

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК 621.3.053.22:621.318.4

*К. Сатаркулов, Г.Ш. Эралиева, Г.Н. Ниязова,**А.К. Асанов, Н.А. Суюнтбекова**Институт машиноведения и автоматизации НАН КР,**Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова***КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ С НОВЫМ СПОСОБОМ НАМОТКИ
КАК УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ**

В работе рассмотрена катушка индуктивности (КИ) с новым способом намотки, которая использована в качестве устройства диагностики (УД), для оценки изменения спектрального состава тока нагрузки в проводе электропередачи от переходных процессов, возникающих в распределительной сети за счет подключения или отключения обычных нагрузок или нагрузок с нелинейными характеристиками. Конструктивно КИ представляет собой магнитопровод тороидальной формы, на которую намотана обмотка из пучка трех изолированных друг от друга эмалированных проводов. В результате получаются три независимые обмотки с равным количеством витков. Дано описание функционирования УД на конкретных примерах. Показано, как, соединяя концы двух параллельно намотанных проводов, можно изменить характер сопротивления с индуктивной на емкостное и обратно в отдельные моменты времени за счет емкости, образованной между этими проводами. Представлены компьютерные модели, описывающие работу УД. Полученные результаты моделирования показали работоспособность представленных устройств.

Ключевые слова: катушка индуктивности, переходной процесс; компьютерное моделирование; SimPowerSystems; воздушные линии; датчик тока; диагностирование.

Введение

Состояние энергетической эффективности электрических сетей рассмотрено в работе [1] выдающимися специалистами Российской Федерации по электроэнергетике В.Э. Воротницким, И.В. Жежеленко и крупным специалистом в области электроэнергетики и энергосбережения Г.Г. Трофимовым. Отмечено, что высокий уровень технических потерь в электрических сетях связан с такими причинами, как: низкий уровень компенсации реактивной мощности; 70-процентный физический и моральный износ сети при явно недостаточном использовании средств оптимизации режимов работы и регулирования напряжения; нерешенность проблем с качеством электрической энергии (КЭЭ). Даже в промышленно развитых странах Западной Европы несвоевременно внедряются решения, направленные на коррекцию КЭЭ, связанные с непрерывным ростом установленной мощности нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок. В [1] сказано, что нет необходимости доказывать значимость проблемы КЭЭ, как и проблемы энергоресурсосбережения, так как они относятся к числу важнейших проблем современной электроэнергетики и являются частью проблемы повышения энергоэффективности электрических сетей.

Практика эксплуатации электрических сетей показала, что универсальным средством улучшения энергоэффективности электрической сети, связанным с повышением его пропускной способности, снижением потерь мощности и электроэнергии в них, регулированием напряжения в контрольных точках сети, снижением уровня высоких гармоник и несимметрии напряжения, является внедрение устройств компенсации реактивной мощности различных типов фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств. Но по ряду причин работа по компенсации реактивной мощности в электрических сетях стран СНГ ведется явно недостаточно [1].

Известно, что необходимость в компенсации реактивной мощности в электрических сетях вызвана тем, что нагрузка сети в основном имеет активно-индуктивный характер, и для повышения коэффициента мощности широко применяются разного рода

компенсирующие устройства (КУ). Например, для предприятий малой мощности представляют интерес компенсации реактивной мощности батареями конденсаторов (БК) [2].

Имеет значение, по мнению авторов, решение задачи изготовления катушек индуктивности с повышенным коэффициентом мощности путем использования специального способа его намотки. Решение такой задачи позволит улучшить энергоэффективность городских распределительных электрических сетей, так как в разных электрических устройствах сети функционирует множество катушек индуктивностей.

Кроме того, авторами ставится задача использования таких катушек, как диагностические устройства для оценки изменения гармонического состава тока нагрузки в проводах, питающие нагрузки, когда количественно соотношения линейных и нелинейных нагрузок изменяются случайным образом.

Вышесказанное связано с тем, что за последние годы возросла нагрузка жилых и административных зданий. С ростом нагрузки изменился и ее характер. Возросла доля электроприемников, таких, как компьютеры, телевизоры, СВЧ-печи, все активнее заменяются обычные лампы накаливания энергосберегающими, и внедряется частотно регулируемый электропривод. Несмотря на относительно небольшую мощность каждого отдельного электроприемника, их массовое применение приводит к существенному искажению синусоидальности кривых напряжения и тока в распределительных электрических сетях [1, 3 -11].

