Повышение пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока

Постолатий В.М., Быкова Е.В. (Институт энергетики АНМ, г. Кишинев); **Тимашова Л.В., Шакарян Ю.Г.** (ВНИИЭ, г. Москва)

Аннотация. Изложены основные технические характеристики и экономические показатели электропередач нового типа - управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий (УСВЛ). Преимущества данного типа электропередач по сравнению с традиционными состоят в повышенной пропускной способности и глубокой управляемости режимными параметрами и характеристиками. Эти преимущества достигаются за счет нового конструктивного исполнения, применения комплекса оборудования - фазорегулирующих и компенсирующих устройств и соответствующих систем управления. По своим принципам работы и режимным показателям данные электропередачи относятся к категории управляемых гибких систем передачи электроэнергии переменного тока (Controlled Flexible Alternating Current Transmission Sistems – CFACTS).

Ключевые слова: Управляемая линия электропередачи, гибкие электропередачи, пропускная способность, натуральная мощность, фазорегулирующие устройства.

Majorarea capacității și gradului de dirijare a liniilor electrice de curent alternativ

Postolati V., Bîcova E., (Institutul de Energetică al AŞM), Timașova L., Şakarian Iu. (VNIIEE, Moscova)

Rezumat. Sunt expuse caracteristicile tehnice principale și indicatorii economici a liniilor de tip nou pentru transportarea energiei electrice – linii dirijate de tensiune înaltă cu autocompensare (LDACTÎ). Prioritățile acestor linii în comparație cu cele tradiționale constă în capacitatea majoră de transportare a energiei și dirijării profunde a parametrilor și caracteristicilor de regim. Aceste priorități sunt realizate din contul perfectărilor constructive noi, utilizării unui utilaj complex – instalații de compensare și reglare a fazei și sisteme respective de dirijare. Conform principiului de lucru și indicatorilor de regim aceste linii se referă la categoriile sistemelor flexibile de dirijare a transportului energiei electrice de curent alternativ (Controlled Flexible Alternating Current Transmission Sistems - CFACTS).

Cuvinte-cheie: linie electrică de transport dirijată, linie electrică de transport flexibilă, capacitatea de transport, puterea instalată, instalațiile de reglare a fazei.

Increase of capacity and controlability of alternating current power transmission lines

Postolatii V.M, Bicova E.V, (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), **Timashova L., Shakarian Iu**. (*VNIIEE, Moscow*)

Abstract. The basic characteristics and economic parameters of electricity transmissions of new type - controlled self-compensating high-voltage lines (CSHVL) are stated. Advantages of the given type of electricity transmissions in comparison with traditional consist in the increased throughput and deep regulating in regime parameters and characteristics. These advantages are reached due to a new design, application of a complex of the equipment – phase shifting and compensating devices and the appropriate control systems. By the principles of work and regime parameters the given electricity transmissions concern to a category of controlled flexible systems of transfer of the electric power of an alternating current (Controlled Flexible Alternating Current Transmission Systems – CFACTS).

Key words: controlled transmission line, flexible electricity transmissions, capacity, natural capacity, phase shifting devices.

Основные проблемы в области передачи электроэнергии

Основными техническими проблемами развития современных электроэнергетических систем являются проблемы повышения пропускной способности электропередач, управления режимами энергосистем, обеспечения статической и динамической устойчивости, снижения потерь мощности и энергии,

уменьшения экологического влияния, сокращения полосы отчуждения земельных угодий под строительство линий электропередач.

К основным экономическим проблемам следует отнести проблему снижения капитальных вложений на строительство линий электропередач, сетей и подстанций и энергетические объекты, уменьшение потерь электроэнергии эксплуатационных затрат. Острота и сложность указанных проблем возрастают с энергосистем, увеличением дальнейшим развитием дальности передачи электроэнергии, увеличением объемов производства и потребления электроэнергии, интеграцией параллельно работающих энергообъединений необходимостью обеспечения требуемой энергетической безопасности.

Цель работы, постановка задачи

Настоящая работа имеет своей целью изложить результаты исследований электропередач нового типа — управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий (УСВЛ), которые позволяют значительно повысить пропускную способность и создать принципиально новые возможности управляемости электропередач переменного тока.

Тематика УСВЛ особенно актуальна в настоящее время в связи с интенсивным развитием исследований и разработок так называемых гибких электропередач переменного тока FACTS [1].

Стремление исследователей и разработчиков найти решения проблем повышения пропускной способности и управляемости электропередач обусловлено практическими потребностями развивающихся электроэнергетических систем, ростом мощности генерирующих источников, дальности передачи электроэнергии и формированием сложных объединенных энергосистем.

Непременным условием при этом является поиск дальнейших путей решения проблем снижения капитальных и текущих затрат, уменьшения потерь, обеспечения заданных режимных параметров, показателей надежности и возможно низкого уровня экологического влияния.

Большинству этих требований рассматриваемые управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи вполне удовлетворяют, и, в связи с этим, они могут рассматриваться как перспективные для применения в энергосистемах.

Формированию основных концептуальных положений создания УСВЛ предшествовали работы в области исследований разомкнутых линий [2, 3], а также результаты теоретических и экспериментальных исследований разомкнутых и в области полуразомкнутых линий электропередач [4-8], дальнейших работ самокомпенсирующихся управляемых линий электропередачи [9-11] фазорегулирующих устройств [12, 13].

Большое значение для разработок вариантов УСВЛ и предложений по их практическому использованию имеют результаты исследований и разработок современных средств компенсации и регулирования [13-15], благодаря которым удается обеспечить эффективное управление режимами УСВЛ и примыкающих узлов энергосистем при любом заданном диапазоне величины передаваемой мощности и направлении передачи мощности.

Результаты исследований и разработок УСВЛ нашли отражение в ряде работ, общее количество которых составляет более 400 наименований, среди которых 23 тематических сборника статей, более 30 авторских свидетельств на изобретения, 21

зарубежный патент, 28 кандидатских 7 докторских диссертационных работ, ряд ТЭО, технических и рабочих проектов.

Современный уровень технической политики в электроэнергетике и требования к электроэнергетическим системам способствуют тому, чтобы заново переосмыслить полученные в области УСВЛ результаты и на новой технической базе оценить возможности и эффективность их применения на практике.

В данной работе освещается ряд аспектов, связанных с направлением исследований и разработок в области УСВЛ:

- теоретические результаты;
- результаты экспериментов;
- опытно конструкторские разработки;
- перспективы использования УСВЛ;
- конкретные варианты применения УСВЛ.

Этапы исследований и исполнители работ. Исследования в области УСВЛ были начаты в 1966 г. Отделом Энергетической кибернетики Академии наук Молдовы, совместно с Кафедрой электрических систем Московского Энергетического Института (МЭИ). Эти работы интенсивно развивались в период до 1992 г. с участием ряда и других научно-исследовательских проектных и производственных организаций. Среди организаций, участвовавших в данных исследованиях в указанный период, также принимали участие: Санкт-Петербургский политехнический университет (ЛПИ), (ИТЕН) электротехнический Институт Новосибирский Сибирский энергетики (СибНИИЭ); Институт «Энергосетьпроект» и его Отделения: Северо-Западное и Сибирское, Всероссийский институт энергетики (ВНИИЭ), Молдавский «Энергопроект» «Молдэнерго», Всесоюзный И ГП трансформаторостроения (ВИТ), ОДП «Дальние электропередачи», Смоленский филиал МЭИ, Институт электродинамики АН Украины, Сибирский институт России (СЭИ АН РАН), Благовещенский и Фрунзенский энергетики АН политехнические институты, Дальневосточное ОКП «Энергосетьпроект», Красноярскэнерго и Красноярский ОКП института «Энергосетьпроект», Белорусский политехнический институт, Днепропетровский, Киевский и Львовский ОКП института «Укрэнергосетьпроект», Украинский институт «Укрэнергосетьпроект», Предприятие «Союзтехэнерго» (ОРГРЭС).

Важную роль в развитии, организации и выполнении исследований в области УСВЛ сыграли специалисты указанных организаций. Большой вклад в выполненные работы внесли: профессора д.т.н.: Веников В.А., Астахов Ю.Н., Левинштейн М.Л., Кадомская К.П., Карасев Д.Д, Чебан В.М., Азарьев Д.И., Алесенко Г.В., Рокотян С.С., Евдокунин Г.А. Поспелова Т.Г., к.т.н.: Тимашова Л.В., Крылов С.В., Козлов А.Н., Штробель В.А., Зарудский Г.К., Новгородцев Б.П., Яковлев Л.В., Лысков Ю.И., членкорреспондент АН РМ Чалый Г.В., члены-корреспонденты АН РАН: Александров Г.Н., академики Попков В.И. и Руденко Ю.Н., Тиходеев Н.Н., специалисты энергетики: Вершков В.А., Шнелль Р.В., Яковлев Л. В., Гусев А.П., Лаврентьев, Вигура Н.М., Сторожук В.А., Константинова Е.Д., Карпов Б.П., Ночка И.Т., Чебырка Г.Н., Балан И.Ф., Новак М.И., Ласло В.Ф., Некрасов А.М., аспиранты, защитившие диссертации в области УСВЛ, сотрудники Лаборатории управляемых электропередач ИЭ АНМ, специалисты ГП «Молдэнерго» и ГПИ «Энергопроект», ГИПРОНИИ, АН РАН.

Работы в области УСВЛ велись при активной поддержке Отделения физикотехнических проблем энергетики Академии наук, а также Государственного Комитета по науке и технике СССР и лично заместителя Председателя д.т.н. Г.В. Алексенко. Определенный интерес и внимание к работам были проявлены со стороны Института «Гидропроект», которым были предложены исходные данные для рассмотрения вариантов выдачи мощности ряда ГЭС с использованием УСВЛ различных классов напряжения.

Период 1992-2004 гг. характеризовался ослаблением работ в области УСВЛ, в связи с распадом Союза и ослаблением творческих связей исполнителей. Однако в этот период, как и во весь предыдущий, в Институте энергетики АН Молдовы исследования в данном направлении не приостанавливались.

Активизация работ в области УСВЛ началась с 2004 г. благодаря развитию творческих взаимосвязей Института Энергетики АН Молдовы с Институтами ВНИИЭ и «Энергосетьпроект».

Немаловажную роль сыграло также решение Федеральной Сетевой Компании Единой Энергетической Системы России, изложенное в письме от 7.12.2007 № ча3755 за подписью Первого заместителя А.Н. Чистякова, направленное в ИЭ АНМ и в ОАО «НТЦ Электроэнергетики». В этом письме проявлен интерес к предложениям Института Энергетики АН Молдовы о целесообразности рассмотрения использования УСВЛ в развитии межсистемных и внутрисистемных связей на базе УСВЛ. Также высказана необходимость обсуждения данного направления работ на НТС ОАО РАО «ЕЭС России» и Координационном научно-техническом Совете ОАО «ФСК ЕЭС», как возможного направления работ по созданию электропередач 220-750 кВ нового поколения — управляемых и повышенной пропускной способности. Особо важную роль в развитии работ в данном направлении в этот период сыграл научный руководитель НТС ОАО РАО «ЕЭС России» д.т.н. профессор Ю.Г. Шакарян.

Следует отметить одну важную историческую особенность в организации работ в области создания УСВЛ и других новых типов электропередач в рассматриваемый период времени. Период до 1990 г. характеризуется интенсивным поиском способов увеличения пропускной способности электропередач переменного тока. Результатами этого явились предложения двухцепных (и многоцепных) УСВЛ и одноцепных трехфазных ВЛ компактного типа (КВЛ) различных модификаций. Этими предложениями проблема повышения пропускной способности линий электропередач переменного тока с учетом современных требований практически решается.

Пропускная способность практически по любому заданному сколь угодно большому пределу передаваемой мощности достигается благодаря двум основным факторам: - снижению продольного индуктивного сопротивления фаз линии и увеличению поперечной емкостной проводимости.

Как одноцепные (КВЛ- компактные воздушные линии), так и двухцепные и многоцепные (УСВЛ) линии электропередачи по своей конструкции являются компактными ВЛ, однако возможности у них разные.

При применении передач повышенной пропускной способности, как и в электропередачах традиционного типа, есть вторая проблема, а именно — поддержание заданных уровней напряжения вдоль линии при изменении величины передаваемой мощности от максимальных значений до холостого хода.

Избыточную реактивную зарядную мощность линии при этом необходимо компенсировать, чтобы не допустить повышения напряжения вдоль линии, если даже поддерживать его на уровне номинального по концам линии на шинах отправной и приемной систем. Так как режим линии постоянно меняется, то компенсация зарядной мощности линии должна быть регулируемой, что предполагает установку устройств компенсации, как регулируемых.

В варианте УСВЛ эта задача в основном решается за счет устройств фазового регулирования (Φ P), обеспечивающего заданные параметры режимов при изменении величины передаваемой мощности от максимальной (P_m) до некоторого значения, равного \approx 0,5 P_m . При дальнейшем уменьшении передаваемой мощности в пределах

 $(0,5\div0)$ P_m требуется регулируемая компенсация избыточной зарядной мощности УСВЛ с помощью других регулируемых устройств, в том числе управляемых шунтирующих реакторов (УШР) или же путем сочетания применения средств ΦP и традиционных компенсирующих реакторов, включенных по специальной схеме.

На пути практического использования УСВЛ и КВЛ до 1990 г. возникали трудности из-за отсутствия на тот период эффективных и приемлемых по техническим и экономическим показателям регулируемых средств поперечной и продольной компенсации.

Следует отметить, что в практике применения обычных ВЛ переменного тока в энергосистемах с целью решения аналогичной проблемы существовал подход, предусматривающий заведомо полную компенсацию зарядной мощности линии, для чего достаточно было применять и нерегулируемые шунтирующие реакторы. Однако полная компенсация зарядной мощности линии оправдана только в режимах холостого хода или передачи достаточно малых величин мощности. Во всех остальных случаях полная компенсация зарядной мощности линии сопровождается снижением пропускной способности электропередачи, что является отрицательным фактором, приводящим к тому, что при полной компенсации зарядной мощности линии переходят в категорию электропередач с недостаточной или низкой пропускной способностью, т.е. в разряд «слабых» высоковольтных связей.

Известно, что ряд даже крупных специалистов энергетиков считали, что зарядная мощность линии является отрицательным фактором, и ее надо полностью скомпенсировать реакторами. Возможно, что работы в области УСВЛ в определенной мере изменили это ошибочное представление о зарядной мощности линии и послужили весомым аргументом для проведения более интенсивных исследований и разработок в области создания регулируемых средств управления режимами электропередач и энергосистем.

Именно в последние 10-15 лет наблюдается проведение в ряде стран широких программ по созданию различных новых средств регулирования стационарных и переходных режимов энергосистем. Итогом этого направления является создание на основе регулируемых средств так называемых гибких электропередач переменного тока (FACTS). Однако, представители этого направления абсолютизировали возможности появившихся новых устройств и пытались решить проблему увеличения пропускной способности электропередач, не обращая внимания на сами линии и на их параметры.

В итоге оказалось, что в энергосистемах, где в основном сети выполнены на базе традиционных линий электропередач, пропускная способность которых заведомо низкая, применение достаточно мощного арсенала средств регулирования, подключенных в узлах энергосистем, желаемого результата не дает, и их использование недостаточно неэффективно.

