

МАРТЫНОВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВОЙ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
СЕТИ 0,38 кВ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве (по техническим наукам)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Зерноград, 2010

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кобзистый Олег Валентинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ерошенко Геннадий Петрович

кандидат технических наук, доцент
Гетманенко Владимир Михайлович

Ведущая организация: **ФГОУ ВПО «Ставропольский
Государственный Аграрный
Университет» (г. Ставрополь)**

Защита состоится «___» _____ 2010 года в ___ часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.001.01 при ФГОУ ВПО АЧГАА по адресу: 347740, г. Зерноград, Ростовской области, ул. Ленина, 21, в зале диссертационного совета (аудитория 201, корпус 5).

Тел./факс (8-86359) 43-3-80

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО АЧГАА.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

Н.И. Шабанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Асинхронный электродвигатель является основным приводным механизмом рабочих машин и аппаратов, используемых в сельскохозяйственном производстве. Выход из строя электродвигателей приводит к нарушению технологических процессов, что влияет на качество сельскохозяйственной продукции и увеличивает ее себестоимость.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором обычно рассчитаны на срок службы 15-20 лет без капитального ремонта при условии их правильной эксплуатации. Однако в современных условиях электроснабжения аварийные режимы работы сети и недостаточное качество электрической энергии оказывают негативное влияние, как на работу асинхронного электродвигателя, так и на устройства его защиты. Это приводит к снижению надежности функционирования устройств защиты. При недостаточно высоком уровне надежности функционирования устройства защиты электродвигателей допускают ложные срабатывания, что вызывает как простой электрооборудования, так и выход электродвигателей из строя.

Недостаточный уровень надежности функционирования фильтровых устройств защиты электродвигателей обусловлен их высокой чувствительностью к несимметричным коротким замыканиям и к искажению формы кривой приложенного напряжения.

Таким образом, решение проблемы недостаточной надежности функционирования устройств фильтровой защиты является актуальной задачей для сельскохозяйственного производства.

Цель работы – повышение надежности функционирования асинхронного электропривода сельскохозяйственного назначения путем обоснования параметров устройства фильтровой защиты электродвигателей.

Объектом исследования является «электрическая сеть напряжением 0,38 кВ – асинхронный электропривод».

Предметом исследования являются зависимости параметров устройства фильтровой защиты от режимов работы сети 0,38 кВ.

Научная гипотеза – повышение надежности функционирования асинхронного электропривода сельскохозяйственного назначения может быть достигнуто за счет обоснования параметров устройств фильтровой защиты электродвигателей от несимметричных режимов работы сети 0,38 кВ.

Рабочая гипотеза – учет одновременного действия несимметрии и несинусоидальности формы кривых напряжения при обосновании параметров устройств фильтровой защиты электродвигателей от несимметричных режимов работы сети 0,38 кВ путем введения параметра по времени срабатывания приведет к повышению надежности функционирования асинхронного электропривода сельскохозяйственного назначения.

Методы исследований. Основаны на применении теории комплексных чисел, векторного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории нагрева, метода симметричных составляющих, метода последовательных приближений при расчете нелинейных цепей, метода узловых потенциалов и метода эквивалентного генератора. Данные экспериментальных исследований были

получены с использованием прибора-анализатора КЭ «Энергомонитор 3.3Т» (ЭМ-3.3Т), измерителя температуры «CENTER 311» и электронного осциллографа «Актаком АСК-4166».

Научная новизна заключается в:

- оценке влияния несинусоидального напряжения на устройство фильтровой защиты;
- разработке алгоритма выбора параметров срабатывания устройств фильтровой защиты электродвигателей;
- усовершенствовании методики проектирования устройств фильтровой защиты электродвигателей.

Техническая новизна защищена патентами РФ №2335082 зарег. 27.09.2008г., №2363083 зарег. 27.07.2009г.

Практическая ценность работы заключается в:

- разработанном устройстве фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы;
- определении параметров срабатывания устройства фильтровой защиты электродвигателя вытяжного вентилятора птицеводческих помещений АИРП 80А6У2 при одновременно несимметричном и несинусоидальном напряжении;
- разработанной методике инженерного расчета устройства селективной фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе ФГОУ ВПО АЧГАА на кафедре «Теоретические основы электротехники и электроснабжение сельского хозяйства».

На защиту выносятся:

1. Алгоритм обоснования параметров срабатывания устройств фильтровой защиты электродвигателей;
2. Методика проектирования устройств фильтровой защиты электродвигателей;
3. Параметры срабатывания фильтровой защиты электродвигателя вытяжного вентилятора птицеводческих помещений АИРП 80А6У2 при одновременно несимметричном и несинусоидальном напряжении;
4. Схемы электрические принципиальные устройств фильтровой защиты.

Личный вклад автора. В ходе научных исследований автором непосредственно сформулирована концепция работы, поставлены задачи исследований, приведена методика проведения экспериментальных исследований, разработана теоретическая модель, сформулированы научные выводы.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях ФГОУ ВПО АЧГАА (г. Зерноград) 2007-2010 гг., СтГАУ (г. Ставрополь) 2007, 2008 гг.; на международной научно-практической конференции «Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения» (г. Санкт-Петербург) 2009 г.; в конкурсе инновационных проектов по программе «УМНИК-2010» Межвузовского научно-практического семинара,

молодых ученых, аспирантов и студентов «Перспективы развития инноваций в АПК» (работа отмечена дипломом); в конкурсе «УМНИК» в рамках проведения международной выставки «Интерагромаш 2010» (работа отмечена дипломом).

По результатам исследований получено в соавторстве 2 патента на изобретение и опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 в изданиях из перечня ВАК.

Разработанное устройство фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы внедрено на ООО ЖК «Надежда» для защиты электродвигателей вытяжных вентиляторов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка используемой литературы из 194 наименований и 6 приложений. Общий объём диссертации 179 страниц машинописного текста, содержит 66 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы, определены цель, объект и предмет исследования, кратко изложено содержание работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также данные о практической ценности и научной новизне.

В первой главе «*Анализ способов и средств защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы*» рассмотрены аварийные режимы работы асинхронных электродвигателей и сети 0,38 кВ, выполнен аналитический обзор существующих способов и средств защиты асинхронных электродвигателей, выполнен анализ действия устройств фильтровой защиты на базе ФНПП, а также была установлена актуальность темы, определены цель, объект, предмет и задачи исследования. Проблема защиты электрооборудования от аварийных режимов работы рассмотрена в трудах Фабриканта В.Ф., Мусина А.М., Грундулиса А.О., Тубиса Я.Б., Казимира А.П., Ерошенко Г.П., Данилова В.Н., Попова Н.М., Оськина С.В., Минакова В.Ф., Гетманенко В.М., Богдан А.В., Сомова И.Я., Юндина М.А. и других ученых.

