

УДК 621.311: 621.316

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ФИЛЬТРАЦИИ В МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

© 2021 М.В. Востриков², А.В. Данеев¹, К.В. Менакер², В.Н. Сизых¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

² Забайкальский институт железнодорожного транспорта –
филиал ФГБОУ ВО ИрГУПС, г. Чита, Россия

Статья поступила в редакцию 27.09.2021

В статье приводятся результаты научных исследований в области оценки надежности и безопасности работы запатентованного автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, интегрированного в состав типовой микропроцессорной системы релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока с целью соответствия показателям надежности и безопасности при ее эксплуатации. Работа устройства основана на предварительной фильтрации сигнала с помощью фильтра нижних частот, настроенного на частоту среза третьей гармоники, фиксации нулевых отметок времени, формировании управляющих импульсов, выпрямлении сигнала и последующем инвертировании с получением чистого выходного синусоидального сигнала по частоте, фазе и амплитуде совпадающего с измеренным сигналом, представляющим его первую гармонику. Для выполнения оценки надежности предложенного устройства фильтрации и выделения первой гармоники составлена модель надежности устройства на основе его принципиальной электрической схемы. Найдены значения базовой и эксплуатационной интенсивности отказов всех входящих в принципиальную схему устройства элементов с учетом правоучастников коэффициентов эксплуатации, приемки, электрической нагрузки и т.д. Определена вероятность безотказной работы всего устройства за нормируемый период эксплуатации 20 лет, в том числе, с учетом самого неблагоприятного случая - последовательного соединения всех входящих в расчетную модель надежности элементов. Определен уровень безопасности эксплуатации устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, предложены варианты повышения данного показателя за счет введения в схему дополнительного схемного контроля и реализации подсистемы электропитания устройства на основе схемы безопасного декодера. Результаты проведенных исследований подтвердили соответствие разработанного устройства требований надежности и безопасности, предъявляемым к устройствам железнодорожных микропроцессорных релейных защит, а безопасность работы предлагаемого устройства в составе терминала релейной защиты обеспечена соответствующими схемотехническими решениями.

Ключевые слова: Фазовая автоподстройка частоты, микропроцессорная релейная защита, фильтрация, гармоника, трансформатор, инвертор, выпрямитель, интегральная микросхема, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, надежность, безопасность.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-126-139

*Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта НТС ЗабИЖТ № 109-гр от 28.04.2021 г.
«Создание и исследование полезной модели автоматизированного микропроцессорного устройства
дистанционной защиты фидеров контактной сети с элементами обучаемости».*

ВВЕДЕНИЕ

В современных микропроцессорных устройствах релейной защиты реализуется цифровой метод выделения первой гармоники измеряе-

Востриков Максим Викторович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение».

E-mail: vostrikov_m@zab.megalink.ru

Данеев Алексей Васильевич доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов». E-mail: daneev@mail.ru

Менакер Константин Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение».

E-mail: menkot@mail.ru

Сизых Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов». E-mail: sizykh_yn@mail.ru

мого сигнала тока и напряжения, основанный на дискретизации входного сигнала и быстром преобразовании Фурье. Значимыми недостатками данного метода являются сложность его технической реализации и значительная погрешность, возникающая при выделении первой гармоники вследствие дискретизации сигнала и многочисленных аналитических преобразований. В работах [1, 2, 3] были представлены результаты разработки автоматизированного устройства на основе схемы ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты), позволяющего осуществлять непосредственное выделение первой гармоники из измеряемого сигнала с минимальной погрешностью фазы, частоты и амплитуды. В данном исследовании приводятся результаты

проверки разработанного устройства на надежность и безопасность его эксплуатации в случае совместного функционирования с микропроцессорной системой релейной защиты фидеров контактной сети (ЦЗА – 27,5 – ФКС (ФТС)).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 представлена принципиальная схема автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, реализованная на логических микросхемах.

Порядок работы схемы основан на предварительной фильтрации сигнала, фиксации нулевых отметок времени, формировании управляющих импульсов, выпрямлении сигнала и последующем инвертировании с получением чистого выходного синусоидального сигнала по частоте, фазе и амплитуде совпадающего с измеренным сигналом, представляющим, по сути, его первую гармонику.

Вторичная обмотка L2 трансформатора T1 гальванической развязки и предварительно масштабированного входных сигналов тока или напряжения подключается к фильтру нижних частот L_f, C_f [4], настроенному на частоту среза третьей гармоники 150 Гц, который позволяет исключить составляющие высших гармоник и значительно повысить точность фазы восстановленной первой гармоники на выходе устройства. Сигнал с вторичной обмотки L3 трансформатора T1 выпрямляется на диодном мосте VD7-VD10 и слаживается конденсатором C10. Выпрямленный сигнал соответствующей амплитуды подается в качестве питающего напряжения на среднюю точку трансформатора T2 и попеременно пропускается через его полубобмотки при поочередном открытии транзисторных ключей VT1 и VT2, образуя в выходном

колебательном контуре синусоидальный сигнал первой гармоники.

В рассматриваемой схеме напряжение с выхода фильтра нижних частот приложено к двум параллельно соединенным токовым цепям: цепь R1, R2 и цепь R3, C1, образующим фазовращатель сигнала. В цепи синусоидального переменного тока с последовательно включенными резистором и конденсатором напряжение на конденсаторе отстает по фазе на 90 градусов от напряжения на резисторе. Сумма векторов падения напряжения на резисторах R1 + R2 с одинаковыми номиналами образует диаметр окружности, а точка соединения R1 и R2 через элементы фильтра будет являться центром этой окружности. Точка соединения R3 и C1 лежит на этой окружности, а при изменении номинала резистора R2 - перемещается именно по этой окружности, таким образом, чтобы угол между векторами напряжения на C1 и R3 оставался прямым, т.е. равным 90 градусов. Получается, что вектор напряжения между центром окружности (точкой соединения резисторов R1, R2 через элементы фильтра) и вершиной прямого угла (точкой соединения R3 и C1) поворачивается на какой-то угол относительно линии диаметра вектора входного напряжения, снимаемого с выхода фильтра, оставаясь неизменным по величине (амплитуде).

Таким образом происходит изменение фазы измеряемого сигнала, который далее через резистор R4 и конденсатор C4 (в виде синусоидального напряжения величиной до 110 вольт) подается на вход следующего чувствительного элемента системы подстройки фазы - триггера Шмитта (элемент D1.1). Диоды VD1, VD2 ограничивают величину этого напряжения от +5,5 до –0,5 В.

При увеличении сигнала с фазовращателя от нуля (т.е. при росте положительной полуволны синусоиды) триггер Шмитта на своем выходе

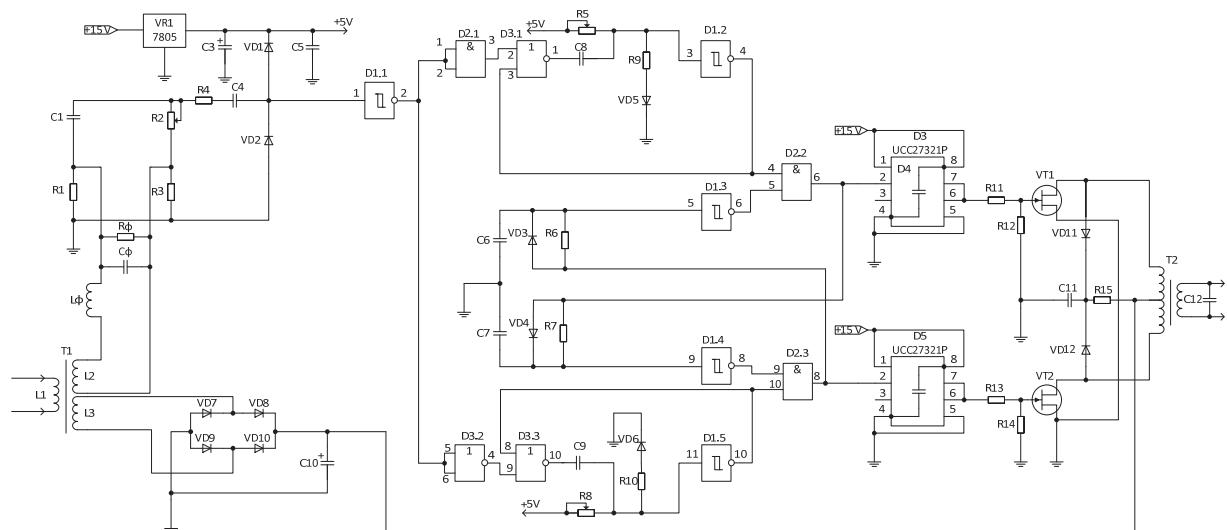


Рис. 1. Схема устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, реализованной на логических микросхемах

скачком изменяет сигнал с логической “1” на “0”. При спаде сигнала с фазовращателя от положительных значений к нулю и далее – в отрицательную область, триггер Шмитта вновь скачком изменяет сигнал на своем выходе, но теперь уже с логического “0” на “1”.

