

На правах рукописи

Емелин Антон Валерьевич

**Адаптированный энергоаудит системы электроснабжения
и электропотребления предприятий хранения зерна**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар, 2010

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет» (ФГОУ ВПО «Кубанский ГАУ»)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Савенко Алексей Валентинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Богдан Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент
Коваленко Павел Васильевич

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Азово-Черноморская
государственная агроинженерная академия»
(г. Зерноград)

Защита состоится «20» мая 2010 г. в 10⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д220.038.08 при ФГОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет» по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, корпус факультета энергетики и электрификации, аудитория 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет».

Автореферат размещен на сайте www.kubsau.ru «19» апреля 2010 г.

Автореферат разослан «19» апреля 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

В.С. Курасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В ноябре 2009 года принят Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», целью которого является создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Предприятия хранения зерна являются крупными потребителями электрической энергии. Их разрешенная активная мощность достигает 3 МВт и более. В настоящее время в РФ имеется около 1147 элеваторных комплексов общей вместимостью зернохранилищ порядка 102 млн. тонн. Доля электрической энергии в общей себестоимости хранения зерна на предприятиях (элеваторах) достигает 34%.

С целью снижения себестоимости хранения зерна необходимо принять меры по экономии электроэнергии. Для этого требуется знать, как она расходуется и по времени и по каждому фидеру, какие участки предприятия, сколько потребляют, какие реальные графики нагрузки и т.д. Поэтому, при разработке мероприятий по повышению эффективности использования и экономии электроэнергии следует проводить энергетическое обследование предприятия или энергоаудит системы электроснабжения и электропотребления. Службе главного энергетика предприятия сложно непосредственно заниматься этими вопросами, ввиду отсутствия необходимого приборного обеспечения персонала соответствующего уровня и, главное – времени. Поэтому, актуальными являются вопросы, связанные с разработкой простого и наглядного методического и аппаратного обеспечения проведения внутреннего энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ предприятия хранения зерна, что позволит оценить потери электрической энергии по известным показателям качества, и выработать экономически обоснованные рекомендации по экономии электрической энергии и по приведению показателей ее качества к требованиям

стандарта. Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках научно-исследовательских работ в соответствии с госбюджетной темой ФГОУ ВПО «Кубанский ГАУ» на 2006-2010г.г.(№ГР01.2.00606851 раздел 1.3 «Снижение энергопотенциальных потерь в сельских электрических сетях»).

Рабочая гипотеза – проведение энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4кВ требует иметь в наличии адаптированную методику для предприятий хранения зерна, что позволит разработать экономические обоснованные мероприятия по снижению потребления электрической энергии и приведению ее показателей качества к нормируемым значениям.

Цель работы - снижение себестоимости хранения зерна на элеваторах путем адаптации методического и аппаратного обеспечения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления.

Задачи исследования. 1. Разработать математическую модель электрической сети 0,4кВ учитывающую основные особенности сельских электрических сетей с позиции потерь энергии и напряжения и наиболее полно учитывающую показатели качества электроэнергии и ее потери на каждом участке сети при различных режимах работы.

2. Исследовать взаимосвязь между показателями качества электрической энергии и показателями режимов работы электрической сети, на основании которой проводится синтез анализатора качества напряжения.

3. Разработать методику получения исходных данных для проведения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ на предприятии хранения зерна на базе разработанных аппаратных средств.

4. Разработать рекомендации по повышению качества электроэнергии и минимизации ее потерь по результатам проведения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления по технико-экономическому критерию.

5. Оценить технико-экономическую эффективность применения разработанной методики энергоаудита для предприятий хранения зерна.

Объектом исследования являются параметры системы электроснабжения и электропотребление 0,4 кВ предприятия хранения зерна и показатели режимов ее работы.

Предметом исследования являются закономерности, связывающие функционально потери мощности и электрической энергии с показателями режимов работы электрической сети 0,4 кВ и качества электрической энергии на предприятиях хранения зерна.

Методы исследований. Использовались методы расчетов электрических цепей, операционное исчисление, методы математической статистики и математического анализа.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- получена имитационная математическая модель электрической сети 0,4кВ на основании задаваемых величин ортогональных составляющих токов нагрузок, как наиболее удобными исходными данными, получаемыми из экспериментов, которая позволяет провести анализ относительных потерь мощности и показателей качества электрической энергии на каждом участке рассматриваемой сети при различных режимах ее работы;

- определена функциональная зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от значений фазных и линейных напряжений, позволяющая определять показатели качества электроэнергии косвенным методом;

- установлена функциональная зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от значения второй гармоники выходного сигнала напряжения трехфазного мостового выпрямителя, которая реализована в виде схемотехнического решения;

- разработан итерационный метод расчета и последующего выбора места установки и мощности устройства компенсации реактивной мощности в электрической сети по экономическому критерию.

Практическая значимость и ценность работы. На основе полученных теоретических положений разработан и изготовлен анализатор качества напряжения, который позволяет вести непрерывный мониторинг таких показателей качества электрической энергии как относительное отклонение напряжения, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

Предложена адаптированная методика получения исходных данных для энергоаудита система электроснабжения и электропотребления на предприятии хранения зерна на базе разработанных аппаратных средств, на основе которой могут быть выработаны мероприятия по снижению потребления электрической энергии и приведению показателей ее качества к нормируемым значениям. Эта методика также дает возможность предприятию хранения зерна провести энергоаудит силами службы главного энергетика, причем затраты при проведении энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления предприятия хранения зерна по предлагаемой методике и с предлагаемым аппаратным обеспечением снижены в 3,8 раз.