Анализ способов и средств защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы показал, что:

1. Существующие средства защиты электродвигателей от несимметричных режимов работы не всегда справляются со своими функциями и имеют недостаточную надежность функционирования, поэтому по-прежнему существует необходимость разработок новых технических средств защиты и усовершенствования старых.

2. Одними из наиболее перспективных устройств защиты электродвигателей от несимметричных режимов работы являются фильтровые устройства защиты на базе фильтров напряжения прямой последовательности.

3. Устройства фильтровой защиты, несмотря на их достоинства, также имеют недостаточную надежность функционирования, например, они могут допускать ошибочные срабатывания в режимах коротких замыканий, кратковременной несимметрии, непродолжительном снижении напряжения.

4. Несинусоидальность напряжения оказывает отрицательное воздействие не только на сам электродвигатель, но и вносит погрешность в работу устройств фильтровой защиты, снижая их надежность функционирования.

Обоснование параметров устройства фильтровой защиты асинхронного электродвигателя позволит повысить надежность функционирования электропривода и снизить ущербы от выхода из строя и простоя оборудования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- определить реальные уровни несимметрии и несинусоидальности напряжения в сетях 0,38 кВ производственного назначения;
- разработать алгоритм обоснования параметров срабатывания устройств фильтровой защиты электродвигателей при воздействии на электродвигатель одновременно несимметричного и несинусоидального напряжения и определить параметры срабатывания устройства фильтровой защиты электродвигателя АИРП 80А6 У2 вытяжного вентилятора ВО-5,6;
- усовершенствовать схемы и методику проектирования устройств фильтровой защиты электродвигателя на базе ФНПП и дать экспериментальную оценку влияния несинусоидального напряжения на работу устройства фильтровой защиты на базе ФНПП;
- технико-экономическая оценка устройства фильтровой защиты.

Во второй главе «*Моделирование работы устройств фильтровой защиты асинхронных электродвигателей на базе ФНПП*» предложена методика обоснования параметров срабатывания устройств фильтровой защиты. Для определения параметров срабатывания по данной методике в начале сделана теоретическая оценка влияния несинусоидального напряжения на работу устройств фильтровой защиты асинхронных электродвигателей, и определено напряжение прямой последовательности на зажимах электродвигателя в аварийных режимах работы сети.

Определение параметров срабатывания устройств фильтровой защиты заключается в установлении их диапазонов (максимального и минимального значений), при которых вероятность ложных срабатываний устройства защиты будет наименьшей

$$K_{1U \min} \leq K_{1U} \leq K_{1U \max}, \quad (1)$$

$$t_{3 \min} \leq t_3 \leq t_{3 \max}, \quad (2)$$

где K_{1U} – коэффициент напряжения прямой последовательности, о.е.;

t_3 – выдержка времени на отключение, с.

Значения для выбора границ диапазона K_{1U} :

K_{1UE} – естественный уровень в сети 0,38 кВ;

K_{1Ut} – обоснованный по критерию теплового старения изоляции статорной обмотки электродвигателя;

K_{1UOK3} – при однофазном коротком замыкании;

K_{1UMK3} – при междуфазном коротком замыкании;

$K_{1UП}$ – при пуске более мощного электродвигателя.

Значения для выбора границ диапазона t_3 :

t_t – обоснованное по критерию теплового старения изоляции статорной обмотки электродвигателя;

$t_{TЗ}$ – время действия устройств токовой защиты;

$t_{П}$ – время пуска более мощного электродвигателя.

Часть этих значений ($K_{1UOKЗ}$, $K_{1UMKЗ}$, $K_{1UП}$, $t_{TЗ}$, $t_{П}$) определяется теоретически, остальные (K_{1UE} , K_{1Ut} , t_t) экспериментально.

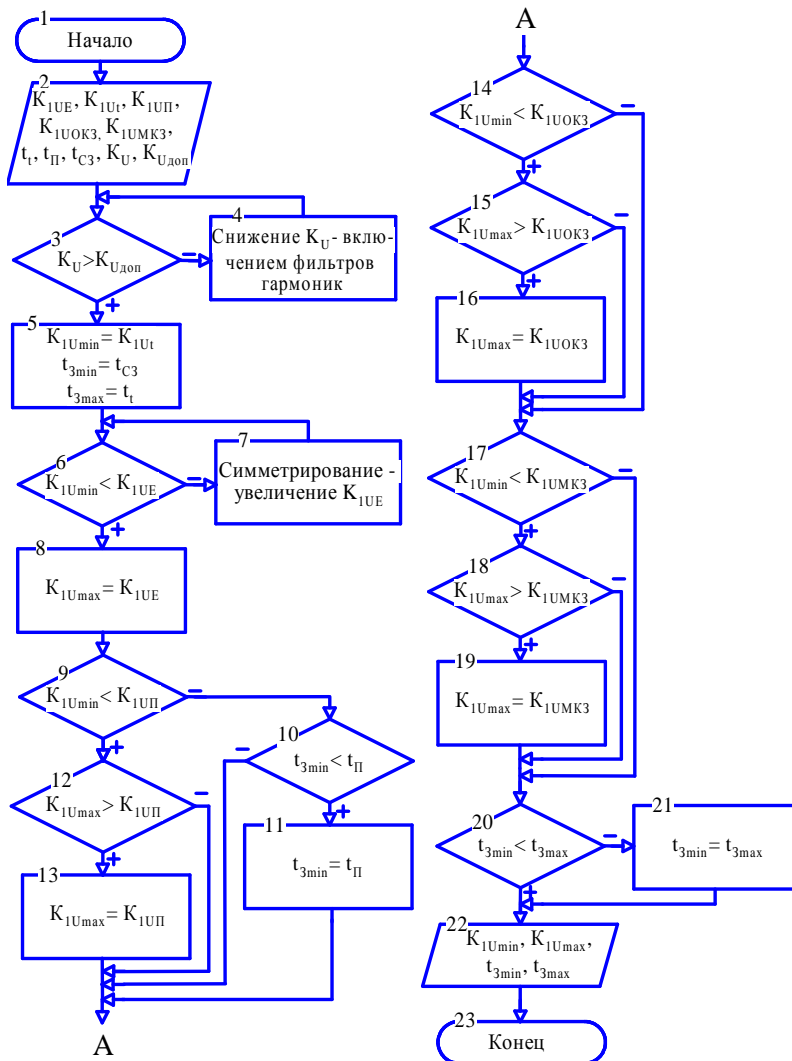


Рисунок 1 – Алгоритм выбора параметров срабатывания электродвигателя от несимметрии напряжения питающей сети и обрыва фазы (патент РФ №2269855).

Параметры фильтра напряжений прямой последовательности (ФНПП) рассчитывались согласно существующей методике при пороговых значениях коэффициента напряжений прямой последовательности K_{1U} равных 0,8; 0,85 и 0,9.

Моделирование проводилось для случаев, характеризующих надежность функционирования защиты:

- 1) для каждого значения коэффициента K_{1U} при номинальном значении напряжения основной гармоники, т.е. 220 В;
- 2) при напряжениях, соответствующих заданным пороговым значениям.

