,1 | 1,9 | +4,3 | +0,5 | -0,2 |
| 950 | 0 | 25,6 | 0 | 1,1 | 0 | 1,4 | +25,6 | +1,1 | +1,4 |
| 1000 | 0 | 42,8 | 0 | 2 | 0 | 2,1 | +42,8 | +2 | +2,1 |
| 1050 | 0 | 28 | 0 | 1,3 | 0 | 1,5 | +28 | +1,3 | +1,5 |
| 1100 | 1,8 | 13,2 | 1,8 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | +11,4 | -0,6 | +0,6 |
| 1150 | 0 | 9,4 | 0 | 0,4 | 0 | 0,5 | +9,4 | +0,4 | +0,5 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1850 | 0 | 7,2 | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | +7,2 | +0,3 | +0,3 |
| 1900 | 0 | 12,5 | 0 | 0,6 | 0 | 0,6 | +12,5 | +0,6 | +0,6 |
| 1950 | 0,6 | 17 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 1,3 | +16,4 | +0,1 | +0,7 |
| 2000 | 0 | 18,4 | 0 | 0,9 | 0 | 0,9 | +18,4 | +0,9 | +0,9 |

Таким образом, описываемое состояние характеризуется увеличением амплитуд выделенных высших гармоник как в сигналах трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и в сигналах трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$. Амплитуды гармоник сигнала напряжения $U_a$ получают кратное увеличение практически на всех выделенных в таблице 5 частотах, по сравнению с амплитудами тех же гармоник сигналов напряжения $U_b$ и $U_c$. Амплитуды выделенных в таблице 6 частот высших гармоник сигнала тока $I_a$ аналогично с сигналом напряжения $U_a$ увеличиваются больше, по сравнению с такими же частотами высших гармоник сигналов тока $I_b$ и $I_c$. Наличие изменений в амплитудах гармоник как в сигналах трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и в сигналах трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ такого типа является одним из признаков наличия дефекта верхнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» в первой стойке.

Состояние двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 2 при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа 1 «короткое замыкание» во второй стойке, при котором нижний силовой полупроводниковый ключ 1 во второй стойке непрерывно находится в состоянии «открыт», оценивается положениями на векторно-пространственной диаграмме обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в координатах d-q с характеристиками изменения координат начала и конца этого вектора для эталонного и дефектного состояния в таблице 7, а также качественной характеристикой векторно-пространственной диаграммы обобщенного вектора тока статора $I_s$ и характеристиками амплитуд высших гармоник сигналов трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 для эталонного и дефектного состояния в таблице 8 и 9.

Состояние характеризуется смещением координаты начала обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ для положений $u_2$, $u_4$ и $u_6$, изменением длины обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в положениях $u_3$ и $u_6$, а также смещение координат конца обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в положениях $u_2$, $u_3$ и $u_4$ на 89 В, 90 В и 90 В соответственно вправо по оси $u_d$ и на j155 В вниз по оси $u_q$ комплексной плоскости. Векторно-пространственная диаграмма тока статора $I_s$ в рассматриваемом состоянии изменяет форму с круга на овал и смещается в зону с положительными вещественными значениями по оси $i_d$ и отрицательными мнимыми значениями по оси $i_q$ комплексной плоскости относительно эталонного состояния (фиг. 4).

Таблица 7 - Характеристика сигнала напряжения в виде обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» во второй стойке

| № положения вектора | Координаты начала вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | | Координаты конца вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Изменение | Эталон | Дефект | Изменение |
| $u_1$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 358; j0 | 358; j0 | без измен. |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $u_2$ | 0; j0 | 89; -j155 | +89; -j155 | 179; j310 | 268; j155 | +89; -j155 |
| $u_3$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -179; j310 | -89; j155 | +90; -j155 |
| $u_4$ | 0; j0 | 89; -j155 | +89; -j155 | -358; j0 | -268; -j155 | +90; -j155 |
| $u_5$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -179; -j310 | -179; -j310 | без измен. |
| $u_6$ | 0; j0 | 89; -j155 | +89; -j155 | 179; -j310 | 179; -j310 | без измен. |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа 1 «короткое замыкание» во второй стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 5 процентов. Существенное изменение амплитуд высших гармоник сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, как показано в таблице 8, происходит на частотах 0 Гц, 1000 Гц и 1850 Гц.