Разработанное методическое и аппаратное обеспечение использовалось при проведении энергоаудита ОАО «Величковский элеватор», учхоза «Кубань».

Материалы результатов научно-исследовательской работы используются в учебном процессе ФГОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет» при изучении дисциплин: «Электротехника и электроника», «Электроснабжение».

На защиту выносятся:

- математическая модель электрической сети 0,4кВ, распределенные нагрузки которой представлены источниками ортогональных токов (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007614667);
- функциональные зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от значений фазных и линейных напряжений;

- функциональная зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от значения второй гармоники выходного сигнала напряжения трехфазного мостового выпрямителя, которая получила аппаратную реализацию (патент РФ №2353943);

- итерационный метод выбора места установки и мощности устройства компенсации реактивной мощности в электрической сети на основе экономического критерия;

- методика получения исходных данных проведения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления на предприятии хранения зерна, в частности на ОАО «Величковский элеватор».

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях КубГАУ в 2007, 2008 годах; на II всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (Краснодар, КубГАУ) 2008 года; на 6-й Международной конференции (13-14 мая 2008 года, г.Москва, ВИЭСХ) «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве».

По результатам исследований получен один патент на изобретение, два свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ и опубликовано 9 печатных работ, в том числе 4 в изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, библиографического списка (121 наименование) и приложения. Диссертация изложена на 140 страницах, содержит 25 таблиц и 41 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, данные о практической ценности и научной новизне.

В первой главе «Проблемы проведения энергоаудита систем электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ предприятий хранения зерна»

рассмотрено использование электрической энергии в технологических процессах на предприятиях хранения зерна. Показаны особенности электроснабжения этих предприятий и обоснована необходимость проведения на них энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4кВ - как метода определения дополнительных потерь электрической энергии и показателей ее качества с возможностью идентификации причин и способов их устранения. Вопросами качества электрической энергии и определения её потерь занимались многие ученые: Железко Ю.С., Воротницкий В.Э., Лещинская Т.Б., Левин М.С., Мурадян А.Е., Тропин В.В., Богдан А.В., Поспелов Г.Е., Троицкий А.И., Кужеков С.Л., Коваленко П.В., Косоухов Ф.Д. и др.

На сегодняшний день отсутствует методика проведения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления для предприятий хранения зерна и сельского хозяйства в целом, то есть отсутствует методика сбора исходных данных, и методика обработки результатов энергоаудита. Отсутствуют доступные по цене для предприятий хранения аппаратные средства энергоаудита – анализаторы качества электроэнергии. Приглашение аудиторской фирмы или покупка дорогостоящего анализатора в настоящих экономических условиях не представляется возможным. Разработка научно обоснованного методического и доступного аппаратного обеспечения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления для предприятий хранения зерна позволит провести экономически обоснованные технические мероприятия по экономии электроэнергии и в итоге снизить себестоимость хранения зерна.

Во второй главе «Исследование закономерностей возникновения основных и дополнительных потерь мощности и электроэнергии в системе электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ сельскохозяйственного предприятия» рассмотрены процессы передачи электроэнергии в сельских электрических сетях. Закономерности взаимосвязи потерь мощности и показателей качества в сельских электрических сетях установлены с помощью последовательно усложняющихся моделей, в которых по теореме компенсации, со-

противление нагрузки может быть заменено идеальным источником тока, ток которого численно равен току в этом сопротивлении и имеет тоже направление, что и ток, протекающий через заменяемое сопротивление.

В модели одноконтурной сети постоянного тока относительные потери мощности по абсолютной величине совпадают с относительным значением отклонения напряжения. В модели одноконтурной сети переменного тока нагрузка имитируется источником активного тока и источником реактивного тока. Относительные потери мощности δP определяются через относительное отклонение напряжения δU

$$\delta P = -\delta U \cdot k_{nnp} \quad (1)$$

где k_{nnp} - коэффициент превышения потерь от реактивной мощности, равный

$$k_{nnp} = 1 + tg^2 \varphi \quad (2)$$

где $tg\varphi$ – коэффициент реактивной мощности.

На рис. 1 показан график зависимости относительных потерь мощности от относительного отклонения напряжения при различных значениях $tg\varphi$ - 0; 0,4; 1,0.

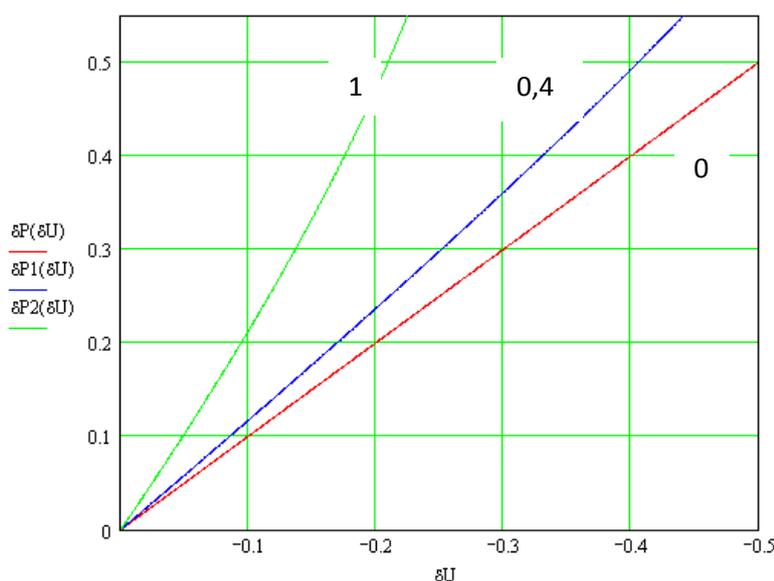


Рисунок 1 – Зависимость относительных потерь мощности от относительного отклонения напряжения при различных значениях коэффициента реактивной мощности.