Полученные действующие значения варьируемых несинусоидальных напряжений на нагрузке (исполнительном органе) были отнесены к действующему значению напряжения срабатывания исполнительного органа $K = U_{ИО} / U_{ОТ}$.

В результате моделирования были получены графики зависимостей данного

Также при выборе параметров срабатывания устройств фильтровой защиты необходимо оценить влияние искажения формы кривой напряжения на их работу и определить допустимый коэффициент искажения $K_{U\partial on}$, при котором не будет снижаться надежность функционирования устройства защиты. После этого нужно определить коэффициент искажения формы кривой напряжения K_U в сети 0,38 кВ, от которой питается защищаемый электродвигатель.

Для выбора границ диапазона разработан алгоритм (рисунок 1).

Для оценки надежности функционирования и определения $K_{U\partial on}$ моделировалось влияние несинусоидального напряжения на работу фильтрового устройства защиты

коэффициента K от коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения сети K_U при номинальном значении напряжения основной гармоники и при напряжениях, соответствующих заданным пороговым значениям напряжения прямой последовательности U_1 (рисунок 2).

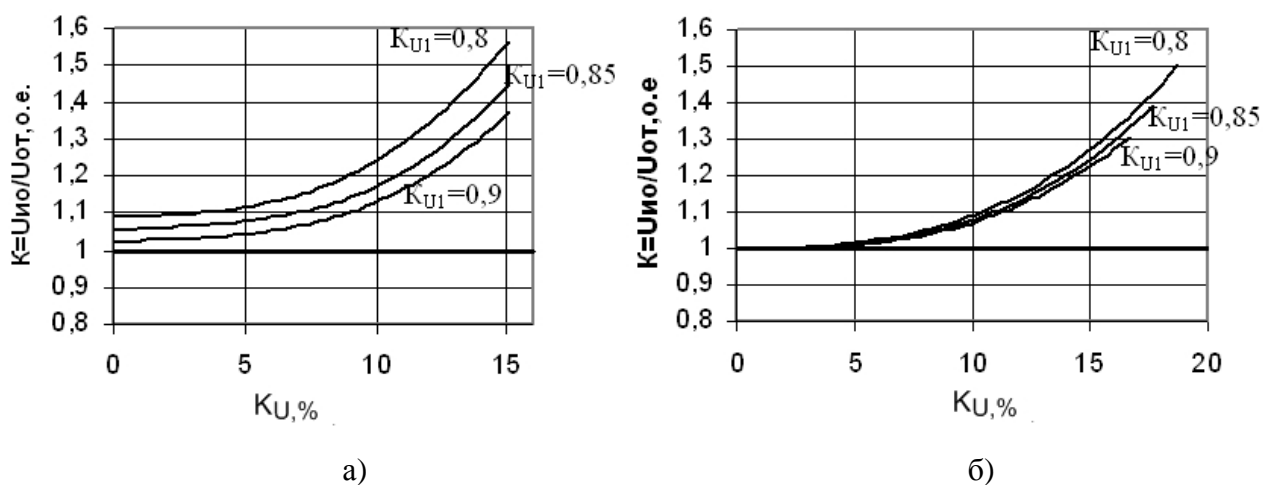


Рисунок 2 – Графики зависимостей $K=f(K_U)$: а) при $U_1=220В$; б) при пороговых значениях напряжения U_1 .

Анализ полученных зависимостей показал:

1) при номинальном значении напряжения основной частоты присутствие высших гармоник в сети не будет приводить к ложным срабатываниям устройства защиты, однако, увеличение напряжения на исполнительном органе уменьшает срок его службы;

2) искажение синусоидальности кривой напряжения в диапазоне 0 – 5 % не оказывает существенного влияния на работу устройства фильтровой защиты. В этом заключается преимущество фильтров напряжения прямой последовательности, так как напряжение небаланса на их выходе составляет незначительный процент от рабочего напряжения. Для фильтров других последовательностей то же напряжение небаланса соизмеримо с рабочими напряжениями, что приведет к отказу устройств защиты. Присутствие в сетевом напряжении высших гармоник «загрубляет» работу устройства защиты и ухудшает надежность его функционирования;

3) гармоники напряжения кратные трем не оказывают заметного влияния на работу фильтрового устройства защиты.

Сделанные выводы справедливы для фильтровых устройств защиты электродвигателей на базе ФНПП. В целом несинусоидальность подводимого напряжения свыше 5 % ухудшает надежность их функционирования. Поэтому необходимо фильтровые устройства защиты усовершенствовать, или снижать уровень высших гармоник в сети путем установки фильтров.

Для выбора параметра срабатывания устройств фильтровой защиты по напряжению прямой последовательности согласно алгоритму (рисунок 1) необходимо знать, каким будет коэффициент напряжения прямой последовательности в месте установки защиты при различных аварийных режимах работы сети K_{1UOK3}, K_{1UMK3} .

Представим линию, к которой подключен защищаемый электродвигатель, схемой замещения (рисунок 3). Линия состоит из: трехфазного трансформатора, который представлен тремя фазными ЭДС (E_A, E_B, E_C) и полными фазными сопротивлениями обмоток (Z_T); воздушной линии 0,38 кВ ($Z_{Л1}$); кабельной линии 0,38 кВ (Z_K), питающей электродвигатель вытяжной вентиляции ($Z_{\partial\partial}$); нагрузки линии 0,38 кВ (Z_H), которая в схеме для упрощения показана сосредоточенной.

Расчет коэффициента напряжения прямой последовательности на зажимах электродвигателя (в месте подключения устройства защиты) в аварийных режимах работы сети был выполнен методом симметричных составляющих. Расчет выполнялся для случаев несимметричных коротких замыканий в точках К1, К2, К3 и для случаев обрыва одного и двух проводов в точках О1, О2, О3, О4, О5.

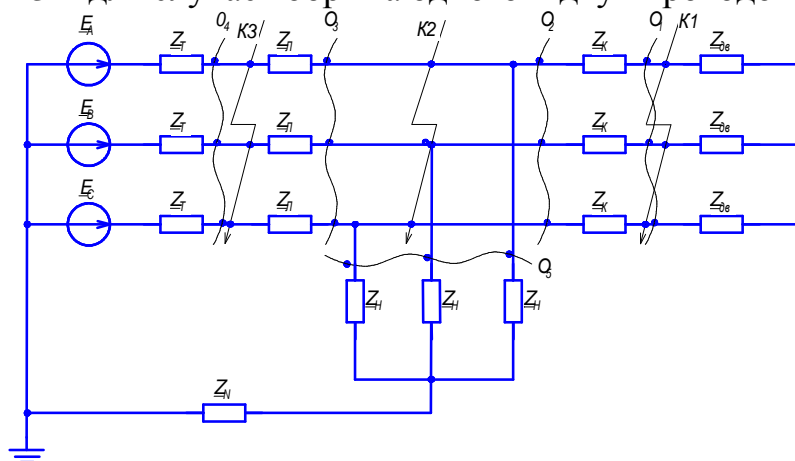


Рисунок 3 – Схема замещения линии электропередач с нагрузкой и электродвигателем: К1, К2, К3 – точки короткого замыкания, О1, О2, О3, О4, О5 – точки обрыва провода.