Несинусоидальность напряжений и токов оказывает влияние на работу электрооборудования, сокращая срок его службы, приводит к увеличению потерь напряжения и мощности в сети, уменьшению ее пропускной способности. Это создает условия для возникновения дополнительного риска отказа оборудования и роста электротехнического и технологического ущерба [1].

На сегодняшний день нормативно-правовая документация в области качества электрической энергии регламентирует уровни искажений не только по напряжению, но и по току. Отсутствуют также методики оценки воздействия несинусоидальности тока на работу электротехнического оборудования [3, 4].

В связи с этим представляется необходимым разработать способы оценки изменений спектрального состава тока нагрузки, а также влияния высших гармоник тока, создаваемых работой нелинейных электроприемников жилых и общественных зданий на оборудование распределительной электрической сети.

Постановка задачи

Представить способ и соответствующее устройство для оценки изменений спектрального состава тока нагрузки, т.е. высших гармоник тока, создаваемых работой нелинейных электроприемников.

Рассмотреть вопрос использования катушки с новым способом намотки для повышения ее коэффициента мощности.

Решение задачи

Аппаратная реализация для оценки изменения спектрального состава тока нагрузки от переходных процессов, которые возникают от всех возможных изменений нагрузок распределительной сети, реализована с помощью прибора специальной конструкции в виде датчика тока (СКДТ). Конструктивно СКДТ представляет катушку индуктивности (КИ), у которой магнитопровод имеет тороидальную форму и на которую намотана обмотка из пучка трех изолированных друг от друга эмалированных проводов (рис.1). В результате получаются три независимые обмотки с равным количеством витков. На рисунке 1 схематично показан ход намотки, где n_1 , n_2 , n_3 начало соответственно первой, второй и третьей обмотки, а k_1 , k_2 , k_3 соответствующие концы этих обмоток. Количество

витков W КИ должно быть достаточным, чтобы обеспечить соответствующую чувствительность датчика, который может быть уточнен в процессе эксперимента.

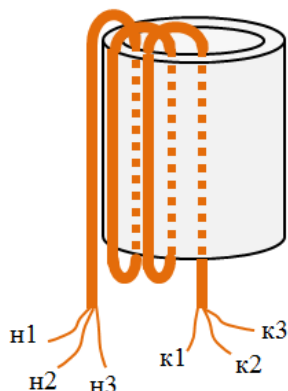


Рисунок 1 – СКДТ: n_1, n_2, n_3 – начало соответственно первой, второй и третьей обмотки,
а k_1, k_2, k_3 – соответствующие концы этих обмоток

Схема подключения СКДТ к соответствующим фазам физической модели исследуемой сети с устройством автоматического управления экспериментом (АУЭ) в данной работе не проводится.

На рисунке 2, *a, b, c* показана развернутая схема подключения СКДТ к конкретной фазе, исследуемой линий электропередачи в двух исполнениях.

Описание функционирования СКДТ на примере рисунка 2, *a*

На вход первой катушки СКДТ сигнал подается с выхода шунта 1, а на вход второй катушки СКДТ с выхода шунта 2 после предварительной фильтрации с помощью цифрового фильтра (ЦФ). ЦФ предназначен, чтобы на его выходе напряжение представляло чистую синусоидальную зависимость с частотой 50 Гц (первая гармоника). Заметим, что полярности напряжений u_1 и u_2 , подаваемые на входы первой и второй обмоток СКДТ, противоположны из-за особенности схемы подключений (рис.2, *a*), контакты выключателя $Вк_2$ разомкнуты.

Предположим, что в спектральном составе тока нагрузки $i(t)$ отсутствуют высшие гармоники и интергармоники из-за характера нагрузки, а шунты $\mathbf{ш1}$, $\mathbf{ш2}$ и фильтр спроектированы так, что действующие значения напряжений u_1 и u_2 равны. При таком предположении напряжения сигнала на выходе третьей обмотки СКДТ будут равны нулю, так как направления токов, протекающие по первой и второй обмоткам, из-за действия напряжений u_1, u_2 противоположны, а, следовательно, магнитное поле в сердечнике отсутствует.

Допустим, что характер нагрузки изменился из-за подключения нелинейной нагрузки Z_2 , т.е. контакты выключателя $Вк_2$ замкнуты. В этом случае на выходе третьей обмотки СКДТ возникнет сигнал с ненулевым напряжением. Это связано с тем, что в спектральном составе напряжения u_1 выхода первого шунта, кроме основной первой гармоники, появятся высшие не скомпенсированные гармоники, напряжения u_1 .