Таблица 8 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» во второй стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник напряжения $U_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $U_a$ | $U_b$ | $U_c$ |
| 0 | 0 | 18,2 | 0 | 50,4 | 0 | 18,1 | +18,2 | +50,4 | +18,1 |
| 900 | 31,8 | 31,7 | 30,7 | 30,6 | 30,7 | 31 | -0,1 | -0,1 | +0,3 |
| 1000 | 0,1 | 11,3 | 0,1 | 31 | 0,1 | 11 | +11,2 | +30,9 | +10,9 |
| 1100 | 31,6 | 31,5 | 31 | 30,9 | 31 | 31,2 | -0,1 | -0,1 | +0,2 |
| 1850 | 0,9 | 4,5 | 0,5 | 10,3 | 0,5 | 3 | +3,6 | +9,8 | +2,5 |
| 1950 | 19,6 | 19,5 | 19,4 | 19,3 | 19,4 | 19,5 | -0,1 | -0,1 | -0,1 |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа 1 «короткое замыкание» во второй стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 2 процентов. Существенное изменение амплитуд высших гармоник сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$, как показано в таблице 9, происходит на частотах 0 Гц и 1000 Гц.

Таблица 9 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» в нижней стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник тока $I_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $I_a$ | $I_b$ | $I_c$ |
| 0 | 0 | 29,3 | 0 | 81 | 0 | 29,1 | +29,3 | +81 | +29,1 |
| 900 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1000 | 0 | 0,7 | 0 | 1,9 | 0 | 0,7 | +0,7 | +1,9 | +0,7 |
| 1100 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 0 | 0 | 0 |

Таким образом, описываемое состояние характеризуется увеличением амплитуд выделенных высших гармоник как в сигналах трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и в сигналах трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$, при этом амплитуды этих гармоник не превышают амплитуду основной частоты сигналов, а также имеют большее увеличение амплитуды в той фазе, в которой произошло изменение состояния силового полупроводникового ключа 1.

Состояние двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 2 при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» во второй стойке, при котором верхний силовой полупроводниковый ключ 1 во второй стойке непрерывно находится в состоянии «закрыт», оценивается положениями на векторно-пространственной диаграмме обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в координатах d-q с характеристиками изменения координат начала и конца этого вектора для эталонного и дефектного состояния в таблице 10, а также качественной характеристикой векторно-пространственной диаграммы обобщенного вектора тока статора $I_s$ и характеристиками амплитуд высших гармоник сигналов трехфазных напряжений статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ и токов статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 для эталонного и дефектного состояния в таблице 11 и 12.

Состояние характеризуется изменением координат конца обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ в положениях $u_1$, $u_5$ и $u_6$. Положения $u_1$ и $u_5$ характеризуются смещением координаты конца обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ влево на 90 В и 89 В по оси $u_d$ соответственно, а для положения $u_6$ на 179 В в том же направлении по той же оси и на j310 В вверх по оси $u_q$ комплексной плоскости. Векторно-пространственная диаграмма обобщенного вектора тока статора $I_s$ в рассматриваемом состоянии из формы круга эталонного состояния вырождается в прямую линию, расположенную в зонах с положительными вещественными значениями по оси $i_d$ и положительными мнимыми значениями по оси $i_q$, а также с отрицательными вещественными значениями по оси $i_d$ и отрицательными мнимыми значениями по оси $i_q$ комплексной плоскости с небольшими колебаниями значений вектора тока в сторону положений $u_2$, $u_3$ и $u_4$ обобщенного вектора напряжения (фиг. 5).

Таблица 10 - Характеристика сигнала напряжения в виде обобщенного вектора напряжения статора $U_s$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «обрыв» во второй стойке

| № положения вектора | Координаты начала вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | | Координаты конца вектора напряжения статора $U_s$ на векторно-пространственной диаграмме, В | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Изменение | Эталон | Дефект | Изменение |
| $u_1$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 358; j0 | 268; j155 | -90; +j155 |
| $u_2$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 179; j310 | 0; j0 | без измен. |
| $u_3$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -179; j310 | 0; j0 | без измен. |
| $u_4$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -358; j0 | 0; j0 | без измен. |
| $u_5$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | -179; -j310 | -268; -j155 | -89; +j155 |
| $u_6$ | 0; j0 | 0; j0 | без измен. | 179; -j310 | 0; j0 | -179; +j310 |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» во второй стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 40 процентов. По сравнению с типом дефекта нижнего силового полупроводникового ключа «короткое замыкание» во второй стойке, количество увеличивших амплитуду относительно основной частоты высших гармоник в частотном спектре сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, как показано в таблице 11, расширяется.