Коэффициент напряжения прямой последовательности K_{1U} определялся по выражению:

$$K_{1U} = \frac{U_{1\partial\partial}}{U_{ном.}} \cdot 100, \quad (3)$$

где $U_{1\partial\partial}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности на зажимах электродвигателя, В;

$U_{ном.}$ – номинальное напряжение, В.

Напряжение прямой последовательности на зажимах электродвигателя:

1) при коротких замыканиях в точке К1

$$\underline{U}_{1\partial\partial} = \underline{U}_1, \quad (4)$$

2) при коротких замыканиях в точке К2

$$\underline{U}_{1\partial\partial} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{\partial\partial 1}} \underline{Z}_{\partial\partial 1}, \quad (5)$$

где \underline{U}_1 – действующее значение напряжения прямой последовательности в месте аварии, В;

\underline{Z}_{K1} – полное сопротивление прямой последовательности кабельной линии, Ом;

$\underline{Z}_{\partial\partial 1}$ – полное сопротивление прямой последовательности двигателя, Ом;

3) при коротких замыканиях в точке К3

$$\underline{U}_{1\partial\partial} = \frac{\underline{U}_1 \underline{Z}_{H1} \underline{Z}_{\partial\partial 1}}{\underline{Z}_{Л1} (\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{\partial\partial 1}) + \underline{Z}_{H1} (\underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{\partial\partial 1})}, \quad (6)$$

где \underline{Z}_{H1} – полное сопротивление прямой последовательности нагрузки, Ом;
 $\underline{Z}_{Л1}$ – полное сопротивление прямой последовательности воздушной линии, Ом;
 4) при обрывах провода в точках О1, О2

$$\underline{U}_{1\partial\partial} = \frac{\underline{E}_{\text{экв1}} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{экв1}}} \underline{Z}_{\partial\partial 1}, \quad (7)$$

где $\underline{E}_{\text{экв1}}$ – эквивалентное ЭДС прямой последовательности, В;
 $\underline{Z}_{\text{экв1}}$ – эквивалентное сопротивление прямой последовательности, Ом;
 5) при обрывах провода в точках О3, О4

$$\underline{U}_{1\partial\partial} = \frac{\underline{E}_{\text{экв1}} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{экв1}}} \frac{\underline{Z}_{H1} \underline{Z}_{\partial\partial 1}}{\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{\partial\partial 1}}, \quad (8)$$

б) при обрывах провода в точке О5

$$\underline{U}_{1\partial\partial} = \frac{\underline{U}_1 \underline{Z}_{\text{экв1}} + (\underline{E}_{\text{экв1}} - \underline{U}_1) \underline{Z}_{H1}}{\underline{Z}_{\text{экв1}} (\underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{\partial\partial 1})} \underline{Z}_{\partial\partial 1}. \quad (9)$$

Здесь \underline{U}_1 – напряжение прямой последовательности в месте аварии:

1) при однофазных коротких замыканиях и обрыве двух фаз

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{\text{экв1}} \frac{\underline{Z}_{\text{экв2}} + \underline{Z}_{\text{экв0}}}{\underline{Z}_{\text{экв1}} + \underline{Z}_{\text{экв2}} + \underline{Z}_{\text{экв0}}}, \quad (10)$$

где $\underline{Z}_{\text{экв2}}$ – эквивалентное сопротивление обратной последовательности, Ом;
 $\underline{Z}_{\text{экв0}}$ – эквивалентное сопротивление нулевой последовательности, Ом;

2) при двухфазных коротких замыканиях

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{\text{экв1}} \frac{\underline{Z}_{\text{экв2}}}{\underline{Z}_{\text{экв1}} + \underline{Z}_{\text{экв2}}}, \quad (11)$$

3) при двухфазных коротких замыканиях на землю и обрыве одной фазы

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{\text{экв1}} \frac{\underline{Z}_{\text{экв2}} \underline{Z}_{\text{экв0}}}{\underline{Z}_{\text{экв2}} \underline{Z}_{\text{экв0}} + \underline{Z}_{\text{экв1}} \underline{Z}_{\text{экв0}} + \underline{Z}_{\text{экв1}} \underline{Z}_{\text{экв2}}}. \quad (12)$$

Для определения коэффициента напряжения прямой последовательности на зажимах электродвигателя с целью упрощения расчетов в среде Electronics Workbench была создана электронная модель трехфазной сети с подключенным к ней электродвигателем, соответствующая схеме рисунка 3.

На виртуальной модели сети были промоделированы все аварийные режимы. В каждом из аварийных режимов на модели были получены зависимости напряжения прямой последовательности от параметров схемы замещения: от величины нагрузки при постоянной длине воздушной линии 0,38 кВ (для различной длины линии) и от длины воздушной линии 0,38 кВ при постоянной нагрузке линии (для различной нагрузки).

Максимальная относительная погрешность при расчете коэффициента напряжения прямой последовательности методом симметричных составляющих и при определении его на виртуальной модели Electronics Workbench составила 1,12 %.

В третьей главе «*Методика проведения и обработка данных эксперимен-*

тальных исследований» приводится методика и результаты экспериментальных исследований по определению реального уровня несимметрии и искажения формы кривой напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ производственного назначения. Получены кривые нагрева асинхронного электродвигателя АИРП 80А6 У2 при питании его от одновременно несимметричного и несинусоидального напряжения. Определено напряжение небаланса устройств фильтровой защиты электродвигателей с применением ФНПП при наличии в сети высших гармоник напряжения. Определена возможность использования устройств фильтровой защиты в системе вентиляционного оборудования «Климатика».

Сбор данных о качестве напряжения проводился на стороне 0,4 кВ подстанций напряжением 10/0,4 кВ Тихорецких электрических сетей ОАО «Кубаньэнерго», питающих производственные потребители. Измерения осуществлялись при помощи прибора для измерений электроэнергетических величин и ПКЭ «Энергомонитор-3.3Т» (ЭМ-3.3Т).

Помимо ПКЭ по несимметрии, приведенных в ГОСТ 13109-97, определяли коэффициент напряжения прямой последовательности K_{IU} по выражению (3).

Полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке в среде программы STATISTICA 6.1, где были определены математическое ожидание, максимальное и минимальное значение, дисперсия, доверительный интервал и среднеквадратическое отклонение каждого ПКЭ.