При коэффициенте реактивной мощности равном 1 относительные потери мощности возрастают более чем в 2 раза.

Модель трехфазной цепи с сосредоточенными параметрами представлена на рис. 2. Нагрузка каждой фазы представляется идеальными источниками тока

в виде симметричных составляющих – формирующих сумму комплексов токов прямой последовательности, обратной последовательности, нулевой последовательности. Известно, что коэффициент превышения потерь от несимметрии нагрузки k_{nnn} задается

$$k_{nnn} = 1 + \varepsilon_{i2}^2 + \varepsilon_{i0}^2 \left(1 + \frac{3R_N}{R} \right) \quad (3)$$

где ε_{i2} , ε_{i0} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности; R – величина сопротивления фазы, R_N – сопротивление нейтрали. Поэтому в этом случае относительные потери мощности в электрической сети

$$\delta P = -\delta U \cdot k_{nnp} \cdot k_{nnn} \quad (4)$$

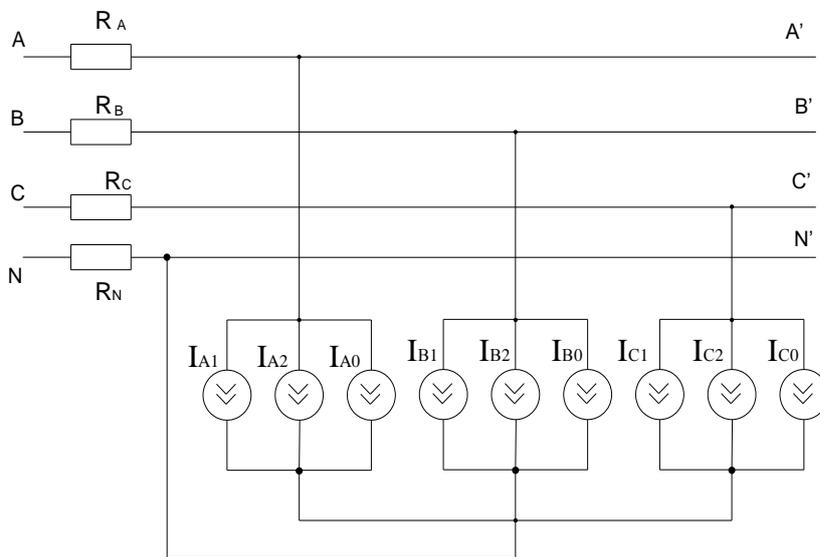


Рисунок 2 – Схема замещения трехфазной сети с учетом симметричных составляющих фазных токов

Установлена функциональная взаимосвязь коэффициентов несимметрии напряжений и токов по нулевой

последовательности при амплитудной несимметрии нагрузки

$$\varepsilon_{i0} = \frac{\varepsilon_{0U}}{R} \cdot \frac{U_A + U_B + U_C - I_A R - I_B R - I_C R}{I_A + I_B + I_C} \quad (5)$$

где $U_A, U_B, U_C, I_A, I_B, I_C$ - действующие значения фазных напряжений и токов.

В итоге потери электрической энергии за период времени T в линии

$$\Delta W_{\text{л}} = -\delta U \cdot k_{nnp} \cdot k_{nnn} \cdot P_{cp} \cdot T + \sigma^2 \cdot RT \quad (6)$$

где P_{cp} – среднее значение активной мощности за рассматриваемый период, $\sigma(I)$ – среднеквадратическое отклонение графика полного тока.

При проведении энергоаудита предлагается имитационная математическая модель сети 0,4 кВ. Эквивалентная трехфазная схема моделируемой сети показана на рис. 3. Источники тока имитируют действие однофазного электроприемника в каждой фазе. R_1, R_2, \dots, R_n активные сопротивления n межузловых участков проводников каждой фазы и нейтрали.

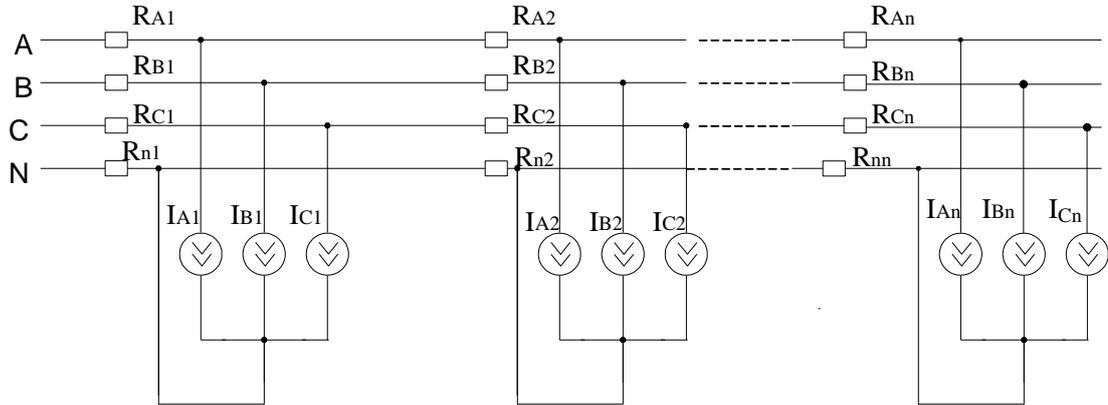


Рисунок 3 – Схема замещения электрической сети 0,4 кВ с распределенной нагрузкой

Напряжение в k -ом узле для каждой фазы определяется (если пренебречь сопротивлением нейтрали) по выражению