Магнитные поля, вызванные токами от действия напряжений, не скомпенсированной части гармоник, напряжения u_1 , наведут в третьей обмотке напряжения, сигнализируя о факте изменения характера переходного процесса в линии.

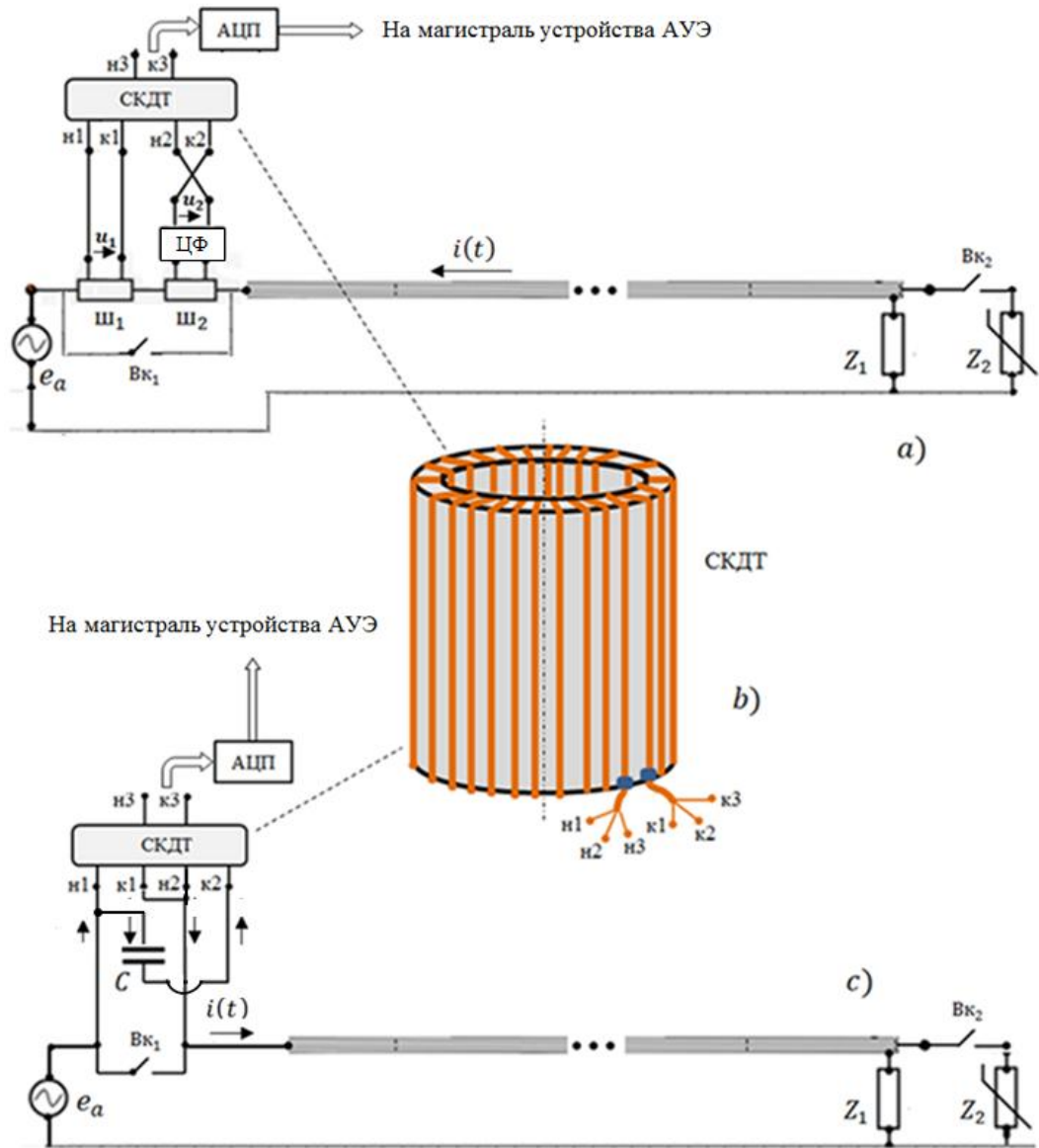


Рисунок 2 – *a, c* развернутые схемы подключения СКДТ к одной фазе, исследуемой провода электропередачи, в двух исполнениях; *b* – изображение СКДТ

Обоснования выше реализуем по результатам численного эксперимента, которые были получены на компьютерной модели СКДТ в среде SimPowerSystems.

