

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ

На правах рукописи

УДК: 621.313.333

ШАПОВАЛОВ ВЯЧЕСЛАВ

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ
ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

**СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 255.01 – ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ**

Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук

КИШИНЭУ 2019

Диссертация подготовлена на кафедре «Электрификация сельского хозяйства и основы проектирования» Государственного Аграрного Университета Молдовы.

Научный руководитель:

ВОЛКОНОВИЧ Ливиу, профессор университет ГАУМ, доктор хабилитат технических наук.

Официальные оппоненты:

БЕРЗАН Владимир, зам. директора Института Энергетики АН РМ доктор хабилитат технических наук,

СТЁПКА Олег, конференциар университет, доктор технических наук.

Состав Специализированного Ученого Совета:

МАРЬЯН Григорий, председатель, профессор университет, ГАУМ, доктор хабилитат технических наук,

ЕРХАН Тудор, профессор университет, ГАУМ, доктор хабилитат технических наук,

ЧЕРНЕЙ Михаил, конференциар университет, доктор технических наук,

ДОБРЯ Виктор, конференциар университет, доктор технических наук,

ПОПЕСКУ Виктор, конференциар университет, доктор технических наук.

Защита состоится 27 декабря 2019 г. в «12-00» часов на заседании **Специализированного Ученого Совета - 255.01** при Государственном Аграрном Университете Молдовы по адресу: г.Кишинев, ул. Мирчешть 56, факультет «Аграрная инженерия и автотранспорт», этаж 3, кабинет 318.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Государственного Аграрного Университете Молдовы и на веб-странице ANACEC Республики Молдова (www.cnaa.md).

Автореферат разослан «25» ноября 2019 г.

Научный секретарь

Специализированного Ученого Совета:

конференциар университет, доктор технических наук

ПОПЕСКУ Виктор

Научный руководитель:

профессор университет

доктор хабилитат технических наук

ВОЛКОНОВИЧ Ливиу

Автор:

ШАПОВАЛОВ Вячеслав

© ШАПОВАЛОВ Вячеслав, 2019

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Трёхфазные короткозамкнутые асинхронные двигатели последних серий считаются самыми надежными электрическими машинами, однако в сельском хозяйстве наблюдается сравнительно высокий процент их выхода из строя. Объясняется это главным образом тем, что в процессе эксплуатации возникают такие условия, на которые машина не рассчитана при проектировании. В итоге сельское хозяйство РМ терпит большие убытки от отказов в работе электрооборудования. Так, например, выход из строя электродвигателя малой или средней мощности обходится хозяйствам примерно в 700-1200 леев. Технологические потери из-за отказа электродвигателя, как правило, значительно превышают его стоимость. Так, например, отказ хотя бы одного из элементов электрооборудования в поточной линии доения и первичной обработки молока на МТФ на 200 голов приводит к производственному ущербу, оцениваемому почти в 7000 леев, что во много раз превышает стоимость отказавшего устройства.

Таким образом, ежегодно в сельском хозяйстве необходимо восстанавливать огромное количество отказавших электродвигателей, на что расходуется большое количество дефицитных материалов, электроэнергии и дорогого рабочего времени. Поэтому проблема повышения эксплуатационной надежности электродвигателей в сельском хозяйстве посредством совершенствования их защиты является актуальной и имеет большое народнохозяйственное значение.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является разработка универсальной защиты асинхронных двигателей от основных аварийных режимов.

Задачи исследований. Провести анализ видов и типов асинхронных двигателей, применяемых в сельском хозяйстве (на примере животноводства), провести анализ условий их эксплуатации и причины аварийности. Разработать специализированную математическую модель для выполнения расчётов параметров асинхронных электродвигателей. Выполнить исследования характеристик и свойств источников диагностических сигналов: аварийной перегрузки двигателей и обрыва фазы питающей сети. Разработать структурную и принципиальную электрическую схему универсального защитного устройства.

Научная гипотеза исследований. В процессе предварительных исследований было выявлено наличие высших гармоник напряжения в нулевом проводе асинхронных трёхфазных двигателей последних серий. В связи с этим нами было высказано предположение о том, что природой появления этих гармоник является не конструктивная асимметрия двигателя или

питающей сети, как считалось ранее, а насыщение его магнитной системы. Т.е. асинхронные двигатели последних серий является в магнитном плане не линейными элементами, генерирующими в фазных обмотках напряжение высшие гармоники, и наличие которых необходимо обязательно учитывать при разработке защит, основанных на использовании напряжения нулевой последовательности в качестве сигнала аварийного режима обрыва фазы.

Научная новизна проведенных исследования состоит в раскрытии сущности возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе асинхронных двигателей последних серий. Предложена специализированная математическая модель асинхронного электрического двигателя, позволяющая определять величину напряжения высших гармоник в нулевом проводе. Научная новизна принятых технических решений подтверждена тремя авторскими свидетельствами по данной теме.

Теоретическая значимость исследований. Получено теоретическое обоснование наличия в нулевом проводе работающего асинхронного двигателя напряжения высших гармоник и определены факторы, влияющие на их величину и пределы их изменения.

Практическая значимость работы состоит в том, что обоснована типовая структурная схема защитных устройств от обрыва фаз, работа которых основана на появлении напряжения в нулевом проводе в момент обрыва фазы питающей сети. Обоснованы значения параметров и характеристик этого защитного устройства, определены его структурная и принципиальная электрические схемы, установлены его функциональные возможности и область применения. Полученные экспериментально характеристики асинхронных двигателей послужили основой для обоснования и разработки задания на проектирование универсального защитного устройства, то есть доведение его до уровня инженерной задачи.

Методология проведения исследований. При проведении научных исследований были использованы различные методы: методы *описания и анализа* в разделе – «Анализа парка асинхронных двигателей, используемых в сельском хозяйстве РМ». Методы *синтеза* – при обобщении результатов проведенных исследований характеристик системы «нуль двигателя - нуль сети» и исследований характеристик датчиков тока как диагностических источников аварийных сигналов обрыва фаз и токовой перегрузки. Метод *моделирования* - при разработке специализированной математической модели асинхронного двигателя. Метод *гипотетический* - при определении сущности появления напряжения в нулевом проводе асинхронного двигателя.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во «Введении» определены актуальность темы диссертации, цель и задачи исследования, его предмет и объект, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология научных исследований.

В первой главе диссертации – **«Анализ парка, условий работы и основных факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения на примере животноводства РМ»** выполнен анализ парка асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения и основных факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность. Приведены основные причины выходов их из строя. Дана краткая характеристика применяемых видов защиты.

Анализ парка электродвигателей, применяемых в животноводстве РМ, проведенный по материалам типовых проектов и по результатам непосредственных обследований на ряде животноводческих предприятий Молдовы показал, что в технологических процессах используются, в основном, асинхронные электродвигатели серий А2, АО2, АО2...СХ, 4А, 4А...СХ с классом изоляции Е, В, мощностью от 0,18 до 75,0 кВт. Причем, территориально, они распределены следующим образом. В помещениях, где непосредственно содержится животные – 39,6%, в кормоцехах – 23,9%, в помещениях первичной обработки сельскохозяйственной продукции (доильные залы, молочные, холодильники и т.п.) – 16,5%. Таким образом, около 80% электродвигателей сосредоточены в помещениях производственной зоны в условиях повышенной влажности и химически агрессивной среды.

Если условно принять, что электродвигатели мощностью 0,18-3,0 кВт - это двигатели малой мощности, 3,0-11,0 кВт - средней мощности и свыше 11,0 кВт - большой мощности, то в соответствии с этим распределение электродвигателей по мощности на объектах с/х назначения Молдовы будет соответствовать диаграмме на Рис.1.

Из диаграммы следует - в сельском хозяйстве Молдовы примерно 60% от общего числа электрических двигателей составляют электродвигатели малой мощности. электродвигатели средней мощности – 32,1%, двигатели большой мощности лишь 7,9%. Такое распределение электродвигателей по мощности и значительная доля двигателей малой и средней мощности объясняется преобладающим влиянием такой отраслей сельского хозяйства как животноводство.

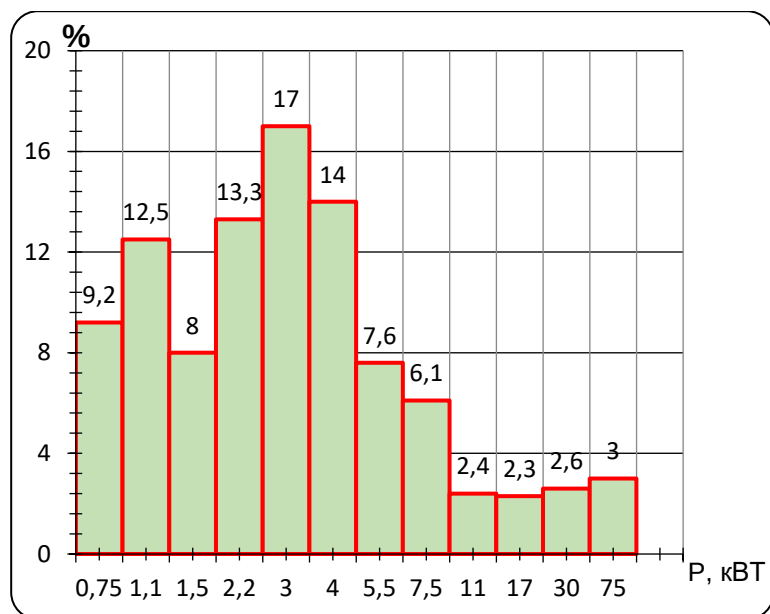


Рис.1. Распределение асинхронных электродвигателей по мощности (в % от общего кол-ва) на объектах с/х назначения Молдовы. (Разработано автором).