<u>Иллюстрация эффективности использования средств регулирования с учетом</u> характеристик линий электропередачи

Вопрос эффективности использования средств регулирования является одним из принципиальных в современных условиях формирования энергосистем.

Эффективность использования средств регулирования (в статике или динамике) может быть оценена по удельной результативности регулирующего воздействия на те или иные показатели и характеристики электропередачи, например, ее пропускную способность.

Наглядно это можно показать на следующем примере. Известно, что предел передаваемой по линии мощности, являющийся показателем величины пропускной способности линии электропередачи, определяется выражением:

$$P_{m} = \frac{\left|\dot{U}_{1}\right| \cdot \left|\dot{U}_{2}\right|}{Z_{C} \cdot \sin \alpha_{0} l} \cdot \sin \delta.$$

Различные средства регулирования (относящиеся к оборудованию FACTS - УШР, ИРМ, СТК, СТАТКОМ и др.)) применяют для воздействия на параметры режимов в отдельных узлах энергосистемы, в том числе и в узлах присоединения линий электропередачи. При этом они могут оказывать влияние:

- на напряжение в начале (\dot{U}_1) и в конце (\dot{U}_2) линии электропередачи;
- на величину угла (δ) сдвига напряжений начала и конца линии электропередачи (объединенные регуляторы потока мощности ОРПМ, тиристорно-управляемые последовательно включенные компенсаторы ТУПК, УРК, ФРТ-УПК и др.).

Однако ни одно из указанных средств не может воздействовать на значение волнового сопротивления линии ($Z_{\rm C}$), величина которого зависит только от параметров самой линии электропередачи и, в первую очередь, от удельного индуктивного сопротивления и удельной емкостной поперечной проводимости, которые в свою очередь определяются типом линии, ее конструкцией и параметрами электромагнитного поля. Указанные параметры определяют также волновую длину линии ($\alpha_0 l$).

Обращает на себя внимание тот факт, что при прочих равных условиях эффект от регулирующих воздействий указанных выше средств находится в обратнопропорциональной зависимости от величины (Z_C) , т.е. чем меньше величина (Z_C) , тем больший эффект по увеличению P_m линии электропередачи при одном и том же регулирующем воздействии с помощью того или иного устройства регулирования (YP), и наоборот. Покажем эту зависимость в относительных величинах при изменении волнового сопротивления (Z_C) в пределах от 1,0 до 0,5 от исходного значения.

Анализ приведенных в таблице 1 данных свидетельствует о том, что для линий электропередач, у которых волновое сопротивление меньше, чем у аналогичных других, применение одних и тех же средств регулирования сопровождается соответственно большим эффектом. Например, если у линии новой конструкции (или нового типа) волновое сопротивление меньше на 30 %, чем у аналогичной, с которой она сравнивается, то при прочих равных условиях на линии новой конструкции применение средств регулирования в 1,42 раза будет более эффективным (таблица 1, рис. 1). Другими словами для достижения одного и того же эффекта для линий электропередач с разными значениями волнового сопротивления, для линий с меньшими ($Z_{\rm C}$) потребуется меньшая мощность, а , следовательно, и меньшая стоимость средств регулирования.

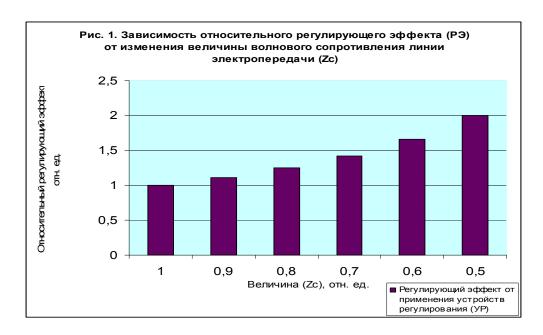
Таблица 1. Зависимость регулирующего эффекта (РЭ) для ВЛ различными значениями волнового сопротивления (Z_C)

Наименование	Значение волнового сопротивления						
	линии $(Z_{\rm C})$, отн. ед.						
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	
Регулирующий эффект, отн. ед.	1,0	1,11	1,25	1,42	1,66	2,0	

Таким образом, уменьшив значение волнового сопротивления линии ($Z_{\rm C}$) вдвое можно двухкратно снизить мощность и, соответственно, стоимость средств регулирования. Этот вывод является качественным.

В каждом конкретном случае результаты сопоставлений будут иметь вполне конкретное количественное выражение, в зависимости от типов устройств, схем их включения, компоновки и возлагаемых на них функций.

Проведенный анализ позволяет сделать вполне определенный вывод о том, что создавать эффективные управляемые электропередачи большой пропускной способности можно применив в комплексе лучшие современные средства регулирования и новые технические решения в области совершенствования линий электропередач.



Принципиальная новизна и основная физическая сущность УСВЛ

Основные отличительные особенности УСВЛ.

Управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ) являются многопроводными многоцепными линиями переменного тока. Для описания происходящих в них процессов, проведения расчетов режимов и выбора основных технических решений для них применимы существующие основы теории электропередач переменного тока. Вместе с тем УСВЛ имеют свои особенности и отличия, что потребовало выполнения для них дополнительных разработок новых методик расчета и новых подходов к выбору основных схем, конструкции и аппаратного оснащения.

Известно, что основные технические характеристики многопроводных линий электропередач определяются параметрами электромагнитного поля, образуемого вокруг проводников в пространстве, занимаемом линией электропередачи.

Из теоретических основ электротехники [16] известно, что векторные величины – напряженность электрического поля (E) и магнитного (H) определяют плотность потока мощности в электромагнитном поле (Π):

$$\Pi = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \tag{1}$$

Основываясь на общей теории электромагнитного поля [16] в работе [17] было получено выражение суммарного потока мощности многопроводной линии для самого общего случая, которое имеет следующий вид:

$$-\Pi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{inp} E_{inp}^{2} \pi r_{0}^{2} l - j \frac{\omega l}{\varepsilon \varepsilon_{0}} \sum_{i=1}^{n} q_{i}^{2} \ln \frac{R_{1}}{r_{0}} + j \frac{\omega l \mu \mu_{0}}{2\pi} \sum_{i=1}^{n} I_{i}^{2} \ln \frac{R_{1}}{r_{0}} = P_{\theta \Sigma} - j Q_{C\Sigma} + j Q_{L\Sigma}$$
(2)

где: E_{inp} — продольная составляющая напряженности электрического поля внутри i-го провода; σ_{inp} — удельная электрическая проводимость провода; r_0 — радиус провода; l — длина линии; ω — угловая частота, рад/с; ωl — скорость распространения электромагнитной волны, м/с, здесь l — размерность м/рад; ε_0 электрическая постоянная; ε — относительная электрическая проницаемость среды; μ_0 — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость; q_i — заряд i-го провода; R_l — радиус некоторого цилиндра, поверхность которого ограничивает объем пространства вокруг провода, в котором происходит изменение энергии поля; I_i — ток в i-том проводе; n — число проводов (фаз) линии; $P_{\theta \Sigma}$ — суммарные тепловые потери в проводах линии; $Q_{C\Sigma}$ — суммарная мощность электрического поля линии; $Q_{L\Sigma}$ — суммарная мощность магнитного поля линии. Мощности магнитного и электрического полей имеют обратные знаки, что свидетельствует об их обменном характере.

Для режима натуральной мощности имеет место равенство:

$$\left| -jQ_{\rm C\Sigma} \right| = \left| +jQ_{\rm L\Sigma} \right| \tag{3}$$

Из выражения (2) при условии (3) было найдено выражение натуральной мощности многопроводной линии:

$$P_{H} = v \cdot U \sum_{i=1}^{n} q_{i} \cos(\gamma_{i} - \alpha_{i}), \tag{4}$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны;

 $U=U_i$ – напряжение фазного провода;

 γ_i , α_i – аргументы напряжения (\dot{U}_i) и тока $(\dot{I_i})$.

Приведенные выражения (2, 4) показывают, каким образом суммарный поток вектора мощности линии зависит от различных факторов конструктивного и режимного характера. Они позволяют выявить наиболее влияющие параметры и оптимизационные расчеты, осуществлять выбор конфигураций выполнять фаз, расположения конструкции и угловых сдвигов векторов напряжений, приложенных к фазам, что в комплексе может обеспечить максимум функции (P_H) , с учетом заданных ограничений. Приведенные выражения позволяют также определять обобщенные характеристики линий различного типа и проводить соответствующие их сопоставления.

На основании исследований и анализа влияющих факторов установлено, что для обеспечения максимальной величины натуральной мощности линии, необходимо максимально увеличить суммарный электрический заряд всех фаз линии. Это возможно при сближении фаз линии и установлении между приложенными к ним векторами напряжений максимального углового сдвига (θ). Вместе с тем, при малых

нагрузках линии целесообразно обеспечить режим, при котором зарядная мощность линии минимальная. Это условие можно выполнить, если осуществить регулирование величины суммарного заряда линии в сторону уменьшения его величины. Для этого необходимо уменьшить (в пределе до 0) угловой сдвиг между векторами напряжений сближенных фаз.

Таким образом, для повышения пропускной способности и улучшения управляемости линий необходимо изменить не только их конструкцию, но и схемы и способы управления. Весь комплекс новых технических решений, сформулированных на основании этих результатов, нашел свое воплощение в предложенных УСВЛ, которые отличаются от обычных линий по своему исполнению и принципу [5-7].

Анализ характеристик трехфазных линий электропередач обычной конструкции показывает, что только относительно небольшая часть (не более 5-10 %) поперечного сечения коридора, ограниченного высотой и шириной опоры, участвует в процессе передачи электрической энергии. Остальная часть (90-95 %) поперечного сечения практически не используется, однако необходима с учетом требований соблюдения соответствующих габаритов по безопасности и ограничений, связанных с изоляционных промежутков диэлектрической прочностью при максимальном отклонении проводов от их исходного положения при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов - в основном ветра и гололеда, а также при возникновении грозовых и внутренних перенапряжений. Вынужденный в связи с этим выбор больших междуфазных расстояний при традиционных конструкциях ЛЭП сопровождается увеличением материальных затрат, стоимости линии, ширины земельных полос отчуждения под строительство, а главное - ухудшением электрических параметров линии – увеличением продольного индуктивного сопротивления (Х_{L)} снижением величины рабочей электрической емкости (Ср), увеличением волнового сопротивления (Z_c), а в результате – снижением величины натуральной мощности (P_H) и соответственно пропускной способности линий электропередачи (Р_m).

Выполненные исследования и проведенный анализ показали, что реально имеются возможности значительного улучшения технических и экономических показателей линий электропередач переменного тока, что предлагается реализовывать путем создания управляемых многоцепных (а в частности — двухцепных) самокомпенсирующихся высоковольтных линиях электропередачи переменного тока (УСВЛ).

Исследования УСВЛ показали, что, благодаря новым техническим решениям, они позволяют значительно (в 2-4 раза) повысить плотность потока мощности в пространстве, ограниченном высотой и шириной опоры, а также повысить эффективность использования земельных полос отчуждения под строительство линий, что благоприятно сказывается на улучшении их экономических показателей.

Главные принципиальные отличия УСВЛ от обычных многоцепных (и в частности двухцепных) трехфазных ЛЭП состоит в том, что в УСВЛ существенно изменены параметры электрического (Е) и магнитного (Н) полей внутри пространства между фазами, причем это изменение осуществлено таким образом, чтобы добиться наибольшего эффекта по увеличению пропускной способности линии электропередачи в целом ($P_{\rm m}$) и создания условий по ее регулированию в процессе изменения величины передаваемой мощности ($P_{\rm m}$), для обеспечения минимальных потерь ($\Delta P_{\rm min}$), отслеживания ограничений по уровням напряжения вдоль линии ($U_{\rm m}$) и оптимизации параметров режимов электропередачи и примыкающих энергосистем.

Указанный эффект достигается за счет выбора новой конструкции линии, рис.2, 3, позволяющей осуществить сближение соответствующих фаз разных цепей на минимально допустимое расстояние между ними (d_c), что создает возможность

увеличения взаимного электромагнитного (электрического – ΔC и магнитного – ΔM) влияния фаз и цепей линии друг на друга.



Рис.2. Опытно-промышленная двухцепная СВЛ-110 кВ

Установление с помощью концевых фазорегулирующих устройств соответствующего углового сдвига (θ) между трехфазными системами векторов напряжений (\dot{U}_i) цепей и, соответственно, протекаемыми по ним токами (\dot{I}_i), (рис.4, 5) обеспечивает изменение знака взаимного электромагнитного влияния цепей и соответствующих значений эквивалентных электрических параметров фаз и цепей. Это обеспечивает требуемую пропускную способность линии и заданные параметры режимов электропередачи в целом.

Регулирование параметров режимов электропередачи новой конструкции — с улучшенными техническими предельными характеристиками при таком подходе имеет новый физический смысл в отличие от известных способов компенсации или регулирования параметров в отдельных узлах линий и систем, так как является регулированием собственно эквивалентных параметров самой линии на всем ее протяжении.

При установлении между системами векторов напряжений цепей углового сдвига, $\theta=180^{\circ}$ обладает минимальным продольным индуктивным линия сопротивлением, максимальной рабочей емкостью, наибольшей величиной натуральной мощности и, соответственно, пропускной способностью. Такой режим линии необходим при передаче предельных величин мощности. Разработанные и описанные ниже варианты двухцепных УСВЛ в режиме при θ=180° обладают на 20-50 % величиной натуральной мощности большей, чем обычные двухцепные ВЛ того же класса напряжения. Перевод УСВЛ в режим при $\theta=0^{\circ}$ сопровождается снижением величины пропускной способности на 10-20 % для данной конструкции линии, благодаря увеличению продольного индуктивного сопротивления (X_L), уменьшению величины рабочей емкости (Ср), а, соответственно, зарядной (Ос) и натуральной (Рн) мощности линии. Этот режим может быть использован для обеспечения наиболее эффективной работы электропередачи при малых нагрузках или в режиме холостого хода.

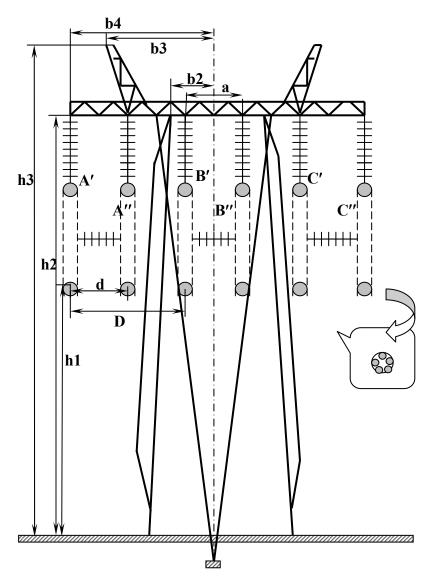


Рис.3. Промежуточная портальная опора УСВЛ для классов напряжений 220,330 и 500 кВ

Диапазон изменения угла θ = $0\div180^{\circ}$ характеризуется промежуточными значениями параметров линии – ее зарядной и натуральной мощности и пропускной способности.

Для увеличения глубины и диапазона регулирования технических характеристик УСВЛ, или придания им дополнительных качеств для них могут быть использованы практически все средства регулирования и компенсации, которые применяются в современной практике для обычных линий электропередач переменного тока.