В качестве компьютерного аналога СКДТ в среде SimPowerSystems можно предложить блок взаимной индуктивности Mutual Inductance (рис.3), предназначенный для моделирования катушек или проводников, имеющих магнитную связь [12].

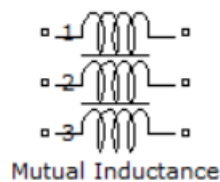


Рисунок 3 – Пиктограмма взаимной индуктивности Mutual Inductance

Параметры блока: собственные сопротивления и индуктивности первой, второй и третьей обмоток; взаимное сопротивление и индуктивность обмоток.

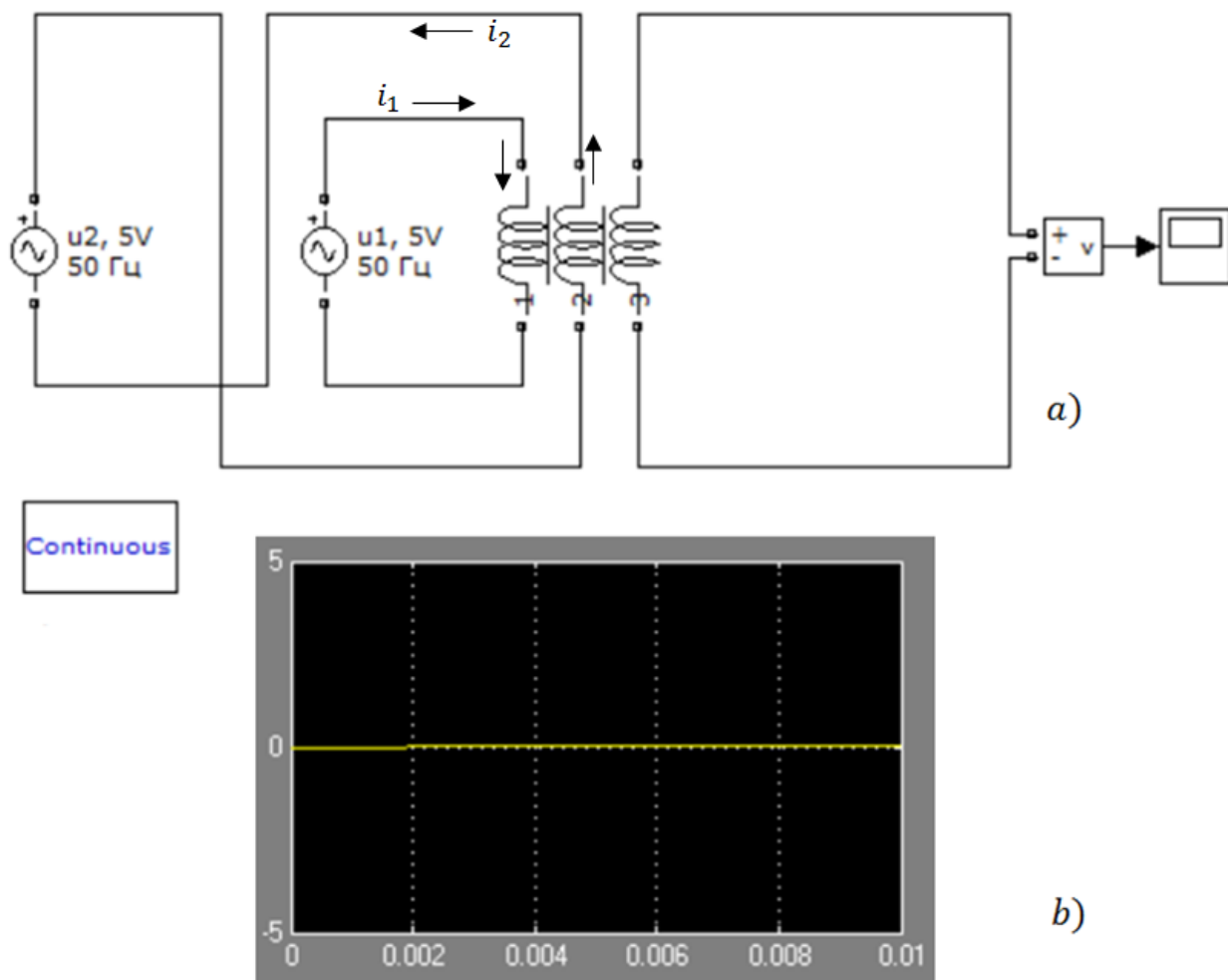


Рисунок 4 – Электрическая схема для исследования сигнала на выходе третьей обмотки СКДТ – *a*. Результат численного эксперимента – *b*

Электрическая схема для исследования сигнала на выходе третьей обмотки СКДТ при подаче сигналов на входы первой и второй обмоток показана на рисунке 4, *a*.