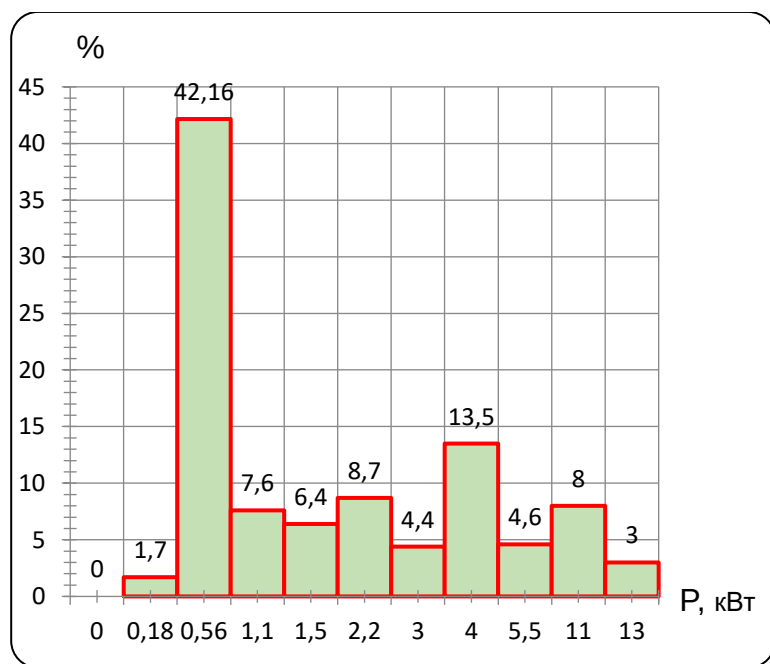


Рис. №2. Распределение электродвигателей по мощности, (в % от общего кол-ва), на крупной СТФ Украины. (По данным И.С.Мишина).

Примерно такая же картина распределения электродвигателей по мощности в животноводческих хозяйствах стран СНГ, например, в Украине и в России.

По данным И.С.Мишина можно построить диаграмму распределения электродвигателей по мощностям на крупной СТФ Украины (Рис.2). Из диаграммы видно, что 71% всех двигателей составляют двигатели малой мощности ($P \leq 3,0$ кВт), и 26,1% - двигатели средней мощности ($3,0 \text{ кВт} < P \leq 11,0 \text{ кВт}$). Итого: 97,1%.

Аналогичная картина и в областях РФ с развитым животноводством. По данным В.Н. Костюка в хозяйствах Поволжской зоны более половины (61%) составляют двигатели мощностью 1,1 кВт...3,0 кВт. По данным А.Н. Михальчука получены следующие результаты анализа парка электродвигателей, применяемых в животноводстве Вологодской, Ярославской и Владимирской областей РФ (круговая диаграмма на Рис. 3).

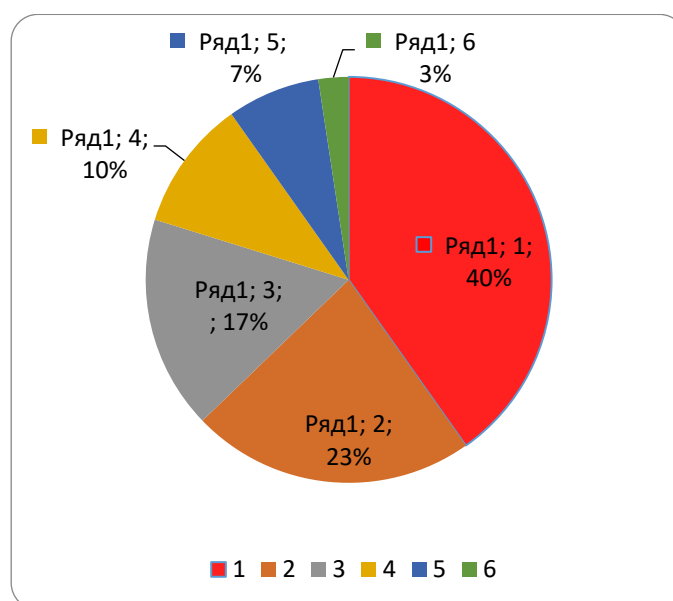


Рис. 3. Круговая диаграмма распределения электрических двигателей по мощности (Р), (в % от общего кол-ва двигателей, применяемых в сельском хозяйстве РФ).

(По данным А.Н. Михальчука).

1.1	P= 0.18 – 0.75 кВт	40,2%
1.2	P= 0.75 – 3.0 кВт	22,6%
1.3	P= 3.00 – 11.0 кВт	17,0%
1.4	P=11.00 – 18.5 кВт	10,4%
1.5	P=15.50 – 30.0 кВт	7,4%
1.6	P=30.00 – 55.0 кВт	2,4%

Проведенный анализ парка электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве РМ, в частности в животноводстве, позволяет сделать ряд выводов:

1. Двигатели, применяемые в животноводстве, составляют более 60% от всех электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве. Сосредоточены они в основном (более 80%) в помещениях производственной зоны с вредной средой.
2. В указанных объектах применяются в основном асинхронные короткозамкнутые электродвигатели серий АО, АО2, 4А и 4А СХ как общепромышленного, так и специального исполнения (из них наибольшее количество составляют двигатели серий АО2 и 4А).
3. Более 90% всех двигателей, применяемых в животноводстве, это двигатели малой и средней мощности, причем двигатели малой мощности (0,18-3,0 кВт) составляют около 60%.
4. Наибольшее применение (более 70,0%) имеют двигатели с числом пар полюсов равным четырем (то есть 1500 об/мин синхронной скорости).

Как показали результаты выполненных обследований важными факторами, существенно влияющими на эксплуатационную надёжность асинхронных электродвигателей, являются *условия окружающей среды*. Как правило, для них характерны резкие колебания температуры, повышенная влажность, наличие значительного количества агрессивных газов, запыленность.

Обследования среды животноводческих помещений в ряде хозяйств в Молдове, показали, что в животноводческих помещениях, не оборудованных системой вентиляции, значения относительной влажности достигают 95-98%, содержание аммиака $0,09 \text{ г/м}^3$, углекислого газа $14,7 \text{ г/м}^3$, что в 4-6 раз превышает допустимые ГОСТом 15150 (климатические условия) нормы. Работая в таких условиях, изоляция электродвигателей интенсивно стареет, что становится одной из причин снижения их надёжности.

В настоящее время промышленностью выпускаются специальные электродвигатели сельскохозяйственного исполнения (с индексом СХ), предназначенные для работы в помещениях с повышенной относительной влажностью и при наличии агрессивных газов, а также летучей пыли и температур окружающей среды до $+40^\circ\text{C}$. Однако использование в сельскохозяйственном производстве только двигателей специальной серии 4А СХ экономически нерационально. К тому же, поступление этих двигателей в хозяйства республики весьма ограничено и не превышает 15-17% от общего количества.

В значительной степени эксплуатационная надёжность электродвигателей определяется так же *режимами их работы*. Последние в свою очередь характеризуются степенью загрузки

и продолжительностью работы.

В технической литературе собран многочисленный статистический материал о количественном соотношении причин выхода из строя асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве. Кафедра «Электрификация сельского хозяйства и электропривод» Кишиневского Политехнического института так же провела исследования эффективности работы электродвигателей в условиях сельского хозяйства Молдовы и причины их выхода из строя. При этом применялись две методики:

- Ведение журналов отказов электродвигателей.
- Подконтрольная эксплуатация электродвигателей.

При обобщении данных по проведенным исследованиям и данных из литературных источников по данной теме отказы электродвигателей по основным причинам можно распределить следующим образом:

- Длительные перегрузки 30-35%.
- Неполнофазный режим 19-25%.
- Заклинивание ротора 15-17%.
- Увлажнение и загрязнение изоляции обмотки 15%.
- Нарушение охлаждения 5%.
- Механические повреждения и заводские дефекты 10%

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что около 70% двигателей выходят из строя по причине технологических и аварийных перегрузок, обрыва фазы питающей линии и заклинивания ротора.

Во второй главе диссертации **«Теоретических и экспериментальных исследований системы «нуль двигателя - нуль сети» как источника аварийного сигнала обрыва фаз»** рассмотрены вопросы теоретического обоснования появления в нулевом проводе асинхронного двигателя напряжения высших гармоник, экспериментально определены факторы, влияющие на величину этого напряжения и пределы его изменения.

Теоретическое обоснование появления в нулевом проводе трёхфазного асинхронного двигателя напряжения высших гармоник.

Как следует из курса ТОО между нулевой точкой трехфазной электрической сети и нулевой точкой трёхфазного потребителя, соединенного в звезду, в не симметричном режиме питания появляется напряжение. На этом явлении может быть основана защита трехфазных потребителей от не симметричных режимов и в частности от обрыва питающей фазы

асинхронных двигателей. Напряжения между нулевыми точками двигателя (0^1) и источника питания (0) в этом случае определяется формулой (1):

$$U_{00^1} = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (1)$$

Где: U_{00^1} - напряжение между нулевой точкой двигателя и питающей сети

$U_A; U_B; U_C$ - напряжение фаз источника;

$Y_A; Y_B; Y_C$ - полные проводимости фаз двигателей.

При отсутствии нулевого провода и обрыве фазы напряжение U_{00^1} достигает величины $\frac{U_\phi}{2}$.

При этом напряжение на двух остальных фазах нагрузки равно значению $\frac{U_{AB}}{2}$. В схемах

защиты электродвигателей, указанное напряжение U_{00^1} фиксируется исполнительным элементом (реле), установленным в нулевом проводе и действующем на отключение электродвигателя через схему управления.