Анализируя экспериментальные данные, были сделаны выводы:

1) коэффициенты несимметрии напряжений K_{2U} и K_{0U} значительно превышают установленные ГОСТ 13109-97 значения только на объектах с выраженной несимметричной нагрузкой, на объектах с двигательной и другой симметричной трехфазной нагрузкой коэффициенты несимметрии напряжений большую часть времени находятся в установленных пределах;

2) среднее значение коэффициента напряжения прямой последовательности K_{IUE} составило 101,01 %, при максимальном значении – 108,78 %, и минимальном значении – 91,14 %, дисперсия – 17,54;

3) коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения K_U находились в пределах 0,47 – 9,52 %, но основную часть времени не превышали 5%; за пределы, установленные ГОСТ 13109-97, выходили 15-я и 21-я гармоники, причем иногда превышали эти пределы в 5 – 9 раз;

4) при проектировании и определении уставок устройств РЗА, содержащих фильтры симметричных составляющих напряжения, необходимо учитывать и отстраиваться от «естественных» уровней несимметрии и высших гармонических составляющих напряжения.

Чтобы правильно определить параметры срабатывания устройства защиты, нужно точно определить порог срабатывания устройств по напряжению прямой последовательности K_{IUt} , исходя из критерия теплового старения изоляции обмоток электродвигателей. Кроме того, в связи с увеличением числа нелинейных нагрузок, форма кривых фазных напряжений в электрической сети заметно искажается. Таким образом, возникает задача определения порогового значения коэффициента напряжения прямой последовательности с учетом наличия в нем

высших гармоник.

Для решения этой задачи определили зависимость установившейся температуры статорных обмоток электродвигателя от коэффициента напряжения прямой последовательности и коэффициента искажения формы кривой напряжения $\tau_{ycm}=f(K_{IU}; K_U)$. Определение этой зависимости потребовало проведения двухфакторного эксперимента, в котором в качестве зависимой переменной (функции отклика) выступает установившаяся температура статорных обмоток электродвигателя τ_{ycm} , а коэффициент напряжения прямой последовательности K_{IU} и коэффициент искажения формы кривой напряжения K_U являются независимыми переменными. При этом коэффициент искажения формы кривой напряжения K_U и коэффициент напряжения прямой последовательности K_{IU} являются случайными величинами.

Зависимость $\tau_{ycm}=f(K_{IU}; K_U)$ определялась на стенде, позволяющем моделировать в узле нагрузки одновременно несинусоидальное и несимметричное напряжение. Несимметричное напряжение в узле нагрузки создавалось при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) TV1, воздушная линия 0,38 кВ представлена упрощено активным и индуктивным сопротивлением, асинхронный электродвигатель АИРП 80А6 У2 вытяжного вентилятора ВО-5,6 подключен к узлу с регулируемой нелинейной нагрузкой. Модуль нелинейной нагрузки представлял собой 3 нелинейных элемента – однофазных тиристорных регулятора мощности, работающих на лампы накаливания мощностью 300 Вт каждая, что соизмеримо с мощностью электродвигателя.

При проведении эксперимента на стенде случайным образом задавались значения и форма кривой фазных напряжений. Значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения варьировались в пределах 0 – 5%, что соответствовало реальным значениям данного коэффициента в сетях 0,38 кВ. Значение напряжения прямой последовательности варьировалось от U_n до $0,5U_n$. Кривые фазных напряжений на зажимах работающего электродвигателя фиксировались при помощи осциллографа «Актаком АСК-4166». Изменение во времени температуры лобовой части статорной обмотки электродвигателя фиксировались при помощи измерителя температуры CENTER 311.

По полученным данным, используя методики, приведенные в ГОСТ 13109-97, были рассчитаны значения показателей качества напряжения в узле нагрузки. Коэффициент напряжения прямой последовательности рассчитывался по формуле (3). По полученным в каждом опыте кривым нагрева лобовой части статорной обмотки электродвигателя были определены установившаяся температура (τ_{ycm} , °С) и постоянная времени нагрева (T_H , мин).

Нелинейный регрессионный анализ данных в среде программы STATISTICA 6.1 по квадратичной зависимости функции $\tau_{ycm}=f(K_{IU}; K_U)$ показал, что: зависимая переменная K_{IU} является значимой; зависимая переменная K_U является незначимой при варьировании ее в диапазоне от 0 до 5 %. Таким образом, пренебрегая незначимой переменной, получим зависимость установившейся температуры статорных обмоток от коэффициента напряжения прямой последовательности $\tau_{ycm}=f(K_{IU})$. График данной зависимости представлен на рисунке 4. Уравнение регрессии имеет вид $\tau_{ycm}= 0,0559(K_{IU})^2 - 11,098K_{IU} + 596,3$. Достоверность ап-

проксимации полученной зависимости составила $R^2 = 0,9313$. По полученной зависимости определяем порог срабатывания фильтровой защиты по коэффициенту напряжения прямой последовательности при максимально допустимой температуре обмоток 135°C , соответствующей классу нагревостойкости изоляции, $K_{IU} = 59\%$.

Чтобы учесть коэффициент загрузки электродвигателя при определении порога срабатывания K_{IUt} по полученным экспериментальным данным был построен график зависимости установившейся температуры статорных обмоток электродвигателя от тока $\tau_{уст*} = f(I_*)$ в относительных единицах (рисунок 5). Уравнение регрессии этой зависимости имеет вид $\tau_{уст*} = 2,5916 I_*^2 - 3,3686 I_* + 1,764$. Достоверность аппроксимации полученной зависимости составляет $R^2 = 0,8998$.

По кривым нагрева определяем время нагрева до предельно допустимой температуры при температуре окружающей среды $\theta_{окр.ср.} = 20^\circ\text{C}$

$$t_\partial = -T_H \cdot \ln \frac{\tau_{\partial on} - \tau_{уст}}{\tau_0 - \tau_{уст}}, \quad (13)$$

где τ_0 – начальная температура нагрева, $^\circ\text{C}$.

При изменении температуры окружающей среды на $\Delta\theta_{окр.ср.}$ время нагрева изменится на

$$\Delta t = -T_H \cdot \ln \frac{\tau_{\partial on} - (\tau_{уст} + \Delta\theta_{окр.ср.})}{\tau_{\partial on} - \tau_{уст}}. \quad (14)$$

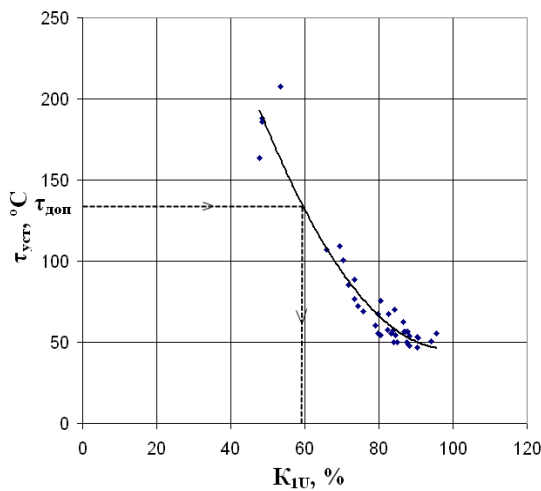


Рисунок 4 – График зависимости $\tau_{уст} = f(K_{IU})$ при номинальной нагрузке

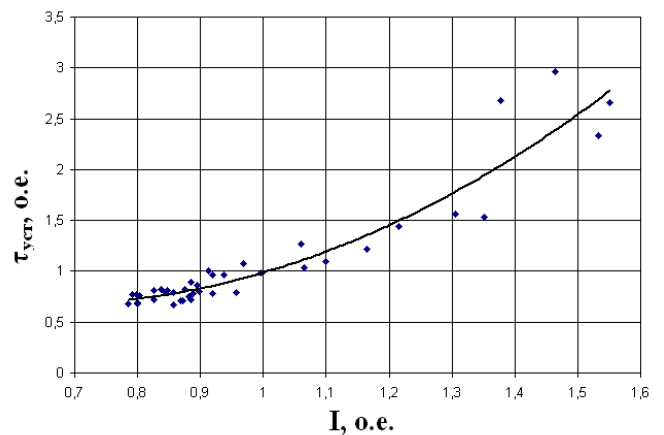


Рисунок 5 – График зависимости $\tau_{уст*} = f(I_*)$

Анализируя полученные результаты были сделаны следующие выводы:

1) наличие высших гармоник в фазах сети при коэффициентах искажения синусоидальности кривой напряжения в пределах $0 - 5\%$ не оказывает существенного влияния на нагрев статорных обмоток электродвигателя АИРП 80А6 У2, основное тепловое воздействие оказывает несимметрия напряжений;

2) пороговое значение коэффициента напряжения прямой последовательности по критерию теплового старения изоляции обмоток K_{IUt} для электро-

двигателя АИРП 80А6 У2 при $\tau_{don}=135^{\circ}\text{C}$ составляет 0,59;

3) в режиме обрыва фазы минимальное время нагрева до предельной температуры составило 630 секунд;

Таким образом, в соответствии с алгоритмом обоснования параметров срабатывания устройств фильтровой защиты, мы можем определить диапазоны для их выбора.

В результате проведения экспериментальных исследований с использованием электродвигателя вытяжного вентилятора АИРП 80А6У2 мощностью 0,37 кВт было установлено, что

$$K_{1U_t} = K_{1U_{\min}} = 0,59.$$

Значение верхней границы диапазона коэффициента напряжения прямой последовательности принимаем, исходя из условия пуска более мощных электродвигателей, равным

$$K_{1U_{\max}} = 0,8.$$

Таким образом, для выбора уставки защиты по коэффициенту напряжения прямой последовательности получаем диапазон

$$0,59 \leq K_{1U} \leq 0,8.$$

При определении зависимости $t_{нагр} = f(K_{1U})$, учтено, что при $K_{1U} \geq 0,59$ время нагрева до предельной температуры равно бесконечности, а минимальное время нагрева будет наблюдаться в режиме обрыва фазы сети 0,38 кВ. Минимальное время нагрева до предельной температуры при обрыве фазы составляет 630 секунд, $t_{3_{\min}}$ принимаем исходя из максимального времени срабатывания токовых защит t_{T3} равным 0,2 сек.

Диапазон для выбора задержки времени на срабатывание защиты составляет

$$0,2 \text{ сек} \leq t_3 \leq 630 \text{ сек}.$$

Также была произведена оценка влияния несимметричного и несинусоидального напряжения на работу фильтрового устройства защиты. Эксперимент включал в себя две серии опытов. В первой серии на вход ФНПП подавалось несимметричное синусоидальное напряжение. Контролировалось напряжение на катушке магнитного пускателя U_{mn} . В другой серии опытов на вход фильтра подавали несимметричное, несинусоидальное напряжение и контролировали напряжение на катушке магнитного пускателя и элементах ФНПП. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых фазных напряжений варьировались в пределах 0 – 5%. Также при помощи осциллографа Актаком АСК-4166 записывались осциллограммы напряжения на элементах устройства защиты.

Для оценки уровня напряжения небаланса были определены зависимости коэффициента $K = U_{mn}/U_{om}$ от коэффициента напряжения прямой последовательности K_{1U} при наличии искажения формы кривой напряжения и при его отсутствии (рисунк б). Здесь U_{om} – напряжение отпущения якоря электромагнитного пускателя.

Анализ полученных графиков показывает, что при варьировании коэффициентов искажения синусоидальности кривых фазных напряжений 0 – 5% на выходе фильтра появляется напряжение небаланса, максимальное значение которого составляет $0,03U_{от}$. Это может привести к несрабатыванию устройства защиты при

аварийном режиме, что недопустимо в установках с высокими требованиями по безопасности.

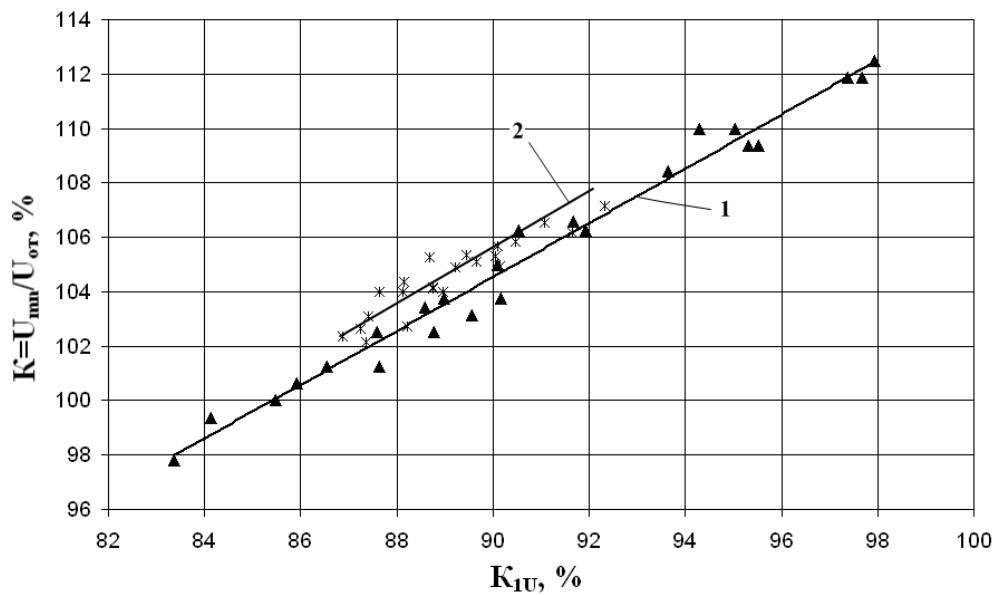


Рисунок 6 – Графики зависимости $K=f(K_{IU})$:
1 – при отсутствии искажения формы кривой напряжения ($R^2 = 0,9807$),
2 – при наличии искажения формы кривой напряжения ($R^2 = 0,8592$).

Для определения влияния тиристорного регулирования на работу электродвигателя и фильтрового устройства защиты в лабораторных условиях был проведен эксперимент, в ходе которого оценивалось качество напряжения и тока (в частности коэффициент искажения синусоидальности формы кривой напряжения) на входе и выходе тиристорного регулятора мощности, а также на выходе ФНПП, включенного между тиристорным регулятором и электродвигателем.