Предположим, что на вход первой обмотки подается сигнал напряжением 5 В, частотой 50 Гц с выхода первого шунта, а на вход второй обмотки подается сигнал напряжением также 5 В и частотой 50 Гц с выхода второго шунта после предварительной фильтрации. Так как по первой и второй обмоткам СКДТ протекают равные по амплитуде и частоте токи, то ток нагрузки не искажен, поэтому отсутствуют высшие гармоники и интергармоники. Из-за противоположности направления токов в первой и второй обмотках на третьей обмотке не наводится сигнал, который подтверждается численным экспериментом (рис. 4, *b*).

Рассмотрим случай, когда в спектральном составе тока нагрузки возникла, например, пятая гармоника (рис.5, *a*). В результате действия фильтра на выходе первого шунта возникнет сигнал, соответствующий первой гармонике пусть напряжением 5 В, тогда как на выходе второго шунта появится сигнал, соответствующий первой гармонике напряжением 5 В, и на него накладывается сигнал пятой гармоники с амплитудой например 1 В (из-за отсутствия фильтра). В результате на выходе третьей обмотки СКДТ появится сигнал от нескомпенсированной части тока пятой гармоники. Это подтверждено

результатом численного эксперимента (рис.5, *b, c*).

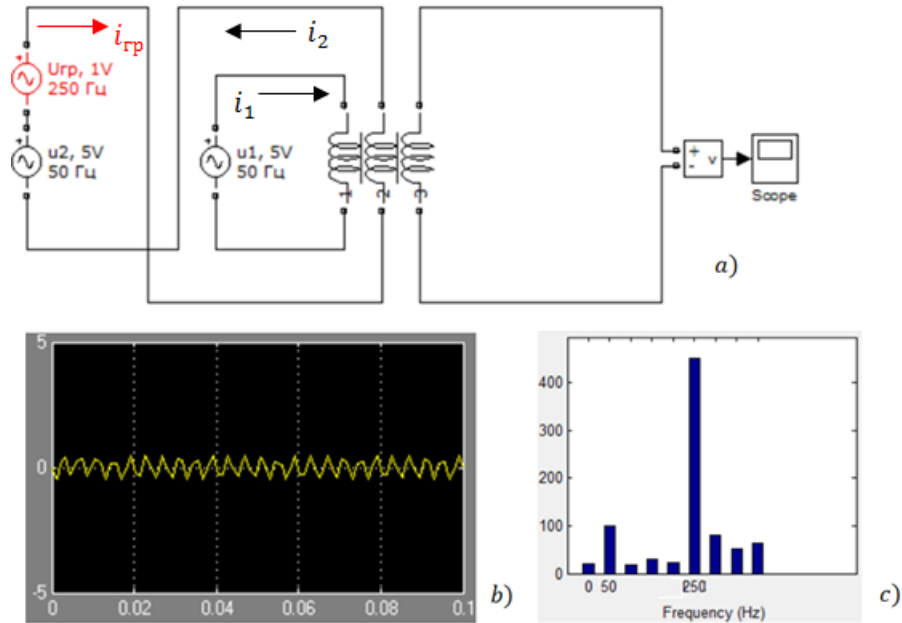
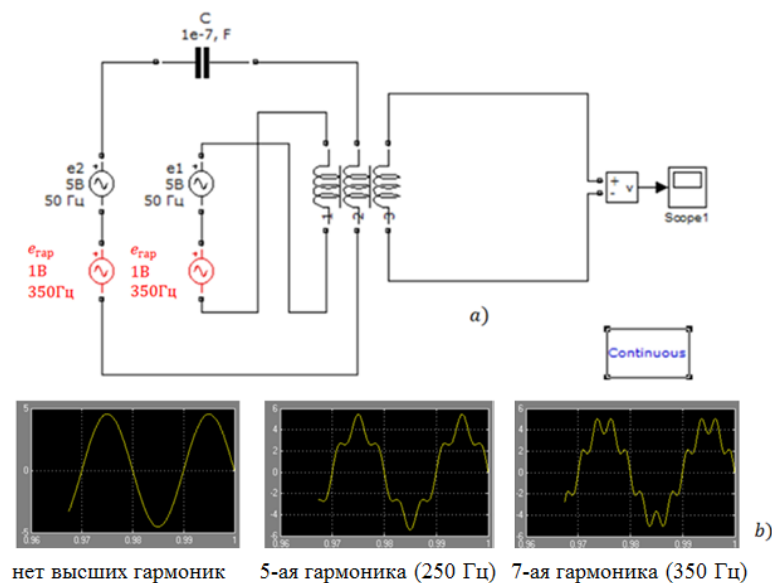