Практика эксплуатации таких защит от обрыва фаз, основанных на фильтрации нулевой последовательности, показала, что во многих случаях происходит их ложное срабатывание. В работах Галюк А.С. и Грундулис А.О. приводится анализ работы таких защиты и причин их ложного срабатывания. По мнению этих авторов, ложное срабатывание таких устройств, происходит из-за наличия между нейтральными точками сети и двигателя, даже в режиме симметричного питания, напряжения (U_0') обусловленного некоторой асимметрией электрической системы самого двигателя. Кроме этого если в трёхфазной сети напряжение не симметрично тогда между указанными точками появляется еще напряжение асимметрии (U_0''), величина и фазовый угол которого зависят от структуры асимметрии сети и скольжения двигателя. При наличии переменной асимметрии самой сети фазовые углы этих напряжений (U_0' и U_0'') могут совпасть. В этом случае суммирующее напряжение становится максимальным, и защита срабатывает, хотя обрыва фазы нет.

$$U_0 \max = U_0' + U_0'' \quad (2)$$

Однако проведенные нами исследования показали, что даже при абсолютной симметрии и фазных напряжений и двигателя между нейтральными точками двигателя и сети имеется напряжение U_0 . Поэтому нами было высказано предположение о том, что природой его появления является не конструктивная асимметрия двигателя, а насыщение магнитной системы двигателя. Т.е. асинхронные двигатели последних серий является в магнитном плане

не линейными элементами, генерирующими в фазных обмотках напряжение высших гармоник. Они появляются в нулевом проводе двигателя и их наличие необходимо обязательно учитывать при разработке защит, основанных на использовании напряжения нулевой последовательности в качестве сигнала аварийного режима обрыва фазы.

Покажем это математически.

Учитывая нелинейность ферромагнитной среды, в условиях магнитного насыщения магнитопровода современных асинхронных двигателей, даже синусоидальному закону распределения кривой м.д.с. в воздушном зазоре двигателя должна соответствовать не синусоидальная волна распределения магнитной индукции $B(t, \gamma)$. Такую не синусоидальную волну магнитной индукции можно разложить в ряд нечетных синусоидальных гармоник (методом Фурье). При этом наиболее сильно будут выражены первая и третья гармоники. Эти гармоники (в отличие от пространственных гармоник, обусловленных не синусоидальностью м.д.с.) могут являться следствием насыщения магнитной системы двигателя. Такие гармоник принято называть *гармониками насыщения*.

Вращаясь со скоростью основного магнитного поля, пространственная не синусоидальная волна магнитной индукции $B(t, \gamma)$, определяемая формулой (3), индуцирует в каждой фазе электродвигателя э.д.с., содержащие нечетные гармоники (в основном первую и третью) и определяемые формулами (4).

$$B(t, \gamma) = B_{M1} \sin(\omega_1 \cdot t - p\gamma_1) + B_{M3} \sin 3(\omega_1 \cdot t - p_1 \cdot \gamma) \quad (3)$$

где: B_{M1}, B_{M3} - соответственно амплитуда магнитной индукции первой и третьей гармоник

ω_1 - угловая частота,

p_1 - число пар полюсов статора,

γ - пространственный угол.

$$\begin{aligned} e_{ad} &= E_{m1} \cos \omega_1 \cdot t + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \\ e_{cd} &= E_{m1} \cos(\omega_1 \cdot t + 2\pi / 3) + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \\ e_{bd} &= E_{m1} \cos(\omega_1 \cdot t - 2\pi / 3) + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \end{aligned} \quad (4)$$

где: E_{m1} и E_{m3} - соответственно амплитуда э.д.с. первой и третьей гармоник,

ω_1 и ω_3 - угловая частота первой и третьей гармоник.

Учитывая это, определим напряжение между нулём двигателя и нулём сети (точки 0 и 0') по методу двух узлов (Рис.4.) по формуле (5).

$$U_0 = \frac{(e_{at} + e_{ad})g_a + (e_{bt} + e_{bd})g_b + (e_{ct} + e_{cd})g_c + (i_a + i_b + i_c)}{g_a + g_b + g_c} \quad (5)$$

где: e_{at}, e_{bt}, e_{ct} - э.д.с. вторичных обмоток трансформатора Т системы электроснабжения,

e_{ad}, e_{bd}, e_{cd} - э.д.с. обмоток статора двигателя М,

g - проводимости ветвей по фазам,

i - токи по фазам.

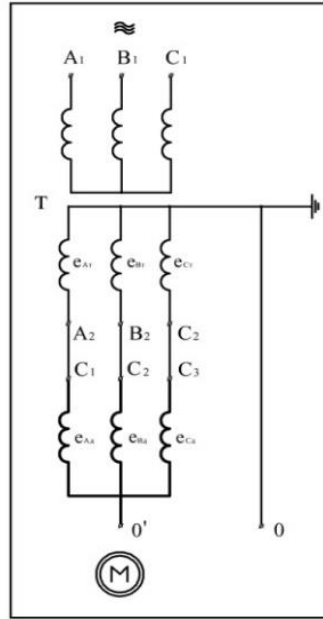


Рис. 4. Схема расчета напряжения между точками O и O' по методу двух узлов.

Для случая симметричного трансформатора Т, симметричного электродвигателя М и симметричного питающего кабеля, э.д.с. трансформатора – (e_{at}, e_{bt}, e_{ct}) синусоидальны по форме и имеют одинаковые амплитуды поэтому геометрическая сумма их произведений: на одинаковые проводимости $(e_{at} \cdot g_a + e_{bt} \cdot g_b + e_{ct} \cdot g_c)$ - равна нулю. Так же равна нулю и сумма токов в ветвях по фазам $i_a + i_b + i_c$. Тогда уравнение (5) принимает вид:

$$U_{.0} = \frac{e_{ad} \cdot g_a + e_{bd} \cdot g_b + e_{cd} \cdot g_c}{3g} \quad (6)$$

Подставив в формулу (6) значения э.д.с. в фазах двигателя ($e_{ad} \cdot e_{bd} \cdot e_{cd}$) из уравнения (4) получим:

$$U_0 = E_{m3} \cos \cdot 3\omega_1 \cdot t \quad (7)$$

Таким образом, в трехфазных асинхронных короткозамкнутых электрических двигателях с **насыщенной магнитной системой** даже при абсолютной конструктивной симметрии двигателя и абсолютно симметричном электропитании между нейтральной точкой обмотки статора и нейтральной точкой сети возникает синусоидальное напряжение утроенной частоты.

При обрыве одной из фаз между указанными выше точками ($00'$) дополнительно появляется напряжение нулевой последовательности основной гармоники с частотой 50 Гц, которое суммируется с напряжением третьей гармоники с частотой 150 Гц. Об этом свидетельствует и форма напряжения $U_{00'}$ полученного нами при его осцилографировании (Рис.5). Очевидно, что для правильной настройки устройств защиты от обрыва фазы, основанных на появлении напряжения между этими точками, необходимо знать количественные значения напряжения U'_0 и факторы, влияющие на его величину.

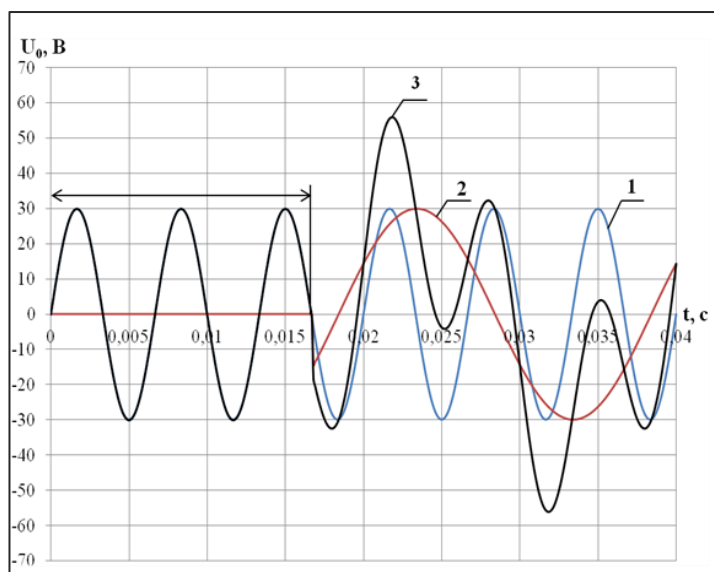


Рис.5. Характер изменения напряжения U_0 для двигателя 4А80В4УЗ при обрыве фазы в режиме ХХ (холостого хода) (стрелкой показан момент обрыва фазы сети).
 1 – составляющая напряжения U_0 , с частотой $f = 150$ Гц,
 2 – составляющая напряжения U_0 , с частотой $f = 50$ Гц,
 3 – суммарное напряжение U_0 обеих составляющих.
 (Разработано автором).

Для подтверждения заявленного теоретического предположения были выполнены расчёты с использованием разработанной специализированной математической модели и проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Разработка специализированной математической модели трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с насыщенной магнитной системой.

Из рассмотренных литературных источников наиболее корректно физическое состояние насыщенной электрической машины может быть описано математической моделью электромеханического преобразователя, приведенного в работах академика А.П. Копылова. Модель рассматривает насыщенную электрическую машину, однако нелинейность ее учитывается характеристикой намагничивания главной магнитной цепи при допущении синусоидального распределения магнитодвижущих сил (м. д. с.) обмоток и магнитного поля, т.е. электрическая машина рассматривается как линейный в магнитном плане элемент, но с изменяющимися параметрами. Однако такая модель не позволяет рассчитать напряжение высших гармоник, появляющихся в нулевом проводе асинхронных двигателей последних серий и которое необходимо учитывать, как составную часть источника аварийного сигнала обрыва фазы.