На выходе 2 элемента D1.1 вместо исходной двухполярной по отношению к “земле” синусоиды входного сигнала с размахом амплитуд до 110 вольт получаем однополярный меандр с размахом амплитуд от 0,3 до 4,7 В.

Импульсы с выхода D1.1 поступают через элементы D2.1 (повторитель) и D3.2 (инвертор) на два одинаковых, но работающих в противофазе канала управления длительностью импульсов первичной обмотки трансформатора T2 инвертора. Резисторами R5 и R8 устанавливается длительность импульсов силового тока через первичную обмотку трансформатора T2 инвертора в “прямом” и “обратном” направлении. В таком варианте схема отрабатывает заданную длительность импульсов тока через первичную обмотку трансформатора T2 инвертора в зависимости от изменений частоты колебаний в первичной обмотке измерительного трансформатора T1.

Длительность импульсов управления и, соответственно, длительность токовых импульсов «накачки» может регулироваться резисторами R5 и R8 в диапазоне от 5% до 90% длительности полупериода собственных колебаний на выходе измерительного трансформатора T1.

Каналы преобразования положительной и отрицательной полуволны схемы ФАПЧ полностью аналогичны, потому рассмотрим их работу на примере верхнего (на рис. 1) канала.

Одновибратор выполнен на элементах D3.1 (два логических элемента «ИЛИ-НЕ») и D1.2 (триггер Шмитта). При логическом уровне «0» на входе 2 элемента D3.1 на его выходе 1 присутствует логическая «1», и конденсатор C8 заряжен до напряжения примерно 3,2 В в полярности «+» на левой и «-» на правой его обкладках (см. рис. 1). Делителем R5, R9, VD5 напряжение на входе 3 элемента D1.2 установлено выше, чем верхний порог срабатывания триггера Шмитта, поскольку на выходе этого элемента в настоящий момент присутствует логический «0». Этот же уровень сигнала устанавливается также при заряде конденсатора C8 в рассмотренной полярности.

При поступлении на вход 2 элемента D3.1 с выхода 3 элемента D2.1 логической “1” меандр на выходе 1 элемента D3.1 появляется логический «0». При этом левая обкладка конденсатора C8 скачком изменяет свой потенциал примерно до +0,3 В, а правая – до -2,9 В относительно «земли». Этот потенциал переключает элемент D1.2 (триггер Шмитта) в состояние логической «1» на его выходе 4. Сигнал логической «1» появляется и на выходе 3 элемента D3.1. Схема встает на самоподхват

и состояние элемента D3.1 не может изменяться до тех пор, пока на его входе 3 будет сигнал с уровнем логической “1” независимо от сигнала на его входе 2. А этот сигнал будет неизменным до тех пор, пока конденсатор C8 не перезаряжается через резистор R5 до напряжения на своей правой обкладке, равного порогу переключения триггера Шмитта. Т.е. схема нечувствительна к помехе, которая может появиться на её входе во время действия длительности выходного сигнала логической «1», определяющего время открытого состояния выходного силового ключа. Так в схеме устройства, совмещенно с формированием длительности импульса управления, реализована первая ступень защиты от помех.

Изменяя величину резистора R5, можно менять длительность логического сигнала «1» на выходе 4 триггера Шмитта и, соответственно, длительность импульса тока на первичной обмотке трансформатора T2 инвертора.

Вторая ступень защиты реализована по принципу создания гарантированной паузы между окончанием открывающего транзистор импульса в одном канале и временем возможного появления импульса, открывающего транзистор в другом канале. Время этой паузы должно выбираться несколько большим, чем время самого длительного из процессов, связанных с закрыванием транзистора и указанного в технических характеристиках транзистора.

Сигналы с выходов элементов D2.2 и D2.3 поступают на драйверы управления силовыми ключами VT1 и VT2. Элементы D1.3, D1.4, а также R6, R7, C6, C7, VD3, VD4 создают гарантированную паузу между управляющими логическими сигналами «1» на выходах элементов D2.2 и D2.3, исключая прохождение сквозного тока через силовые транзисторы плеча. Переменный резистор R2 обеспечивает настройку в широком диапазоне сдвига фазы сигнала на входе элемента D1.1 относительно фазы сигнала на обмотке L2, что позволяет смещать фазу токовых импульсов накачки через первичные обмотки трансформатора T2 относительно фазы колебаний в измерительном трансформаторе T1, осуществляя первичную заводскую калибровку разработанного устройства путем подачи эталонного сигнала. При изменении фазы и (или) частоты сигнала на обмотке измерительного трансформатора соответственно сдвигается фаза и (или) частота импульсов накачки.

Практическое применение схемы автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, представленной на рис. 1, показало высокую эффективность ее работы, подтвержденную результатами имитационного моделирования (рис. 2, 3).

В настоящее время появилась целая линейка недорогих и удобных схем фазовой автоподстрой-

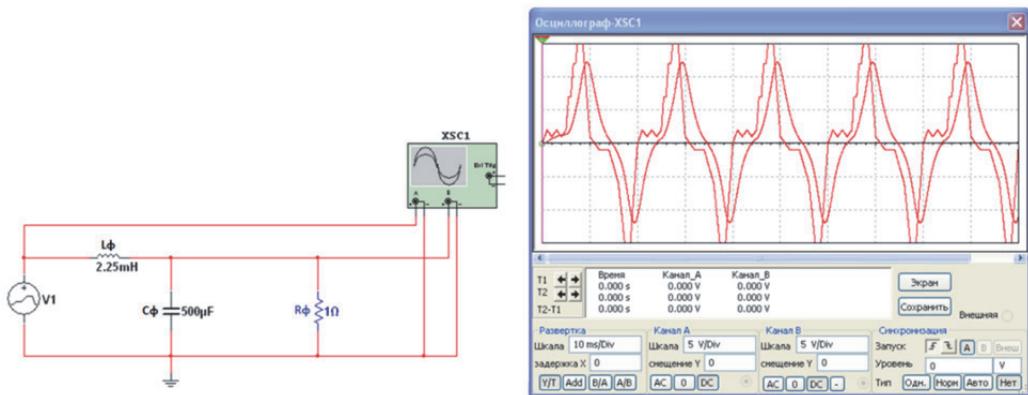


Рис. 2. Схема предвходного фильтра низких частот автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники и осциллограммы на входе и выходе фильтра

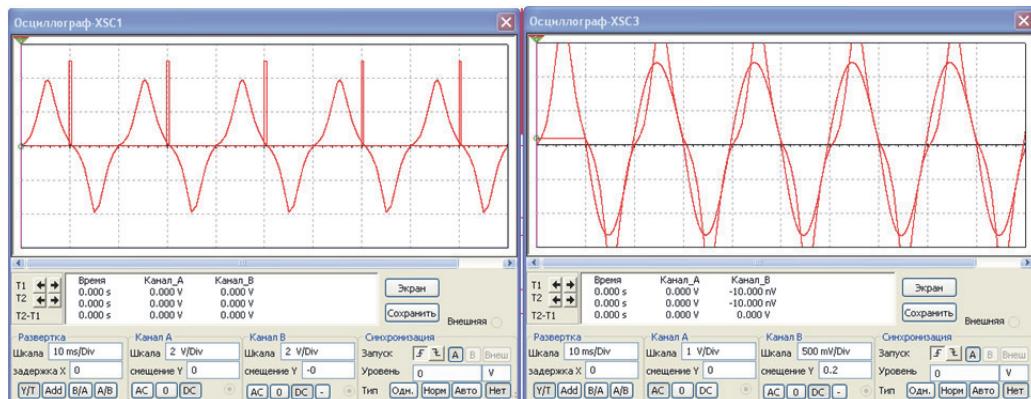


Рис. 3. Осциллограммы входного и выходного (первая гармоника) сигналов схемы устройства фильтрации и выделения первой гармоники, реализованной на логических микросхемах

ки частоты в интегральном исполнении. В связи с этим была реализована полезная модель автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе интегральной микросхемы ФАПЧ марки 74HC4046 [1], принципиальная схема которого представлена на рис. 4.