Рисунок 5 – Электрическая схема для исследования сигнала на выходе третьей обмотки СКДТ – *a*, при искаженном сигнале тока нагрузки. Результат численного эксперимента – *b, c*

Описание функционирования СКДТ на примере рисунка 2, *c*

Как видно из схемы подачи сигналов, на входы двух обмоток СКДТ, в отличие от выше рассмотренного случая (рис.4, *a*), ток нагрузки $i(t)$ протекает по виткам обмоток в следующей последовательности. Сначала ток $i(t)$ входит в начало ($n1$) первой обмотки, далее с выхода ($k1$) этой обмотки ток направляется по проводу в нагрузку, при этом конец первой обмотки $k1$ имеет соединение с началом второй обмотки. В то же время начало первой обмотки $n1$ соединено с концом второй обмотки $k2$ с помощью конденсатора C . В результате ток, проходящий через конденсатор C , входит в конец второй обмотки $k2$, пройдя вторую обмотку, с выхода $n2$ направляется по проводу в нагрузку. Такой способ соединения подходит, когда ток нагрузки соответствует сечению проводов обмотки.



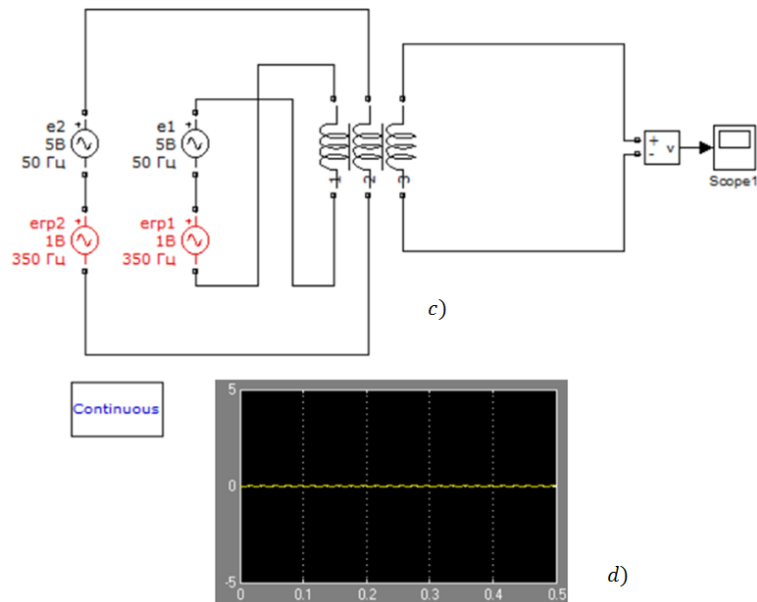


Рисунок 6 – Электрические схемы для исследования сигнала на выходе третьей обмотки СКДТ, с фильтром в виде конденсатора C – *a* и без фильтра – *c*

Компьютерная модель рассмотренного выше случая функционирования СКДТ представлена на рисунке 8, *a*. На рисунке 8, *b* представлены результаты численного эксперимента для трех случаев: первый соответствует, когда в спектральном составе тока нагрузки отсутствуют высшие гармоники; второй – в спектральном составе содержится 5-я гармоника и третий – содержится 7-я гармоника.

Как видно из рисунка 8, *d*, в случае отсутствия фильтра на рисунке 8, *c* в виде конденсатора датчик не реагирует на изменение спектрального состава тока нагрузки, что доказывает необходимость включения конденсатора.