Эффективным и оригинальным является способ установки средств поперечной компенсации между фазами разных цепей, рис.4, соответственно реакторов или батарей конденсаторов на регулируемую разность между векторов напряжений этих фаз, которая имеет место при изменении между ними угла сдвига (θ). В области УСВЛ выполнены многочисленные исследования, а также разработки, проведены

эксперименты и натуральные испытания, благодаря чему подтверждены теоретические посылки и достоверность результатов.

УСВЛ относятся к категории гибких электропередач, получивших в последние годы развитие как в теоретическом так и практическом плане. Направление создания гибких электропередач переменного тока — Flexible Alternating Curent Transmission Systems (сокращенно FACTS) подразумевает создание регулируемых электропередач на базе применения различных сосредоточенных средств компенсации и управления, однако при сохранении линии как нерегулируемого объекта.

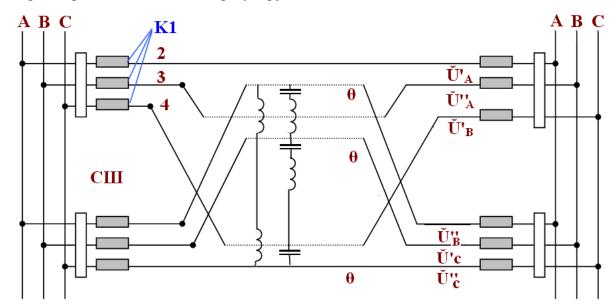


Рис.4. Принципиальная электрическая схема двухцепной УСВЛ с возможностью регулирования в широких пределах углового сдвига между системами векторов напряжений цепей и содержащая компенсирующие устройства между фазами

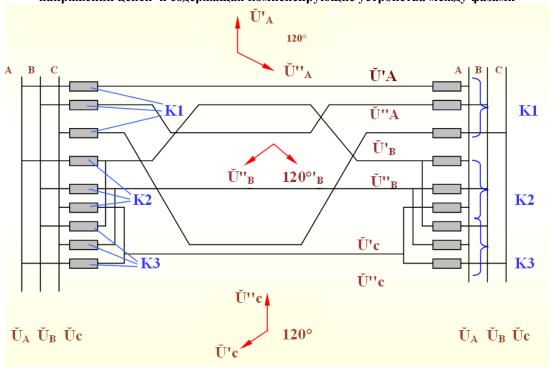


Рис.5. Принципиальная схема УСВЛ с дискретным регулированием углового сдвига между системами векторов напряжений цепей 0...120 эл. Град.

УСВЛ воплощая в себе идеи регулируемой электропередачи являются дальнейшим развитием направления гибких электропередач, так как в дополнение включает идеи и способы регулирования параметров и собственно линий на всем их протяжении, благодаря чему достигается принципиально новый уровень управления режимами и техническими показателями электропередач переменного тока. УСВЛ могут быть названы и управляемыми самокомпенсирующимися гибкими системами передачи электроэнергии на переменном токе — Controlled Flexible Self — Compensation Alternating Current Transmission Power Systems (сокращенно CFACTS).

Следует отметить, что исследованиям и предложениям УСВЛ предшествовали многочисленные исследования, выполненные рядом авторов в области дальних электропередач, в том числе [2, 7] — в области разомкнутых линий, [18,19] — компенсированных электропередач, [20, 21, 22] — настроенных линий электропередач, [14,15] — дальних ЛЭП сверхвысокого напряжения.

Не без оснований можно полагать, что к настоящему времени в области электропередач переменного тока получены такие результаты, которые позволяют решать любые проблемы транспорта электроэнергии на большие расстояния и осуществлять формирование больших протяженных объединенных энергосистем на переменном токе.

УСВЛ могут быть выполнены и в кабельном варианте. Основные преимущества УСВЛ в кабельном исполнении состоят в том, что они при регулировании углового сдвига между напряжениями жил кабеля, представляющими собой фазы разных цепей, позволяют изменять критическую длину кабельной линии, что создает возможности увеличения в 3-4 раза предельной дальности передачи электроэнергии по кабельным ВЛ на переменном токе.

Технические характеристики вариантов УСВЛ различных классов напряжения.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований к настоящему времени выполнены расчеты и разработки конкретных вариантов двухцепных УСВЛ различных классов напряжений, от 10 кВ до 1150 кВ.

В процессе проведения исследований и разработок был решен целый комплекс технических вопросов, связанных с новизной конструкций опор, междуфазовой изоляции, нетрадиционных конфигураций расположения фаз, схем присоединения к подстанциям, применения фазорегулирующих устройств, средств компенсации, релейной защиты и управления, отличием режимов и многими другими.

К настоящему времени удалось реально построить и проверить на практике работоспособность двухцепных УСВЛ напряжением 10, 35, 110 кВ с попарно сближенными фазами разных цепей при фиксированном угле сдвига векторов напряжений цепей θ=120°, осуществленном путем особой схемы присоединения к концевым и промежуточном подстанциям,рис.5, провести механические испытания двухстоечных специально разработанных опор для УСВЛ-110 кВ, провести моделирование и механические испытания сближенных фаз УСВЛ 110 и 220 кВ; выполнить ТЭО УСВЛ – 220 кВ Курейская ГЭС – Норильск протяженностью 380 км, ТЭО УСВЛ – 500 кВ Богучанская ГЭС – Канск длиной 450 км, провести предпроектные проработки варианта двухцепной УСВЛ 1150 кВ Туруханская ГЭС – Центр, протяженностью более 3675 км, соорудить на высоковольтном испытательном полигоне Института Энергетики АН РМ опытный пролет УСВЛ – 500 кВ с подвеской двух сближенных расщепленных фаз с проводами 5хАС-300/39 и провести электрические испытания воздушных промежутков и элементов междуфазовой изоляции.

В разработках и исследованиях принимали участие многие научно- исследовательские, проектные организации и подразделения ряда энергосистем. Новизна выполненных работ подтверждается тем, что в области исследований УСВЛ защищено около 30 кандидатских и докторских диссертаций, опубликовано более 400 научных работ, получены десятки авторских свидетельств и зарубежных патентов.

На базе УСВЛ различных классов напряжений (330, 500, 750 и 1150 кВ) были разработаны возможные варианты системообразующих сетей Единой энергосистемы на период до 2010-2020 г. нынешних стран СНГ.

Работы в области УСВЛ требуют своего продолжения. Их целесообразность подтверждена на основании выполненных технических и экономических обоснований.

Удалось только изготовить опытные образцы $\Phi PT - 35$ кВ в условиях Молдавской энергосистемы и $\Phi PT - 110$ кВ на Запорожском трансформаторном заводе.

В таблицах 1-3 приведены основные показатели разработанных вариантов УСВЛ различных классов напряжений.

Таблица 1 Технические характеристики построенных опытно-промышленных двухцепных СВЛ-10, 35, 110 кВ

Показатели	Единица	Напряжение СВЛ, кВ			
	измерения	10	10	35	110
Протяженность линии	КМ	1,2	9,5	8,7	34
Проектная нагрузка	МВт	3,5	3	12	70
Провода	Марка	A-90	AC-70	AC-90	AC-150
Фазовый сдвиг напряжений цепей	Град	120	120	120	120
Расстояние между сближенными	M	0,3	0,3	0,6	1,1
фазами разных цепей					
Удельное индуктивное	Ом/км	0,32	0,308	0,34	0,37
сопротивление при θ=120°					
По сравнению с обычными					
двухцепными ЛЭП					
обеспечивается					
Снижение индуктивного	%	22	25,3	24,5	18
сопротивления					
Снижение результирующего	%	12,3	10,1	15,5	14
сопротивления					
Экономия приведенных затрат	%	21,7	17	9,4	10
Экономия капитальных затрат	%	33	24,3	12	9,2

В качестве опор для двухцепных СВЛ-10, 35 кВ приняты одностоечные опоры. Для двухцепной СВЛ-110 кВ разработаны варианты одностоечных и двухстоечных опор (рис. 2) на железобетонных типовых стойках. На одностоечных опорах расположение попарно сближенных (стянутых) фаз выполнено по вершинам треугольника, а на двухстоечных — в горизонтальной плоскости. Расстояния между сближенными фазами приняты равными d_c =0,3-0,4 м для СВЛ-10 кВ, d_c =0,6-0,8 м — для СВЛ-35 кВ и d_c =1,1-1,3 м — для СВЛ-110 кВ. Сближенные фазы зафиксированы друг относительно друга в пролетах с помощью изоляционных распорок - в СВЛ-10, 35 кВ и с помощью стягивающих гирлянд изоляторов в СВЛ-110 кВ.

Значения расстояний между сближенными фазами и длина пути утечки изоляционных элементов удовлетворяют требованиям ПУЭ по условиям длительного воздействия рабочих междуфазовых напряжений, внутренних и грозовых перенапряжений.

Для двухцепных УСВЛ-220, 330, 500, 750 кВ рассмотрены варианты двухстоечных опор с горизонтальным расположением фаз (рис. 3).

Таблица 2. Технические характеристики вариантов двухцепных УСВЛ напряжением 220, 500 кВ (по данным проектных проработок и технико-экономических обоснований).

Показатели	Единиц	ниц Напряжение СВЛ, кВ						
	Ы	220	220	500	500	500		
	измере-							
	ния							
Протяженность линии	KM	380	15	450	450	340		
Передаваемая	МВт	400	400	3500	3500	2500		
проектная мощность								
Провода	Марка	2xAC-	2xAC-	5xAC-	5xAC-	5xAC-		
		240	240	240	240	240		
Расположение фаз	Горизонтальное							
Расстояние между	M	2,2	2,2	4,0	4,0	4,0		
сближенными фазами в								
пролете								
Волновое								
сопротивление при:								
θ=120°	Ом	235	236	205	205	205		
θ=180°	Ом	216	216	185	185	185		
Натуральная мощность								
при:								
θ=120°	МВт	400	400	2400	2400	2400		
θ=180°	МВт	450	450	2700	2700	2700		
Экономия в сравнении								
с обычными								
двухцепными ЛЭП по:								
Приведенным затратам	%	37	10	20	20	20		
Капитальным затратам	%	29	5,8	33	33	33		

В пролетах линий между сближенными фазами на некотором расстоянии от опор предусматривается установка стягивающих гирлянд изоляторов облегченного типа, которые обеспечивают фиксацию расстояния между фазами и обеспечивают практически полное гашение пляски и вибрации проводов фаз при воздействии неблагоприятных ветровых и гололедных нагрузок.

Длительный опыт эксплуатации (более 15 лет) опытно-промышленной двухцепной СВЛ-110 кВ показал, что на ней пляски проводов не наблюдалось, хотя в том же районе на ВЛ110-330 кВ обычного типа неоднократно наблюдались пляска проводов, из-за чего происходили отключения, обрывы и падения опор.

Для двухцепной УСВЛ-1150 кВ разработан новый вариант четырехстоечной опоры с вантовыми траверсами.

Главные электрические схемы УСВЛ могут иметь различный вид. Для самого общего случая может быть рекомендована схема, показанная на рис. 4.

В схеме УСВЛ предусматривается установка фазорегулирующих устройств по концам линии и компенсирующих устройств в промежуточных точках.

Таблица 3. Технические характеристики вариантов двухцепных УСВЛ напряжением 220-1150 кВ.

Показатели	Едини-	Напряжение СВЛ, кВ						
	ЦЫ	220	20 330			500	750	1150
	измере-							
	ния							
Протяженность линии	KM	100-3	100-300 200-400		0	300-600	400-800	500-
								3000
Провода	Марка	2xA	C-	C- 3xAC-		5xAC-	6xAC-	13xAC-
		300	0	300		300	300	300
Расположение фаз		Горизонтальное						
Расстояние между	M	2,2		2,2		4,0	6,0	10,0
сближенными фазами в								
пролете								
Волновое								
сопротивление при:								
θ=0°	Ом	375		367		338	342	338
θ=120°	Ом	222		214		183	191	209
θ=180°	Ом	206		199		170	177	195
Натуральная мощность								
при:								
θ=0°	МВт	258		592		1478	3282	7820
θ=120°	МВт	416		965		2567	5742	12146
θ=180°	МВт	458		1090		2929	6334	13580

В практике могут найти применение схемы УСВЛ с дискретным регулированием угла (θ) между системами напряжений цепей - 120° и 0° (рис.5), путем соответствующей коммутации фаз одной из цепей в местах присоединения линии к подстанциям. На УСВЛ возможно также применение пофазного управления.

Приведенные в таблицах данные основных показателей УСВЛ и сопоставление их с аналогичными характеристиками обычных трехфазных ЛЭП показывает, что УСВЛ превосходят обычные ЛЭП по величине натуральной мощности на 20-50 %, и обеспечивают экономию на 15–30 % удельных капитальных вложений и приведенных затрат в расчете на единицу передаваемой мощности.

Что касается дальности передачи электроэнергии по УСВЛ, то, как и для любых других типов электропередач переменного тока, эту задачу необходимо рассматривать самостоятельно с учетом конкретных условий и требований.

Проблема увеличения дальности передачи энергии переменным током по УСВЛ может быть решена в частности путем настройки их, например, в режим полуволны. При этом подходы остаются аналогичные тем, которые разработаны для обычных ЛЭП переменного тока.

Несмотря на изменение эквивалентных параметров УСВЛ и регулирование их в широких пределах при изменении угла сдвига между системами напряжений цепей в диапазоне 180-0°, волновая длина линии остается неизменной и может быть увеличена или уменьшена рекомендованными для настроенных электропередач средствами поперечной или продольной компенсации [9,12].

Отличие состоит только в том, что по УСВЛ, как обладающим большей величиной натуральной мощности, можно соответственно передавать большую по сравнению с обычными ЛЭП электрическую мощность. При этом сохраняются

указанные выше технико-экономические преимущества УСВЛ по сравнению с обычными ЛЭП.

Выводы

- 1. Управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ) обладают рядом достоинств и могут быть успешно использованы для транспорта электроэнергии как на дальние и сверхдальние расстояния, так и применены в распределительных электросетях
- 2. По сравнению с обычными ЛЭП переменного тока УСВЛ обеспечивают при прочих равных условиях:
 - увеличение значения натуральной мощности на 20-50 %;
 - повышение плотности суммарного потока мощности в поперечном сечении линии в 2-4 раза;
 - снижение величины напряженности электрического и магнитного полей в пространстве, окружающем линию и вблизи поверхности земли;
 - экономию капитальных и приведенных затрат на 10-30 % в расчете на единицу передаваемой мощности;
 - создают благоприятные возможности для системообразования, регулирования перетоков мощности и снижения суммарных потерь в энергосистеме.
- 3. Выполненные исследования и проектные разработки, опыт строительства вариантов УСВЛ и проведенные экспериментальные работы подтверждают реальные возможности широкого применения УСВЛ в энергосистемах для решения проблем транспорта электроэнергии, улучшения параметров режимов энергосистем и получения значительного экономического эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока (flexible AC Transmission system, FACTS). Составитель д.т.н. профессор Ю.Г. Шакарян, ОАО «ВНИИЭ», 41 с.
- 2. Solovieff I.I. An Investigation of a special circuit for long transmission of electric power. Канд. дисс., США, 1933, -156 с.
- 3. Ракушев Н.Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. М.: ГЭИ, 1957, -160 с.
- 4. Постолатий В.М. Исследование управляемых полуразомкнутых электропередач переменного тока. Автореф. канд. дисс. –М., 1968, -28 с.
- 5. А.с. 218294 (СССР). Способ передачи электроэнергии /В.А. Веников, Г.В. Чалый, В.М. Постолатий. Заявл. 6.12.66. № 1116879. Опубл. в Б.И., 1968, № 17.
- 6. А.с. 266924 (СССР). Способ передачи электроэнергии /В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий. Заявл. 4.11.68. № 1280553. Опубл. в Б.И., 1970, № 12.
- 7. А.с. 566288 (СССР). Электропередача переменного тока / В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин. Заявл. 21.03.74. № 2006496. Опубл. в Б.И., 1977, № 27.
- 8. Электропередача переменного тока /Постолатий В.М., Веников В.А., Астахов Ю.Н., Чалый Г.В., Калинин Л.П. Патенты: США №4001672, 1977; ГДР № 116990, 1976; Франции № 7508749, 1977; Англии № 1488442, 1978; Швеции № 75032268, 1978; Канады № 1038029, 1978; ФРГ № 2511928, 1979; Японии № 1096176, 1982.