Таблица 11 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «обрыв» во второй стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник напряжения $U_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник напряжения $U_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $U_a$ | $U_b$ | $U_c$ |
| 0 | 0 | 2,4 | 0 | 44,7 | 0 | 2,2 | +2,4 | +44,7 | +2,2 |
| 100 | 1,3 | 3,3 | 0,8 | 63,5 | 0,8 | 3,7 | +2 | +62,7 | +2,9 |
| 850 | 0,5 | 4,7 | 0,7 | 89,1 | 0,6 | 4,6 | +4,2 | +88,4 | +4 |
| 900 | 31,8 | 28,1 | 30,7 | 92,3 | 30,7 | 34,6 | -3,7 | +61,6 | +3,9 |
| 950 | 0,2 | 19 | 0,8 | 361,5 | 0,8 | 18,7 | +18,8 | +360,7 | +17,9 |
| 1000 | 0,1 | 34,3 | 0,1 | 631,4 | 0,1 | 31,8 | +34,2 | +631,3 | +31,7 |
| 1050 | 0,6 | 22,7 | 0,8 | 430,4 | 0,9 | 22,3 | +22,1 | +429,6 | +21,4 |
| 1100 | 31,6 | 43 | 31 | 200,8 | 31 | 21 | +11,4 | +169,8 | -10 |
| 1150 | 0,3 | 9,5 | 0,5 | 168 | 0,6 | 8 | +9,2 | +167,5 | +7,4 |
| 1700 | 0 | 2,1 | 0,8 | 30,3 | 0,8 | 1 | +2,1 | +29,5 | +0,2 |
| 1800 | 0,6 | 5,8 | 1,2 | 93 | 1,2 | 4 | +5,2 | +91,8 | +2,8 |
| 1850 | 0,9 | 9,7 | 0,5 | 166,4 | 0,5 | 7,7 | +8,8 | +165,9 | +7,2 |
| 1900 | 0 | 20 | 0,2 | 370,6 | 0,2 | 18,8 | +20 | +370,4 | +18,6 |
| 1950 | 19,6 | 39,3 | 19,4 | 517,6 | 19,4 | 27,2 | +19,7 | +498,2 | +7,8 |
| 2000 | 0 | 31 | 0,6 | 578 | 0,6 | 29,5 | +31 | +577,4 | +28,9 |

Сравнение эталонных спектральных характеристик для сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 со спектральными характеристиками сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ электродвигателя с рабочим механизмом 6 при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» во второй стойке двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты 3 проводится для таких высших гармоник, чья амплитуда относительно основной гармоники в спектре сигналов дефектного состояния больше 5 процентов. Для спектра сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ происходят аналогичные спектру сигналов трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «обрыв» во второй стойке изменения в составе высших гармоник.

Таблица 12 - Спектральные характеристики сигналов трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ при дефекте нижнего силового полупроводникового ключа «обрыв» во второй стойке

| Частота высшей гармоники f, Гц | Амплитуды гармоник тока $I_a$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_b$, % от основной | | Амплитуды гармоник тока $I_c$, % от основной | | Изменение, % от основной | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | Эталон | Дефект | $I_a$ | $I_b$ | $I_c$ |
| 0 | 0 | 3,4 | 0 | 67,1 | 0 | 3,2 | +3,4 | +67,1 | +3,2 |
| 100 | 0,7 | 1,8 | 0,5 | 38,2 | 0,6 | 2,1 | +1,1 | +37,7 | +0,6 |
| 150 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 6,2 | 0,2 | 0,4 | 0 | +6 | +0,2 |
| 850 | 0 | 0,3 | 0 | 6,5 | 0 | 0,3 | +0,3 | +6,5 | +0,3 |
| 900 | 2,2 | 2 | 2,1 | 6,7 | 2,1 | 2,4 | -0,2 | +4,6 | +0,3 |
| 950 | 0 | 1,3 | 0 | 26,3 | 0 | 1,3 | +1,3 | +26,3 | +1,3 |
| 1000 | 0 | 2,2 | 0 | 43,1 | 0 | 2 | +2,2 | +43,1 | +2 |
| 1050 | 0 | 1,4 | 0 | 28,3 | 0 | 1,4 | +1,4 | +28,3 | +1,4 |
| 1100 | 1,8 | 2,4 | 1,8 | 11,9 | 1,8 | 1,2 | +0,6 | +10,1 | -0,6 |
| 1150 | 0 | 0,5 | 0 | 9,4 | 0 | 0,4 | +0,5 | +9,4 | +0,4 |
| 1850 | 0 | 0,3 | 0 | 6,1 | 0 | 0,3 | +0,3 | +6,1 | +0,3 |
| 1900 | 0 | 0,6 | 0 | 13,4 | 0 | 0,6 | +0,6 | +13,4 | +0,6 |
| 1950 | 0,6 | 1,3 | 0,6 | 17,8 | 0,6 | 0,8 | +0,7 | +17,2 | +0,2 |
| 2000 | 0 | 0,9 | 0 | 19,1 | 0 | 0,9 | +0,9 | +19,1 | +0,9 |