$$\dot{U}_{Ak} = \dot{U}_A - \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=j}^{na} \dot{I}_{Ai} \right) R_{Aj}; \quad \dot{U}_{Bk} = \dot{U}_B - \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=j}^{nb} \dot{I}_{Bi} \right) R_{Bj}; \quad \dot{U}_{Ck} = \dot{U}_C - \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=j}^{nc} \dot{I}_{Ci} \right) R_{Cj} \quad (7)$$

где k – номер рассматриваемого узла; na, nb, nc – количество потребителей на фазах A, B, C соответственно. Токи на участках $R_{A1}, R_{A2}, \dots, R_{An}$ и ток нейтрали

$$\dot{I}_{Ak} = \sum_{i=k}^{na} \dot{I}_{Ai}; \quad \dot{I}_{Bk} = \sum_{i=k}^{nb} \dot{I}_{Bi}; \quad \dot{I}_{Ck} = \sum_{i=k}^{nc} \dot{I}_{Ci}, \quad \dot{I}_{Nk} = \sum_{i=k}^{nn} \dot{I}_{Ni} \quad (8)$$

На основании предложенной модели разработана программа, которая позволяет произвести имитацию различных режимов работы электрической цепи, и дать количественную и качественную оценку потерь электрической энергии на всех участках сети. Предусмотрен расчет коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательности на каждой нагрузке, а

также коэффициентов несимметрии токов по нулевой и обратной последовательности по известным формулам Фортескью.

Предложены выражения для определения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) по фазным и линейным напряжениям: коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям, результаты расчетов по которым в отличие от приближенных формул, приведенных ГОСТ 13.109-97 совпадают с результатами расчетов по формулам Фортескью.

В третьей главе «Аппаратное обеспечение проведения энергоаудита систем электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ предприятий хранения зерна» предлагаются схемные решения и аппаратные средства, позволяющие службе главного энергетика предприятия хранения зерна, не приобретая дорогие приборы, проводить энергоаудит системы электроснабжения и электропотребления своими силами.

Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности определяется с помощью симметричной прецизионной резистивной «звезды» (рис. 4).

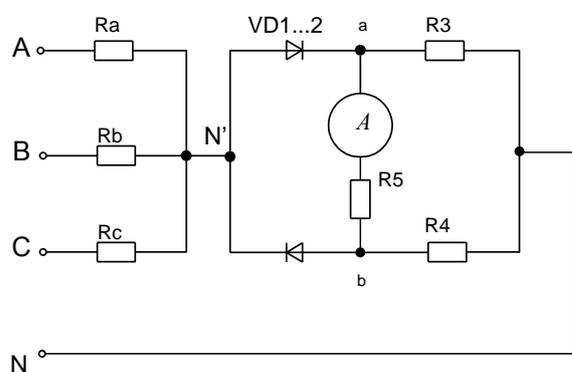


Рисунок 4 – Принципиальная схема для определения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности.

Ток нейтрали пропорционален напряжению нулевой последовательности. Для его измерения с целью уменьшения зоны нечувствительности предложено использование диодно-резистивного выпрямительного моста. Шкала магнито-электрического микроамперметра проградуирована в процентах и позволяет напрямую оценить коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности

$$\varepsilon_{0U} = 0,2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left(\left(\frac{\left| U_A \frac{1}{R_a} + U_B \frac{1}{R_b} + U_C \frac{1}{R_c} \right|}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{экв1}}} \right) \left(\frac{1}{R_4 + R_5} \right) + \left(\frac{\left| U_A \frac{1}{R_a} + U_B \frac{1}{R_b} + U_C \frac{1}{R_c} \right|}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{экв2}}} \right) \left(\frac{1}{R_3 + R_5} \right) \right) \quad (9)$$

Схема позволяет определить коэффициент отклонения нулевой последовательности от 0 до 10 % с абсолютной погрешностью соответствующей требованиям стандарта не более 0,3 %. Результаты подтверждены моделированием с помощью программы Electronics Workbench. Дана оценка параметрической чувствительности показаний микроамперметра. При отклонении параметров R_3 и R_4 на 5 % абсолютная погрешность в целом не превышает 0,1 %.

Относительное значение отклонения напряжения прямой последовательности определяется с помощью разработанной прецизионной резистивной мостовой схемы, в опорном плече которой используется прецизионный стабилизатор, обеспечивающий требуемую точность измерений рис.5а. Схема замещения представлена на рис. 5б. Опорное напряжение стабилизатора представлено источником ЭДС. Относительное отклонение напряжения определяется

$$\delta U = 0,2 \cdot \frac{-U_d (R_3 R_2 - R_1 R_4) + E (R_1 R_2 + R_1 R_4)}{R_1 R_2 R_5 + R_2 R_3 R_5 + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_4 R_5 + R_3 R_4 R_5 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_4 + R_2 R_3 R_4}, \% \quad (10)$$