- 9. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Постолатий В.М. и др. основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи, Электричество, 1977, № 12, с. 37-44.
- 10. Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый. Управляемые линии электропередачи. Под ред. В.А. Веникова, Изд-во Штиинца, 1984, 296 с.
- 11. Управляемые электропередачи. Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001-2007 гг. Составители: Постолатий В.М., Быкова Е.В. Кишинев, 2007. 234 с.
- 12. Устройство изменения фазового сдвига/Бошняга В.А., Калинин Л.П., Постолатий В.М. Патенты: США № 3975673, 1976; ГДР № 119494, 1976; ГДР № 123846, 19774 США № 4013942, 19774 Англии № 1484522, 1977; Франции № 7522737, 1977; Англии № 1493652, 1978; Швеции № 7508349, 1978; Швеции № 7508350, 1978; ФРГ № 2531578, 1978; ФРГ № 2531644, 1978; Франции № 7522615, 1978; Канады № 1045202, 1978; Канады № 1041172, 1978.
- 13. В.М. Постолатий, Л.П. Калинин, Д.А. Зайцев, Е.В. Быкова. Современные средства регулирования перетоков мощности и эффективность применения их в энергосистемах. Сборник докладов международной конференции «Энергетика Молдовы 2005». с. 2006-219.
- 14. Ю.П. Рыжов. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗов/Ю.П. Рыжов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.: илл.
- 15. Г.Н. Александров. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. 412 с. (Энергетика в политехническом университете).
- 16. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия. 1969. 352 с.
- 17. В.М. Теоретические основы и принципы создания управляемых самокомпенсирующихся линий электропередач. Дис. на соиск. уч. ст. д.т.н., Кишинев, 1987. 529 с.
- 18. Вульф А.А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. М.: ГЭИ, 1941. 100 с.
- 19. Веников В.А. Дальние электропередачи. М.Л.: ГЭИ, 1960. 312 с.
- 20. Щербаков В.К., Лукашов Э.С., Ольшевский О.В., Путилова А.Т. Настроенные электропередачи. Новосибирск, 1963.
- 21. Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В., Совалов С.А., Фотин В.П., Щербаков В.К. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ ЕЭС Европейской части СССР. Электричество, 1968, № 8.
- 22. Г.В. Воробьев, Т.Б. Заславская, А.Х. Калюжный, Э.С. Лукашов, О.В. Ольшевский, А.Т. Путилова, Ф.З. Хакимов, В.К. Халевин, В.К. Щербаков. Технические и экономические характеристики настроенных электропередач. Под ред. В.К. Щербакова. Новосибирск. Наука, 1965. 68 с.

Получено редакцией 6 октября 2008 г.

MODELUL MATEMATIC AL ELEMENTULUI REZISTIV DIN MICROFIRE A DIVIZORULUI DE TENSIUNE ÎNALTĂ.

V.Berzan (Institutul de Energetică al AŞM)

Rezumat. S-a propus modelul matematic al elementului rezistiv al divizorului de tensiune înaltă din microfire reprezentat ca o linie lungă cu capacitate longitudinală. S-au formulat condițiile de continuitate a curentului și tensiunii la frontierele de divizare a porțiunilor pentru care se consideră că parametrii lineici au valori constante. S-a propus schema în diferențe finite și s-a analizat stabilitatea ei. Această schemă este neevidentă și pentru obținerea soluției numerice s-a propus pentru utilizare metoda interațiilor multiple prin disparalelizarea procedurii de calcul, precum și algoritmul procedurii iterațiilor multiple reieșind din ipoteza, că în punctele de ruptură sunt cunoscute valorile soluției - valorile funcției căutate.

Cuvinte-cheie: divizor de tensiune înaltă, microfire rezistive, model matematic.

Mathematical model of a resistive element made from a microwire of a high-voltage divider of a voltage V.Berzan (Institute of Power Engineering of ASM)

Abstract. It is proposed the mathematical model of a resistive element of a high-voltage voltage divider made from a microwire. The model is presented as a long line with longitudinal running capacity. There are formulated conditions of continuity for a current and voltage on borders of sections with various values of running parameters which are constant within the limits of this section. It is proposed the scheme in final differences and the analysis of its stability is executed as well. This scheme refers to a class of implicit schemes and for getting the numerical decision it is recommended to use a method of repeated iteration with multisequencing of procedures of the numerical calculation. It is offered the algorithms of repeated iteration on the assumption of that in points of discontinuity of the solution values of this solution are known.

Key words: high-voltage divider, microwire, mathematical model.

Математическая модель резистивного элемента из микропровода высоковольтного делителя напряжения

В. Берзан (Институт Энергетики АНМ)

Аннотация. Предложена математическая модель резистивного элемента высоковольтного делителя напряжения из микропровода исходя из его представления в виде длинной линии с продольной погонной емкостью. Сформулированы условия непрерывности для тока и напряжения на границах участков с различными значениями погонных параметров, которые в пределах этого участка принимают постоянные значения. Предложена схема в конечных разностях и выполнен анализ ее стабильности. Эта схема относится к классу неявных и для получения численного решения рекомендовано использовать метод многократной итерации с распараллеливание процедуры численного счета, предложен алгоритм многократной итерации исходя из предположения, что в точках разрыва решения известны значения этого решения.

Ключевые слова: высоковольтный делитель напряжения, микропровод, математическая модель.

1.Introducere

În prezent măsurarea, evidența și distribuirea energiei se realizează cu ajutorul transformatoarelor de măsurare inductive sau capacitive. Neajunsul lor constă în gabaritele mari și masa mare, precum și eroarea ridicată de măsurare, ceea ce conduce la apariția dezechilibrului dintre fluxurile de putere și dintre energia electrică livrată și achiziționată. De exemplu, în domeniul transportului electric feroviar și urban măsurarea și evidența energiei electrice se realizează cu eroare în limitele de 1-5 %.

Tendințe moderne de dezvoltare a echipamentului energetic de măsurare sunt orientate spre: majorarea preciziei convertoarelor de măsurare inductive și capacitiv-rezistive de tensiune înaltă, creșterii preciziei și rapidității de reacție a echipamentului, sporirii numărului de mărimi electrice și a parametrilor rețelelor electrice ce se măsoară în timp real, micșorării masei și gabaritelor echipamentului de măsurare.

Analiza realizărilor pe plan mondial indică, că soluționarea complexă și în plin volum a sarcinilor enumerate nu este posibilă la utilizarea convertoarelor inductive și capacitiv-rezistive.

O soluție de perspectivă privind problema abordată o constituie construirea echipamentului energetic de măsurare pe baza conductelor din microfire rezistive cu izolație din sticlă. Acest echipament este cunoscut sub titlul de divizoare de măsurare din microfire rezistive (DMMR).În Republica Moldova este acumulată o bogată experiență în domeniul de cercetare și elaborare a microconductelor turnate cu izolație din sticlă, în cercetarea și elaborarea elementelor, traductoarelor și aparatelor pe baza conductoarelor din microfire rezistive (CMR) [1-7].

Convertizoarele rezistive de măsurare a tensiunilor înalte sunt realizate constructiv ca lanțuri de elemente rezistive elementare cu scopul obținerii valorilor necesare a rezistenței și a coeficientului de divizare a tensiunii pentru alimentarea circuitelor de intrare a componentelor electronice ce procesează și prelucrează informația. De obicei aceste echipamente sunt individuale și neportabile, și la utilizarea în calitate de divizoare de tensiune înaltă în sistemul energetic pot fi influențate puternic de perturbațiile electromagnetice din stațiile de transformare a tensiunilor și în centralele electrice, inclusiv condiționate de sarcini neliniare. Investigațiile experimentale orientate spre ridicarea indicilor de performanță a divizoarelor rezistive de tensiune înaltă utilizate pentru măsurarea tensiunilor alternative în condiții reale de exploatare sunt destul de costisitoare. Din aceste considerente simularea matematică a regimului de funcționare în baza utilizării modelelor matematice adecvate realizării constructive a divizorului [8,9] se prezintă ca o soluție bună privind ridicarea indicilor lui de calitate și elaborare a metodelor de verificare metrologică.

Scopul acestei lucrări constă în elaborarea modelului matematic al DMMR apt să descrie veridic procesele într-o bandă largă de frecvență; inclusiv și cele condiționate de tensiunile temporare și de impuls.

2. Particularitatea realizării constructive a divizorului de tensiune înaltă

Divizoarele rezistive de măsurare a tensiunilor înalte sunt realizate constructiv în formă de coloane formate din elemente rezistive unitare. Elementele unitare rezistive după realizarea constructivă sunt similare cu bobinele de inductanță și/sau cu înfășurările transformatoarelor de putere. O astfel de realizare constructivă ca a bobinei de inductanță asigură rigiditatea electrică suficientă a izolației dintre două spire vecine, precum și încadrarea în cerințele ce se referă la valoarea rezistențelor brațelor divizorului. Cea mai simplă construcție a elementului rezistiv din microfire o prezintă bobinarea într-un strat cu un microfir rezistiv a unei carcase cilindrice din material izolator. În Fig.1 este prezentată schematic varianta de realizare constructivă a elementului elementar rezistiv al divizorului.

În scop de protecție coloana rezistențelor unitare se amplasează într-o cuvă din material cu electroconductivitate potențialul căruia este egal cu potențialului pământului. Ca rezultat apar scurgeri de curent prin capacitățile noi formate. Scurgerile de curent sunt condiționate și de imperfecțiunea izolației - componenta curentului de electroconductivitate de asemenea nu este egală cu zero. Vom menționa, că stratul rezistiv posedă inductivitate, iar între spirele lui de asemenea apare o capacitate nedorită. În afară de valoarea lineică a rezistenței longitudinale R_0 toți parametrii menționați influențează asupra repartiției tensiunii în rezistența unitară și sunt surse de erori la transmiterea conversia tensiunii înalte în tensiunea măsurată la ieșire din divizor.

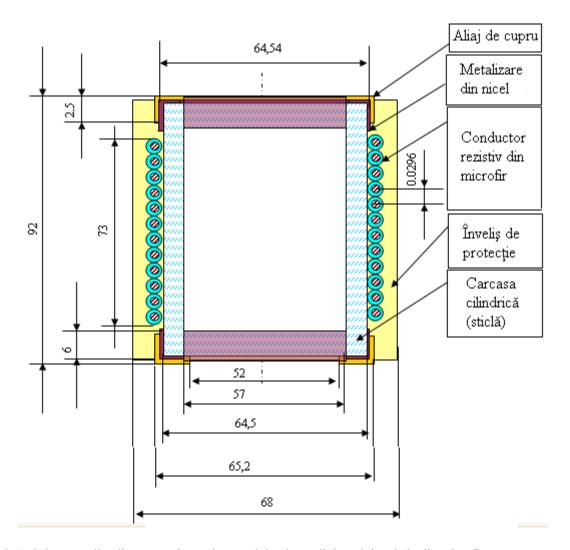


Fig.1. Schema realizării constructive a elementului unitar a divizorului rezistiv din microfire.

Mărimile enumerate se pot prezenta prin valori lineice a elementului unitar rezistiv a divizorului: capacitatea lineică C_0 , inductivitatea lineică L_0 , electroconductivitatea G_0 , rezistența longitudinală R_0 și capacitatea longitudinală a spirelor vecine K_0 . Definirea în așa mod a unor mărimi specifice realizării date constructive ne permite să examinăm rezistența unitară ca o linie lungă cu parametri distribuiți, cu capacitate longitudinală și la întocmirea modelului să utilizăm schema echivalentă, care este propusă pentru descrierea bobinelor transformatoarelor de putere și a liniilor lungi [8,9].

3. Schema echivalentă și modelul matematic al rezistorului unitar din microfire

În cazul realizării constructive a părții active a elementului unitar rezistiv prezentată în Fg.1. este veridică următoarea schemă echivalentă, care include și capacitatea longitudinală K_0 (Fig.2).

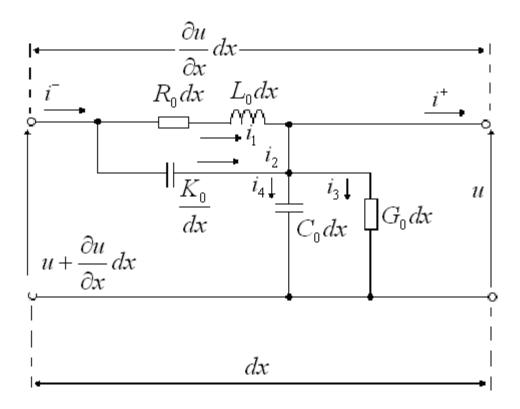


Fig.2. Schema echivalentă a porțiunii elementului rezistiv

Ecuațiile integralo-diferențiale pentru schema echivalentă (Fig.2) sunt următoarele:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i_1}{\partial t} + R_0 i_1;$$

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} - \frac{\partial i_2}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 u;$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{K_0} \int_0^t i_2 d\tau,$$

$$i_3 = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, i_4 = G_0 u, \frac{\partial}{\partial x} (i_1 + i_2) = i_3 + i_4,$$
(1)

unde K_0 - capacitatea longitudinală, care revine la o unitate de lungime a înfășurării rezistorului; L_0, R_0, C_0, G_0 - parametrii distribuiți ai înfășurării rezistorului unitar.

Condițiile inițiale sunt nule:

$$u(x,0) = i_1(x,0) = i_2(x,0) = 0$$
 sau $u(x,0) = \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0$.

Vom lansa ipoteza că examinăm o linie lungă la capătul căreia poate fi regimul de scurtcircuit (SC), sau regimul de mers în gol (MG) și condițiile de limită în secțiunile de frontieră sunt următoarele:

$$u(0,t) = f_0(t), \ u(l,t) = 0 \text{ (SC)} \quad \text{sau } \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = 0 \text{ (MG)}$$

În caz că la capătul liniei este conectată o rezistență șunt R_s , sau în caz general o impedanță Z_s aceasta ne permite să formulăm următoarele condiții de limită marginale:

$$u(l,t) = R_s i_l + L_s \frac{di_l}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t i_l d\tau.$$
(3)

Domeniul de variație a argumentului $x \in [0,l]$ se divizează în Q segmente, în interiorul cărora coeficienții L_0, R_0, C_0, G_0, K_0 au valori constante. În secțiunile frontierelor de contactare a segmentelor $x=x_k, k=1, 2,Q-1$ sunt valabile condițiile de continuitate a soluției:

$$[u]=[i_{1}]=[i_{2}]=0.$$
 (4)

Din sistemul de ecuații (1) vom obține expresia funcției u(x,t).