Результаты работы полезной модели в виде соответствующих осциллограмм входного тока и выделенной первой гармоники представлены на рис. 5.

Произведем оценку надежности и безопасности разработанной схемы автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе специализированной интегральной микросхемы ФАПЧ (74HC4046). Для выполнения расчета составим модель надежности устройства фильтрации и выделения первой гармоники (рис. 6) на основе его принципиальной электрической схемы (рис.

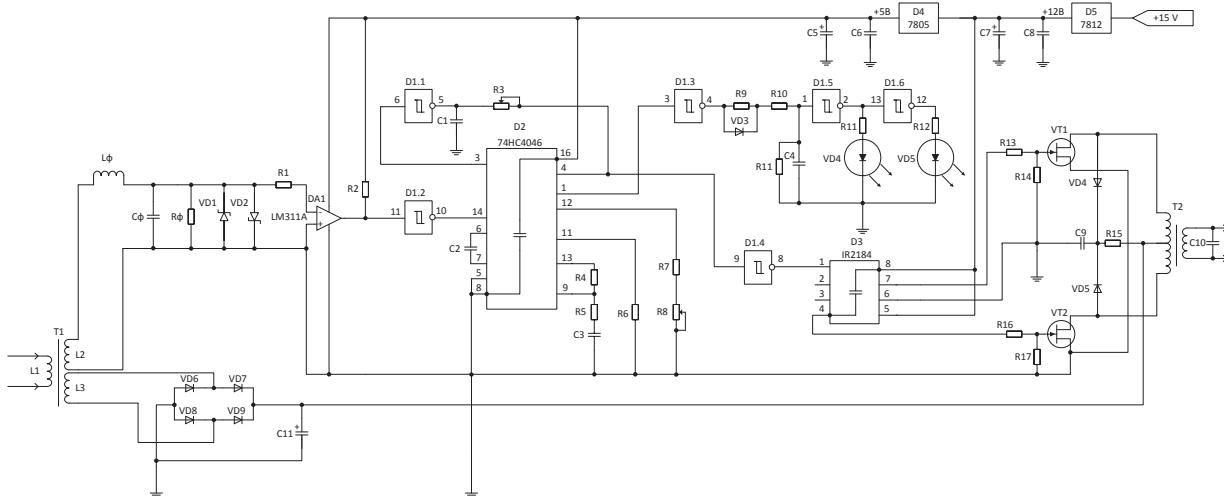


Рис. 4. Схема устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе специализированной интегральной микросхемы ФАПЧ (74HC4046)

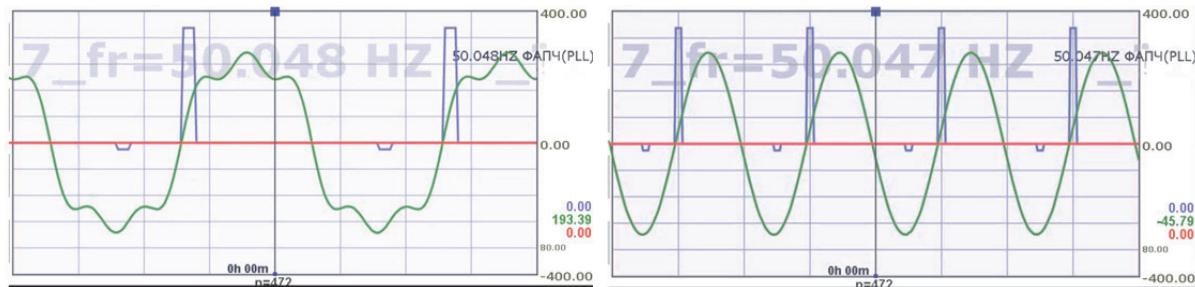


Рис. 5. Осциллограммы входного тока и выделенной первой гармоники полезной модели, реализованной на интегральной специализированной микросхеме 74HC4046

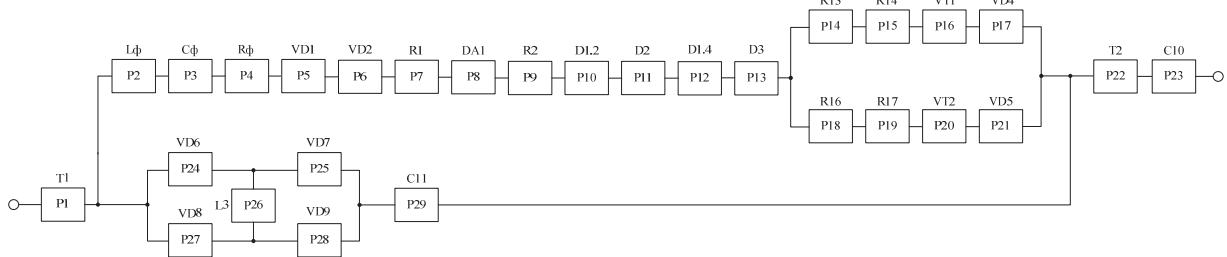


Рис. 6. Расчетная модель надежности устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе специализированной интегральной микросхемы ФАПЧ (74HC4046)

4). Определим вероятность безотказной работы устройства при соединении элементов, представленном на рис. 6. При этом следует отметить, что при составлении расчетной модели надежности не учитывались вспомогательные цепи схемы, представленной на рис. 4: цепь электропитания (стабилизаторы напряжения D4, D5, конденсаторы C5-C8), цепь настройки микросхемы 74HC4046 (триггер Шмитта D1.1, конденсаторы C1-C3, резисторы R3-R8), цепь индикации (триггеры Шмитта D1.3, D1.5, D1.6, резисторы R9-R12, диод VD3, конденсатор C4, светодиоды VD4, VD5).

Вероятность безотказной работы любой системы при последовательном соединении элементов для случая простейшего потока отказов и их независимости равна произведению вероятностей безотказной работы всех входящих в нее элементов [5]:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) \cdots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента, n – количество последовательно соединенных элементов.

Вероятность безотказной работы любого отдельного элемента можно найти через известный показатель надежности – эксплуатационное значение интенсивности отказов λ_e [5]:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_e t}, \quad (2)$$

Для параллельного соединения элементов, при условии независимости отказов и стационарности их потока, отказ всей системы произойдет лишь после отказа всех ее элементов. В этом случае вероятность отказа всей системы будет равна произведению вероятностей отказов всех входящих в нее элементов [5]:

$$Q(t) = Q_1(t)Q_2(t) \cdots Q_m(t) = \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)], \quad (3)$$

где Q_i – вероятность отказа i -го элемента, m – количество параллельно соединенных элементов.