Исходя из выше изложенного, можно считать целесообразным, дополнить существующие виды математических моделей специализированной математической моделью.

Предлагаемая математическая модель асинхронной машины содержит следующие уравнения:

- электрического равновесия цепей статора и ротора;
- магнитного состояния (их количество может быть различным и зависит от уровня детализации магнитопровода; в свою очередь уровень детализации определяется спецификой решаемых задач и необходимостью достижения заданной точности);
- электромеханического преобразования энергии.

Представим вышеперечисленные уравнения в векторной форме;

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{i} \cdot R - \vec{U} = 0 \\ \omega_0 \vec{\Psi} = \omega_0 \vec{\Psi}(\vec{\varphi}, \vec{i}) \\ f(\vec{\varphi}, \vec{i}) = 0 \\ M_s - M_c - J \frac{d\omega}{d\tau} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (8) \\ (9) \\ (10) \\ (11) \end{array}$$

где: $\vec{\Psi}$, $\vec{U}$, $\vec{i}$, $\vec{\varphi}$ – вектора синхронных потокосцеплений, напряжений, токов и магнитных

потоков схемы замещения магнитной цепи;

$\omega_0 = 2\pi \cdot f$ - угловая синхронная скорость;

$\tau = \omega_0 \cdot t$ - синхронное время;

R – матрица активных сопротивлений электрических контуров;

ω – скорость вращения ротора;

M_c – момент сопротивления на валу двигателя, являющийся известной функцией скорости;

J – момент инерции вращающихся частей;

M_ψ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем и определяемый согласно формуле:

$$M_\psi = \frac{P}{\omega_0 \sqrt{3}} [\omega_0 \Psi_A \cdot (i_B - i_C) + \omega_0 \Psi_B \cdot (i_C - i_A) + \omega_0 \Psi_C \cdot (i_A - i_B)] \quad (12)$$

Для совместного решения уравнений (8–10), приведём уравнения (9 - 10) к дифференциальному виду, для чего продифференцируем их как сложные функции по независимой переменной τ (время):

$$\frac{d(\omega_0 \bar{\Psi})}{d\tau} = \frac{\partial(\omega_0 \bar{\Psi})}{\partial \vec{i}} \cdot \frac{d\vec{i}}{d\tau} + \frac{\partial(\omega_0 \bar{\Psi})}{\partial \vec{\varphi}} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \vec{\varphi}} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} + \frac{\partial f}{\partial \vec{i}} \cdot \frac{\partial \vec{i}}{\partial \tau} = 0 \quad (14)$$

Введем обозначения:

$$\frac{\partial(\omega_0 \bar{\Psi})}{\partial \vec{i}} = A_{11}; \quad \frac{\partial(\omega_0 \bar{\Psi})}{\partial \vec{\varphi}} = A_{12}; \quad \frac{\partial f}{\partial \vec{\varphi}} = A_{22}; \quad \frac{\partial f}{\partial \vec{i}} = A_{21}; \quad (15)$$

где A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , матрицы соответствующих частных производных.

С учетом уравнений (13), (14) и (15) уравнения (8), (9) и (10)

примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\omega_0 \bar{\Psi})}{d\tau} + \vec{i} \cdot R - \vec{U} = 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\omega_0 \bar{\Psi})}{d\tau} = A_{11} \cdot \frac{\partial \vec{i}}{\partial \tau} + A_{12} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{22} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} + A_{21} \cdot \frac{\partial \vec{i}}{\partial \tau} = 0 \end{array} \right. \quad (18)$$

Из уравнений (17) получим:

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} = -A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot \frac{\partial \vec{i}}{\partial \tau} \quad (19)$$

где: A_{22}^{-1} - матрица, обратная матрице A_{22} .

Подставим (18) в (16):

$$\frac{d(\omega_0 \cdot \vec{\Psi})}{d\tau} = (A_{11} - A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot A_{12}) \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \quad (20)$$

Обозначим:

$$(A_{11} - A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot A_{12}) = S_\psi \text{ и } (-A_{22}^{-1} \cdot A_{21}) = S_\varphi \quad (21)$$

В общем виде матрицы S_ψ и S_φ имеют вид:

Тогда с учетом уравнений (20) и (21) уравнения (8 - 11) запишутся в виде:

$$\begin{cases} \frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{l} \cdot R - \vec{U} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\vec{\varphi})}{\partial \tau} = s_\varphi \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\omega_0 \vec{\Psi})}{\partial \tau} = s_\psi \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} M_\Sigma - M_c - I \frac{d(\omega)}{d\tau} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

Таким образом, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений математической модели асинхронной машины. Численно интегрируя эти уравнения по синхронному времени τ , получим семейство интегральных кривых:

$$\vec{\varphi} = \vec{\varphi}(\tau), \quad \omega_0 \vec{\Psi} = \omega_0 \vec{\Psi}(\tau), \quad \vec{l} = \vec{l}(\tau), \quad M_\Sigma = M(\tau). \quad (26)$$

Эти кривые описывают характеристики электрической машины, как в переходных, так и в установившихся режимах.

На основании представленной математической модели была разработана компьютерная программа. Программа разработана в объёме 377 операторов с использованием соответствующих математических приложений в виде программ и подпрограмм. Программа позволяет выполнять расчёты необходимых параметров асинхронного двигателя. В том числе: значения фазных токов, магнитной индукции на любом участке магнитной цепи электродвигателя и напряжение системы «нуль двигателя - нуль сети». Необходимые параметры электродвигателя можно определить и вывести на печать, как в нормальном, так и в аварийном режиме, в любой момент времени. Экспериментальные исследования показали, что расчеты, выполненные с применением математической модели адекватны с результатами экспериментальных исследований с относительной погрешностью не более 5 -7%

Экспериментальные исследования системы «нуль двигателя – нуль сети» как источник аварийного сигнала обрыва фаз.

Были определены объект исследования, цель и программа исследований.

Объект исследования - система нуль двигателя – нуль сети. Цель исследования - получение ряда характеристик системы «нуль двигателя – нуль сети» необходимых для проектирования и разработки защитного устройства электродвигателя от аварийного режима обрыва фазы питающей сети.

В соответствии с программой и методикой исследований нами были выполнены соответствующие экспериментальные исследования. Часть полученных результатов представлена в автореферате в виде графиков на Рис. (6 -9).

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно сделать ряд выводов:

- В процессе исследований было установлено, что абсолютная величина напряжения третьей гармоники полностью определяется степенью насыщения магнитной системы асинхронного двигателя и зависит от следующих факторов: напряжения сети, скольжения двигателя, мощности двигателя и числа пар полюсов двигателя.
- Максимальное значение этого напряжения соответствует режиму холостого хода асинхронных двигателей. С увеличением скольжения от режима холостого хода до полной остановки ротора величина указанного напряжения уменьшается примерно на 30-35%.
- С увеличением напряжения сети указанное напряжение растет, а с увеличением мощности асинхронных электрических двигателей и уменьшением числа пар полюсов напряжение уменьшается.

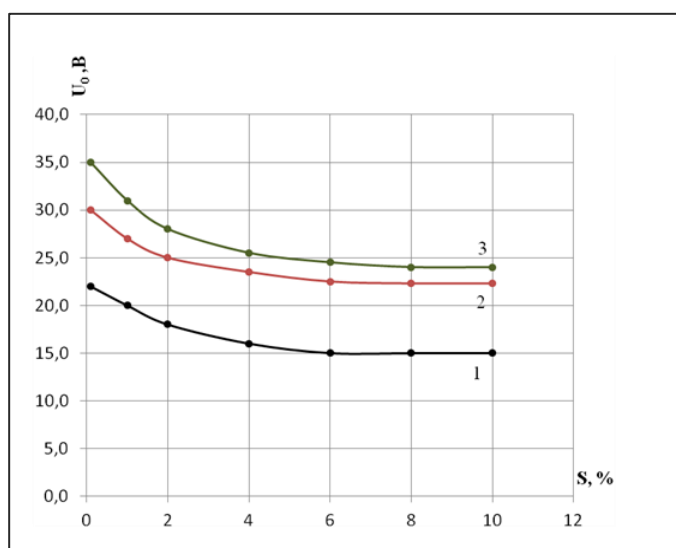


Рис.6. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от скольжения (S) для двигателя $P_n=1,5$ кВт при различном числе пар полюсов (p). Линия 1– (при $p=1$). Линия 2– (при $p=2$). Линия 3– (при $p=3$). (Разработано автором).

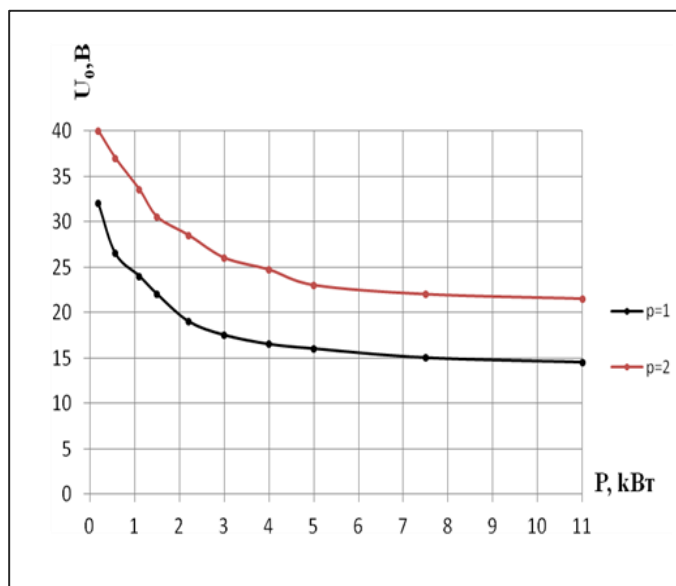


Рис. 7. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от мощности двигателя (P_n) при различном числе пар полюсов (p).
 Линия 1 – (при $p=1$). Линия 2 – (при $p=2$).
 (Разработано автором).