Din ecuația trei a sistemului (1) avem:

$$-i_2 = K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}.$$
 (5)

Substituim curentul i, din sistemul inițial de ecuații

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i_1}{\partial t} + R_0 i_1;$$

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 u.$$
(6)

Din prima ecuație a sistemului (6) obținem:

$$i_1 = -\int_0^t \frac{1}{L_0} \frac{\partial u}{\partial x} e^{-\frac{R_0}{L_0}(t-\tau)} d\tau,$$

și din ecuația a doua obținem relația integro-diferențială pentru funcția u(x,t)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 u - \int_0^t \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{L_0} \frac{\partial u}{\partial x} \right) e^{-\frac{R_0}{L_0} (t - \tau)} d\tau \tag{7}$$

După derivarea funcției (7) obținem următoarea relație:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{L_0} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{R_0}{L_0} \int_0^t \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{L_0} \frac{\partial u}{\partial x} \right) e^{-\frac{R_0}{L_0}(t-\tau)} d\tau = C_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + G_0 \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_0 \frac{\partial}{\partial x} \right)$$
(8)

și cu ajutorul (7) ne eliberăm în relația (8) de componenta prezentată de integral. După o modificare a ecuației (8), obținem expresia:

$$-C_{0} \frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} - \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{0} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \left(G_{0} + \frac{R_{0} C_{0}}{L_{0}} \right) \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{R_{0}}{L_{0}} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{0} \frac{\partial u}{\partial x} \right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{L_{0}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{G_{0} R_{0}}{L_{0}} u. \tag{9}$$

4. Schema numerică de calcul în diferențe finite și stabilitatea ei

Vom suprapune pe porțiunea $[0,l] = \sum_{k=1}^{Q} [X_{k-1}, X_k]$ o rețea uniformă cu pasul h_k pe

fiecare segment $[X_{k-1}, X_k]$, unde $h_k = (X_k - X_{k-1})/N_k$ pentru k = 1, 2, ..., Q.

Nodurile rețelei le vom nota astfel:

$$x_i^k = X_{k-1} + ih_i, i = 0, 1, ..., N_k, x_0^k = X_{k-1}, x_{N_k}^k = X_k, (x_0^l = 0, x_{N_0}^l = l).$$

Pentru fiecare porțiune $[X_{k-l}, X_k]$ vom aproxima în diferențe finite ecuația (9):

$$C_{0,i}\left(u_{i}^{n}\right)_{\overline{t}\overline{t}} - \left[\left(K_{0,i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n}\right)_{x}\right]_{\overline{t}\overline{t}} + \left(G_{0,i} + \frac{R_{0,i}C_{0,i}}{L_{0,i}}\right)u_{i,t}^{n} - \left[\frac{R_{0,i}}{L_{0,i}}\left(K_{0,i-1/2}u_{i,\overline{x}}\right)_{x}\right]_{0}^{1} = \left(\frac{1}{L_{0,i-1/2}}u_{i,\overline{x}}^{n}\right)_{x} - \frac{G_{0,i}R_{0,i}}{L_{0,i}}u_{i}^{n}$$

$$(10)$$

pentru x_i^k ; $i = 0,1...,N_k$; k = 1,2,...,Q.

Vom utiliza la aproximare indici întregi și semiîntregi pentru coeficienții, cărora în interiorul porțiunilor $[X_{k-l'}, X_k]$ le atribuim valori constante. Coeficienții vor fi diferiți pentru o valoare fixă i, pentru i=0 sau $i=N_k$.

Vom cerceta stabilitatea schemei ce este descrisă e relația (10). Dacă în schema canonică în diferențe cu trei nivele este valabilă egalitatea:

$$By_{i,t_{\circ}}^{n} + \tau^{2}R_{0}y_{i,\overline{t}}^{n} + Ay_{i}^{n} = 0,$$

în acest caz se îndeplinește inegalitatea operațională

$$B \ge 0, R_0 = R^*, A = A^* \ge 0, R_0 - \frac{1}{4}A \ge 0.$$

Pentru aceste condiții schema numerică de calcul pentru modelul liniei lungi cu capacitate longitudinală va fi stabilă.

Pentru schemade calcul (10) acești operatori se descriu de relațiile:

$$\begin{split} Bu_i &= \left(G_{0,i} + \frac{R_{0,i}C_{0,i}}{L_{0,i}}\right)u_i - \frac{R_{0,i}}{L_{0,i}}\left(K_{0,i-1/2}u_{i,\overline{x}}\right)_x;\\ \tau^2 R_0 u_i &= C_0 u_i - \left(K_{0,i-1/2}u_{i,\overline{x}}\right)_x;\\ Au_i &= -\left(\frac{1}{L_{0,i-1/2}}u_{i,\overline{x}}\right)_x + \frac{G_{0,i}R_{0,i}}{L_{0,i}}u_i. \end{split}$$

Valoarea pozitivă a coeficientului B, reiese din inegalitatea:

$$\begin{split} & \left(Bu,u\right) = \left(\left(G_{0} + \frac{R_{0}C_{0}}{L_{0}}\right)u,u\right) - \left(\frac{R_{0}}{L_{0}}\left(K_{0}u_{\bar{x}}\right)_{x},u\right) = \\ & = \left(\left(G_{0} + \frac{R_{0}C_{0}}{L_{0}}\right),u,u\right) + \left(K_{0}u_{\bar{x}}\left(\frac{R_{0}}{L_{0}}u\right)_{\bar{x}}\right) \geq 0. \end{split}$$

Autocorelarea coeficientului R, reiese din simetria funcției biliniare ($R_o u$, Z):

$$\tau^{2}(R_{0}u,z) = (C_{0}u,z) - ((K_{0}u_{\bar{x}})_{x},z) = (C_{0}u,z) + (K_{0}u_{\bar{x}}z_{\bar{x}}).$$

Autocorelarea și valoarea pozitivă a coeficientului A se poate demonstra prin următoarele transformări. Dacă este valabilă relatia:

$$(Au,z) = \left(-\left(\frac{1}{L_0}u_{\overline{x}}\right)_{x},z\right) + \left(\frac{G_0R_0}{L_0}u,z\right) = \left(\frac{1}{L_0}u_{\overline{x}},z_{\overline{x}}\right) + \left(\frac{G_0R_0}{L_0}u,z\right),$$

reiese, că coeficientul A are proprietăți de simetrie și deci,

$$(Au,u) = \left(\frac{1}{L_0}u_{\overline{x}},u_{\overline{x}}\right) + \left(\frac{G_0R_0}{L_0}u,u\right) \geq 0.$$

Şă verificăm veridicitatea condiției $R_0 - \frac{1}{4}A \ge 0$.

Fie că este valabilă relația:

$$\left(\left(R_0 - \frac{1}{4}A\right)u, u\right) = \frac{1}{\tau^2}\left(C_0u, u\right) + \frac{1}{\tau^2}\left(K_0u_{\overline{x}}, u_{\overline{x}}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{1}{L_0}u_{\overline{x}}, u_{\overline{x}}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{G_0R_0}{L_0}u, u\right).$$

Deoarece este valabilă relatia

$$(K_0 u_{\bar{x}}, u_{\bar{x}}) = \sum_{k=1}^{Q} (K_{0,k} u_{\bar{x}}, u_{\bar{x}}) \ge \sum_{k=1}^{Q} (K_{0,k} \frac{8}{l_k} u_i^k, u_i^k),$$

unde

$$l_k = X_k - X_{k-1}, k = 1,2,...,Q$$
, și

$$\left(\frac{1}{L_0}u_{\bar{x}}, u_{\bar{x}}\right) = \sum_{k=1}^{Q} \left(\frac{1}{L_{0,k}}u_{\bar{x}}, u_{\bar{x}}\right) \leq \sum_{k=1}^{Q} \left(\frac{4}{h_k^2} \frac{1}{L_{0,k}}u_i^k, u_i^k\right),$$

și deci reiese că

$$\left(\left(R_{0} - \frac{1}{4}A\right)u, u\right) \ge \sum_{k=1}^{Q} \left(\left(\frac{1}{\tau^{2}}C_{0,k} + \frac{4}{\tau^{2}}K_{0,k}\frac{8}{l_{k}} - \frac{1}{l_{k}^{2}L_{0,k}} - \frac{G_{0,k}R_{0,k}}{4L_{0,k}}\right) * u_{i}^{k}, u_{i}^{k}\right) \ge \min_{k} \left(\frac{1}{\tau^{2}}C_{0,k} + \frac{1}{\tau^{2}}K_{0,k}\frac{8}{l_{k}} - \frac{1}{l_{k}^{2}L_{0,k}} - \frac{G_{0,k}R_{0,k}}{4L_{0,k}}\right) (u)^{2} \ge 0.$$
(11)

Fie că valoarea minimală a relației (11) se realizează pentru condiția k=m. În acest caz obținem inegalitatea:

$$\frac{1}{\tau^2} \left(C_{0,m} + \frac{8K_{0,m}}{l_m} \right) \ge \frac{1}{h_m^2 L_{0,k}} \left(1 + \frac{G_{0,m} R_{0,m}}{4} h_m^2 \right).$$

În baza inegalității obținute formulăm condiția de stabilitate a schemei numerice de calcul:

$$\tau^{2} \leq \frac{h_{m}^{2} L_{0,m} \left(C_{0,m} + \frac{8K_{0,m}}{l_{m}} \right)}{1 + \frac{G_{0m} R_{0,m}}{4} h_{m}^{2}}$$
(12)

sau

$$\tau \leq h_{m} \sqrt{\frac{L_{0,m} \left(C_{0,m} + \frac{8K_{0,m}}{l_{m}}\right)}{1 + \frac{G_{0,m}R_{0,m}}{4}h_{m}^{2}}} = h_{m}A_{m}(h_{m}),$$

unde
$$A_m(h_m) = \sqrt{\frac{L_{0,m}\left(C_{0,m} + \frac{8K_{0,m}}{l_m}\right)}{1 + \frac{G_{0,m}R_{0,m}}{4}h_m^2}}$$
.

Pentru a păstra valoarea maximală a numărului lui Kurant în interiorul porțiunilor $[X_{k-l}, X_k]$, k=1, 2, ..., Q, pașii h_k se determină în așa mod, ca produsul $h_k A(h_k)$ să nu depindă de porțiunea respectivă. Vom descrie un posibil algoritm de determinare a valorilor pașilor h_k .

Alegem porțiunea divizată pe line unde avem cea mai mare valoare a vitezei de propagare a undei, sau cel mai mic interval de timp t_k :

$$\min_{k} t_{k} = \min_{k} \frac{X_{k} - X_{k-1}}{a_{k}} = \min_{k} \frac{X_{k} - X_{k-1}}{1/\sqrt{L_{0,k}C_{0,k}}},$$

unde $a_k = \frac{1}{\sqrt{L_{0,k}C_{0,k}}}$ – - viteza undei la propogarea pe porțiunea k a liniei. Vom nota această porțiune cu indicele m și vom calcula valoarea pasului h_m :

$$h_m = \frac{X_m - X_{m-1}}{N_m}$$
, pentru $N_m = 2, 3, 4, \dots$ (13)

Pasul de divizare a timpului se determină din relația (12).

Pentru porțiunea selectată pasul de divizare a timpului este egal $\tau = h_m A(h_m)$. Trebuie de menționat că și în interiorul altor segmente de asemenea este de dorit îndeplinirea condiției $\tau = h_k A(h_k)$. În acest caz pasul h_k se calculează ținând cont de relația $h_k A(h_k) = h_m A(h_m)$.

Deoarece variabila t deja este cunoscută, iar $h_k A(h_k) = \tau$ și din (12), obținem următoarele relații:

$$\begin{split} &\tau^2 \left(1 + \frac{G_{0,k} R_{0,k}}{4} h_k^2 \right) = h_k^2 L_{0,k} \left(C_{0,k} + \frac{8K_{0,k}}{l_k} \right); \\ &h_k^2 \left[L_{0,k} \left(C_{0,k} + \frac{8K_{0,k}}{l_k} \right) - \tau^2 \frac{G_{0,k} R_{0,k}}{4} h_k^2 \right] = \tau^2; \\ &h_k^2 = \frac{\tau^2}{L_{0,k} \left(C_{0,k} + \frac{8K_{0,k}}{l_k} \right) - \tau^2 \frac{G_{0,k} R_{0,k}}{4} h_k^2}. \end{split}$$

Dacă vom determina valorile pașilor h_k conform algoritmului propus, atunci aceasta este echivalent condiției, că în formula (11) valoarea minimală se obține pentru orice k.

Valorile calculate ale pașilor h_k de obicei nu vor corespunde unui număr întreg pentru spațiul porțiunilor $[X_{k-l}, X_k]$. De aceea, este necesară recalcularea pașilor h_k și t după coordonatele

spațiale și de timp pentru a obține coicidența plasei de calcul cu frontierile de divizare a liniei. La recalculare determinăm numărul întreg de divizare pe porținile N_{ν} :

$$N_k = \left[\frac{X_k - X_{x-1}}{h_k} \right] + I$$

și, prin urmare, calculăm valoarea pașilor pentru variabila spațială

$$h_k = \frac{X_k - X_{x-1}}{N_k}.$$

Conform valorii precizate h_k , determinăm pasul de divizare a timpului: $\tau_k = h_k A \Big(h_k \Big)$ și în calitate de valoare finală a variabilei t, selectăm pasul minimal din subspațiu k, deci, $\tau = \min_k \tau_k$.

Acest t, desigur va fi mai mic decât valoarea maximală admisă, conform condiției Kurant, dar cu cât este mai mare numărul de pași inițiali N_m (13), cu atât mai mult numărul Kurant se apropie de unitate.

5. Algoritmul de rezolvare a sistemului de ecuații în diferențe finite

Schema în diferențe finite (10) este de tip neevident și de aceea, pentru obținerea soluției este utilă utilizarea metodei multiplelor interații.

Deoarece coeficienții pe parcursul liniei au valori constante doar în interiorul porțiunilor selectate, cea mai comodă este metoda multiplelor interații prin desparalelizarea procedurii de calcul.