С учетом выражения (3) вероятность безотказной работы всей системы может быть найдена как:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)], \quad (4)$$

Для мостового участка схемы, в нашем случае представленного в виде элементов VD6-VD9 и L3 (см. рис. 6), используют метод разложения с целью определения показателей надежности [5]:

$$P_M(t) = P_{26}(t) \left(1 - Q_{24}(t)Q_{27}(t)\right) \left(1 - Q_{25}(t)Q_{28}(t)\right) + Q_{26}(t) \left[1 - (1 - P_{24}(t)P_{25}(t))(1 - P_{27}(t)P_{28}(t))\right], \quad (5)$$

Значения эксплуатационной интенсивности отказов λ_e большинства групп элементов (компонентов) схемы рассчитывают по математической модели [5]:

$$\lambda_e = \lambda_B \prod_{i=1}^m K_i, \quad (6)$$

где λ_B – базовая интенсивность отказов элементов данной группы, K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов каждого i -го элемента в зависимости от различных факторов, m – число различных учитываемых факторов.

В таблице 1 приведены математические модели, рекомендуемые для расчета (прогнозирования) значений λ_e элементов, используемых в физической полезной модели устройства [5].

Таблица 1. Математические модели, рекомендуемые для расчета (прогнозирования) значений λ_{\exists} элементов

Класс (группа) элементов	Вид математической модели
Интегральные микросхемы (типовой электрический режим работы)	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_t K_{IC} K_{корп} K_V K_{\exists} K_{\Pi}$
Диоды, диодные сборки	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_{\Phi} K_D K_U K_{\exists} K_{\Pi}$
Стабилитроны	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_{\exists} K_{\Pi}$
Транзисторы полевые	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_{\Phi} K_{\exists} K_{\Pi}$
Диоды СВЧ	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_D K_{\exists} K_{\Pi}$
Конденсаторы неполярные, оксидно-электролитические	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_C K_{\exists} K_{\Pi}$
Конденсаторы электролитические, импульсные	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_t K_C K_{\exists} K_{\Pi}$
Резисторы переменные непроволочные	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_R K_U K_{\exists} K_{\Pi}$
Резисторы постоянные: металлизированные, композиционные	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_R K_{\exists} K_{\Pi}$
Трансформаторы	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_{\exists} K_{\Pi}$
Дроссели, катушки индуктивности	$\lambda_{\exists} = \lambda_B K_P K_{\exists} K_{\Pi}$

Интенсивность отказов трансформаторов T_1, T_2 :

Из [5] выберем базовое значение интенсивности отказов трансформатора T_1 (как преобразователя напряжения):

$$\lambda_B = 0,0072 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Из [5] выберем базовое значение интенсивности отказов импульсного трансформатора T_2 :

$$\lambda_B = 0,0019 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_P рассчитается по модели [5]:

$$K_P = A \cdot e^{\left[\left(\frac{(t_M + 273)}{T_M} \right)^G \right]}, \quad (7)$$

где t_M – температура максимально нагретой точки обмотки трансформатора, характеризуется классом изоляции, A, G, T_M – постоянные модели.

$$A = 0,891, G = 14, T_M = 352$$

Температуру t_M определяют как [4]:

$$t_M = t_{окр} + t_{\Pi}, \quad (8)$$

где $t_{окр}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{окр} = 15^{\circ}\text{C}$, t_{Π} – температура перегрева, $^{\circ}\text{C}$.

Значение t_{Π} для частоты питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$ рассчитывается по формуле:

$$t_{\Pi} = 0,25 \cdot t_{\Pi, \text{ту}} (3K_h^2 + 1), \quad (9)$$

где $t_{\Pi, \text{ту}}$ – максимальная температура перегрева по ТУ, $t_{\Pi, \text{ту}} = 10^{\circ}\text{C}$, K_h – коэффициент электрической нагрузки трансформатора по мощности, для потребителя первой категории $K_h = 0,65 - 0,7$.

$$t_{\Pi} = 0,25 \cdot t_{\Pi, \text{ту}} (3K_h^2 + 1) = 0,25 \cdot 10 \cdot (3 \cdot 0,65^2 + 1) = 5,669^{\circ}\text{C}$$

$$t_M = t_{окр} + t_{\Pi} = 15 + 5,669 = 20,669^{\circ}\text{C}$$

$$K_P = A \cdot e^{\left[\left(\frac{(t_M + 273)}{T_M} \right)^G \right]} = 0,891 \cdot e^{\left[\left(\frac{(20,669 + 273)}{352} \right)^{14} \right]} = 0,964$$

Коэффициент эксплуатации для стационарной аппаратуры, эксплуатируемой в капитальных жилых помещениях или помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями $K_{\exists} = 1$ [5].

Коэффициент приемки в условиях военного производства общего применения $K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов трансформатора $T1$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_{\Pi} = 0,0072 \cdot 10^{-6} \cdot 0,964 \cdot 1 \cdot 1 = 6,941 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч.}$$

Фактическое значение интенсивности отказов трансформатора $T2$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_{\Pi} = 0,0019 \cdot 10^{-6} \cdot 0,964 \cdot 1 \cdot 1 = 1,832 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч.}$$

Интенсивность отказов катушек индуктивности $L\phi$ и $L3$:

Базовое значение интенсивности отказов катушек индуктивности $L\phi$ и $L3$ [5]:

$$\lambda_B = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_P согласно математической модели [5]:

$$K_P = 0,46 + 0,012 \cdot (t_{окр} - 50)^{1,3} + 0,54 \cdot K_H^{3,5} \cdot e^{\left[0,2 \cdot (t_{окр} - 50)^{0,8}\right]}, \quad (10)$$

где K_H – коэффициент нагрузки по току (оптимальное значение $K_H = 0,2 - 0,6$), $t_{окр}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), при $t_{окр} < 50^{\circ}\text{C}$ принять $t_{окр} = 50^{\circ}\text{C}$.

$$K_P = 0,46 + 0,012 \cdot (50 - 50)^{1,3} + 0,54 \cdot 0,4^{3,5} \cdot e^{\left[0,2 \cdot (50 - 50)^{0,8}\right]} = 0,482$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки по аналогии с трансформатором $T1$ $K_3 = 1$, $K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов катушек индуктивности $L\phi$ и $L3$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_{\Pi} = 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot 0,482 \cdot 1 \cdot 1 = 4,82 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$$

Интенсивность отказов неполярных конденсаторов $C\phi$ и $C10$ с органическим синтетическим диэлектриком:

Базовое значение интенсивности отказов конденсаторов $C\phi$ и $C10$ [5]:

$$\lambda_B = 0,028 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_P согласно математической модели [5]:

$$K_P = A \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right)^H + 1 \right] \cdot e^{\left[B \left(\frac{t_{окр} + 273}{N_T} \right)^G \right]}, \quad (11)$$

где K_H – коэффициент электрической нагрузки по напряжению (оптимальное значение $K_H = 0,2 - 0,6$), $t_{окр}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{окр} = 15^{\circ}\text{C}$, A, B, N_T, G, N_S, H – постоянные коэффициенты.

$$A = 9,259 \cdot 10^{-3}; B = 2,5; N_T = 358; G = 18; N_S = 0,4; H = 5$$

$$K_P = 9,259 \cdot 10^{-3} \left[\left(\frac{0,4}{0,4} \right)^5 + 1 \right] \cdot e^{\left[2,5 \left(\frac{15+273}{358} \right)^{18} \right]} = 0,019$$

Значение коэффициента K_C согласно математической модели [5]:

$$K_C = C^{0,05}, \quad (12)$$

где C – емкость конденсатора в мкФ.