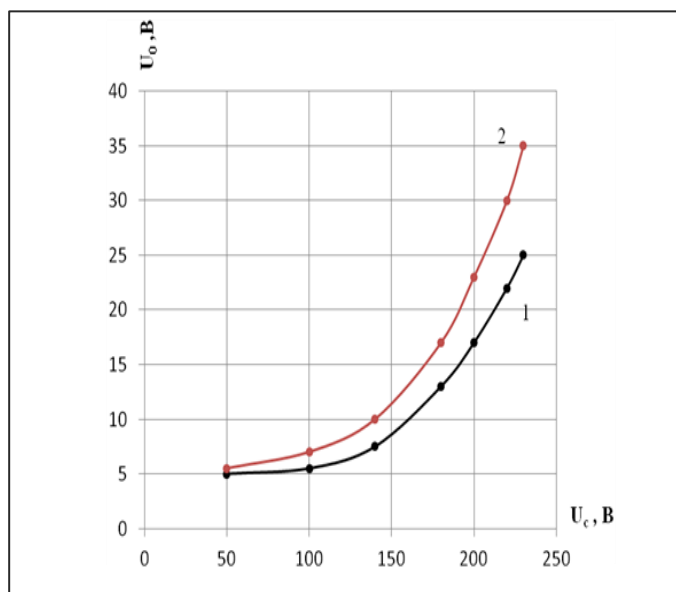


Рис..8. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от напряжения питающей сети (U_c) для двигателя $P_n=1,5$ кВт при различном числе пар полюсов (p). Линия 1 – (при $p=1$). Линия 2 – (при $p=2$).
 (Разработано автором).

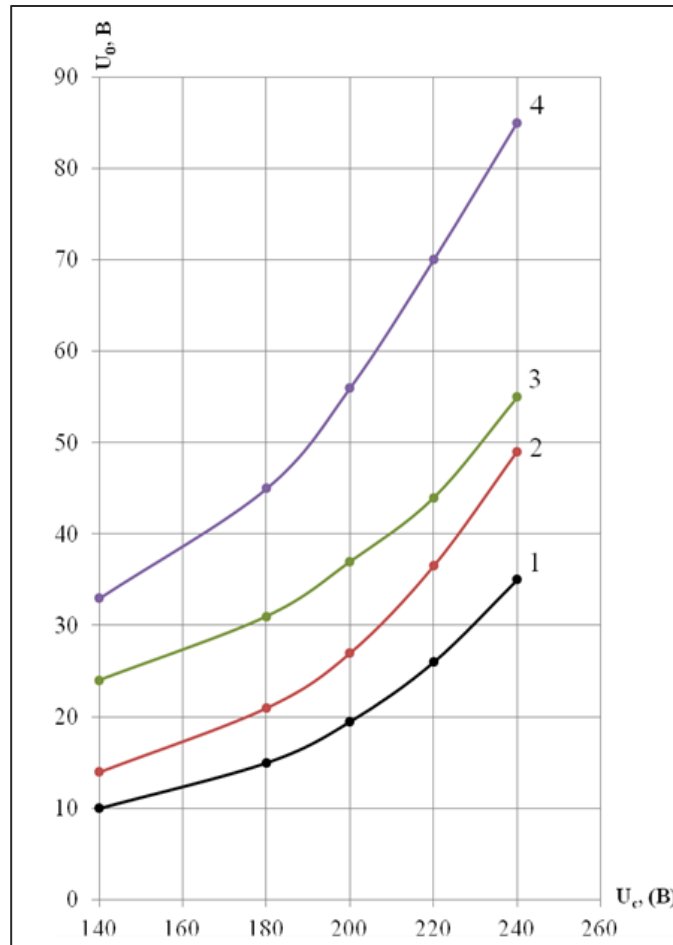


Рис.9. Зависимость напряжения (U_{00}) от напряжения питающей сети (U_c) для двигателей 0,55 кВт. при различном числе пар полюсов (p).
 Линии 1,2 в режиме холостого хода при симметричном питании (линия 1 при $p=1$, линия 2 при $p=2$).
 Линии 3,4 в режиме холостого хода и обрыве фаз (линия 3 при $p=1$, линия 4 при $p=2$).
 (Разработано автором).

Выполненные расчёты и проведенные экспериментальные исследования подтвердили гипотезу о том, что в работающем трёхфазном асинхронном короткозамкнутом двигателе даже при абсолютно симметричном двигателе и симметричном режиме питания в нулевом проводе двигателя генерируется синусоидальное по форме напряжение утроенной частоты ($f=150$ Гц) природа которого – магнитное насыщение стали двигателя.

В третьей главе «Разработка и исследование универсального устройства защиты трёхфазного асинхронного двигателя от аварийной перегрузки и обрыва фаз» рассмотрены вопросы исследования первичных преобразователей тока – датчиков тока, разработки

структурной и принципиальной электрической схемы универсального защитного устройства, а также расчёт ожидаемого экономического эффекта от применения предлагаемого устройства защиты.

Разработка и исследование первичных преобразователей - датчиков тока.

Выпускаемые промышленностью датчики тока предназначены для конкретных технических устройств с конкретной установленной мощностью. Поэтому для разрабатываемого универсального защитного устройства, рассчитанного на целый диапазон мощностей двигателей, они не подойдут. Необходимы соответствующие проверочные исследования и конструктивные доработки. С учетом этого было рассмотрено несколько вариантов выпускаемых промышленностью датчиков тока для различных устройств и агрегатов, применяемых в различных технологических процессах. Предварительные исследования показали, что наиболее подходящим из них, для разрабатываемого защитного устройства, является датчик тока, используемый в станциях управления погружными электронасосами типа ШЭТ 5801-0362Г-У2.

Исследования проводились на заводском датчике тока, и на датчике, после его реконструкции. Для этого в заводском датчике, в среднем сердечнике Ш-образного магнитопровода, был выполнен воздушный зазор $\delta=0,1\text{мм}$. Наличие воздушного зазора обеспечивает работу датчика в не насыщенном магнитном режиме на всём необходимом диапазоне мощностей исследуемых двигателей. После статистической обработки результаты экспериментальных исследований были представлены в виде таблиц и графиков.

На Рис.10 и Рис.11 представлены некоторые результаты экспериментальных исследований по реконструированному датчику.

Анализ характеристик полученных в процессе исследований датчика тока позволяет сделать следующие выводы:

- ❖ Внешняя характеристика датчика №2 $U_2=f(I_1)$ обеспечивает необходимую прямо пропорциональную зависимость между первичным током и вторичным напряжением на всём диапазоне изменения вторичного тока ($I_1=1,0\text{ А}-20,0\text{ А}$). (Рис.10).
- ❖ Внешняя $U_2=f(I_1)$ и внутренняя $U_2=f(I_2)$ характеристики конструктивно измененного датчика тока №2, полностью отвечают предъявляемым требованиям. (Рис.11).

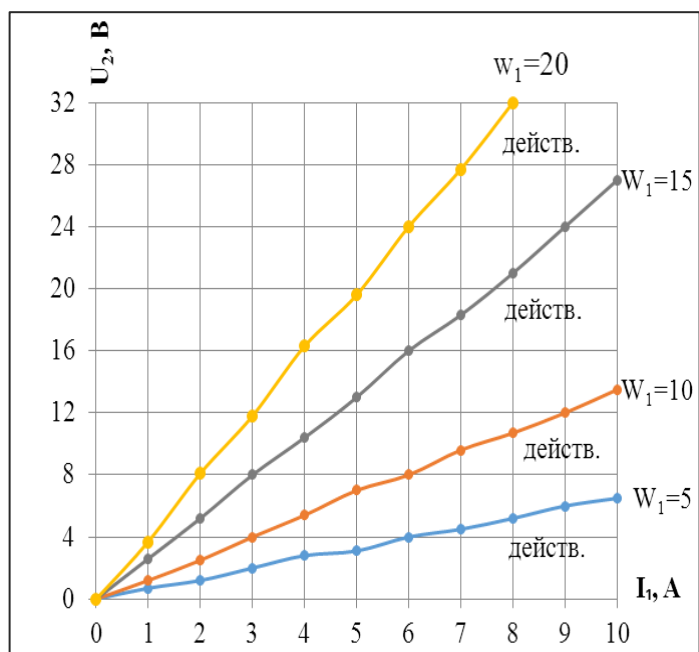


Рис. 10. Внешняя характеристика реконструированного датчика №2.
Зависимость вторичного напряжения U_2 от первичного тока I_1
при различном числе витков W_1 в первичной обмотке.
(Разработано автором).