Calcularea fiecărui interval al timpului se efectuează în baza relațiilor:

$$a_{i}^{k} u_{i-1}^{k} - b_{i}^{k} u_{i}^{k} + C_{i}^{k} u_{i+1}^{k} = f_{i}^{k}, i = 1, 2, ..., N_{k} - 1;$$

$$u_{0}^{k} = U^{k-1}, u_{N_{k}}^{k} = U^{k} \qquad k = 1, 2, ..., Q$$
(14)

Fie că inițial, în punctele cu rupturi ne sunt cunoscute valorile soluției U^0 , U^1 ,..., U^Q . În acest caz, dacă utilizăm procedeul de rezolvare prin metoda simplă de multiple interații pentru sistemul de ecuații (14), de exemplu de Q ori, se poate obține soluția căutată. Dar ințial valorile U^0 , U^1 ,..., U^Q nu sunt cunoscute. De aceea, se propune de utilizat procedura de rezolvare prin metoda multiplelor iterații a trei probleme de tipul (14) pentru două funcții fundamentale ϕ^{I0} , ϕ^{I0} și a funcției din partea dreaptă F:

$$\begin{cases} a_{i}^{k}\varphi_{i-1}^{10k} - b_{i}^{k}\varphi_{i}^{10k} + C_{i}^{k}\varphi_{i+1}^{10k} = 0 & i = 1, 2, ..., N_{k} - 1 \\ \varphi_{o}^{10k} = 1, & \varphi_{N_{k}}^{10k} = 0 \end{cases} \qquad (I)$$

$$\begin{cases} a_{i}^{k}\varphi_{i-1}^{01k} - b_{i}^{k}\varphi_{i}^{01k} + C_{i}^{k}\varphi_{i+1}^{01k} = 0 & i = 1, 2, ..., N_{k} - 1 \\ \varphi_{o}^{01k} = 0, & \varphi_{N_{k}}^{01k} = 1 \end{cases} \qquad (II)$$

$$\begin{cases} a_{i}^{k}F_{i-1}^{k} - b_{i}^{k}F_{i}^{k} + C_{i}^{k}F_{i+1}^{k} = f_{i}^{k} & i = 1, 2, ..., N_{k} - 1 \\ F_{o}^{k} = 0, F_{N_{k}}^{k} = 0 \end{cases} \qquad (III)$$

Funcțiile φ^{10} , φ^{01} - sunt soluții a ecuației (14) cu partea dreaptă nulă pentru condițiile de limită I, 0 sau 0, I. Funcția F este soluția ecuației (14) cu partea dreaptă egală cu valoarea funcției f_i^k pentru condițiile de limită nule. Toate trei funcții nu necesită cunoașterea valorilor reale u_i în punctele de ruptură, deci a valorilor U^0 , U^1 ,..., U^0 . În baza acestei proceduri obținem Q ori soluțiile pentru cele trei tipuri de probleme I, II și III formulate anterior. Deoarece coeficienții în interiorul porțiunilor de divizare a liniei au valori constante, reiese că valorile mărimilor a_i^k , b_i^k , C_i^k și f_i^k nu depind de indicele i, deci în acest caz operăm cu tipul de iterație multiplă cu coeficienți constanți. De exemplu, vom ilustra metoda în baza obținerii soluției pentru problema I:

$$\begin{cases} a^{k} \varphi_{i-1}^{10k} - b^{k} \varphi_{i}^{10k} + C^{k} \varphi_{i+1}^{10k} = 0 & i = 1, 2, ..., N_{k} - 1 \\ \varphi_{o}^{10k} = 1, & \varphi_{N_{k}}^{10k} = 0 \end{cases}$$

Obținînd valorile tuturor funcțiilor φ_i^{10k} , φ_i^{01k} , F_i^k , se poate determina soluția (dacă cunoaștem valorile U^0 , U^1 ,..., U^Q).

$$u_i^k = U^{k-1} \varphi_i^{10k} + U^k \varphi_i^{01k} + F_i^k.$$
 (15)

Pentru determinarea valorii U^k trebuie să formulăm ecuațiile (14) pentru condițiile în nodurile de racordare $i=N_k$. Atunci, relația (14) pentru nodul $i=N_k$ se transformă în expresia:

$$a_{N_k}^k u_{N_k-l}^k - b_{N_k}^k u_{N_k}^k + C_{N_k}^k u_{N_k+l}^k = f_{N_k}^k$$

Vom întroduce în relația obținută formula (15):

$$\begin{split} &a_{N_k}^k \Big(U^{k-l} \varphi_{N_k-l}^{l0k} + U^k \varphi_{N_k-l}^{0lk} + F_{N_k-l}^k \Big) - b_{N_k}^k U^k + \\ &+ C_{N_k}^k \Big(U^k \varphi_l^{l0(k+l)} + U^{k+l} \varphi_l^{0l(k+l)} + F_l^{k+l} \Big) = f_{N_k}^k \,. \end{split}$$

În relația obținută s-a ținut cont, că $u_{N_k}^k = U^k$. Grupând coeficienții pe lângă variabilele necunoscute U^{k-l} , U^k , U^{k+l} , obținem relația:

$$U^{k-l}\left(a_{N_{k}}^{k}\varphi_{N_{k}}^{l0k}\right)-U^{k}\left(b_{N_{k}}^{k}-a_{N_{k}}^{k}\varphi_{N_{k}}^{0lk}-C_{N_{k}}^{k}\varphi_{N_{k}}^{l0(k+l)}\right)+$$

$$+U^{k+l}\left(C_{N_{k}}^{k}\varphi_{N_{k}}^{0l(k+l)}\right)=f_{N_{k}}^{k}-a_{N_{k}}^{k}F_{N_{k}-l}^{l0k}-C_{N_{k}}^{k}F_{l}^{k+l},$$

$$(16)$$

unde k=1, 2, ..., Q-1;

$$U^0 = V_1$$
, $U^Q = V_2$ - și în acest caz $V_1 = f(t)$; iar $V_2 = 0$.

Rezolvând acest sistem de ecuații cu metoda de multiple iterații, obținem valorile U^k , iar din (15) valorile mărimilor u^k_i .

Vom transcrie în formă de (14) schema în diferențe finite (10):

$$\begin{split} &C_{0,i}\frac{u_{i}^{n+1}-2u_{i}^{n}+u_{i}^{n-1}}{\tau^{2}}-\frac{\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n+1}\right)_{x}-2\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n}\right)_{x}}{\tau^{2}}+\\ &+\frac{\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n-1}\right)_{x}}{\tau^{2}}+\left(G_{0,i}+\frac{R_{0,i}C_{0,i}}{L_{0,i}}\right)\frac{u_{i}^{n+1}-u_{i}^{n-1}}{2\tau}-\\ &-\frac{R_{0,i}}{L_{0,i}}\frac{\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n+1}\right)_{x}-\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n-1}\right)_{x}}{2\tau}=\left(\frac{1}{L_{0,i-1/2}}u_{i,\overline{x}}^{n}\right)_{x}-\frac{R_{0,i}G_{0,i}}{L_{0,i}}u_{i}^{n};\\ &C_{0,i}u_{i}^{n+1}-\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n+1}\right)_{x}+\frac{\tau}{2}\left(G_{0,i}+\frac{R_{0,i}C_{0,i}}{L_{0,i}}\right)u_{i}^{n+1}-\\ &-\frac{\tau R_{0,i}}{2L_{0,i}}\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n+1}\right)_{x}=2C_{0,i}u_{i}-C_{0,i}u_{i}^{n-1}2\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n}\right)_{x}+\\ &+\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n-1}\right)_{x}+\frac{\tau}{2}\left(G_{0,i}+\frac{R_{0,i}C_{0,i}}{L_{0,i}}\right)u_{i}^{n-1}-\\ &-\frac{\tau R_{0,i}}{2L_{0,i}}\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}^{n-1}\right)_{x}+\tau^{2}\left(\frac{1}{L_{0,i-1/2}}u_{i,\overline{x}}^{n}\right)_{x}-\tau^{2}\frac{R_{0,i}G_{0,i}}{L_{0,i}}u_{i}^{n}=f_{i}^{n}. \end{split}$$

Dacă derivata $\left(k_{i-1/2}u_{i,\overline{x}}\right)_x$ se descrie pentru interiorul porțiunii $[X_{k-1},X_k]$, atunci coeficientul $k_{i-1/2}$ este o constantă și plasa este uniformă:

$$\left(k_{i-1/2}u_{i,\bar{x}}\right)_x = k_k \frac{u_{i+1}^k - 2u_i^k + u_{i-1}^k}{h_k^2}, \qquad k=1,2,...,Q$$

În sistemele de ecuații *I, II, III* coeficienții și pașii plasei de calcul vor avea valori constante; care se determină din relațiile:

$$\begin{split} a_i^k &= -\frac{K_{0,k}}{h_k^2} \bigg(1 + \frac{\tau}{2} \frac{R_{0,k}}{L_{0,k}} \bigg); \qquad C_{0,i}^k = a_i^k \, ; \qquad b_i^k = C_{0,k} + \frac{\tau}{2} \bigg(G_{0,k} + \frac{R_{0,k}C_{0,k}}{L_{0,k}} \bigg) - a_i^k - C_{0,i}^k ; \\ f_i^{k,n} &= 2C_{0,k}u_i^n - C_{0,k}u_i^{n-1} - 2K_{0,k}u_{i,\overline{x}x}^n + K_{0,k}u_{i,\overline{x}x}^{n-1} + \frac{\tau}{2} \bigg(G_{0,k} + \frac{R_{0,k}C_{0,k}}{L_{0,k}} \bigg) * \\ *u_i^{n-1} - \frac{\tau}{2} \frac{R_{0,k}}{L_{0,k}} K_{0,k}u_{i,\overline{x}x}^{n-1} + \frac{\tau^2}{L_{0,k}}u_{i,\overline{x}x}^n - \tau^2 \frac{R_{0,k}C_{0,k}}{L_{0,k}}u_i^k \, . \end{split}$$

Pentru sistemul de ecuații (16) derivata trebuie descifrată, ținând cont de diferențele valorilor diferitor pași h_k , h_{k+1} și de valorile coeficienților. Derivata în nodul $i=N_k$ se descrie de relația:

$$\begin{split} \left(K_{0,N_k-1/2}u_{N_k\overline{x}}\right)_x &= \frac{1}{\hbar_k} \Biggl(K_{0,N_k+1/2}\frac{u_{N_k+1}-u_{N_k}}{h_{k+1}} - K_{0,N_k-1/2} \, * \\ &\quad * \frac{u_{N_k}-u_{N_k-1}}{h_k} \Biggr) = \frac{1}{\hbar_k} \Biggl(K_{0,k+1}\frac{u_{N_k+1}-u_{N_k}}{h_{k+1}} - K_{0,k}\frac{u_{N_k}-u_{N_k-1}}{h_k} \Biggr), \end{split}$$
 unde $h_k = \frac{h_k + h_{k+1}}{2}$.

Coeficienții de pe lângă funcțiile fundamentale se calculează din relațiile:

$$\begin{split} a_{N_k}^k &= -K_{0,k} \, \frac{1}{h_k \hbar_k} - \frac{\tau}{2} \, \frac{R_k'}{L_k'} K_{0,k} \, \frac{1}{h_k \hbar_k} = -\frac{K_k}{h_k \hbar_k} \bigg(1 + \frac{\tau}{2} \, \frac{R_k'}{L_k'} \bigg); \\ C_{0,N_k}^k &= -K_{0,k+1} \, \frac{1}{h_{k+1} \hbar_k} - \frac{\tau}{2} \, \frac{R_k'}{L_k'} \, K_{0,k} \, \frac{1}{\hbar_k h_{k+1}} = -\frac{K_{0,k+1}}{\hbar_k \hbar_{k+1}} \bigg(1 + \frac{\tau}{2} \, \frac{R_k'}{L_k'} \bigg); \\ b_{N_k}^k C_k' &+ \frac{\tau}{2} \bigg(G_k' + \frac{R_k' C_k'}{L_k'} \bigg) - a_{N_k}^k - C_{N_k}^k. \end{split}$$

În ecuațiile cu ștrih sunt notate valorile coeficienților R, L, G, C în punctele de ruptură a soluțiilor $i=N_k$. Aceste valori se pot determina ca valori de limită din stânga și dreapta punctului de ruptură, dar este mai util de folosit media aritmetică, deci:

$$R_k' = \frac{R_{0,k} + R_{0,k+1}}{2}, \ L_k' = \frac{L_{0,k} + L_{0,k+1}}{2}, \ G_k' = \frac{G_{0,k} + G_{0,k+1}}{2}, \quad C_k' = \frac{C_{0,k} + C_{0,k+1}}{2}.$$

Pentru realizarea algoritmului de calcul vom deduce formula iterațiilor multiple pentru sistemul de ecuații (14).

Vom transcrie sistemul de ecuații (14) în forma următoare:

$$\begin{cases}
a_i^k u_{i-1}^k - b_i^k u_i^k + C_{0,i}^k u_{i+1}^k = f_i^k, & i = 1, 2, ..., N_k - 1 \\
u_0^k = A, u_{N_k}^k = B
\end{cases}$$
(17)

Soluția o căutăm ca funcția $u_i^k = \alpha_i u_{i+1}^k + \beta_i$ și atunci este valabilă relația $u_{i-1}^k = \alpha_{i-1} u_i^k + \beta_{i-1}$. Substituim în (17) valoarea u_{i-1}^k :

$$a_{i}^{k} \left(\alpha_{i-1} u_{i}^{k} + \beta_{i-1}\right) - b_{i}^{k} u_{i}^{k} + C_{0,i}^{k} u_{i+1}^{k} = f_{i}^{k}$$

$$\left(a_{i}^{k} \alpha_{i-1} - b_{i}^{k}\right) u_{i}^{k} = -C_{0,i}^{k} u_{i+1}^{k} + f_{i}^{k} - a_{i}^{k} \beta_{i-1}$$

simplificăm relația și determinăm valoarea variabilei u_i^k :

$$u_{i}^{k} = \frac{C_{0,i}^{k}}{b_{i}^{k} - \alpha_{i-1}a_{i}^{k}}u_{i+1}^{k} + \frac{a_{i}^{k}\beta_{i-1} - f_{i}^{k}}{b_{i}^{k} - \alpha_{i-1}a_{i}^{k}}.$$

Egalând coeficienții de pe lângă necunoscute, obținem formulele pentru calcularea valorilor coeficienților α_i și β_i :

$$\alpha_{i} = \frac{C_{0,i}^{k}}{b_{i}^{k} - \alpha_{i-1}a_{i}^{k}}; \ \beta_{i} = \frac{a_{i}^{k}\beta_{i-1} - f_{i}^{k}}{b_{i}^{k} - \alpha_{i-1}a_{i}^{k}}; \qquad i = 1, 2, ..., N_{k} - 1.$$

Din condiția de limită $u_0^k = A$ obținem, că:

$$u_0^k = \theta \cdot u_1^k + \beta_0 = A \Longrightarrow \alpha_0 = \theta, \beta_0 = A.$$

Deci, se poate propune următorul algoritm de calcul pentru determinarea valorilor coeficienților și a funcției necunoscute:

1)
$$\alpha_0 = 0, \beta_0 = A;$$

2)
$$\alpha_i = \frac{C_{0,i}^k}{b_i^k - \alpha_{i-1} a_i^k}, \ \beta_i = \frac{a_i^k \beta_{i-1} - f_i^k}{b_i^k - \alpha_{i-1} a_i^k}, \quad i = 1, 2, ..., N_k - 1;$$

3)
$$u_{N_k}^k = B$$
;
4) $u_i^k = \alpha_i u_{i+1}^k + \beta_i$, $i = N_k - 1, N_k - 2, ..., 2, 1$.

6. Rezultate ale testării modelului matematic

În calitate de problemă test s-a selectatat modelarea procesului de propagare a undei în linia lungă fără pierderi și cu pierderi la aplicarea la intrare a unui semnal sinusoidal pentru regimuri marginale la capătul ei. S-a simulat în baza modelului elaborat și a algoritmului de organizare a procedurii de calcul numeric propus simularea matematică a procesului de propagare pentru cazul $R_0 = G_0 = 0$ (R = G = 0) la prezentarea capacității lineică longitudinală în sistemul de unități relative și valoarea acesteia s-a determinat din relația $K^* = \frac{K_0}{C_0 l_0}$. Lungimea liniei este egală cu $l = 537\,\mathrm{m}$, iar parametrii lineici au valorile $L_0 = 2.49*10^{-6}\,\mathrm{H/m}$ și $C_0 = 1.21*10^{-9}\,\mathrm{H/m}$. Calculele s-au efectuat pentru trei valori ale capacității longitudinale $K^* = 0$; $10^{-4}\,\mathrm{pe}$ parcursul timpului egal cu durata sumară a trei propagări a semnalului în circuitul examinat.