Таким образом, описываемое состояние характеризуется увеличением амплитуд выделенных высших гармоник как в сигналах трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и в сигналах трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$. Амплитуды гармоник сигнала напряжения $U_b$ получают кратное увеличение практически на всех выделенных в таблице 11 частотах, по сравнению с амплитудами тех же гармоник сигналов напряжения $U_a$ и $U_c$. Амплитуды, выделенных в таблице 12 частот высших гармоник сигнала тока $I_b$ аналогично с сигналом напряжения $U_b$ увеличиваются больше, по сравнению с такими же частотами высших гармоник сигналов тока $I_a$ и $I_c$. Наличие изменений в амплитудах гармоник как в сигналах трехфазного напряжения статора $U_a$, $U_b$ и $U_c$, так и в сигналах трехфазного тока статора $I_a$, $I_b$ и $I_c$ такого типа является одним из признаков наличия дефекта нижнего силового полупроводникового ключа 1 «обрыв» во второй стойке.

Способ оценки технического состояния силовых полупроводниковых ключей инвертора в электроприводах переменного тока, включающий анализ координат обобщенных векторов напряжения и тока статора на векторно-пространственных диаграммах и спектров гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя быстрым преобразованием Фурье, согласно которому делается вывод о техническом состоянии каждого силового полупроводникового ключа инвертора, отличающийся тем, что непрерывно измеряют сигналы трехфазного напряжения и тока статора датчиками напряжения и тока, с выходов которых их передают на входы блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора и блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, в которых математическим преобразованием Парка рассчитывают сигналы обобщенных векторов напряжения статора и тока статора электродвигателя в алгебраической форме комплексных чисел и быстрым преобразованием Фурье формируют сигналы частотных составляющих сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя, с выходов которых их передают на вход блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственных диаграммам напряжения и тока статора и блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов

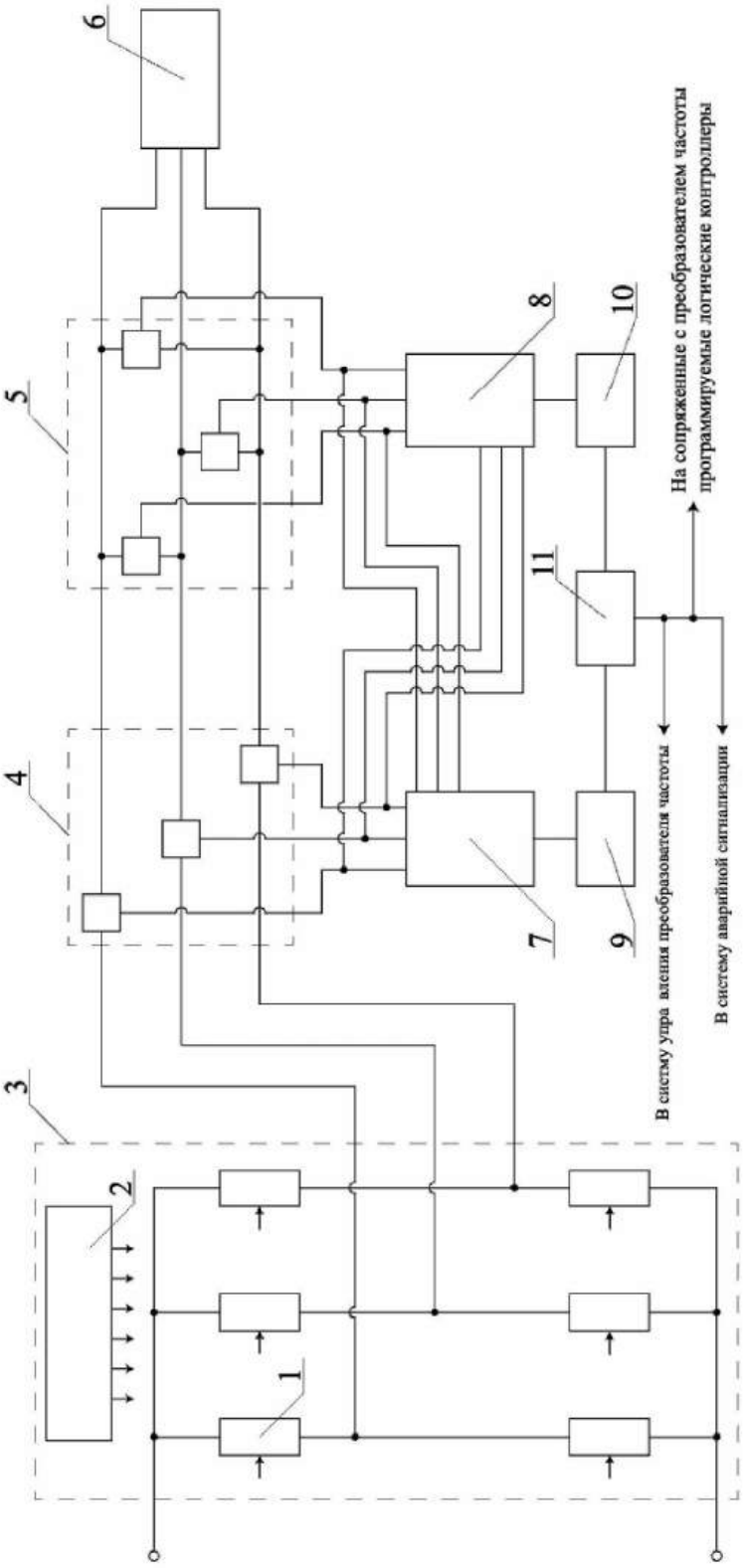
напряжения и тока статора, в которых формируются сигналы состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, затем проводят сравнение векторно-пространственных диаграмм обобщенного вектора напряжения статора и тока статора электродвигателя при неноминальных параметрах с векторно-пространственными диаграммами обобщенного вектора напряжения статора и тока статора электродвигателя, соответствующими эталонному состоянию работы преобразователя, затем проводят сравнение частотных спектров трехфазных напряжений и токов электродвигателя при неноминальных параметрах с эталонными спектрами, относящимися к эталонному состоянию работы преобразователя, далее определяют сигналы рассогласования по векторно-пространственным диаграммам обобщенных векторов напряжения и тока статора электродвигателя и по спектру частотных составляющих сигналов трехфазного напряжения и тока статора электродвигателя, которые поступают на вход блок оценки технического состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, в котором на основе количественной и качественной оценки сигналов рассогласования формируют сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, который передается в систему управления преобразователем частоты, на сопряженные по аналоговым или дискретным каналам с преобразователем частоты программируемые логические контроллеры, интегрированные в общую систему SCADA предприятия и в систему аварийной сигнализации для самостоятельного останова электродвигателя системой управления при возникновении дефекта в силовых полупроводниковых ключах и уведомления оператора о предаварийных и аварийных ситуациях.