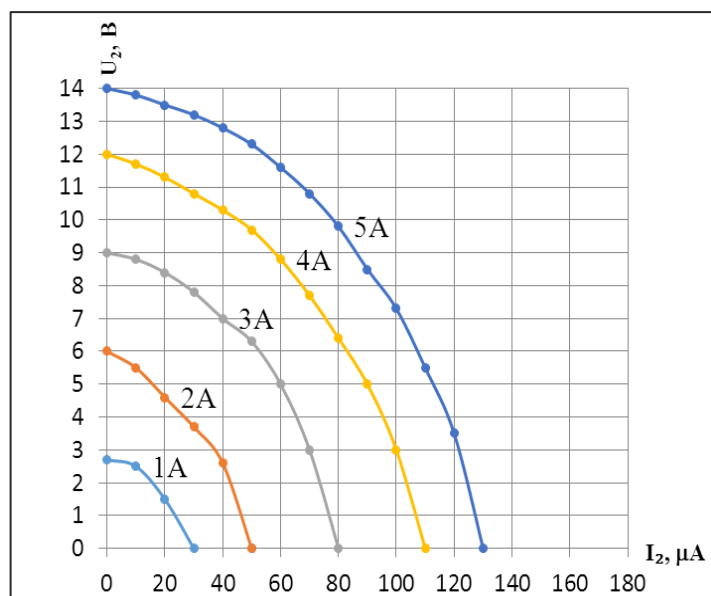


Рис. 11. Внутренняя характеристика реконструированного датчика №2.
Зависимость вторичного напряжения U_2 от вторичного тока I_2
при различном значении тока I_1 в первичной обмотке и при числе
витков в первичной обмотке $W=15$.
(Разработано автором).

В процессе исследований были так же определены оптимальные конструктивные параметры реконструированного датчика тока №2:

- число витков первичной обмотки $W_1 = 16$,
- число витков вторичной обмотки $W_2 = 800$,
- величина воздушного зазора (δ) в магнитной цепи датчика $\delta = 0,1 \text{ мм}$,
- оптимальное нагрузочное сопротивление вторичной обмотки $R_2 \geq 10,0 \text{ кОм}$.

Разработка структурной схемы защитного устройства.

В соответствии с поставленной целью разрабатываемое защитное устройство должно выполнять функции защиты электродвигателя от наиболее распространенных аварийных режимов, таких как перегрузка, заклинивание ротора, обрыв фазы. Исходя из этого, структурная схема устройства должна содержать ряд необходимых структурных блоков. В их числе:

- Первичные преобразователи (датчики аварийного сигнала).
- Пороговые элементы (необходимые для отстройки от возможных сигналов датчиков тока и не являющихся аварийными).
- Элементы выдержки времени (необходимые для отстройки от пусковых токов и небольших или кратковременных перегрузок).
- Элементы сравнения сигналов от первичных преобразователей и опорных сигналов для получения логического вывода о том, что сигнал является аварийным.
- Блока питания электронных элементов схемы защиты.
- Исполнительного механизма для коммутации силовой цепи электродвигателя.

В соответствие с поставленной задачей была разработана структурная схема универсального защитного устройства (УЗУ-1), представлена на Рис.12 и состоящая из указанных структурных элементов.

Схема состоит из двух каналов: канал контроля токовой перегрузки и канал контроля обрыва фазы. В состав канала контроля токовой перегрузки входят: датчик тока (ДТ), первый пороговый элемент (ПР1), элемент выдержки времени (ВВ), второй пороговый элемент (ПР3) и исполнительный механизм силовой цепи (КМ). В состав канала контроля обрыва фаз входят: датчик обрыва фаз (ДОФ), пороговый элемент (ПР2) и исполнительный механизм силовой цепи (КМ). Общим для обоих каналов является блок питания электронных элементов схемы (БП).

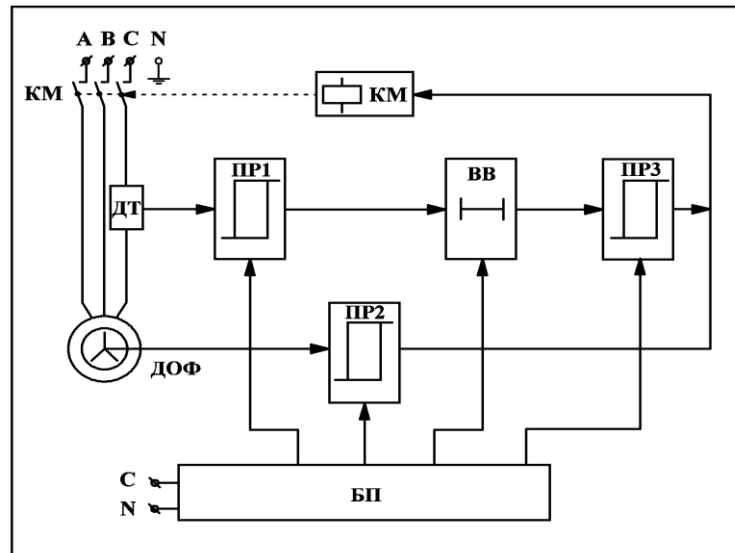


Рис. 12. Структурная схема устройства защиты УЗУ-1.
(Разработано автором).

Работа структурной схемы в режиме контроля токовой перегрузки.

Контроль перегрузки электродвигателя осуществляется первичным преобразователем тока ДТ (датчиком тока). В качестве первичного преобразователя используется реконструированный датчик тока от станции управления погружными насосами типа ШЭТ 5801-0362Г-У2. Первичная обмотка датчика тока включена последовательно в статорную цепь фазы электродвигателя и обеспечивает на выходе напряжение, величина которого прямо пропорциональна величине тока нагрузки электродвигателя. Напряжение с ДТ подаётся на выпрямительный элемент и далее на пороговый элемент ПР1. При появлении на одном из входов ПР1 напряжения больше или равного заданному (опорному напряжению) ПР1 открывается и пропускает сигнал на элемент выдержки времени ВВ. Элемент ВВ обеспечивает выдержку времени, величина которой обратно пропорциональна величине сигнала. При достижении на элементе ВВ величины сигнала равного напряжению открытия порогового элемента ПР3 последний открывается и пропускает сигнал на исполнительный механизм силовой цепи КМ который отключает двигатель от сети. При кратковременной перегрузке подача сигнала от ПР1 к ВВ прекращается раньше, чем его величина возрастёт до уровня напряжения при котором открывается третий пороговый элемент ПР3 и отключения электродвигателя не происходит.

Работа структурной схемы в режиме контроля обрыва фаз.

Контроль обрыва фаз электродвигателя осуществляется первичным преобразователем ДОФ, в качестве которого используется система «ноль двигателя - ноль сети» (ОО). Работа

схемы происходит аналогично работе схемы при контроле перегрузки с тем лишь отличием, что сигнал аварийного режима приходит на пороговый элемент ПР2 не от датчика тока ДТ, а от датчика обрыва фаз ДОФ и далее без использования элемента выдержки времени ВВ на исполнительный механизм силовой цепи КМ.

Разработка принципиальной электрической схемы.

В соответствии с представленной структурной схемой была разработана принципиальная электрическая схема (Рис.14) и выполнен расчёт всех элементов принципиальной электрической схемы.

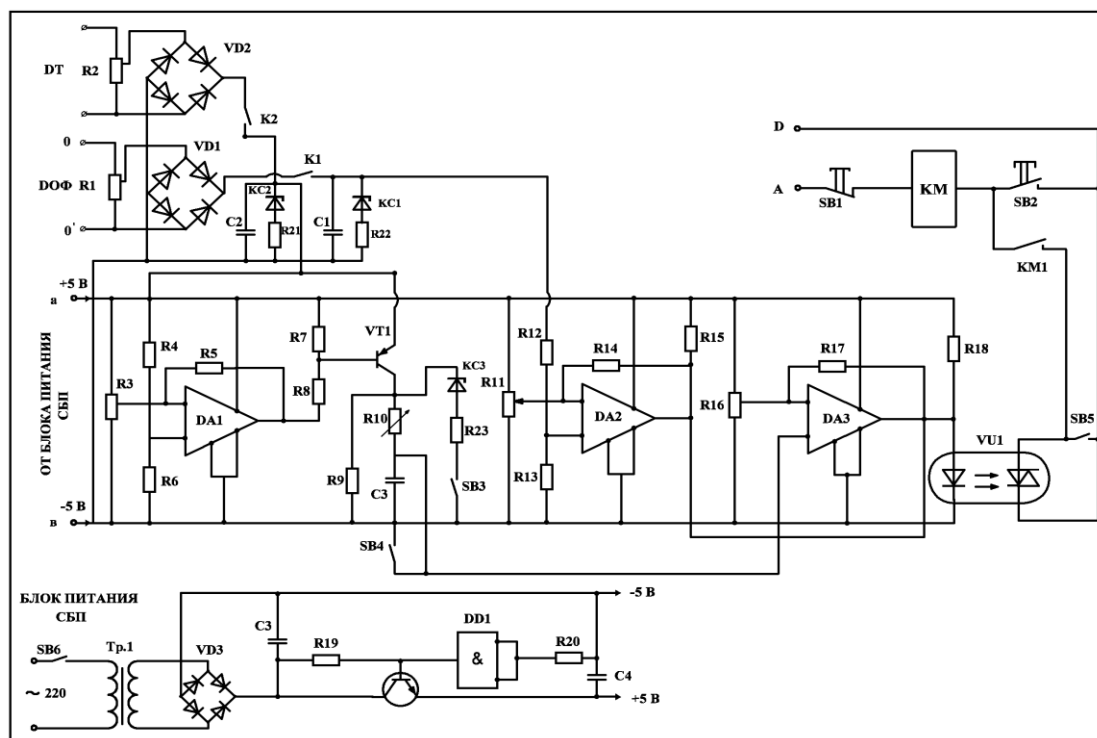


Рис. 14. Принципиальная электрическая схема защитного устройства УЗУ-1.
(Разработано автором).