Значение коэффициента K_C для конденсатора $C\phi = 500$ мкФ (рис. 2):

$$K_C = C^{0,05} = 500^{0,05} = 1,364$$

Значение коэффициента K_C для конденсатора $C10 = 1000$ мкФ:

$$K_C = C^{0,05} = 1000^{0,05} = 1,413$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1$, $K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов конденсатора $C\phi$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_C K_3 K_{\Pi} = 0,028 \cdot 10^{-6} \cdot 0,019 \cdot 1,364 \cdot 1 \cdot 1 = 7,256 \cdot 10^{-10} \text{ 1/ч}$$

Фактическое значение интенсивности отказов конденсатора $C10$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_C K_3 K_{\Pi} = 0,028 \cdot 10^{-6} \cdot 0,019 \cdot 1,413 \cdot 1 \cdot 1 = 7,517 \cdot 10^{-10} \text{ 1/ч}$$

Интенсивность отказов оксидно-электролитического алюминиевого конденсатора $C11$:

Базовое значение интенсивности отказов конденсатора $C11$ [5]:

$$\lambda_B = 0,173 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_P согласно математической модели (11):

$$K_P = A \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right)^H + 1 \right] \cdot e^{\left[B \left(\frac{t_{окр} + 273}{N_T} \right)^G \right]}$$

где A, B, N_T, G, N_S, H – постоянные коэффициенты.

$$A = 3,59 \cdot 10^{-2}; B = 4,09; N_T = 358; G = 5,9; N_S = 0,55; H = 3$$

$$K_P = 3,59 \cdot 10^{-2} \left[\left(\frac{0,4}{0,55} \right)^3 + 1 \right] e^{\left[4,09 \left(\frac{15+273}{358} \right)^5 \right]} = 0,154$$

Значение коэффициента K_C согласно математической модели [5]:

$$K_C = 0,2 \cdot C^{0,23}, \quad (13)$$

где C – емкость конденсатора в мкФ, ($C=10000$ мкФ).

$$K_C = 0,2 \cdot 10000^{0,23} = 1,664$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов конденсатора $C11$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_C K_3 K_{\Pi} = 0,173 \cdot 10^{-6} \cdot 0,154 \cdot 1,664 \cdot 1 \cdot 1 = 4,433 \cdot 10^{-8} 1/\text{ч}$$

Интенсивность отказов резисторов $R\Phi, R1, R2, R13, R14, R16, R17$:

Базовое значение интенсивности отказов резисторов постоянных непроволочных, металлизированных [5]:

$$\lambda_B = 0,044 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$$

Значение коэффициента K_P согласно математической модели [5]:

$$K_P = A \cdot e^{\left[B \left(\frac{t_{\text{окр}}+273}{N_T} \right)^G \right]} \cdot e^{\left\{ \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right) \left(\frac{t_{\text{окр}}+273}{273} \right)^J \right]^H \right\}}, \quad (14)$$

где K_H – коэффициент электрической нагрузки резистора по мощности (оптимальное значение $K_H = 0,2 - 0,6$), $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{\text{окр}} = 15^{\circ}\text{C}$, A, B, N_T, G, N_S, J, H – постоянные коэффициенты.

$$A = 0,260; B = 0,5078; N_T = 343; G = 9,278; N_S = 0,878; J = 1; H = 0,886$$

$$K_P = 0,260 \cdot e^{\left[0,5078 \left(\frac{15+273}{343} \right)^{9,278} \right]} \cdot e^{\left\{ \left[\left(\frac{0,4}{0,878} \right) \left(\frac{15+273}{273} \right)^1 \right]^{0,886} \right\}} = 0,485$$

Значения коэффициентов K_R в зависимости от номиналов резисторов [5]:

Резисторы $R_\Phi = 1 \dots 10 \Omega$; $R_1 = 100 \Omega$; $R_{13} = R_{16} = 3 \Omega$: $K_R = 1$

Резисторы $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $R_{14} = R_{17} = 2,2 \text{ кОм}$: $K_R = 0,7$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов резисторов $R\Phi, R1, R13, R16$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_R K_3 K_{\Pi} = 0,044 \cdot 10^{-6} \cdot 0,485 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2,134 \cdot 10^{-8} 1/\text{ч}$$

Фактическое значение интенсивности отказов резисторов $R2, R14, R17$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_R K_3 K_{\Pi} = 0,044 \cdot 10^{-6} \cdot 0,485 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 = 1,494 \cdot 10^{-8} 1/\text{ч}$$

Интенсивность отказов стабилитронов $VD1, VD2$:

Базовое значение интенсивности отказов стабилитронов [5]:

$$\lambda_B = 0,0041 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$$

Значение коэффициента K_P согласно математической модели [5]:

$$K_P = A \cdot e^{\left[\frac{N_T}{273+t_{\text{окр}}+\Delta t K_H} + \left(\frac{273+t_{\text{окр}}+\Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right]}, \quad (15)$$

где K_H – коэффициент электрической нагрузки стабилитрона по напряжению (оптимальное значение $K_H = 0,2 - 0,6$), $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{\text{окр}} = 15^{\circ}\text{C}$, $A, N_T, T_M, L, \Delta t$ – постоянные коэффициенты;

$$A = 2,1935; N_T = -800; T_M = 448; L = 14; \Delta t = 150$$

$$K_P = 2,1935 \cdot e^{\left[\frac{-800}{273+15+150 \cdot 0,4} + \left(\frac{273+15+150 \cdot 0,4}{448} \right)^{14} \right]} = 0,227$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов стабилитронов $VD1, VD2$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_P K_3 K_{\Pi} = 0,0041 \cdot 10^{-6} \cdot 0,227 \cdot 1 \cdot 1 = 9,307 \cdot 10^{-10} 1/\text{ч}$$

Интенсивность отказов импульсных диодов $VD4, VD5$:

Базовое значение интенсивности отказов импульсных диодов [5]:

$$\lambda_B = 0,025 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_p согласно математической модели [5]:

$$K_p = A \cdot e^{\left[\frac{N_T}{273+t_{окр}+\Delta t K_h} + \left(\frac{273+t_{окр}+\Delta t K_h}{T_M} \right)^L \right]}, \quad (16)$$

где K_h – коэффициент электрической нагрузки стабилитрона по напряжению (оптимальное значение $K_h = 0,2 - 0,6$), $t_{окр}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{окр} = 15^{\circ}\text{C}$, $A, N_T, T_M, L, \Delta t$ – постоянные коэффициенты.

$$A = 44,1025; N_T = -2138; T_M = 448; L = 17,7; \Delta t = 150$$

$$K_p = 44,1025 \cdot e^{\left[\frac{-2138}{273+15+150 \cdot 0,4} + \left(\frac{273+15+150 \cdot 0,4}{448} \right)^{17,7} \right]} = 0,096$$

Значение коэффициента K_d для диодов с прямым током до 6 А [4]:

$$K_d = 1$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов стабилитронов $VD4, VD5$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_p K_d K_3 K_{\Pi} = 0,025 \cdot 10^{-6} \cdot 0,096 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$$

Интенсивность отказов выпрямительных диодов $VD6 - VD9$:

Базовое значение интенсивности отказов выпрямительных диодов [5]:

$$\lambda_B = 0,091 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_p согласно математической модели [5]:

$$K_p = A \cdot e^{\left[\frac{N_T}{273+t_{окр}+\Delta t K_h} + \left(\frac{273+t_{окр}+\Delta t K_h}{T_M} \right)^L \right]}, \quad (17)$$

где K_h – коэффициент электрической нагрузки выпрямительного диода по напряжению (оптимальное значение $K_h = 0,2 - 0,6$), $t_{окр}$ – температура окружающей среды (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{окр} = 15^{\circ}\text{C}$, $A, N_T, T_M, L, \Delta t$ – постоянные коэффициенты.

$$A = 44,1025; N_T = -2138; T_M = 448; L = 17,7; \Delta t = 150$$

$$K_p = 44,1025 \cdot e^{\left[\frac{-2138}{273+15+150 \cdot 0,4} + \left(\frac{273+15+150 \cdot 0,4}{448} \right)^{17,7} \right]} = 0,096$$

Значение коэффициента K_{Φ} для выпрямительного диода [5]:

$$K_{\Phi} = 1,5$$

Значение коэффициента K_d для диодов с прямым током до 5 А [5]:

$$K_d = 1$$

Значение коэффициента K_U для диодов с коэффициентом нагрузки по напряжению от 0 до 0,6 [5]:

$$K_U = 0,7$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов диодов $VD6 - VD9$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_p K_{\Phi} K_d K_U K_3 K_{\Pi} = 0,091 \cdot 10^{-6} \cdot 0,096 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 = 9,173 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$$

Интенсивность отказов аналоговой микросхемы $DA1$ (LM311A):

Базовое значение интенсивности отказов микросхемы $DA1$ [5]:

$$\lambda_B = 0,028 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_t согласно выражению [5]:

$$K_t = e^{[B(t_{окр}-25)]}, \quad (18)$$

где B – константа, зависящая от функционального назначения интегральной микросхемы (ИМС) (для аналоговой микросхемы $B = 0,023$), $t_{окр}$ – температура среды, окружающей ИМС, $^{\circ}\text{C}$.