Condițiile marginale de limită sunt următoarele:

$$u(0,t)=\sin(5\pi t)$$
 pentru $0 < t < 0,2;$
 $u(0,t)=0$ pentru $\forall t < 0,2;$
 $u(0,t)=0$ pentru $\forall t > 0.$

Pentru cazul $K^* = 0$ nu se depistează deformarea impulsului inițial avem o coincidență absolută cu repartiția spațială a tensiunii obținută în baza metodei caracteristicilor pentru linia ideală (fig.3). Procesul devine mult mai complex în cazul când capacitatea longitudinală diferă de zero (fig.4). În acest caz are loc dispersia energiei impulsului în linia lungă și atenuarea amplitudinii lui. La măsurători aceasta se sesizează ca o eroare de amplitudine condiționată de fenome e nu există.

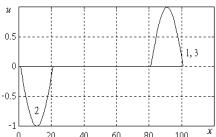


Fig.3.Profilul tensiunii în linia ideală SC și propagările (1), (2) și (3) ale impulsului sinusoidal pentru $\boldsymbol{K}^* = 0$

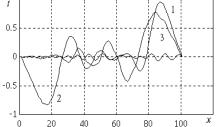


Fig.4.Profilul tensiunii în linia ideală SC și propagările (1), (2) și (3) ale impulsului sinusoidal pentru $K^*=10^{-4}$

În caz că linia are pierderi procesul tranzitoriu devine şi mai complex. Astfel pentru valorile $K^* = 10^{-4}$ şi pierderi în linie condiționate de rezistența activă longitudinală $R^* = 0.0133$ Om/m, conductivitatea activă a izolației $G^* = 2.62*10^{-9}$ Sm/m se observă modificări foarte esențiale ale

caracteristicilor procesului (fig.5). În acest caz atât capacitatea longitudinală, cât și parametrii de disipare acționează în aceiași direcții modificând valoarea amplitudinii tensiunii. Cu scopul observării acestor modificări în linia cu pierderi punctul de observație sa deplasat la mijlocul liniei, deoarece în regim de SC avem din condițiile marginale de limită u(l,t)=0 pentru orice $t\geq 0$. În baza rezultatelor obținute se poate constata, că modelul matematic propus este robust și poate fi utilizat pentru simularea proceselor în circuitele cu capacitate longitudinală și parametrii distribuiți.

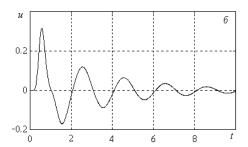


Fig.5. Influența capacității $K^* = 10^{-4}$ și parametrilor de disipare $R^* = 0.0133$ Om/m, $G^* = 2.62*10^{-9}$ S/m asupra caracterului procesului ondulatoriu în punctul x=0.5l al liniei lungi la solicitarea ei cu un impuls sinusoidal

Coincidența datelor calculelor propagării semnalului sinusoidal, obținute cu schemele numerice evidente și neevidente, este o confirmare a robusteții metodei propuse și algoritmului numeric pentru calcularea proceselor tranzitorii în structurile cu capacitate longitudinală distribuită cum sunt divizoarele de tensiune înaltă din microfire.

Calculele efectuate indică, că capacitatea K și pierderile în linie influențează în același mod asupra dinamicii procesului ondulatoriu.

Concluzii

- 1. S-a propus modelul matematic în formă de line lungă cu capacitate longitudinală a rezistorului din microfire realizat în forma unei bobine cu spirele amplasate pe o carcasă din material izolant, care conține multe spire. S-au formulat condițiile de continuitate a curentului și tensiunii la frontierele de divizare a porțiunilor pentru care se consideră că parametrii lineici au valori constante.
- 2. S-a propus schema în diferențe finite și s-a analzat sabilitatea ei. S-a demonstrat că la majorarea numărului de ochiuri a plasei de calcul, valoarea pasului de divizare spațială tinde spre valoarea numărului lui Kurant.
- 3. Schema în diferențe finite pentru circuitul cu capacitate longitudinală este neevidentă și pentru obținerea soluției numerice s-a propus pentru utilizare metoda iterațiilor multiple prin disparalelizare a procdurii de calcul. S-a propus algoritmul procedurii iterațiilor multiple reieșind din ipoteza, că în punctele de ruptură sunt cunoscute valorile soluției- valorile funcției căutate. Coeficienții și pasul rețelei se definesc drept mărimi constante în modelul matematic elaborat.
- 4. Rezultatele testărilor modelului matematic propus indică, că capacitatea K și pierderile în această linie influențează în același mod asupra dinamicii procesului ondulatoriu. Modelul matematic și algoritmul de obținere a soluției numerice sunt robuste pentru calcularea proceselor tranzitorii în structurile cu capacitate longitudinală distribuită cum sunt divizoarele de tensiune înaltă din microfire.

Lucrarea a fost realizată în cadrul Programului de stat "**Ingineria si tehnologiile electronice în relansarea economiei"**, **nr.** <u>08.808.05.04A</u>, conducător acad. Dumitru Ghiţu, la îndeplinirea lucrărilor de cercetare – dezvoltare "Convertoare rezistive electronice şi echipament de măsurare a tensiunilor 6,3 -25 kV de curent alternativ".

Bibliografia

- 1. Бадинтер Е., Берман Н., Драбенко И.и др. Литой микропровод и его свойства. Кишинев: Штиинца, 1973 318 с.
- 2. Колпакович Ю.И. Чернов А.М. Данилюк И.Я. Методы и аппаратура для метрологического обеспечения измерений в цепях постоянного тока. В кн.: Автоматизация и метрология научных исследований г. Кишинев, Штиинца, 1985, с.20-39.
- 3. Данилюк И.Я. Колпакович Ю.И. Гришанов И.И. Устройство поверки высоковольтного прецизионного делителя напряжения. А.с.1647418 (СССР), Бюллетень изобретений, 1991, N 17.
- 4. E.Badinter, V. Vasiltchuc, Iu. Colpacovitch. Calibratore de rezistența și curent Al 5-lea SIMPOZION NATIONAL DE METROLOGIE, Bucuresti, 5-6 mai, 1994, p.84-85.
- 5. Daniliuc I., Colpacovici I. Procedeu de acordare a divizoarelor de tensiune. Brevet de inventie nr. MD 820 C2, BOPI nr.8/97.
- 6. Колпакович Ю., Кожокару Д., Данилюк И. Автономная поверка высоковольтных делителей напряжения в реальных условиях эксплуатации. Academia de Ştiinţe a Republicii Moldova. Centrul de Metrologie şi Automatizare a cercetărilor ştiinţifice. Contribuţii în metrologie, certificare, informatizare şi inovare. Chişinău, 2003, p.50-55.
- 7. Бадинтер Е.,Васильчук В.,Колпакович Ю.,Кожокару Д. Метрологическое обеспечение измерений сопротивления, напряжения и тока. Academia de Științe a Republicii Moldova. Centrul de Metrologie și Automatizare a cercetărilor științifice. Contribuții în metrologie, certificare, informatizare și inovare. Chișinău, 2003, p.56-62.
- 8. В.Римский, В.Берзан, М.Тыршу. Волновые явления в неоднородных линиях./Том 2.*Переходные процессы в линиях с сосредоточенными параметрами*/ Под ред. чл.- корр. АНМ, д.х.т.н. В.М.Постолатий. Кишинэу: Типография АНМ, 2006 г. 264 с
- 9. Rimschi V., Berzan V., Tîrşu M., Uzun M., Rimschi S. Soluţii precise ale ecuaţiilor telegrafiştilor. Acad.de Şt. a Moldovei, Institutul de Energetică.- Ch.: Tipografia Acad.de Şt. a Moldovei, 2007.–88p.

Informații despre autor.

V.Berzan. Dr. hab. în tehnică, director adjunct pe probleme de știință a Institutului de Energetică al AŞM. Domeniul intereselor științifice: diagnoza indistructivă a echipamentului electroenergetic, procese nestaționare în circuite electrice neomogene, modelarea matematică, transportul energiei electrice la distanțe mari, surse regenerabile de energie. Autor a peste 160 lucrări științifice, inclusiv monografii 10, manuale 2.

Prezentată la redacție: 6.11.2008

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ В НАГРУЖЕННОЙ ПОЛУВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕ

Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И.

Институт энергетики Академии наук Молдовы www.ie.asm.md

Аннотация. Исследованы аварийные и послеаварийные режимы в ненагруженной и нагруженной полуволновой линии без дополнительных присоединений. Показано, что кратность перенапряжений в переходном процессе, вызванном КЗ длительностью 130 мс или разрывом цепи длительностью 60 мс, достигает 6.

Ключевые слова: телеграфные уравнения, полуволновые и четвертьволновые линии.

REGIMURILE DE AVARIE ÎN LINIA SUB SARCINĂ CU LUNGIMEA DE SEMIUNDĂ

Rimschi V.X., Berzan V.P., Paţiuc V.I.

Rezumat. S-au cercetat regimuri de avarie și postavarie în linia cu lungimea de semiundă la mers în gol și subsarcină fără conexiuni intermediare. S-a constatat faptul, că în regim tranzitoriu ca urmare a unui scurtcircuit cu durata de 130 ms și discontinuitate a conductorului liniei cu durata de 60 ms factorul de supratensiune temporară atinge valoarea de 6 unităti

Cuvinte-cheie: ecuațiile telegrafiștilor, linie cu lungimea de o pătrime și o doime de undă.

THE EMERGENCY CONDITIONS IN A LOADED HALF-WAVE LINE

Rimsky V.X., Berzan V.P., Patsiuk V.I.

Abstract. The emergency and postemergency states in the unloaded and loaded half-wave line without optional connections are investigated. It is found that the overvoltage ratio during the transition process induced by a short circuit (with the action time equal to 130 mc) or by a break in the circuit (with the action time equal to 60 mc) runs up to 6.

Key words: telegraph equations, half-wave and quarter-wave transmission lines.

Введение

Надежность электроснабжения и качество поставляемой электроэнергии в современных условиях приобретают всё возрастающее значение. Для достижения этой цели в энергосистемах в качестве ее базовых элементов предусмотрены отдельные подсистемы автоматики и защиты. Необходимым условием их надежной работы является знание предельных режимов, в том числе и аварийных, которые зависят от особенностей конструкции и топологии защищаемых участков.

Возмущения, влияющие на показатели качество напряжения, могут возникать как при передаче, так и при распределении электроэнергии. Из-за значительной протяженности воздушные линии электропередачи подвержены воздействию атмосферных явлений. Различные виды разрядов атмосферного электричества (молний) являются причинами различных типов возмущений, бросков, посадок сетевого напряжения, полного прекращения подачи электроэнергии. Длительность и степень возмущений зависят от структуры сети и времени, необходимого на ее реконфигурацию. Причины возникновения перенапряжений из-за ударов молний обычно рассматриваются как внешние по отношению к сети. Другие виды возмущений возникают в процессе управления сетью, при сбросах или неожиданных нарастаниях нагрузки. Хотя последний вид возмущений достаточно редок, поскольку обычно крупные нагрузки подключаются к сети постепенно. Это не относится к внезапным

сбросам нагрузки, которые зачастую являются следствием аварийных ситуаций, таких как КЗ или разрыв линии. Максимальная величина тока при электромагнитных переходных процессах может в десятки и сотни раз превышать его номинальное значение. Максимально возможные перенапряжения при различных нестационарных режимах составляют несколько крат номинального значения.

К настоящему времени решено и доведено до числа не так уж много нестационарных задач для электрических цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами [1–7]. В основном, рассматривалось включение однородных идеальных линий на постоянное напряжение [1–5]. Для линий с потерями удалось найти лишь две задачи, рассмотренные в динамической постановке: движение прямоугольной волны потенциала и тока по полубесконечной линии [2], а также падение прямоугольной волны на сосредоточенную емкость [3]. В обеих задачах предполагалось наличие активных потерь в однородной линии (кабеле) при отсутствии утечки тока через изоляцию. Перепроверка этих решений показала, что численные результаты, представленные в [3] в виде временных диаграмм напряжения и тока на зарядном конденсаторе определены неверно [8–10]. Таким образом, для линий с потерями до последнего времени имелась лишь одна правильно решенная нестационарная задача шестидесятилетней давности [2].

Не лучше обстоит дело и с экспериментальными исследованиями в этой области. Ощущается явный дефицит тщательно выверенных опытных данных даже для установившихся режимов, не говоря уже о переходных электромагнитных явлениях в параметрических цепях. Можно указать лишь на две статьи [6,7], где приводятся результаты испытаний по определению параметров волновых процессов в микро- и миллисекундном диапазонах. Теоретические расчеты, полученные в [6] методом бегущих волн для идеального кабеля, легко можно повторить, а вот качество представленных там экспериментальных данных вряд ЛИ онжом считать удовлетворительным. Результаты натурных испытаний по определению максимальной кратности перенапряжений, вызванных КЗ одного из фазных проводов полуволновой ЛЭП 500 кВ [7], тоже нельзя считать бесспорными и явно нуждаются в дополнительной проверке.

В этой связи давно назрела необходимость в создании на базе новейших измерительных и информационных технологий тезауруса контрольных (тестовых) примеров для линейных и нелинейных электрических цепей с переменными параметрами. Складывается впечатление, что существующую пропасть между теоретическими и экспериментальными исследованиями нестационарных электромагнитных явлений вряд ли удастся преодолеть в обозримом будущем.

Ни один дедуктивный метод расчета или прогнозирования «не любит» больших градиентов (ни временных, ни пространственных). Ситуация еще более усложняется когда предстоит рассчитать эволюцию ударных волн (сильных разрывов) в резко неоднородной среде с параметрами, отличающимися на порядки. Например, волновые сопротивления в магистральных и распределительных сетях, содержащих кабельные вставки, отличаются в 8...12 раз, а активные сопротивления нагрузок могут мгновенно изменяться от нуля (КЗ) до бесконечности (ХХ). Тем не менее, идеи метода характеристик и первых дифференциальных приближений оказалась на редкость плодотворными и позволили вывести однородные (единообразные) формулы для расчета искомых функций в существенно неоднородных линиях при подключении-отключении нагрузок и сосредоточенных устройств с мгновенно изменяющимися во времени параметрами [8–10].