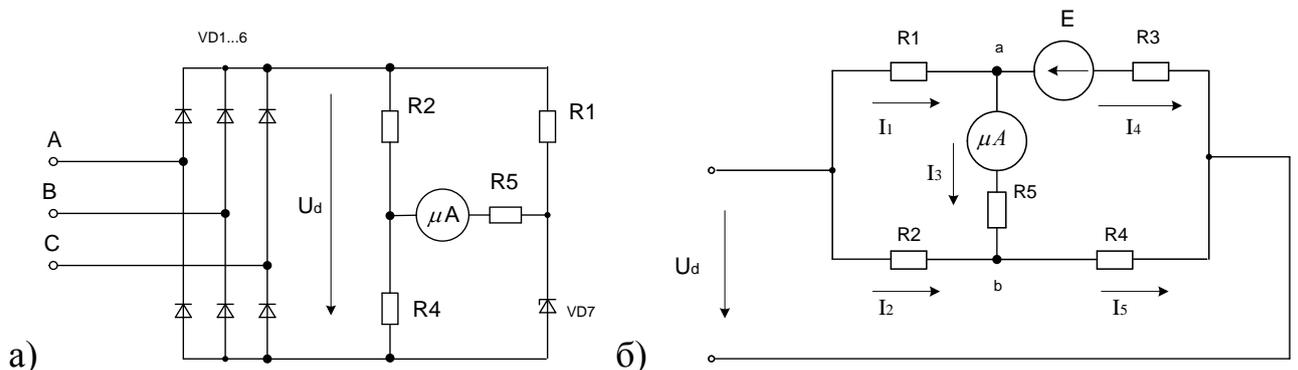


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема устройства для определения относительного отклонения напряжений прямой последовательности

Абсолютная погрешность измерений не превышает по абсолютному значению 0,5%. Параметрическая чувствительность определена согласно методу Монте-Карло при вариации параметров системы от 0 до 5% их номинальных

значений по нормальному закону распределения. Абсолютная погрешность определения относительного отклонения напряжения не превышает 0,14 %.

Для определения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, предложено следующее схемотехническое решение рис. 6 (патент РФ №2353943), которое разработано на основании установленной зависимости между действующим значением второй гармоники выходного сигнала трехфазного двухполупериодного выпрямителя и коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности.

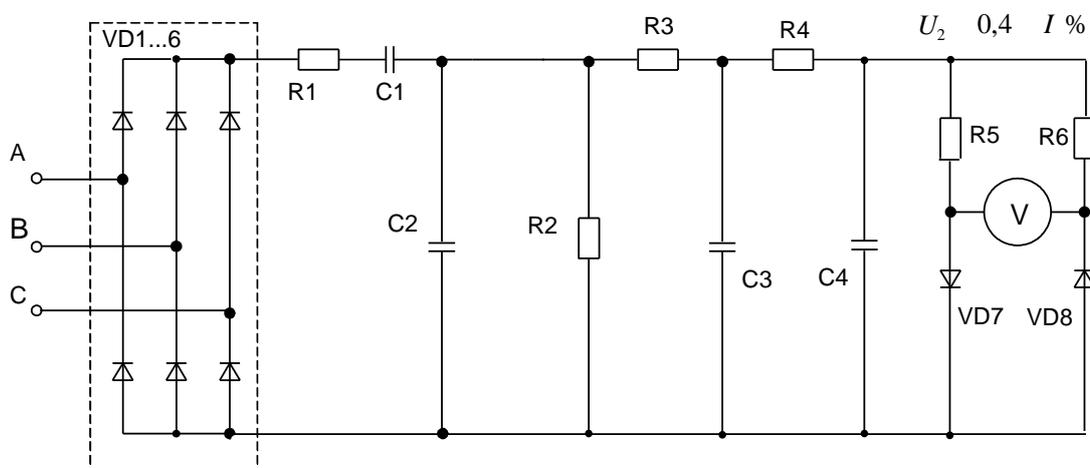


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема для определения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

При симметричной системе напряжений на выходе мостового трехфазного выпрямителя гармонический состав напряжения показан на рис.7а. В этом случае сигнал с выхода выпрямителя содержит гармоники, кратные шести. Вторая гармоника отсутствует $U_2 = 0$. Действующее значение второй гармоники равно нулю. При несимметрии например величиной, 7% действующее значение второй гармоники $U_2 = 23,80$. Спектральный состав выходного напряжения в этом случае показан на рис.7б. С помощью метода наименьших квадратов получено уравнение линейной регрессии

$$\varepsilon_{2U} = 0,287U_{\epsilon} + 0.033 \quad (11)$$

Методическая погрешность предложенного способа определения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности не превышает 5%. К выходу выпрямителя подключен пассивный полосовой фильтр на основе моста Вина, который позволяет пропустить сигнал второй гармонической составляющей (100Гц) и подавить остальные гармоники. Результаты аналитического расчета подтверждены моделированием фильтра программой Electronics Workbench.