Способ изменения характера сопротивления катушки индуктивности с индуктивного на емкостное и обратно в отдельные моменты времени

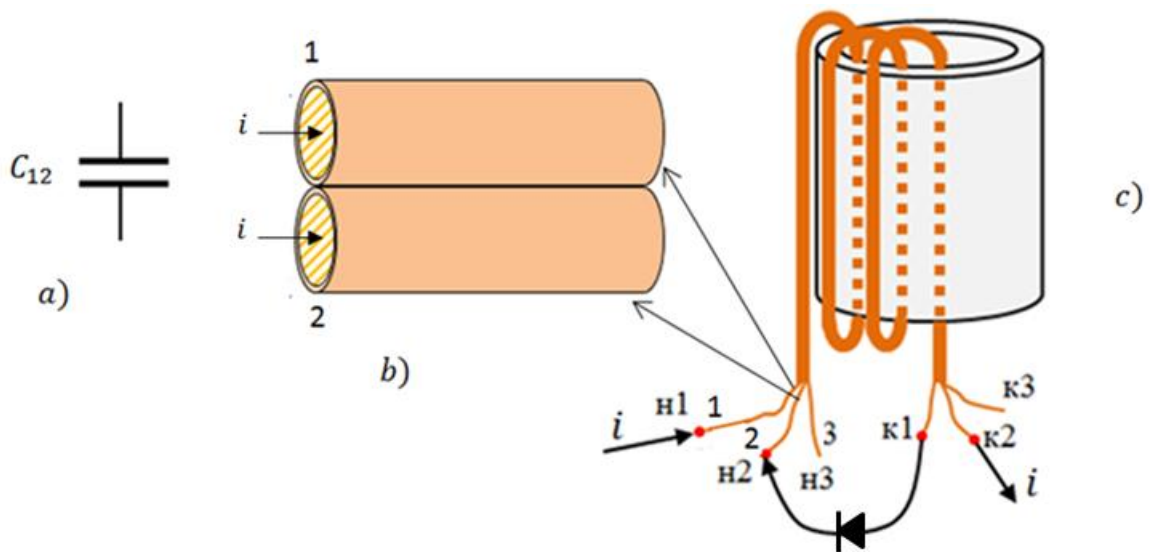


Рисунок 7 – Способ соединения концов двух проводов 1 и 2 обмотки КИ (*c*), когда конец провода 1 ($k1$) обмотки соединен с началом провода 2 ($h2$) через диод

На рисунке 7 показан способ соединения концов двух проводов 1 и 2 обмотки КИ (*c*) с помощью диода, приводящего к изменению характера нагрузки с индуктивного на емкостный и обратно. При этом конец первого провода k_1 соединен с началом второго провода n_2 обмотки с помощью диода, в результате по проводам 1, 2 обмотки протекает один и тот же ток i в одинаковом направлении (рис.7, *b*). Изменение характера нагрузки катушки с индуктивного на емкостный связано с электрической емкостью C_{12} между проводами 1 и 2 обмотки, который естественным образом образует эквивалентную емкость C_{12} в замене на индуктивности катушки в отдельные моменты времени. При этом емкость C_{12} вычисляется по формуле [13]:

$$C_{12} = \frac{\varepsilon l}{4 \log \left(\frac{d}{a} + \sqrt{\frac{d^2}{a^2} - 1} \right)}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, геометрические параметры l, a, d – соответственно, радиус, длина, расстояние между проводами, входящие в выражение (1), представленное на рисунке 8.

В рассматриваемой задаче $2a$ – диаметр токопроводящей жилы эмалированного провода; l – общая длина провода обмотки КИ; $d = 2a + 2\Delta$ (Δ – толщина эмали – изоляции); $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, где $(\varepsilon_0, \varepsilon_r)$ соответственно электрическая постоянная и относительная диэлектрическая постоянная эмали-изоляции.