В схеме предложено оригинальное техническое решение. В качестве пороговых элементов с регулируемой величиной порога в устройстве защиты предложена микросхема-компаратор типа К554-СА3. Компаратор представляет собой операционный усилитель, реализующий логическую функцию сравнения двух напряжений, подаваемых на два входа: прямой и инвертирующий. Указанный элемент обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими аналогами пороговых элементов (например, с использованием аналога динистора, или пороговый элемент на базе однопереходного транзистора). Прежде всего пороговый элемент на базе компаратора позволяет менять напряжение, подаваемое на вход

микросхемы, и тем самым настраивать порог на необходимую величину. Имея большой коэффициент усиления, компаратор обладает очень высокой чувствительностью, что обеспечивает срабатывание микросхемы при разнице в уровне напряжений на обоих входах всего несколько десятков милливольт. Пороговый элемент на базе компаратора обеспечивает связь с другими логическими элементами (например, микросхемами серии К155) без дополнительных устройств для согласования, что значительно упрощает схему. Кроме того, входной ток компаратора не превышает 2 мкА. Это в пять тысяч раз ниже входного тока порогового элемента построенного с использованием тиристора и стабилитрона (такая схема применена в устройстве защиты типа ФУЗ-М). Следует так же иметь в виду, что компаратор имеет значительную температурную стабилизацию составных элементов микросхемы. Таких преимуществ лишена схема порогового элемента, на однопереходном транзисторе применённая в устройстве защиты ФУЗ-У.

Разработанное устройство обеспечивает защиту двигателя от основных аварийных режимов (перегрузка, обрыв фаз, заклинивание ротора) трёхфазных асинхронных электрических двигателей мощности от 0,55 кВт до 11,0 кВт. По своим габаритным размерам оно выполнено так, что может быть установлено внутри заводских магнитных пускателей на место тепловых реле. Защитное устройство прошло производственные испытания в ряде хозяйств Республики Молдова и внедрено на ряде оборонных предприятий РФ (г. Москва, оборонные предприятия №107078 и №125833).

Ожидаемый годовой экономический эффект.

Экономический эффект от внедрения предлагаемого устройства определился как результат замены применяемых в настоящее время типовых устройств защиты РТЛ1021 и ФУЗ (базовые варианты №1 и №2) на разработанное устройство УЗУ-1 (предлагаемый вариант №4). Определение затрат на изготовление предлагаемого устройства защиты выполнено по формуле годовых приведенных затрат (Зпр):

$$З_{пр} = C_{г} + E_{н} * K_{г} \quad (26)$$

где: $C_{г}$ – годовые эксплуатационные затраты.

$K_{г}$ – капитальные затраты.

$E_{н}$ – нормативный коэффициент капитальных вложений в электропромышленности.

Тогда годовой экономический эффект ($\Delta_{г}$) определяется по формуле:

$$\Delta_{г} = ((C_{г1} + E_{н} * K_{г1}) + (C_{г2} + E_{н} * K_{г2})) - (C_{г4} + E_{н} * K_{г4}) \quad (27)$$

где: : $C_{г1}$ – эксплуатационные расходы по базовому варианту №1(защита РТЛ1021)

$C_{г2}$ – эксплуатационные расходы по базовому варианту №2 (защита ФУЗ)

$C_{г4}$ – эксплуатационные расходы по предлагаемому варианту №4 (защита УЗУ-1)

$K_{г1}$ – капитальные затраты по базовому варианту №1(защита РТЛ1021)

$K_{г2}$ – капитальные затраты по базовому варианту №2 (защита ФУЗ)

$K_{г4}$ – капитальные затраты по предлагаемому варианту №4 (защита УЗУ-1)

E_n – нормативный коэффициент капитальных вложений в электротехнике.

$\text{Эг} = (107,04 + 0,15 \cdot 341,62) + (82,90 + 0,15 \cdot 194,6) - (54,7 + 0,15 \cdot 265,47) = 175,51$ лей.

Срок окупаемости дополнительных затрат (T_z) определён из условия сравнимости технически сопоставимых вариантов. А именно: одновременного применения тепловых реле РТЛ1021 и ФУЗ (по базовым вариантам №1и №2) и устройства УЗУ-1 (предлагаемый вариант №4). Расчёт выполнен по формуле:

$$T_z = \frac{K_{гп} - K_{гб}}{C_{гб} - C_{гп}} = \frac{265,47 - 242,22}{82,9 - 54,70} = 0,82 \text{ года.} \quad (28)$$

где: $K_{гп}$ - капитальные затраты предлагаемого варианта;

$K_{гб}$ - капитальные затраты базовых вариантов;

$C_{гп}$ - текущие затраты предлагаемого варианта;

$C_{гб}$ - текущие затраты базовых вариантов.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Установлено что даже при абсолютно симметричном режиме питания при работе трёхфазных асинхронных двигателей последних серий между нулевой точкой обмотки статора и нулевой точкой сети генерируется напряжение высших гармоник. Особенно сильно выражена третья гармоника с частотой $f=150$ Гц [9].

В работе определена природа возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе трёхфазного асинхронного двигателя, это - магнитное насыщение магнитопровода двигателя [18]. Предложена специализированная математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая определить величину напряжения этих гармоник в рабочих и аварийных режимах работы двигателя [5,6,15].

Экспериментальные исследования показали, что расчеты, выполненные с применением разработанной математической модели, учитывающей насыщение магнитной системы современных асинхронных двигателей, адекватны с результатами экспериментальных исследований с относительной погрешностью не более 5 -7% [7].

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов:

1. Установлено, что парк трёхфазных асинхронных электрических двигателей, применяемых в сельском хозяйстве РМ (на примере животноводства), составляют двигатели серий АО, АО2, 4А в основном малой и средней мощности (0,18–11,0 кВт), работающие в производственной зоне с тяжелыми условиями среды [14].
2. Обзор парка асинхронных электрических двигателей показал, что около 70 % выходов их из строя составляют такие аварийные режимы как перегрузка, заклинивание ротора и обрыв фазы питающей линии [1].
3. Теоретически доказано, что асинхронные двигатели последних серий 4А и 5А следует рассматривать как нелинейные системы, генерирующие в фазных напряжениях двигателя высшие гармоники [9].
4. Экспериментально установлено, что абсолютная величина напряжения третьей гармоники полностью определяется степенью насыщения магнитной системы асинхронного электрического двигателя и зависит от следующих факторов: напряжения сети, скольжения двигателя, мощности двигателя и числа пар полюсов двигателя. Максимальное значение этого напряжения соответствует режиму холостого хода асинхронных электрических двигателей. С увеличением скольжения от режима холостого хода до полной остановки ротора величина указанного напряжения уменьшается примерно на 30-35%. С увеличением напряжения сети указанное напряжение растет, а с увеличением мощности асинхронных электрических двигателей и уменьшением числа пар полюсов напряжение уменьшается [13].
5. Был исследован и реконструирован датчик тока как источник диагностического сигнала аварийной перегрузки асинхронных электрических двигателей. Определены оптимальные конструктивные параметры реконструированного датчика:
 - число витков первичной обмотки $W_1 = 16$,
 - число витков вторичной обмотки $W_2 = 800$,
 - воздушный зазор магнитной системы $\delta = 0,1 \text{ мм}$,
 - оптимальное нагрузочное сопротивление вторичной обмотки $R_2 \geq 10,0 \text{ кОм}$ [16].
6. Разработано универсальное защитное устройство УЗУ-1 (по А.С. №1410175, А.С. №807435 и А.С. №877691) обеспечивающее защиту от аварийной перегрузки, обрыва фазы и заклинивания ротора для трехфазных асинхронных электрических двигателей мощностью от 0,55 кВт до 11,0 кВт. Разработанное устройство прошло производственные испытания в ряде

хозяйств Республики Молдова и внедрено на ряде оборонных предприятий России (г. Москва, оборонные предприятия №107078 и №125833) [2,3,8,17,19].

7. Экономический эффект от внедрения данного защитного устройства, рассчитан на основании рекомендаций по определению экономической эффективности от внедрения новой техники и составляет 175,51 лей/дв, а срок окупаемости дополнительных затрат 0,82 года.

По результатам выполненной работы можно сделать ряд практических рекомендаций и предложений:

- 1) Предложено высшие гармоники, генерируемые в нулевом проводе современных асинхронных двигателей учитывать и использовать при разработке устройств защиты, в которых в качестве сигнала обрыва фаз используется напряжение между нулевыми точками двигателя и сети [11,12].
- 2) Рекомендовано разработанное защитное устройство использовать вместо применяемых сейчас тепловых реле. С этой целью устройство по своим габаритным размерам выполнено так, что монтируется внутрь стандартных магнитных пускателей вместо тепловых реле. При этом устройство защищает двигатель не только от перегрузки и от обрыва фаз, но и от заклинивания ротора и к тому же является универсальным т.к. может настраиваться на любой двигатель мощностью от 0,5 кВт до 11,0 кВт.

IV. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ АВТОРА

1. ШАПОВАЛОВ, В.И., МИШИН, В.И. *Исследование эффективности работы электродвигателей в условиях сельского хозяйства Молдавии*. Отчет НИР, КПИ. Инв. №868508, № ГР 800059075. Кишинев: МолдНИИНТИ, 1980, 55с.
2. ШАПОВАЛОВ, В.И., МИШИН, В.И. и др. *Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы*. А.С. №807435, Б.И. №7 от 23.02.81.
3. ШАПОВАЛОВ, В.И., МИШИН, В.И. и др. *Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы*. А.С. №877691, Б.И. № 40 от 30.10.81.
4. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В. и др. *Устройство для защиты асинхронных двигателей от аварийных перегрузок и обрыва фазы*. В кн. Ученые высшего учебного заведения Молдавии народному хозяйству. Кишинев: РИО МолдНИИНТИ, 1985. 2 с.
5. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., МИШИН, В.И. *Математическая модель трёхфазного асинхронного двигателя для исследования аварийных режимов*: тезисы доклада МНТК «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов» Днепропетровск, 1985, 2 с.

6. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., МИШИН, В.И. *Математическая модель асинхронной машины*. Библиотечный указатель депонированных рукописей. Кишинев: МолдНИИНТИ, 1986, № I, 21с.
7. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В. *Некоторые результаты расчета магнитного состояния асинхронных двигателей*: тез. доклада XX НТК КПИ, Кишинев, 1986, 5 с.
8. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., ЛЕВКО, А.Н. и др. *Устройство для защиты погружного электродвигателя от перегрузок, обрыва фазы и сухого хода*. А.С. № 1410175, 1987.
9. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В. *Гармоники насыщения асинхронных двигателей в динамических и аварийных режимах*: тез. доклада V МНТК «Динамические режимы работы асинхронной машины», Каунас, 1988. 1 с.
10. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., ЛЕВКО, А.Н. *Электронное устройство защиты асинхронных электродвигателей*: тезисы доклада, НТК КПИ, Кишинев, 1989. 2 с.
11. ШАПОВАЛОВ, В.И., *Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал в устройствах защиты электрических двигателей*. Сборник научных трудов ГАУМ, Кишинэу: 2000. 1с.
12. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Некоторые результаты исследований параметров системы нуль сети 220/380 – нуль электродвигателя*. ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, часть 1. Москва: 2006, 4 с.
13. ШАПОВАЛОВ, В.И., ВОЛКОНОВИЧ, Л.Ф. *Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал обрыва фазы асинхронного электродвигателя*. ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, часть 1. Москва: 2006. 2с.
14. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Краткий анализ парка асинхронных электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве РМ*. Сборник научных трудов 6-й международной НТК, часть 1. Кишинэу: ГАУМ, 2015, 2с.
15. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Математическая модель асинхронного трехфазного электродвигателя в условиях насыщения магнитной системы*. Сборник научных трудов 6-й международной НТК, часть 1. Кишинэу: ГАУМ, 2015, 4с.
16. ШАПОВАЛОВ, В.И. ВОЛКОНОВИЧ, Л.Ф. *Исследования измерительного преобразователя тока*. Институт энергетики АН РМ. Международная конференция «Энергетика Молдовы-2016», часть III, 7с.
17. ШАПОВАЛОВ В.И. *Универсальное защитное устройство*. Сборник научных трудов ГАУМ 46-й выпуск, часть 1, Кишинэу: 2018, 5с.
18. ШАПОВАЛОВ В.И. *Асинхронные двигатели современных серий как не линейные системы - источники напряжения высших гармоник в нулевом проводе*. “*Știință agricolă*”, сборник научных трудов ГАУМ, выпуск 2. Кишинэу, 2019, 9 с., УДК 621.515.3.
19. SHAPOVALOV V. Universal protection device as an efficient way to increase the operational reliability of asynchronous engines. “*Journal of Engineering Science*”. Volume 26 (2), UTM, 2019. p.58-65. УДК 321.316.925(088.8).

ADNOTARE

la teza de doctor în științe tehnice cu tema: „**Perfecționarea dispozitivelor de protecție a motoarelor electrice asincrone trifazate utilizate în agricultură**”, Veaceslav Șapovalov, Chișinău, 2019.

Structura tezei include: introducere, trei capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 176 surse, 9 anexe, 120 pagini text de bază, 39 figuri, 68 tabele, rezultatele cercetării sunt publicate în 19 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: protecția motoarelor asincrone, fiabilitatea funcționării motoarelor asincrone, modelul matematic al unui motor de inducție.

Scopul cercetării: constă în elaborarea unui dispozitiv universal pentru protecția motoarelor electrice asincrone trifazate de principalele regimuri de rezervă.

Obiectivele cercetării constau în elaborarea unei scheme structurale și conceptuale al dispozitivului de protecție pe baza cercetării efectuate și a modelului matematic propus.

Metodologia cercetării științifice include metodele de analiză, sinteză, modelare și metoda ipotetică utilizată.

Noutatea și originalitatea științifică constă în dezvăluirea esenței apariției tensiunilor armonice ridicate în cablul zero a unui motor asincron.

Problema științifică importantă soluționată în domeniul cercetat. Este obținută o justificare teoretică a prezenței în cablul zero a motorului asincron a unei tensiuni înalte armonice și sunt determinați factorii care influențează magnitudinea acestei tensiuni și limitele modificării sale.

Semnificația teoretică a cercetării constă în justificarea schemei structurale și a parametrilor necesari pentru toate tipurile de dispozitive de protecție, a căror funcționare se bazează pe apariția unei tensiuni în cablul zero în momentul întreruperii fazei de alimentare.

Valoarea aplicativă a lucrării constă în faptul că caracteristicile obținute pe cale experimentală ale unui motor asincron au servit drept bază pentru fundamentarea și elaborarea sarcinii de proiectare a unui dispozitiv de protecție universal, adică aducându-l la nivelul unei probleme de inginerie.

Implementarea rezultatelor științifice. Cercetările analitice și experimentale au fost utilizate la elaborarea dispozitivului universal de protecție, ale cărui mostre experimentale au fost implementate într-un de gospodării agricole din Republica Moldova (s. Volontirovca, r-ul Ștefan-Vodă, ferma avicolă) și din Rusia (or. Moscova, întreprinderile de apărare nr. 107078 și nr. 125833).

АННОТАЦИЯ

докторской диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук на тему; **"Усовершенствование устройств защиты трёхфазных асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения"**, Вячеслав Шаповалов, Кишинев, 2019.

Структура диссертации состоит из: введения, трёх глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии из 176 наименований, 9 приложений, 120 страниц основного текста, 39 рисунков, 68 таблиц, научные результаты были опубликованы в 19 научных работах.

Ключевые слова: защита асинхронных двигателей, надежность работы асинхронных двигателей, математическая модель асинхронного электродвигателя.

Цель исследования заключается в разработке универсального устройства защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от основных аварийных режимов.

Задачи исследования заключаются в разработке структурной и принципиальной схемы универсального защитного устройства.

Методология научного исследования включает в себя использованные методы анализа, синтеза, моделирования и гипотетический метод

Научная новизна и оригинальность заключается в раскрытии сущности возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе асинхронного двигателя и разработке специализированной математической модели асинхронного двигателя, позволяющего определять напряжение высших гармоник в нулевом проводе.

Важная научная проблема, которая решена. Получено обоснование наличия в нулевом проводе асинхронного двигателя напряжения высших гармоник, определены факторы, влияющие на величину этого напряжения и пределы его изменения.

Теоретическая значимость исследования состоит в обоснованности структурной схемы и необходимых параметров для всех видов защитных устройств, работа которых основана на появлении напряжения в нулевом проводе в момент обрыва питающей фазы.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что результаты исследования послужили основой для обоснования и разработки задания на проектирование универсального защитного устройства, то есть доведение его до уровня инженерной задачи.

Внедрение научных результатов. Опытные образцы защитного устройства были опробованы в ряде хозяйств Молдовы (район Штефан Водэ, с. Волонтировка, птицеферма) и внедрены в России (г. Москва, оборонные предприятия №107078 и №125833).

ANNOTATION

Doctoral thesis in technical sciences: „**Improvement of protection devices for three-phase asynchronous motors used for agricultural purposes**”, Veaceslav Sapovalov, Chisinau, 2019.

Thesis structure includes: the introduction, three chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 176 sources, 9 annexes, 120 pages of the basic text, 39 figures and 68 tables, research results are published in 19 scientific papers.

Key words: protection of asynchronous motors, reliability of asynchronous motors, mathematical model of an induction motor.

The purpose of research: to develop a universal device for the protection of asynchronous three-phase electric motors according to the main reserve regimes.

The objectives of research: to develop a structural and conceptual scheme of the protective device based on the performed research and the proposed mathematical model.

The methodology of scientific research includes the methods of analysis, synthesis, modeling and hypothetical method used.

Scientific novelty and originality of the research consist in identifying the essence of the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable of an asynchronous motor.

The important scientific problem solved in the researched field. It was reached a theoretical argumentation justifying the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable of an asynchronous motor and there were determined the factors that influence the magnitude of this voltage and the limits of its change.

The scientific significance of research consists in justifying the structural scheme and the required parameters for all types of protection devices, the operation of which is based on the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable when interrupting power supply.

The applicative value of research consists in the fact that the obtained experimental characteristics of an asynchronous motor have served as a basis for substantiating and developing concrete task for designing a universal protective device, i.e. bringing it to the level of an engineering problem.

The implementation of scientific results. Analytical and experimental researches were used to develop the universal protection device, the experimental samples of which were implemented in a range of agricultural farms from the Republic of Moldova (the poultry farm located in Volontirovca village, Stefan-Voda district) and Russia (defense enterprises nr. 107078 and nr. 125833 from Moscow)

ШАПОВАЛОВ ВЯЧЕСЛАВ

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ
ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

**СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 255.01 – ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ**

Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук

Aprobat spre tipar: 07.11.2019
Hârtie ofset. Tipar digital.
Coli de tipar:2.0

Formatul hârtiei A4
Tiraj 50 exemplare
Comanda nr.33

Centrul Editorial UASM
Chişinău, str.Mirceşti, 42
Tel. 022-432-575

UNIVERSITATEA AGRARĂ DE STAT DIN MOLDOVA

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 621.313.333

ȘAPOVALOV VEACESLAV

**PERFEȚIONAREA DISPOZITIVELOR DE PROTECȚIE A
MOTOARELOR ELECTRICE ASINCRONE TRIFAZATE
UTILIZATE ÎN AGRICULTURĂ**

**SPECIALITATEA: 255.01 – TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE
PENTRU AGRICULTURĂ ȘI DEZVOLTAREA RURALĂ**

Rezumatul tezei de doctor în științe tehnice

CHIȘINĂU 2019