## (57) Формула изобретения

Способ оценки технического состояния силовых полупроводниковых ключей инвертора в электроприводах переменного тока, включающий регистрацию сигналов, пропорциональных фазным токам от датчиков тока, установленных в каждой фазе питающей сети, регистрацию сигналов кривых мгновенных значений фазных токов, сравнение гармоник фазных токов между собой, регистрацию мгновенных значений напряжения, поступающих с датчика напряжения, отличающийся тем, что вначале определяют эталонные характеристики работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, к которым относят векторно-пространственные диаграммы обобщенных векторов напряжения и тока статора и спектры гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом, затем спектры гармонических составляющих трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом рассчитывают быстрым преобразованием Фурье мгновенных значений трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом, непрерывного измерения сигналов трехфазного напряжения и тока статора, далее измеренные сигналы трехфазных напряжений и токов статора электродвигателя с рабочим механизмом с выхода датчиков напряжения и датчиков тока поступают на входы блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора и блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, сигналы, которые сформированы обобщенными векторами напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом, с выхода блока расчета обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока статора поступают на вход блока

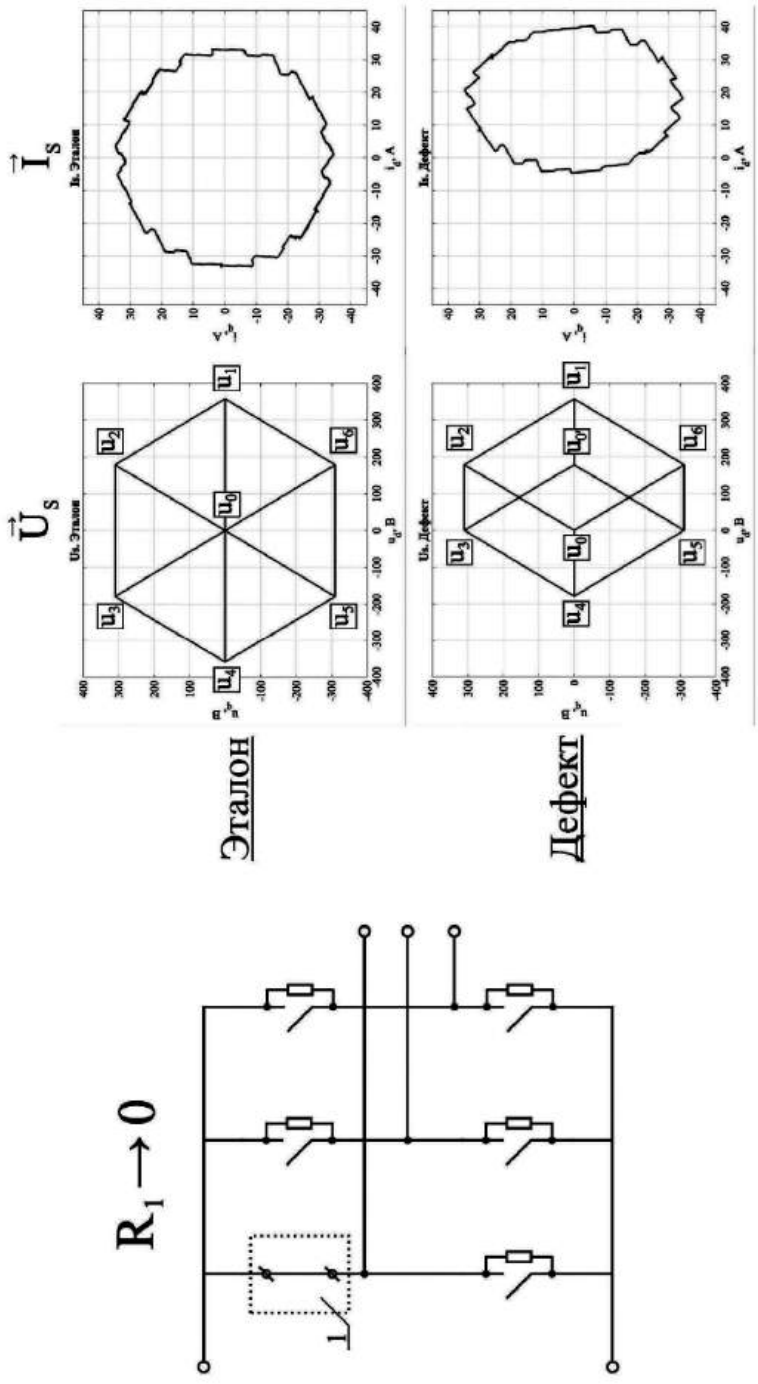
формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора, где векторно-пространственные диаграммы напряжения и тока статора на комплексной плоскости формируют сигналы состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, сигналы состояния процесса преобразования энергии силовыми полупроводниковыми ключами формируют в соответствии с полученными векторно-пространственными диаграммами напряжения статора $U_s$ и тока статора $I_s$ электродвигателя с рабочим механизмом в результате сравнения векторно-пространственных диаграмм при неноминальных параметрах с векторно-пространственными диаграммами, соответствующими эталонному состоянию работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, далее производят расчет сигнала рассогласования в блоке формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по векторно-пространственным диаграммам напряжения и тока статора, быстрое преобразование Фурье мгновенных значений трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом в блоке вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора формирует частотные составляющие сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом, затем с выхода блока вычисления частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора эти сигналы передают на вход блока формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, эти сигналы состояния работы силовых полупроводниковых ключей, в двухуровневом трехфазном мостовом автономном инверторе напряжения преобразователя частоты, формируют в соответствии с полученными спектрами сигналов трехфазных напряжений и токов электродвигателя с рабочим механизмом в результате сравнения спектров при неноминальных параметрах с эталонными спектрами, относящимися к эталонному состоянию работы двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, после этого, производя расчет сигнала рассогласования в блоке формирования сигналов состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты по спектру частотных составляющих сигналов напряжения и тока статора, на основе количественной и качественной оценки сигналов рассогласования, которые поступили на вход блока оценки технического состояния двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, формируют сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах двухуровневого трехфазного мостового автономного инвертора напряжения преобразователя частоты, полученный сигнал о наличии или отсутствии определенного типа дефекта в силовых полупроводниковых ключах передают в систему управления преобразователем частоты, на сопряженные по аналоговым или дискретным каналам с преобразователем частоты программируемые логические контроллеры, интегрированные в общую систему SCADA предприятия и в систему аварийной сигнализации, которая самостоятельно производит остановку электродвигателя и уведомляет оператора о предаварийных и аварийных ситуациях.