Значение $t_{окр}$ определяется выражением:

$$t_{окр} = t_{раб\ max} + \Delta t_3 \quad (19)$$

где $t_{раб\ max}$ – верхнее значение рабочей температуры устройства ($t_{раб\ max} = 20^{\circ}\text{C}$);

Δt_3 – перегрев в нагретой зоне конструкции устройства (обычно $\Delta t_3 \leq 25 \dots 30^{\circ}\text{C}$).

$$t_{окр} = 20 + 25 = 45^{\circ}\text{C}$$

$$K_t = e^{[B(t_{окр}-25)]} = e^{[0,023(45-25)]} = 1,584$$

Для определения коэффициента $K_{\text{ИС}}$, учитывающего количество элементов в ИМС воспользуемся математической моделью [5]:

$$K_{\text{ИС}} = AN^S \quad (20)$$

где A, S – постоянные коэффициенты модели (для аналоговой ИМС $A = 0,478; S = 0,253$), N – количество элементов в ИМС (для ИМС LM311A $N = 50$).

$$K_{\text{ИС}} = AN^S = 0,478 \cdot 50^{0,253} = 1,286$$

Значение коэффициента $K_{\text{корп}}$ в зависимости от типа корпуса ИМС (для всех типов корпусов кроме пластмассовых $K_{\text{корп}} = 1$).

Значение коэффициента K_V в зависимости от максимальных значений напряжения питания (для всех технологий изготовления кроме КМОП $K_V = 1$) [5].

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов аналоговой микросхемы DA1 согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_3 K_{\Pi} = 0,023 \cdot 10^{-6} \cdot 1,522 \cdot 0,563 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 5,704 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$$

Интенсивности отказов полупроводниковой цифровой логической микросхемы D1 (74HC14) и полупроводниковой цифровой микросхемы D2 (74HC4046A), полупроводниковой цифровой микросхемы – полумостового драйвера D3 (IR2184):

Базовое значение интенсивности отказов микросхем D1, D2, D3 [5]:

$$\lambda_B = 0,023 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_t согласно выражению [5]:

$$K_t = e^{[B(t_{\text{окр}} - 25)]}, \quad (21)$$

где B – константа, зависящая от функционального назначения интегральной микросхемы (ИМС) (для полупроводниковой цифровой микросхемы $B = 0,021$), $t_{\text{окр}}$ – температура среды, окружающей ИМС, ($t_{\text{окр}} = 45^{\circ}\text{C}$, см выражение (19)).

$$K_t = e^{[B(t_{\text{окр}} - 25)]} = e^{[0,021(45 - 25)]} = 1,522$$

Для определения коэффициента $K_{\text{ИС}}$, учитывающего количество элементов в ИМС воспользуемся математической моделью [5]:

$$K_{\text{ИС}} = AN^S, \quad (22)$$

где A, S – постоянные коэффициенты модели (для полупроводниковой цифровой логической ИМС $A = 0,336; S = 0,288$), N – количество элементов в ИМС;

- для ИМС 74HC14 $N = 6$:

$$K_{\text{ИС}} = AN^S = 0,336 \cdot 6^{0,288} = 0,563$$

- для ИМС 74HC4046A $N = 24$:

$$K_{\text{ИС}} = AN^S = 0,336 \cdot 24^{0,288} = 0,839$$

- для ИМС IR2184 $N = 25$:

$$K_{\text{ИС}} = AN^S = 0,336 \cdot 25^{0,288} = 0,849$$

Значение коэффициента $K_{\text{корп}}$ в зависимости от типа корпуса ИМС (для всех типов корпусов кроме пластмассовых $K_{\text{корп}} = 1$).

Значение коэффициента K_V в зависимости от максимальных значений напряжения питания (для технологии изготовления КМОП при напряжении питания 5 В $K_V = 1$) [5].

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_{\Pi} = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов полупроводниковой цифровой логической микросхемы D1 согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_3 K_{\Pi} = 0,023 \cdot 10^{-6} \cdot 1,522 \cdot 0,563 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,971 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$$

Фактическое значение интенсивности отказов полупроводниковой цифровой микросхемы D2 согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_3 K_{\Pi} = 0,023 \cdot 10^{-6} \cdot 1,522 \cdot 0,839 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2,937 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$$

Фактическое значение интенсивности отказов полупроводниковой цифровой микросхемы D3 согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_3 K_{\Pi} = 0,023 \cdot 10^{-6} \cdot 1,522 \cdot 0,849 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2,972 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$$

Интенсивности отказов полевых кремниевых транзисторов VT1 и VT2:

Базовое значение интенсивности отказов транзисторов VT1 и VT2 [5]:

$$\lambda_B = 0,065 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Значение коэффициента K_p согласно математической модели [5]:

$$K_p = A' e^{\left[\frac{N_T}{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H} + \left(\frac{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right]}, \quad (23)$$

где K_h – коэффициент электрической нагрузки полевого транзистора по напряжению (оптимальное значение $K_h = 0,2 - 0,6$), $t_{окр}$ – температура транзистора на радиаторе (транспортабельный модуль, здание тяговой подстанции), $t_{окр} = 35^{\circ}\text{C}$, $A, N_T, T_M, L, \Delta t$ – постоянные коэффициенты:

$$A = 5,2; N_T = -1162; T_M = 448; L = 13,8; \Delta t = 150$$

$$K_p = 5,2 \cdot e^{\left[\frac{-1162}{273+35+150+0,4} + \left(\frac{273+35+150+0,4}{448} \right)^{13,8} \right]} = 0,236$$

Значение коэффициента K_Φ для полевых транзисторов в переключающем режиме [5]:

$$K_\Phi = 0,7$$

Коэффициент эксплуатации и коэффициент приемки $K_3 = 1, K_\Pi = 1$ [5].

Фактическое значение интенсивности отказов транзисторов $VT1, VT2$ согласно математической модели (табл. 1):

$$\lambda_3 = \lambda_B K_p K_\Phi K_3 K_\Pi = 0,065 \cdot 10^{-6} \cdot 0,236 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1 = 1,074 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$$

Определив значения интенсивности отказов всех элементов, входящих в полезную модель устройства, в соответствии с расчетной моделью надежности устройства фильтрации и выделения первой гармоники, определим общую вероятность безотказной работы.

Для начала определим вероятность безотказной работы последовательной цепи элементов $P2 - P13$ (рис. 6). Для этого воспользуемся выражением (1):

$$P_I(t) = P_2(t)P_3(t) \dots P_{13}(t) = e^{-4,82 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-7,256 \cdot 10^{-10}t} \cdot e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-9,307 \cdot 10^{-10}t} \cdot \\ \cdot e^{-9,307 \cdot 10^{-10}t} \cdot e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-5,704 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,494 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,971 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,937 \cdot 10^{-8}t} \cdot \\ \cdot e^{-1,971 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,972 \cdot 10^{-8}t} = 0,962092$$

где $t = 8760 \cdot 20 = 175200$ – число часов непрерывной работы за 20 лет эксплуатации (допустимое значение, принятное для устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [6, 7, 8]).