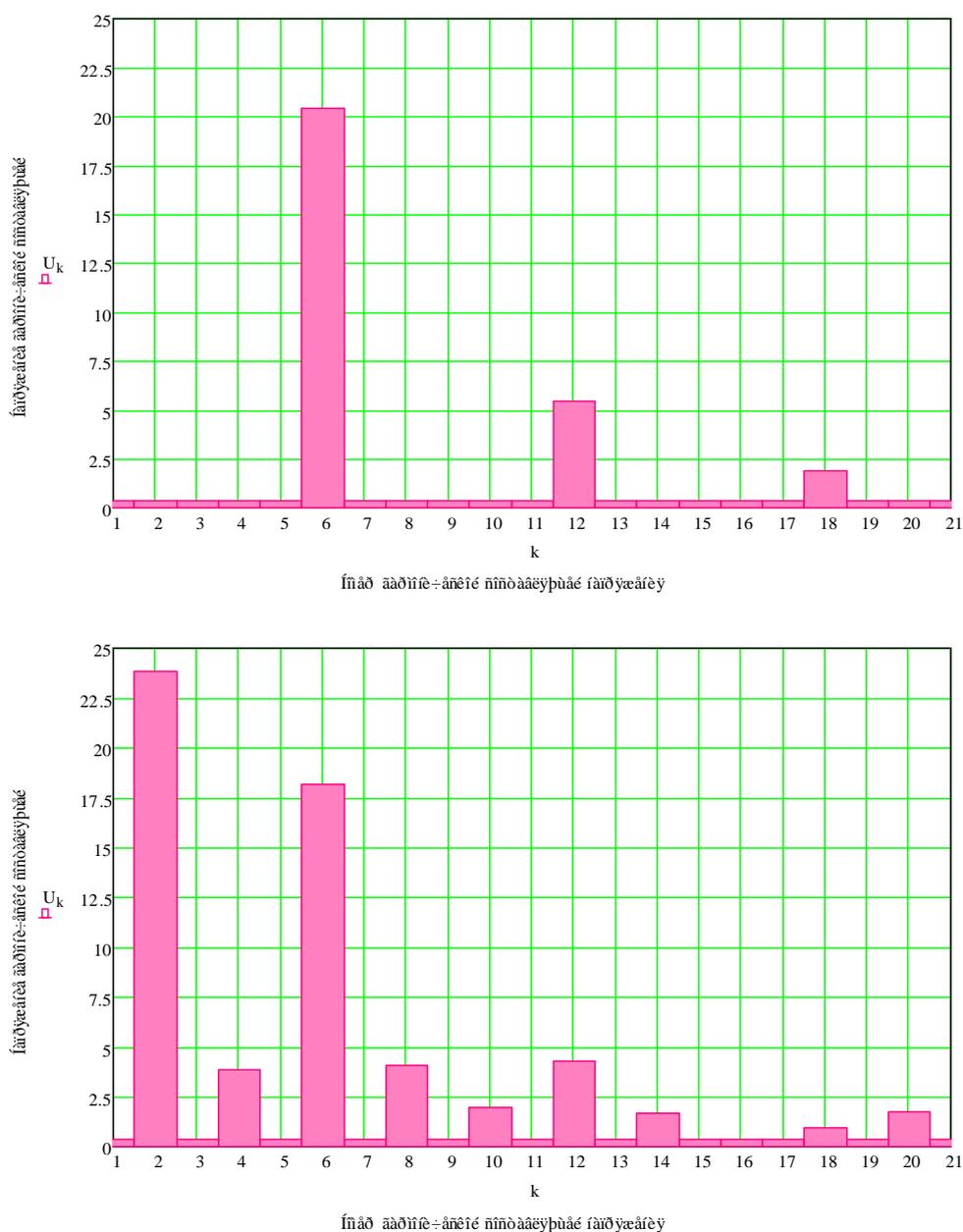


Рисунок 7 – Гармонический состав выходного напряжения выпрямителя.

На основе трех схмотехнических решений получен анализатор качества напряжения рис. 8. Основные достоинства прибора: низкая цена, прибор не требует питания (изготовлен на пассивных элементах). Уровень эксплуатации предлагаемого устройства соответствует уровню квалификации специалистов, службы главного энергетика предприятия хранения зерна.

В четвертой главе «Методика проведения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ предприятия хранения зерна и ее практическое использование» предлагается последовательность действий при проведении энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления электрической сети 0,4 кВ предприятия хранения зерна:

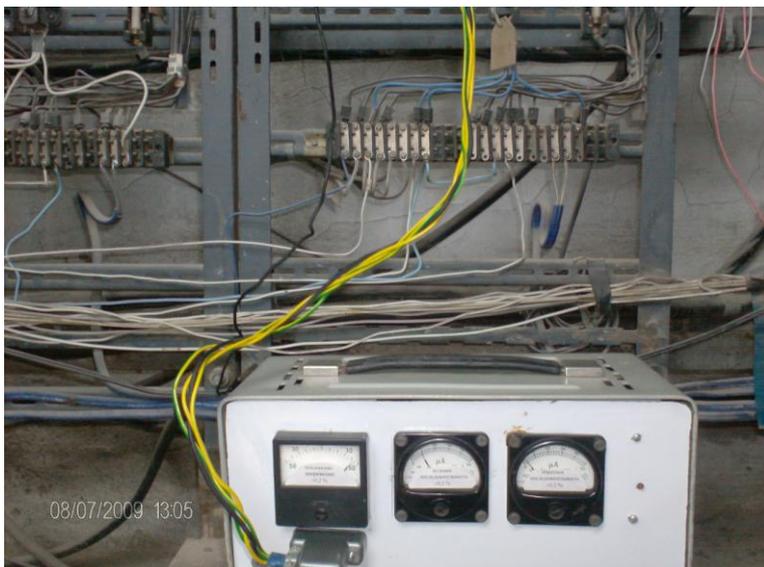


Рисунок 8 – Анализатор качества напряжения

1) анализ схемы системы электроснабжения и выбор точек наиболее критичных к изменению напряжения; 2) обследование показателей качества напряжения и обследование нагрузочных режимов работы электрической сети в этих точках; 3) по полученным данным рекомендуют мероприятия по снижению потребления электрической энергии и приведению ПКЭ к нормативным значениям.