Анализируя полученные опытные данные был сделан вывод, что применение тиристорного регулятора значительно искажает форму кривой напряжения на электродвигателе и на выходе ФНПП при подключении его после тиристорного регулятора. На входе же тиристорного регулятора напряжение практически не искажается, коэффициент искажения кривой напряжения равен «естественному» уровню. Отсюда можно сделать вывод о том, что использование фильтровых защит электродвигателей в системе вентиляционного оборудования «Климатика» при тиристорном регулировании возможно, но необходимо подключать устройства фильтровой защиты до (на входе) тиристорных регуляторов мощности.

Четвертая глава **«Совершенствование устройства фильтровой защиты асинхронного электродвигателя от несимметричных и неполнофазных режимов работы»** содержит уточненную методику проектирования устройств фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы, схемы разработанных по предложенной методике устройств фильтровой защиты и результаты их экспериментальных исследований.

Для повышения надежности функционирования устройств фильтровой защиты асинхронных электродвигателей необходимо, чтобы эти устройства защиты позволяли реализовать алгоритм выбора необходимых параметров срабатывания (рисунок 1). Существующие устройства фильтровой защиты не позволяют реализовать данный алгоритм, так как в них отсутствует выдержка времени на срабатывание. Повысить надежность функционирования защиты можно за счет введения в структурную схему устройства звена выдержки времени на отключение.

Структурная схема предлагаемого устройства защиты приведена на рисунке 7.

Устройство защиты состоит из ФНПП, напряжение с которого через выпрямитель (В) и звено выдержки времени (ЗВ) подается в цепь управления исполнительного органа (ИО), который коммутирует катушку магнитного пускателя (МП). В нормальном режиме работы электрической сети напряжения, формируемого ФНПП, достаточно для включения исполнительного органа (ИО) и катушки магнитного пускателя (МП). При обрыве фазы сети или значительной несимметрии напряжение и ток в цепи управления исполнительного органа уменьшаются, и цепь управления катушкой магнитного пускателя размыкается с выдержкой времени.

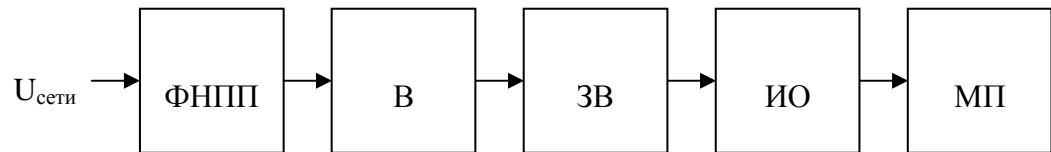


Рисунок 7 – Структурная схема предлагаемого устройства защиты

В качестве звена выдержки времени принимаем стандартную RC-цепочку.

Максимально возможное сопротивление во времязадерживающей цепи определяется из выражения

$$R_3 \leq \frac{U_{xxвыпр.} \cdot k_{IU}}{I_{упр.вкл.}} - R_{ИО}, \quad (15)$$

где $U_{xxвыпр.}$ – выпрямленное напряжение холостого хода ФНПП, В;

k_{IU} – отношение напряжения прямой последовательности, при котором электродвигатель необходимо отключить, к номинальному, о.е;

$R_{ИО}$ – активное сопротивление цепи управления исполнительного органа.

После выбора сопротивления R_3 , емкость конденсатора, обеспечивающего требуемую выдержку времени, определяем из уравнения переходного процесса

$$C_3 = - \frac{t_3}{(R_3 + R_{ИО}) \cdot \ln \frac{U_{откл.} - U_{кон.}}{U_{нач.} - U_{кон.}}}, \quad (16)$$

где t_3 – требуемое время задержки, с;

$U_{нач.}$ – начальное напряжение на емкости в нормальном режиме работы, В;

$U_{кон.}$ – конечное напряжение на емкости в аварийном режиме (при однофазном $U_{10КЗ}$, двухфазном $U_{1МКЗ}$ коротком замыкании, или обрыве фазы $U_{10Ф}$), В;

$U_{откл.}$ – напряжение на емкости, при котором исполнительный орган размыкает цепь управления катушкой магнитного пускателя, В.

В соответствии с предложенной структурной схемой по уточненной методике окончательно разработано два устройства фильтровой защиты с замедлением срабатывания (рисунки 8, 9).

Для разработанных устройств защиты определили надежность функционирования в сравнении с базовым фильтровым устройством защиты без выдержки

времени. В качестве базового устройства защиты было принято устройство защиты по патенту РФ №2269855. Надежность функционирования выразили через процент правильных действий устройства защиты. Процент правильных действий разработанных устройств защиты в сравнении с базовым устройством увеличился на 81 %.

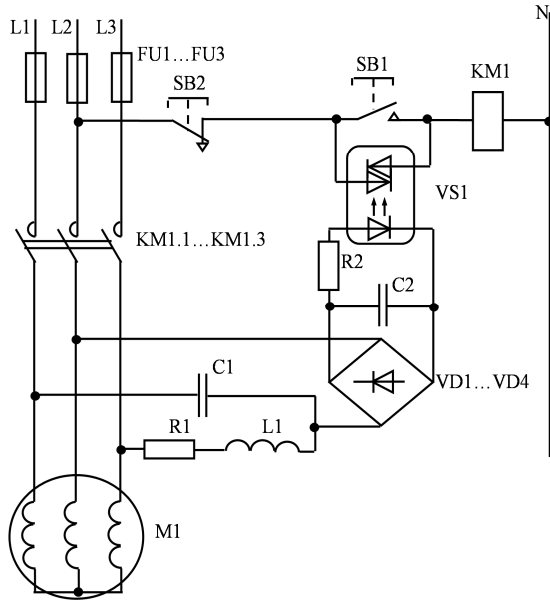


Рисунок 8 – Схема электрическая принципиальная устройства фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы с выдержкой времени в исполнительном органе

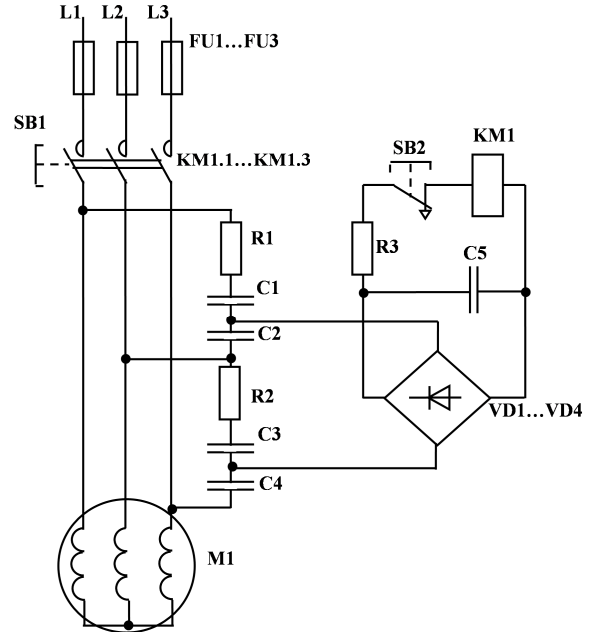


Рисунок 9 – Схема электрическая принципиальная устройства фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы с выдержкой времени на коммутационном аппарате

Относительная погрешность при срабатывании устройства защиты по пороговому напряжению прямой последовательности не превышает 3 %, с 95 % – процентной доверительной вероятностью можно считать, что погрешность составит 0,56 % от теоретически рассчитанной уставки по коэффициенту напряжения прямой последовательности. Относительная погрешность времени срабатывания устройства защиты не превышает 5 %, с 95 – процентной доверительной вероятностью можно считать, что погрешность составит 1,96 % от теоретически рассчитанной уставки по времени срабатывания.