Далее определим вероятность безотказной работы последовательных цепей элементов $P14 - P17$ и $P18 - P21$ (рис. 6):

$$P_{II}(t) = P_{14}(t)P_{15}(t) \dots P_{17}(t) = e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,494 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,074 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,4 \cdot 10^{-9}t} = 0,991379$$

$$P_{III}(t) = P_{18}(t)P_{19}(t) \dots P_{21}(t) = e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,494 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,074 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,4 \cdot 10^{-9}t} = 0,991379$$

Затем определим вероятность безотказной работы параллельных цепей $P_{II}(t), P_{III}(t)$, используя выражение (4):

$$P_{IV}(t) = 1 - (1 - P_{II}(t)) \cdot (1 - P_{III}(t)) = 1 - (1 - 0,991379) \cdot (1 - 0,991379) = 0,999926$$

Определим вероятность безотказной работы последовательных цепей $P_I(t), P_{IV}(t)$, используя выражение (1):

$$P_V(t) = P_I(t)P_{IV}(t) = 0,962092 \cdot 0,999926 = 0,962021$$

После этого определим вероятность безотказной работы мостовой цепи (элементы $P24 - P28$ (рис. 6)), используя выражение (5):

$$P_{VI}(t) = P_{26}(t)(1 - Q_{24}(t)Q_{27}(t))(1 - Q_{25}(t)Q_{28}(t)) + \\ + Q_{26}(t)[1 - (1 - P_{24}(t)P_{25}(t))(1 - P_{27}(t)P_{28}(t))] = \\ = P_{26}(t)[1 - (1 - P_{24}(t))(1 - P_{27}(t))][1 - (1 - P_{25}(t))(1 - P_{28}(t))] + \\ + (1 - P_{26}(t))[1 - (1 - P_{24}(t)P_{25}(t))(1 - P_{27}(t)P_{28}(t))] = \\ = e^{-4,82 \cdot 10^{-9}t} \cdot [1 - (1 - e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t})(1 - e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t})] \cdot \\ \cdot [1 - (1 - e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t})(1 - e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t})] + (1 - e^{-4,82 \cdot 10^{-9}t}) \cdot \\ \cdot [1 - (1 - e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t})(1 - e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t})] = 0,999995$$

Вслед за этим определим вероятность безотказной работы параллельных цепей $P_V(t), P_{VI}(t)$, используя выражение (4):

$$P_{VII}(t) = 1 - (1 - P_V(t)) \cdot (1 - P_{VI}(t)) = 1 - (1 - 0,962021) \cdot (1 - 0,999995) = 0,99999981$$

С учетом найденных значений определим вероятность безотказной работы всего устройства:

$$P_y(t) = P_1(t)P_{VII}(t)P_{22}(t)P_{23}(t) = e^{-6,941 \cdot 10^{-9}t} \cdot 0,99999981 \cdot e^{-1,832 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-7,517 \cdot 10^{-10}t} = \\ = 0,998332$$

Следует отметить, что отказ любого элемента при работе полезной модели автоматизированного устройства фильтрации и выделения первой гармоники может привести к некорректной работе всего устройства. Следовательно, необходимо определить минимальное значение вероятности его безотказной работы с учетом последовательного соединения всех входящих в расчетную модель надежности элементов:

$$P_{y\min}(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t) \dots P_{29}(t), \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
P_{y \min}(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t) \dots P_{27}(t) = & e^{-6,941 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-4,82 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-7,256 \cdot 10^{-10}t} \cdot e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot \\
& \cdot e^{-9,307 \cdot 10^{-10}t} \cdot e^{-9,307 \cdot 10^{-10}t} \cdot e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-5,704 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,494 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,971 \cdot 10^{-8}t} \cdot \\
& \cdot e^{-2,937 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,971 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,972 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,494 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,074 \cdot 10^{-8}t} \cdot \\
& \cdot e^{-2,4 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-2,134 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,494 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-1,074 \cdot 10^{-8}t} \cdot e^{-2,4 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-1,832 \cdot 10^{-9}t} \cdot \\
& \cdot e^{-7,517 \cdot 10^{-10}t} \cdot e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-9,173 \cdot 10^{-9}t} \cdot e^{-4,82 \cdot 10^{-9}t} \cdot \\
& \cdot e^{-4,433 \cdot 10^{-8}t} = 0,929908
\end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью сравнительной оценки полученных значений надежности работы устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ проанализируем показатели надежности наиболее распространенных на сети российских железных дорог микропроцессорных терминалов релейных защит фидеров контактной сети переменного тока (БМРЗ – 27,5 – ФКС и ЦЗА – 27,5 – ФКС(ФТС)). Средняя наработка на отказ терминалов БМРЗ, согласно заводским характеристикам, составляет 18000, а терминалов ЦЗА – 50000 часов соответственно. Фактические значения вероятности безотказной работы терминалов БМРЗ и ЦЗА, приведенные в работах [9, 10, 11, 12], за 5 лет эксплуатации составили 0,90625 и 0,92307 соответственно. Таким образом, принимая во внимание минимальное значение вероятности безотказной работы устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ $P_{y \min}(t) = 0,929908$, определенное за гораздо больший период эксплуатации (20 лет), предлагаемое устройство отвечает требованиям надежности, предъявляемым к микропроцессорным устройствам релейной защиты железных дорог переменного тока [13].

Для обеспечения необходимого уровня безопасности работы устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ в случае возможного отказа одного или нескольких его элементов, авторами предлагается введение дополнительного схемного контроля положительных и отрицательных полуволн напряжения на шунтовых измерительных резисторах, включенных последовательно с выпрямительными диодами VD7 и VD9 (шунтовые резисторы на рис. 1 не показаны) с сигналами напряжения на шунтовых резисторах, включенных в цепи стоков транзисторов VT1, VT2 (шунтовые резисторы на рис. 1 не показаны). Сравниваемые сигналы путем подачи на аналоговые входы (1-4, 6-9) вспомогательного микроконтроллера (рис. 7) анализируются им с определенной заданной периодичностью. При нарушении нормального режима работы одного или двух каналов управления одновременно, вспомогательный микроконтроллер изменяет сигнал на дискретном выходе 5 с логической «1» на логический «0». Данный сигнал поступает на дискретный вход 3 микроконтроллера терминала релейной защиты, который в свою очередь обрывает генерацию управляющих импульсов на своем дискретном выходе 4, что приводит к уменьшению напряжения на конденсаторе C1 до нулевого значения. Соответственно, напряжение в цепи питания устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению также будет иметь нулевое значение. При непрерывном действии логического «0» на входах 2 и 5 микроконтроллера терминала релейной защиты анализ дискретных отчетов измеряемых сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ осуществляется напрямую через дискретные входы 1 и 6 микроконтроллера, минуя устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения.

Цепь выключения электропитания устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению основана на работе схемы безопасного декодера (источник постоянного напряжения V1, импульсный трансформатор T1, резисторы R1 и R2, транзистор VT1, диод VD1, конденсатор C1) (рис. 7) [14]. Безопасность данной схемы декодера при всевозможных отказах одного или нескольких входящих в нее элементов, включая транзистор VT1, обеспечивается за счет двойного преобразования входных импульсных сигналов с выхода 4 микроконтроллера терминала релейной защиты: дифференцирования с помощью импульсного трансформатора и интегрирования с помощью диода и конденсатора [15]. При нарушении хода любого из этих двух преобразований сигналов на выходе схемы будет отсутствовать напряжение. Трансформатор, работая в соответствии с законом электромагнитной индукции $u_L = -L \frac{di}{dt}$, обладает исключительным свойством – не трансформировать постоянный сигнал на выходную обмотку.