1


6
5
8
10
На сопряженные с преобразователем частоты программируемые логические контроллеры
11
4
7
9
В систему управления преобразователя частоты
В систему аварийной сигнализации
3
2
1

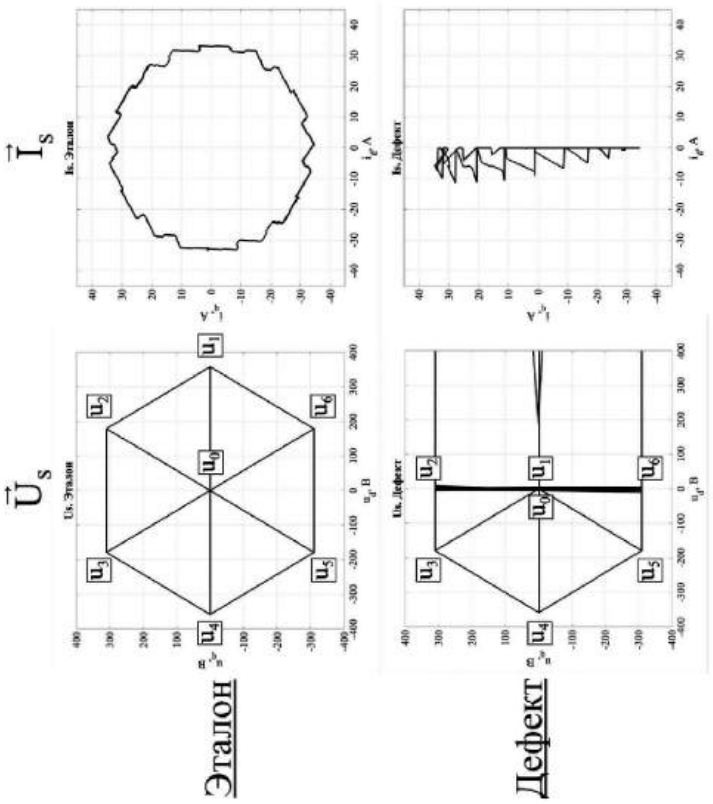
Фиг. 1

2



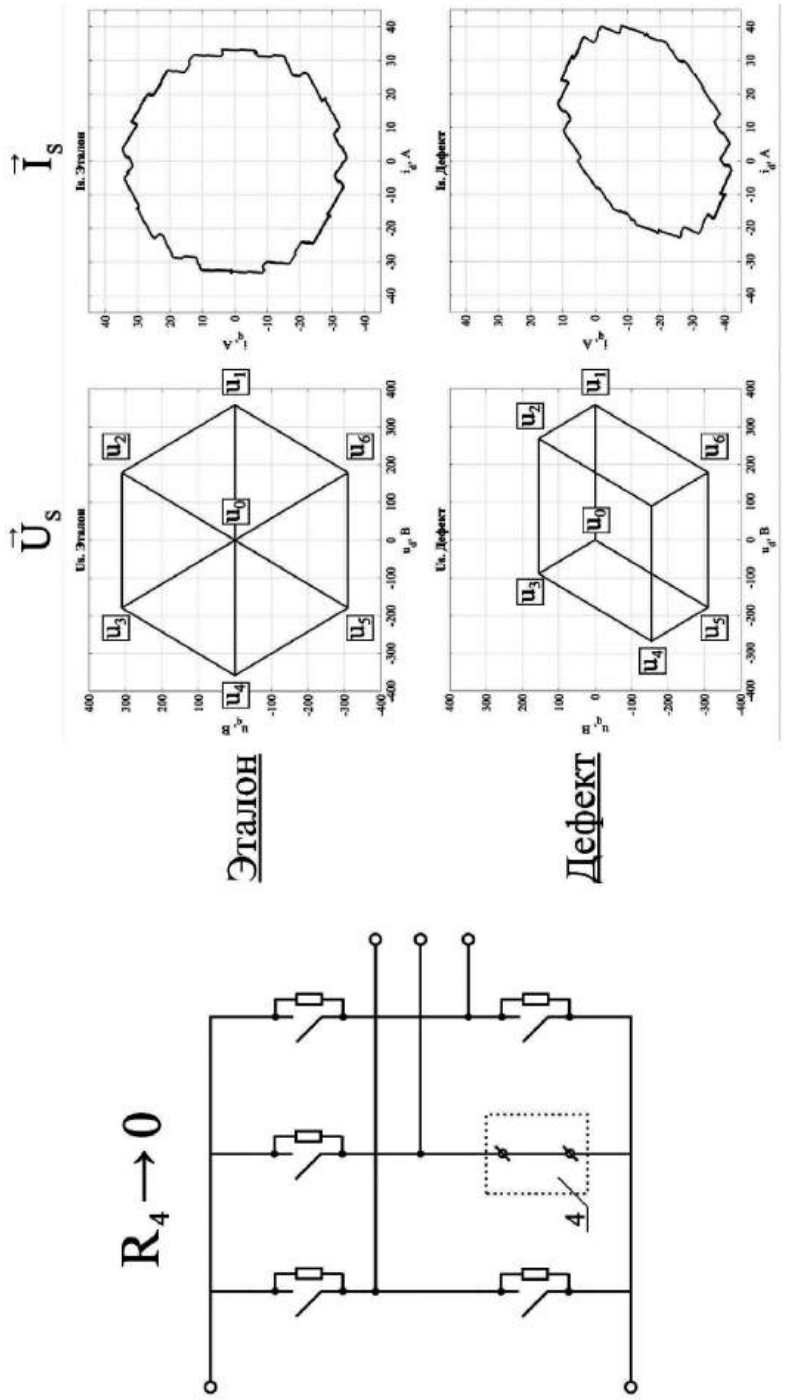

Фиг. 2

3

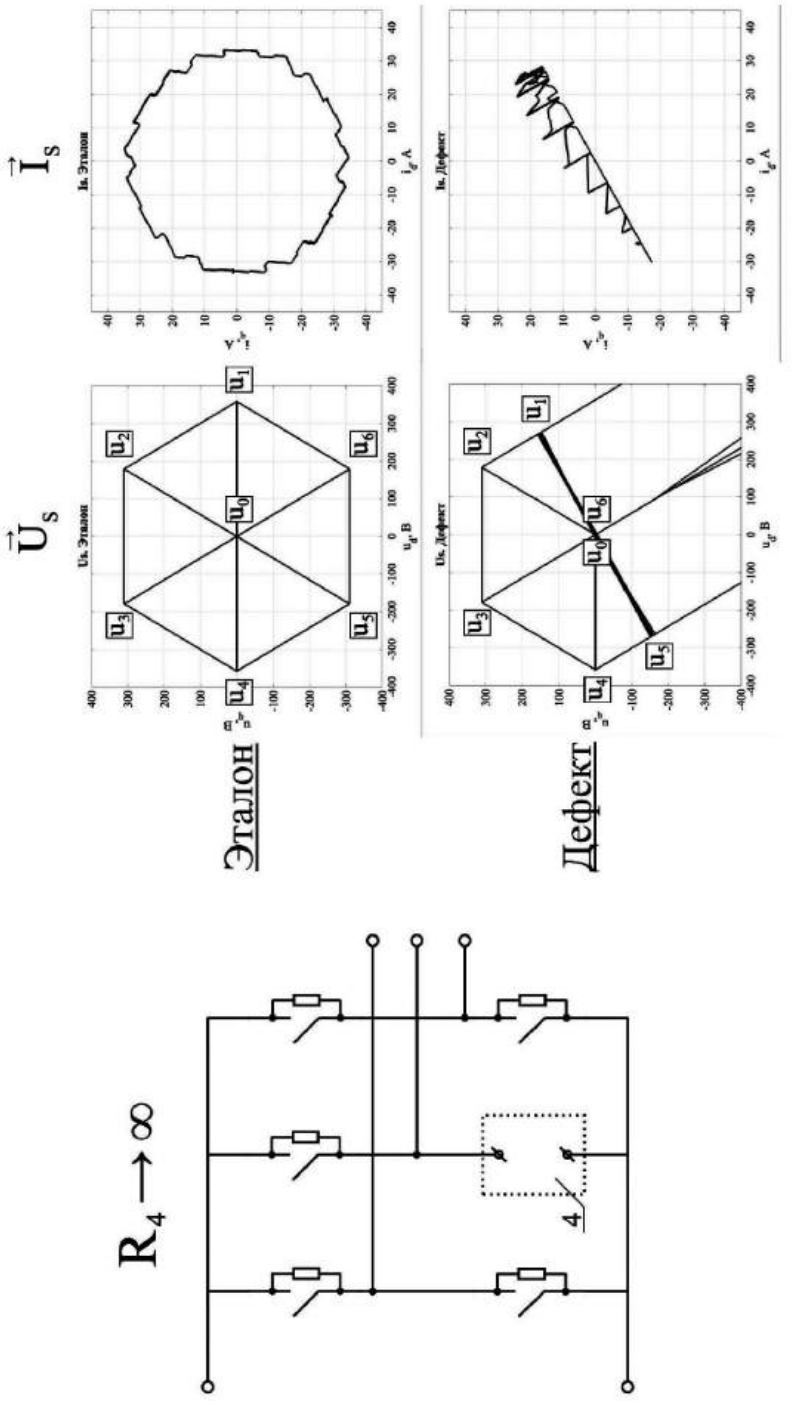



Фиг. 3

4




Фиг. 4




Фиг. 5