Методика сбора исходных данных энергоаудита состоит из двух частей: обследование показателей качества напряжения и обследование нагрузочных режимов работы электрической сети. В первой части необходимо определить: δU – относительное отклонение напряжения; ε_{2u} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности; ε_{0u} – коэффициент несимметрии

напряжений по нулевой последовательности. Во второй части определяются: $P(t)$ – график активной мощности; $Q(t)$ – график реактивной мощности; I_A, I_B, I_C – фазные токи и коэффициенты мощности по каждой фазе. Измерения относительного отклонения напряжения должны производиться синхронно, как минимум в двух точках, одной из которых должна быть шина 0,4 кВ подстанции. Графики активной и реактивной нагрузки снимают по показаниям соответствующих счётчиков или с помощью токовых клещей. Период анализа – неделя.

Методика анализа исходных данных энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ предприятия хранения зерна заключается: 1) по показателям качества напряжения определяется соответствие значений этих показателей нормативным значениям; 2) по показателям нагрузочных режимов работы электрической сети 0,4кВ определяется математическое ожидание или среднее значение тока нагрузки, дисперсия тока нагрузки. На основании измерения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности, действующих значений фазных токов и напряжений определяются коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности по формуле (5). Определяется коэффициент превышения потерь мощности от несимметрии по формуле (3), коэффициент превышения потерь мощности от реактивной мощности по выражению (2). В итоге определяются относительные потери мощности в электрической сети (4) и потери электрической энергии (6). По значениям фазных токов и коэффициентов мощности каждой фазы формируются данные для математической модели, на базе которой рассчитываются потери мощности и электрической энергии по участкам, ПКЭ во всех узлах сети 0,4 кВ. На основе расчета принимаются организационно-технические мероприятия по снижению потребления электроэнергии и приведению ПКЭ к нормируемым значениям. Одним из них является компенсации реактивной мощности.

Предлагается итерационная методика определения мощности и места установки (узла) конденсаторной установки (КУ) по экономическому критерию.

При размещении КУ в k -ом узле с током компенсации (емкостным) I_k разница между потерями мощности до и после компенсации

$$\Delta P_k = -x^2 \cdot \left(\sum_{j=0}^k r_j \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^n I_{ri} \right)^2 + 2 \cdot x \cdot \left(\sum_{j=0}^k \left(\sum_{i=j}^n I_{ri} \right) r_j \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^n I_{ri} \right) \quad (12)$$

где r_1, r_2, \dots, r_n - активные сопротивления n межзубовых участков токонесущих проводников; I_{ab}, I_{ri} - источники активного и реактивного тока имитирующие действие i -го электроприемника как соответствующей нагрузки сети;

x - степень компенсации реактивной мощности, $x = \frac{I_k}{\sum_{i=0}^n I_{ri}}$.

На основании математического анализа получен максимум функции

$$\Delta P_{k \max} = \frac{\left(\sum_{j=0}^k \left(\sum_{i=j}^n I_{ri} \right) r_j \right)^2}{\sum_{j=0}^k r_j} \quad (13)$$

Зная величину предотвращенных потерь энергии данного фидера за определенное время, например - за год, можно определить экономический эффект в денежном выражении от действия КУ - $\Delta P_k \cdot Tt \cdot Tp$, где Tp - тариф на электроэнергию; Tt - суммарное время (в часах) работы нагрузки в году. Определяя чистый дисконтированный доход, получаем экономические показатели характеризующие КУ в рассматриваемом узле. Мощность КУ определяется

$$Q_{\text{укрм}} = 0,001 \cdot x \cdot \left(3 \cdot U_{\phi} \cdot \sum_{i=0}^n I_{ri} \right) \quad (14)$$

где U_{ϕ} - фазное напряжение.

По предлагаемым методикам проведен энергоаудит системы электропитания и электропотребления 0,4 кВ ОАО «Величковский элеватор» и учхоза «Кубань». В результате было рекомендовано установить КУ на РП1 фидера «Шинный мост ЛВ4» мощностью 90 квар. Это позволит сэкономить за год 6585кВт-ч электроэнергии, что составляет 2,75% от потребленной фидером за год. При этом КУ окупается на 3-ой год и по его окончанию приносит прибыль

4485 рублей. Если учесть что доля электроэнергии в себестоимости зерна 34%, то при сокращении потребления на 2,75% эта доля уменьшается до 33,06%. Нормативное значение затраты электроэнергии на хранение одной тонны зерна снизятся и для рассматриваемого элеватора составят не 25,58кВт-ч, а 24,88кВт-ч. На одну тонну зерна выигрыш составит 0,70 кВт-ч. За 2008 год на ОАО «Величковский элеватор» было заготовлено 96829 тонн зерна, поэтому выигрыш составит около 68 тыс. кВт-ч. С учетом годовой заготовки зерна по краю 3787 тыс. тонн, ожидаемый эффект может составить 2,6 млн. кВт-ч

Рассчитаны расходы на проведение энергоаудита системы электропитания и электропотребления 0,4 кВ на предприятии хранения зерна при анализе десяти фидеров. В итоге энергоаудит системы электропитания и электропотребления с использованием анализатора качества напряжения и разработанной имитационной модели электрической сети 0,4 кВ в 3,8 раза дешевле, чем при использовании микропроцессорного анализатора качества электрической энергии. Стоимость анализатора качества напряжения 9700 рублей. При серийном производстве эта стоимость может быть значительно уменьшена.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для анализа показателей качества электрической энергии и её потерь на каждом участке рассматриваемой электрической сети 0,4 кВ при различных режимах ее работы, разработана математическая модель, учитывающая основные особенности электрических сетей предприятий хранения зерна. Исходными данными являются ортогональные составляющие токов нагрузок, определяемые прямыми измерениями в узлах рассматриваемой сети 0,4кВ (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007614667).