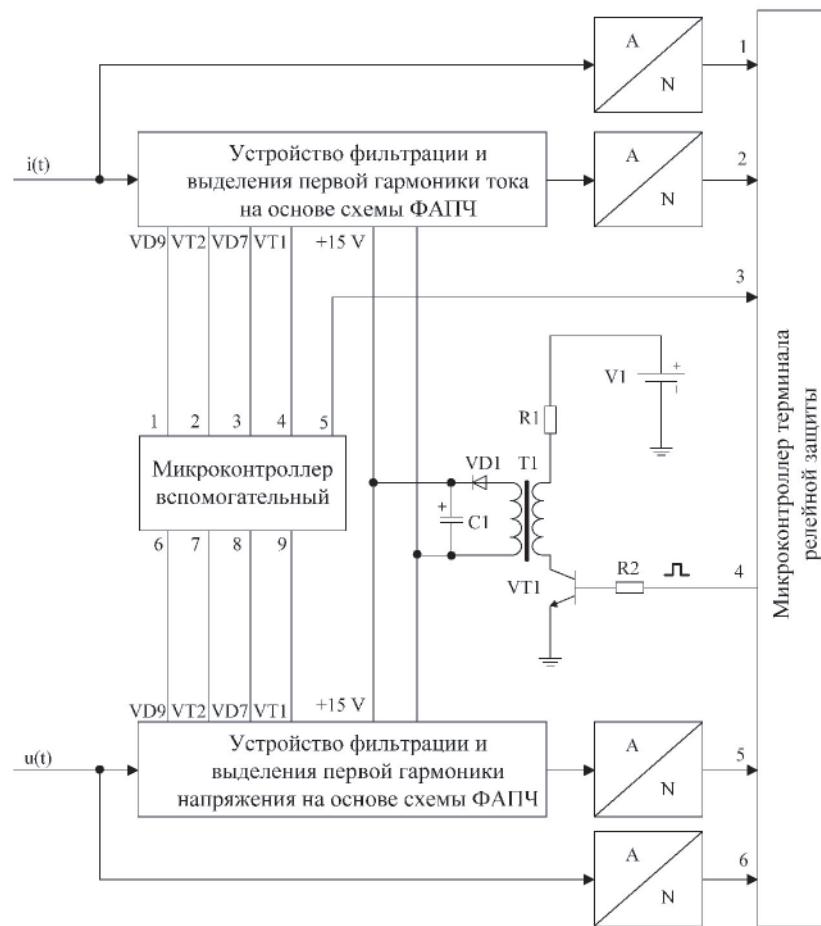


Рис. 7. Структурная схема интеграции устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению в терминал микропроцессорной релейной защиты

Таким образом, любой отказ в цепи выключения электропитания устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению приводит к их обесточиванию. А при непрерывном действии логического «0» на входах 2 и 5 микроконтроллера терминала релейной защиты анализ дискретных отчетов измеряемых сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ осуществляется напрямую через дискретные входы 1 и 6 микропроцессора, минуя устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе схемы ФАПЧ.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги, следует отметить, что надежность разработанного устройства соответствует требованиям, предъявляемым к железнодорожным микропроцессорным устройствам релейной защиты, а безопасность работы устройства в составе терминала релейной защиты обеспечена соответствующими схемотехническими решениями. Любые отказы устройств фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, включая цепь выключения электропитания, приводят к переходу на штатный режим работы терминала релейной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2708684 С1 Российской Федерации, МПК G01R 31/00. Устройство фильтрации и выделения первой гармоники в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети на основе схем ФАПЧ : № 2018154810 : заявл. 01.10.2018 : опубл. 11.12.2019 / К. В. Менакер, М. В. Востриков, Д. А. Яковлев, Е. В. Ярилов ; заявитель Федеральное государственное бюджет-
2. Менакер К.В. Создание высокоеффективных импульсных источников электропитания на основе схем ФАПЧ / К. В. Менакер, М. В. Востриков // Силовая электроника. – 2016. Т. 6. – № 63. – С. 44-47.
3. Vostrikov, M. V. Creation of a learning microprocessor system for protection of contact network feeders using adaptive parametric identification methods / M. V. Vostrikov, K. V. Menaker, V. A. Ushakov //

- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – Р. 012066. – DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012066.
4. Одиноков, В.Ф. Полоса захвата измерительной системы ФАПЧ с ФНЧ / В. Ф. Одиноков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 39-2. – С. 33–39.
 5. Боровиков С.М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян; под ред. С.М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
 6. Журавлев И.А., Орлов А.В., Веселова А.С., Солдатов Д.В., Савченко П.В., Тарадин Н.А., Неваров П.А., Горелик А.В. Нормирование показателей надежности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе методологий ALARP и УРРАН // МИИТ, деп. в ВИНИТИ 28.11.2016, №158-В2016.
 7. Нормирование показателей надежности объектов железнодорожной инфраструктуры / А. В. Горелик, И. А. Журавлев, А. В. Орлов // Изд.1// Наука и техника транспорта. – 2017. – № 2. – С. 32–36.
 8. Количествоные требования и средства контроля обеспечения безопасности систем и устройств ЦСБ: Организация сотрудничества железных дорог, 2000. – 8 с.
 9. Руководство по эксплуатации АВ036-00-000-00РЭ. Устройство цифровой защиты и автоматики фидера тяговой сети 2×25 кВ ЦЗА-27,5-ФТС. - 61 с.
 10. Руководство по эксплуатации 1СР.251.249-02РЭ. Устройство цифровой защиты и автоматики фидера тяговой сети ЦЗА-27,5-ФКС. - 53 с.
 11. ДИВГ.648228.070-12.РЭ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМР3-ФКС. Руководство по эксплуатации. НТЦ «Механотроника» 01.02.2016 г. – 64 с.
 12. Защита секционированных тяговых сетей переменного тока: монография / П.С. Пинчуков. – Хабаровск: ДВГУПС, 2010.
 13. Бочкарёв, С.В. Проблемы оценки надежности микропроцессорных устройств релейной защиты / С. В. Бочкарёв, Р. Р. Хисамов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 6. – С. 91-94. – DOI 10.24153/2079-5920-2018-8-6-91-94.
 14. Харни, О. Проектирование подсистемы питания для схем ФАПЧ / О. Харни, Г. Варжола // Беспроводные технологии. – 2011. – № 4(25). – С. 60-64.
 15. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Х.А. Христов, Д.В. Гавзов; Под ред. Вл.В. Сапожникова – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.

EVALUATION OF THE RELIABILITY OF AN AUTOMATED FILTRATION DEVICE IN THE UPGRADED MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION OF CONTACT NETWORK FEEDERS

© 2021 M. V. Vostrikov², A.V. Daneyv¹, K. V. Menaker², V. N. Sizykh¹

¹ Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, Russia

² Zabaikal'sk Institute of Rail Transport - the branch of Irkutsk State Transport University, Chita, Russia

The article presents the results of scientific research in the field of assessing the reliability and safety of the patented automated device for filtering and isolating the first harmonic based on the PLL scheme integrated into a typical microprocessor system for relay protection of AC contact network feeders in order to meet the reliability and safety indicators during its operation. The operation of the device is based on pre-filtering the signal using a low-pass filter tuned to the cutoff frequency of the third harmonic, fixing zero timestamps, forming control pulses, rectification of the signal and subsequent inverting to obtain a pure output sinusoidal signal in frequency, phase and amplitude coinciding with the measured signal representing its first harmonic. To assess the reliability of the proposed filtering device and the allocation of the first harmonic, a model of the reliability of the device is compiled based on its basic electrical circuit. The values of the basic and operational failure rates of all elements included in the schematic diagram of the device are found, taking into account the correction coefficients of operation, acceptance, electrical load, etc. The probability of trouble-free operation of the entire device for the normalized period of operation of 20 years is determined, including, taking into account the most unfavorable case - the serial connection of all elements included in the calculated reliability model. The level of safety of operation of the device for filtering and allocating the first harmonic based on the PLL scheme is determined, options for increasing this indicator are proposed by introducing additional circuit control into the scheme and implementing the power supply subsystem of the device based on the safe decoder scheme. The results of the conducted studies confirmed the compliance of the developed device with the reliability and safety requirements for railway microprocessor relay protection devices, and the safety of the proposed device as part of the relay protection terminal is provided with appropriate circuit solutions.

Keywords: Phase automatic frequency tuning, microprocessor relay protection, filtering, harmonic, transformer, inverter, rectifier, integrated circuit, failure rate, probability of trouble-free operation, reliability, safety.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-126-139

Maxim Vostrikov, Senior Lecturer at the Electricity Supply Department. E-mail: vostrikov_m@zab.megalink.ru

Alexey Daneyev, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Automation of Production Processes Department. E-mail: daneev@mail.ru

Konstantin Menaker, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Electricity Supply Department. E-mail: menkat@mail.ru

Viktor Sizykh, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Automation of Production Processes Department. E-mail: sizykh_vn@mail.ru