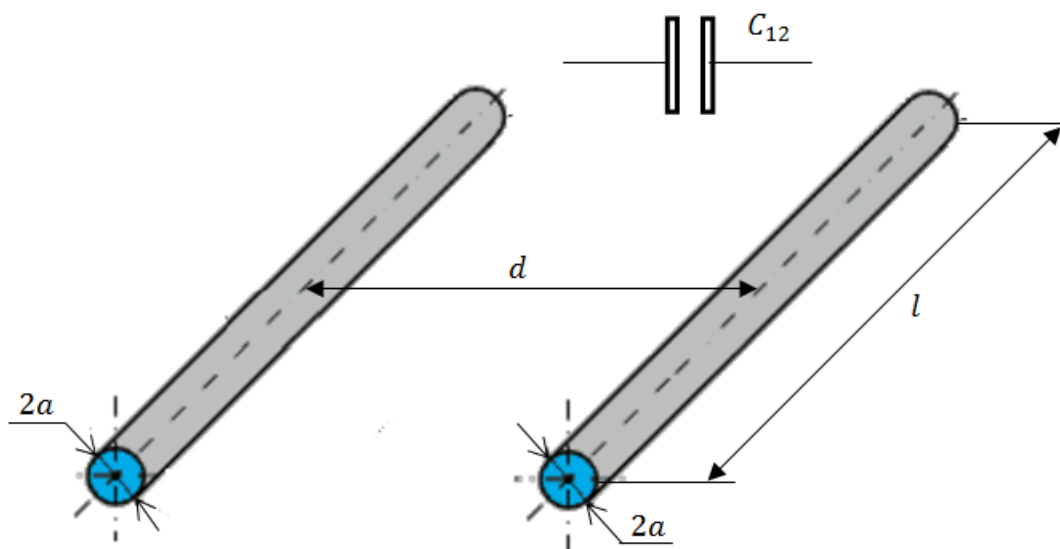


Рисунок 8 – Схема расположения двух параллельно расположенных проводов с указанием их геометрических параметров

Заключение

Катушку индуктивности (КИ) с новым способом намотки можно использовать в качестве устройства диагностики (УД) для оценки изменения спектрального состава тока нагрузки в проводе электропередачи от переходных процессов, возникающих в распределительной сети за счет подключений или отключений обычных нагрузок или нагрузок с нелинейными характеристиками. Показано, как, соединяя концы двух параллельно намотанных проводов с помощью диода, можно изменить характер сопротивления КИ с индуктивного на емкостный и обратно в отдельные моменты времени, за счет емкости образованные между этими проводами. Представлены

компьютерные модели, описывающие работу УД. Полученные результаты моделирования показали работоспособность представленных устройств.

Литература

1. Воротницкий В. Э., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г. Повышение энергетической эффективности электрических сетей / http://www.rtp3.ru/wp-content/uploads/2019/03/27-Povyshenie-energetich.-ef-ti-setej_na-sajt.pdf (дата обращения 20.09.2024).
2. Дрей, Н. М. Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях с малой установленной мощностью электроприемников / Г.М. Михеев, Н.М. Дрей, А.Г. Зиганшин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: IV Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. 61– 67.
3. Тульский, В.Н. Управление качеством электроэнергии в электрических сетях [Текст] / В.Н. Тульский, И.И. Карташев, Н.М. Кузнецов, М.Г. Симуткин, Х.Б. Назиров // Горный журнал. – 2012. – №12. – С.52– 55.
4. Асанов А.К., Демидов А.Д., Симуткин М.Г., Тульский В.Н., Шведов Г.В. Электромагнитная совместимость систем электроснабжения и электроприемников жилых и общественных зданий // Энергосбережение – теория и практика: Труды Шестой международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-ский дом МЭИ, 2012. – С. 279 – 283.
5. Боярская Н. П. Качество электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / Н. П. Боярская, С. А. Темербаев, В. П. Довгун, Я. С. Кунгс, А. Ф. Синяговский // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города 21-22 ноября 2012 г.: Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск, 2012. – С. 113–121.
6. Дрей, Н. М. Гармонический анализ тока замыкания на землю в переходном режиме / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, Г. М. Михеев, А. Н. Пулин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Материалы II Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 18–19 октября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 137–144.
7. Турукина, Т.Е. Алгоритм регулирования уровня несимметрии в распределительных сетях / Т.Е. Турукина, Е.А. Шутов, И.И. Елфимов, В.К. Сибирцев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – № 10 . – С. 24–30.
8. Куско А. Качество энергии в электрических сетях / Пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
9. Akagi H. // Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12. P. 2128–2141.
10. Hu C-H., Wu C-J., Chen Y-W. // IEEE trans. on Power delivery. 1997. Vol. 12. No. 3. P. 1275–1281.
11. De Lima Tostes M., BezerraU., Silva R. // IEEE transactions on power delivery. 2005. Vol. 20. No. 1. Pp. 384–389.
12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
13. Дж. Джексон. Классическая электродинамика, – М.: Мир, 1965. – 263 с.: ил.