2. Установлены функциональные зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от фазных и линейных напряжений, результаты которых совпадают с результатами, полученными по формулам Фортескью, что позволяет их рекомендовать к практическому использованию.

3. На основании теоретических исследований разработаны и реализованы аппаратно схемотехнические решения, позволяющие определять относительное отклонение напряжения, коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательности, которые интегрированы в виде анализатора качества напряжения. Установлена функциональная зависимость между коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности и действующим значением второй гармоники выходного сигнала трехфазного мостового выпрямителя, которая реализована аппаратно (патент РФ №2353943) в анализаторе качества напряжения.

4. Разработана адаптированная методика проведения энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления 0,4 кВ предприятий хранения зерна, которая позволяет сократить затраты на проведение энергоаудита в 3,8 раза. Затраты составят 27000 рублей при обследовании электрической сети 0,4 кВ десяти отходящих фидеров.

5. Разработан итерационный метод выбора места установки и расчетной мощности устройства компенсации реактивной мощности в электрической сети 0,4 кВ по экономическому критерию на основе имитационного моделирования с использованием ортогональных составляющих тока нагрузки сети. Это позволит снизить потребление электроэнергии предприятием хранения зерна на 2,75%. Себестоимости зерна уменьшится, так как нормативное значение затрат электроэнергии на хранение одной тонны зерна снизится на 0,70 кВтч. С учетом годовой заготовки зерна на ОАО «Величковский элеватор» 96829 тонн и по краю 3787 тысяч тонн за 2008 г., ожидаемый эффект составит на элеваторе около 68 тыс. кВт-ч и в Краснодарском крае около 2,6 млн. кВт-ч.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Емелин А.В. Определение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности косвенным методом / А.В. Савенко, А.В. Емелин // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропи-

тания для АПК [посвящается 180 летию Тесла] Труды Кубанского ГАУ. -Вып. 421(151). - Краснодар, 2006. – С. 261-263.

2. Емелин А.В. Определение функциональной зависимости тока нейтрали в сети 0,4кВ от коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности / А.В. Савенко, А.В. Емелин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Материалы 8-й региональной научно-практической конференции молодых ученых. – Краснодар: КубГАУ, 2006. – С. 300-301.

3. Емелин А.В. Расчет потерь электрической энергии и показателей ее качества в электрической сети 0,4 кВ (имитационное моделирование режимов работы электрической сети 0,4 кВ) / А.В. Савенко, А.В. Емелин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007614667. Зарегистрир. 09.11.2007.

4. Емелин А.В. Определение рекомендуемой длины линии 0,4кВ электрической сети на имитационной математической модели / А.В. Савенко, А.В. Емелин, В.А. Перепечин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2007. № 8. – С. 9-10.

5. Емелин А.В. Методика определения потерь энергии в четырехпроводной электрической сети по показаниям измерителя ампер-квадрат-часов / В.В. Тропин, А.В. Савенко, А.В. Емелин // Известия вузов. Электромеханика. - 2007. Специальный выпуск. - С. 61.

6. Емелин А.В. Методика определения потерь энергии в четырехпроводной электрической сети по показаниям счетчиков электроэнергии / В.В. Тропин, А.В. Савенко, А.В. Емелин // Известия вузов. Электромеханика. 2007. - Специальный выпуск. - С.62.

7. Емелин А.В. Программа управления базой данных схемы электрооборудования и системы планово-предупредительного ремонта на предприятии АПК/ А.В. Савенко, А.В. Емелин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2008610564. Зарегистрир. в 31.01.2008.

8. Емелин А.В. Методическое обеспечение анализа исходных данных экспресс-энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления предприятий АПК / А.В. Савенко, А.В. Емелин // Труды Кубанского ГАУ. Серия Агроинженер. - №1. 2008. – С. 81-82.

9. Емелин А.В. Аппаратное обеспечение энергоаудита системы электроснабжения и электропотребления электрической сети 0,4 кВ сельскохозяйственного предприятия / А.В. Савенко, А.В. Емелин, А.С. Белых // Известия вузов. Электромеханика. - 2008. Специальный выпуск. – С. 123-124.

10. Емелин А.В. Математическое моделирование системы электроснабжения и электропотребления предприятия АПК при проведении на нем экспресс-энергоаудита / А.В. Савенко, А.В. Емелин // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 6-й Международной конференции (13-14 мая 2008 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. – С.196-199.

11. Емелин А.В. Определение коэффициента обратной последовательности напряжений в электрических сетях 0,4 кВ / А.В. Емелин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Материалы II всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Краснодар: КубГАУ, 2008. – С. 325-326.

12. Пат. РФ №2353943, МПК G01R 29/16 Фильтр напряжения обратной последовательности / В.В. Тропин, А.В. Савенко, А.В. Емелин; Патентообладатель КГАУ. - №2008110252. - заявл.17.03.2008; опубл. 27.04.2009. Бюл. №12. – 4 с.