В пятой главе «*Технико-экономическая эффективность применения предлагаемых устройств защиты*» в соответствии с методическими рекомендациями определены показатели экономической эффективности от внедрения разработанного устройства для защиты электродвигателей АИРП 80А6 У2 вытяжных вентиляторов ВО-5,6 птичника клеточного содержания в расчете на 1000 кур несушек.

Эффективность применения предлагаемых устройств защиты показала, что чистый дисконтированный доход за 9 лет составил 98,679...117,669 тыс. руб. для первого устройства защиты и 77,582...92,880 тыс. руб. для второго устройства защиты. То есть, эти денежные средства могут быть сэкономлены при использовании данных устройств защиты.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ защит асинхронных электродвигателей показал, что дальнейшее повышение надежности функционирования фильтровых защит возможно за счет правильного выбора уставок срабатывания по напряжению и времени в аварийных режимах сети 0,38 кВ, сопровождающихся несинусоидальностью напряжения.

2. На основе статистических исследований в сельских электрических сетях 0,38 кВ с производственной нагрузкой получены математическое ожидание коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения – 1,97 % при разбросе значений по выборке 0,47 % – 9,52 % и дисперсии – 1,02; и математическое ожидание коэффициента напряжения прямой последовательности – 101 % при разбросе значений по выборке 91,1 % – 108,8 % и дисперсии – 17,54.

3. С использованием разработанной методики обоснования параметров устройства фильтровой защиты для асинхронного электродвигателя АИРП 80А6 У2 при воздействии на него одновременно несимметричного и несинусоидального напряжения определен диапазон уставок по напряжению прямой последовательности, который составил $0,59 \leq K_{1U} \leq 0,8$.

4. Применение предложенной методики обоснования параметров устройства фильтровой защиты позволило определить для асинхронного электродвигателя АИРП 80А6 У2 при воздействии на него одновременно несимметричного и несинусоидального напряжения диапазон уставок по времени срабатывания, который составил $0,2 \text{ с.} \leq t_3 \leq 600 \text{ с.}$

5. Выполненная экспериментальная оценка влияния несинусоидального напряжения на работу устройства фильтровой защиты позволила установить, что при варьировании коэффициентов искажения синусоидальности кривых фазных напряжений в пределах 0 – 5% на выходе фильтра напряжения прямой последовательности появляется напряжение небаланса, не превышающее 3 % от напряжения срабатывания устройства защиты.

6. Повышение надежности функционирования электропривода вытяжных вентиляторов птицеводческих помещений достигнуто за счет развития схемных решений и методики проектирования устройств фильтровой защиты. Экспериментальные исследования усовершенствованных устройств защиты показали, что относительная погрешность при срабатывании по пороговому напряжению прямой последовательности не превышает 3 %, а по времени задержки на отключение – 5 %.

7. Применение предлагаемых устройств защиты вытяжных вентиляторов в птичнике клеточного содержания позволит снизить технологический ущерб на 18,900...22,500 тыс.руб. в год. на 1000 кур несушек.

Основные результаты работы опубликованы:

– в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мартынов, А.П. Устройство селективной фильтровой защиты асинхронных электродвигателей от несимметричных режимов работы / О.В. Кобзистый, А.П. Мартынов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – №12. – С.12-14.

2. Мартынов, А.П. Определение параметров срабатывания устройства фильтровой защиты асинхронного электродвигателя [Текст] / О.В. Кобзистый, А.П. Мартынов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. – №1. – С.45-47.

– в сборниках научных трудов вузов:

3. Мартынов, А.П. Анализ работы фильтровых устройств защиты электродвигателей в условиях искажения синусоидальности кривой напряжения [Текст] / О.В. Кобзистый, А.П. Мартынов // Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве: сборник научных трудов. – Ставрополь: АГРУС, 2007. – С.159-164.

4. Мартынов, А.П. К вопросу о влиянии несинусоидального напряжения на работу фильтровых устройств защиты электродвигателей [Текст] / О.В. Кобзистый, А.П. Мартынов // Электротехнологии и электрооборудование в с/х производстве: сборник научных трудов АЧГАА (выпуск 7, том 1). – Зерноград: АЧГАА, 2007. – С.15-18.

5. Мартынов, А.П. Экспериментальное определение порога срабатывания устройств фильтровой защиты электродвигателей [Текст] / О.В. Кобзистый, А.П. Мартынов // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж, 2009. – №2. – С.35-37.

6. Мартынов, А.П. Экспериментальное определение реального уровня несимметрии и искажения формы кривой напряжения в сетях напряжением 0,38 кВ производственного назначения [Текст] / О.В. Кобзистый, А.П. Мартынов // Энергетический вестник: сборник научных трудов. – Санкт-Петербург, 2009. – С.35-40.

7. Мартынов, А.П. Оценка напряжения небаланса фильтровых устройств защиты электродвигателей при наличии в сети высших гармоник напряжения [Текст] / А.П. Мартынов // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: сборник научных трудов. – Ставрополь, 2009. – С.38-43.

– патенты РФ:

8. Пат. 2335082 Российская Федерация МПК7 Н 03 Н 7/09. Электромагнитный компенсатор гармоник / Юндин М.А., Кобзистый О.В., Мартынов А.П., Труфанов В.А.; заявитель и патентообладатель Азово-Черномор. гос. агоинж. акад. – №2007127381/09; заявл. 17.07.2007; опубл. 27.09.2008; БИ №27, 2008г.

9. Пат. 2363083 Российская Федерация МПК7 Н 02 Н 7/08. Устройство селективной защиты трехфазных потребителей от несимметричных режимов работы / Юндин М.А., Кобзистый О.В., Мартынов А.П.; заявитель и патентообладатель Азово-Черномор. гос. агоинж. акад. – №2008132237/09; заявл. 04.08.2008; опубл. 27.07.2009; БИ №21, 2009г.

ЛР 65–13 от 15.02.99. Подписано в печать 10.11.2010 г.

Формат 60×84/16. Уч. – изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

РИО ФГОУ ВПО АЧГАА

347740, г. Зерноград, Ростовская обл., ул. Советская, 15.