1. Расчет переходных процессов, вызванных мгновенным изменением сопротивления нагрузки

Точное решение для однородной линии с активным сопротивлением R_S на приемном конце

$$u = R_s i \text{ при } x = l, t > 0,$$
 (1.1)

когда на входе линии задано синусоидальное напряжение

$$u = U_0 \sin(\omega t)$$
 при $x = 0, t > 0$ (1.2)

получено в [4] и в режиме установления режима имеет вид

$$i(t) = \frac{U_0 A_0}{Z_B} \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ при } x = 0, t > 0,$$
 (1.3)

$$tg\phi_0 = \frac{2z_{\gamma}\sin 4\pi\Delta}{1 - z_{\gamma}^2}, \ A_0 = \frac{\sqrt{1 - 2z_{\gamma}^2\cos 8\pi\Delta + z_{\gamma}^4}}{1 + 2z_{\gamma}\cos 4\pi\Delta + z_{\gamma}^2}, \tag{1.4}$$

$$u(t) = U_0 A_1 (1+z) \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$i(t) = \frac{U_0 A_1}{Z_R} (1 - z) \sin(\omega t + \varphi_1)$$
 при $x = l, t > 0$, (1.5)

$$tg\phi_1 = \frac{z_{\gamma} - 1}{z_{\gamma} + 1} tg 2\pi\Delta, \ A_1 = \frac{e^{-\gamma\Delta}}{\sqrt{1 + 2z_{\gamma}\cos 4\pi\Delta + z_{\gamma}^2}}.$$
 (1.6)

Здесь используются обозначения

$$z = \frac{R_S - Z_B}{R_S + Z_B}, z_{\gamma} = ze^{-2\gamma\Delta}, R_S = Z_B \frac{1 + z}{1 - z}, Z_B = \frac{1}{aC}, \gamma = \frac{R}{L} = \frac{G}{C}, a = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \Delta = \frac{l}{a}.$$

Будем считать, что к начальному моменту времени t=0 в линии сформировался установившийся режим, который описывается формулами (1.3)–(1.6). В момент t=0 происходит резкое (скачкообразное) изменение нагрузки R_S . Получим решение такой задачи на интервале времени $t\in[0,t^*],\ t^*=(2n^*+1)\Delta$. Таким образом, на правом конце линии граничное условие приобретает вид

$$u = R_S^* i$$
 при $x = l, t > 0$. (1.7)

Если нагрузка R_S^* равняется нулю, что соответствует значению параметра z^*

$$z^* = \frac{R_S^* - Z_B}{R_S^* + Z_B} = -1,$$

то реализуется режим K3, если же $R_S^* = \infty$ или $z^* = 1$, то реализуется режим XX.

Решение этой задачи строится методом характеристик, который был подробно описан в [10]. На входе линии, пока отраженная от нагруженного конца волна не достигла начала, сохраняется установившееся решение (1.3)–(1.6) (см. рис. 1.1).

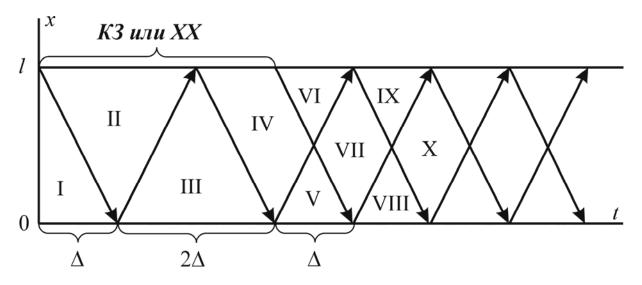


Рис. 1.1. Расчетные области и конфигурация волновых фронтов при мгновенном изменении сопротивления нагрузки

Следовательно, при $x = 0, t \in [0, \Delta]$ имеем

1.
$$u_{-1}(t) = U_0 \sin(\omega t)$$
, $i_{-1}(t) = \frac{U_0 A_0}{Z_B} \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{U_0}{Z_B} i_{ct}(t)$

при $x = 0, t \in [0, \Delta]$.

Далее на правом конце линии при $x = l, t \in [0,2\Delta]$

2.
$$u_0(t) = \frac{(1+z^*)e^{-\gamma \Delta}}{2}U_0[\sin \omega(t-\Delta) + i_{ct}(t-\Delta)],$$

$$i_0(t) = \frac{(1-z^*)e^{-\gamma \Delta}}{2} \frac{U_0}{Z_B} [\sin \omega (t - \Delta) + i_{ct}(t - \Delta)]$$

при $x = l, t \in [0,2\Delta]$.

3. $u_1(t) = U_0 \sin(\omega t)$,

$$i_1(t) = \frac{U_0}{Z_B} \left[\sin(\omega t) - z_{\gamma}^* \left(\sin \omega (t - 2\Delta) + i_{ct} (t - 2\Delta) \right) \right]$$

при $x = 0, t \in [\Delta, 3\Delta]$.

4.
$$u_{2}(t) = \frac{(1+z^{*})e^{-\gamma\Delta}}{2}U_{0}\left[2\sin\omega(t-\Delta) - z_{\gamma}^{*}\left(\sin\omega(t-3\Delta) + i_{ct}(t-3\Delta)\right)\right]$$

$$i_{2}(t) = \frac{(1-z^{*})e^{-\gamma\Delta}}{2}U_{0}\left[2\sin\omega(t-\Delta) - z_{\gamma}^{*}\left(\sin\omega(t-3\Delta) + i_{ct}(t-3\Delta)\right)\right]$$
при $x = l, t \in [2\Delta, 4\Delta]$.

5. $u_{3}(t) = U_{0}\sin(\omega t)$,
$$i_{3}(t) = \frac{U_{0}}{Z_{B}}\left[\sin(\omega t) - 2z_{\gamma}^{*}\sin\omega(t-2\Delta) + (z_{\gamma}^{*})^{2}\left(\sin\omega(t-4\Delta) + i_{ct}(t-4\Delta)\right)\right]$$
при $x = 0, t \in [3\Delta, 5\Delta]$.

6.
$$u_4(t) = \frac{(1+z^*)e^{-\gamma\Delta}}{2}U_0 \left[2\sin\omega(t-\Delta) - 2z_{\gamma}^*\sin\omega(t-3\Delta) + \right]$$

$$+(z_{\gamma}^*)^2(\sin\omega(t-5\Delta)+i_{ct}(t-5\Delta))$$

$$i_4(t) = \frac{(1-z^*)e^{-\gamma \Delta}}{2}U_0 \Big[2\sin \omega (t-\Delta) - 2z_{\gamma}^* \sin \omega (t-3\Delta) + \frac{1}{2}u_0 \Big] \Big[2\sin \omega (t-\Delta) - \frac{1}{2}u_0 \Big] \Big[2\cos \omega (t-\Delta) - \frac{1}{2}u_0 \Big] \Big[2\sin \omega (t-\Delta) - \frac{1}{2}u_0 \Big] \Big[2\cos \omega$$

$$+(z_{\gamma}^{*})^{2}\left(\sin\omega(t-5\Delta)+i_{ct}(t-5\Delta)\right)$$

при $x = l, t \in [4\Delta, 6\Delta]$.

7. $u_5(t) = U_0 \sin(\omega t)$,

$$\begin{split} i_5(t) &= \frac{U_0}{Z_{\scriptscriptstyle B}} \Big[\sin(\omega t) - 2z_\gamma^* \sin \omega (t - 2\Delta) + 2(z_\gamma^*)^2 \sin \omega (t - 4\Delta) - \\ &- (z_\gamma^*)^3 \big(\sin \omega (t - 6\Delta) + i_{ct} (t - 6\Delta) \big) \Big] \end{split}$$
 при $x = 0, t \in [5\Delta, 7\Delta]$.

Приведенные выше формулы можно представить в общем виде

$$u_{2n-1}(t) = U_0 \sin(\omega t),$$

$$i_{2n-1}(t) = \frac{U_0}{Z_B} \left[\sin(\omega t) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-z_{\gamma}^*)^j \sin \omega (t - 2j\Delta) + (-z_{\gamma}^*)^n \left(\sin \omega (t - 2n\Delta) + i_{ct} (t - 2n\Delta) \right) \right]$$
(1.8)

$$\pi p u \ x = 0, \ t \in [(2n-1)\Delta, (2n+1)\Delta], \ n = 1, 2, ..., n *.$$

$$u_{2n}(t) = \frac{(1+z^*)e^{-\gamma\Delta}}{2}U_0 \left[2\sum_{j=0}^{n-1} (-z_{\gamma}^*)^j \sin \omega (t - (2j+1)\Delta) + (-z_{\gamma}^*)^n \left(\sin \omega (t - (2n+1)\Delta) + i_{ct}(t - (2n+1)\Delta)\right) \right],$$

$$i_{2n}(t) = \frac{(1-z^*)e^{-\gamma\Delta}}{2} \frac{U_0}{Z_B} \left[2\sum_{j=0}^{n-1} (-z_{\gamma}^*)^j \sin \omega (t - (2j+1)\Delta) + \right.$$

$$\left. + (-z_{\gamma}^*)^n \left(\sin \omega (t - (2n+1)\Delta) + i_{ct} (t - (2n+1)\Delta) \right) \right]$$

$$\left. \text{при } x = l, t \in [2n\Delta, 2(n+1)\Delta], n = 0, 1, ..., (n*-1).$$

Если в момент времени $t^* = (2n + 1)\Delta$ восстанавливается прежняя нагрузка, то дальнейшее решение имеет вид

$$u_{2m-1}^*(t) = U_0 \sin(\omega t),$$

$$i_{2m-1}^{*}(t) = \frac{U_0}{Z_B} \left[\sin(\omega t) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} (-z_{\gamma})^j \sin(\omega t) - 2j\Delta \right] +$$

$$+(-z_{\gamma})^{m} \left(\sin \omega (t-2m\Delta) + i_{nA}(t-2m\Delta)\right)$$
при $x = 0, t \in [t^{*} + (2m-1)\Delta, t^{*} + (2m+1)\Delta], m = 1,2,...$

$$u_{2m}^{*}(t) = \frac{(1+z)e^{-\gamma\Delta}}{2}U_{0} \left[2\sum_{j=0}^{m-1}(-z_{\gamma})^{j}\sin\omega(t-(2j+1)\Delta) + \right]$$

$$+(-z_{\gamma})^{m}\left(\sin\omega(t-(2m+1)\Delta)+i_{nA}(t-(2m+1)\Delta)\right)$$

$$i_{2m}^{*}(t) = \frac{(1-z)e^{-\gamma\Delta}}{2} \frac{U_0}{Z_B} \left[2\sum_{j=0}^{m-1} (-z_{\gamma})^j \sin \omega (t - (2j+1)\Delta) + \right]$$

$$+ (-z_{\gamma})^{m} \left(\sin \omega (t - (2m+1)\Delta) + i_{nA} (t - (2m+1)\Delta) \right)$$
 (1.11)

при
$$x = l$$
, $t \in [t^* + 2m\Delta, t^* + 2(m+1)\Delta]$, $m = 0,1,2...$

Здесь через i_{nA} обозначена функция тока в начале линии x=0 на интервале времени $t\in [t^*-\Delta, t^*+\Delta]$

$$i_{nA}(t) = \begin{cases} \frac{Z_B}{U_0} i_{2n*-1}(t), & t \in [t^* - \Delta, t^*] \\ \frac{Z_B}{U_0} i_{2n*+1}(t), & t \in [t^*, t^* + \Delta] \end{cases}.$$

2. Сопоставление результатов расчета и натурных испытаний для полуволновой линии 500 кВ

Рассмотрим одну фазу ВЛ 500 кВ Волгоград – Липецк (556 км) – Арзамас (1572 км) – Шагол (2858 км) без дополнительных присоединений с общей волновой длиной 173° [7], что определяет длину волны $\lambda = 2858 \times 360^{\circ} / 173^{\circ} = 5947.28$ км и скорость распространения электромагнитных возмущений вдоль линии $a = \lambda f = 297364$ км/с на частоте f =50 Гц (период колебаний $\Delta = \lambda/a = 1/f = 20$ мс, $\Delta_I = l/a = 9.61$ мс). Если линию считать однородной и принять ее эквивалентное волновое сопротивление $Z_{\rm \it B}$ = 278 Ом [11], то получаем следующие погонные реактивные параметры: C =12.10 ${\rm H}\Phi/{\rm KM};\ L=0.9348\ {\rm M}\Gamma{\rm H}/{\rm KM};\ Cl=34\ {\rm MK}\Phi;\ Ll=2.67\ \Gamma{\rm H}.$ Активное сопротивление и проводимость изоляции фазы зададим как R = 22.67 мОм/км; G = 41.47 нСм/км [12]. Значение активного погонного сопротивления характерно для фазы из трех проводов Исходя из этих значений первичных параметров, определяем типа АС 450/51 [12]. комплексное волновое сопротивление $Z_0 = 278.25 - j9.0927$ Ом, которое принято использовать в качестве согласованной с линией нагрузкой, когда вся энергия передается в нее прямой волной [11]. Амплитуда фазного напряжения $U_0 = 525 \sqrt{2}/3 =$ 428.66 кВ, а для натуральной мощности линии синусоидального напряжения:

$$u = U_0 \sin(2\pi f t)$$
 принимаем величину $P_{\rm H} = \frac{U_0^2}{2Z_B} = 330.5$ МВт. Таким образом, в режиме

бегущих волн на отправном конце трехфазной линии 500 кВ входит поток энергии мощностью около 1 ГВт. Если воспользоваться теперь формулами (1.2) из [10], то в безразмерном виде имеем $U_0=f=L=C=Z_B=\lambda=a=\Delta=2P_{\rm H}=1;~Z_0=1.0009-j0.0327;~l=173°/360°=R=7~G=\Delta_l=Cl=Ll=0.4805.$

Рассмотрим вначале установившиеся процессы передачи мощности и проведем сравнительный анализ расчетных и опытных данных. На рис. 2.1 показана зависимость от длины линии потерь при передаче натуральной мощности $\Pi=1$ – P_1/P_0 , где P_0 , P_1 – генерируемая и передаваемая мощность (кривые 1;2), а также в режиме холостого хода $\Pi=P_0$ / $P_{\rm H}$ (кривая 3). Потери в нагруженной полуволновой линии с параметрами $R=7\,G=0.48$ составляют около 23%, что практически совпадает с результатами натурных испытаний из [7]. Напомним, что в эксперименте 1968 г. потери активной мощности составили 225 МВт (часть из них потери на корону) при 985 МВт на отправном конце линии (ГЭС). Вариант R=0.74, G=0 (b) соответствует R=34 мОм/км. При этих значениях погонного активного сопротивления фазы которая состоит из трех проводов АС 300/66, если они используются в линиях класса 500 кВ, потери превышают 30%, что противоречит данным эксперимента [7].

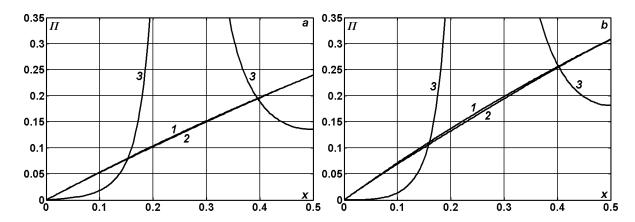


Рис. 2.1. Зависимость от длины линии x потерь мощности при передаче натуральной мощности $\Pi = 1 - P_1/P_0$ (кривые 1;2) и на холостом ходу $\Pi = P_0/P_{\rm H}$ (3) для R = 7G = 0.48(a); R = 0.74, G = 0(b)

Из сопоставления кривых 1 и 2 следует, что потери при чисто активной нагрузке $Z_S = Z_B = 1$ все-таки оказываются несколько ниже, чем при работе линии на согласованную нагрузку, равную комплексному волновому сопротивлению $Z_S = Z_0$. Однако эти отличия достаточно малы для любой длины линии и ими можно пренебречь. Как видим относительные потери при передаче натуральной мощности (или мощности близкой к натуральной) почти линейно зависят от длины линии и величина этих потерь достаточно чувствительна к изменению параметра R. Здесь уместно подчеркнуть, что потери XX для полуволновой линии без дополнительных присоединений составляют 13.66%, т.е. немногим больше половины, чем при передаче натуральной мощности.

Обратимся к другому источнику, где приводятся расчетные потери в 13% при передаче натуральной мощности по возможному варианту передачи электрической энергии по полуволновой линии 750 кВ Сургут — Чернобыль [13]. Легко определить, что в этом случае для линии без дополнительных присоединений как минимум должно выполняться неравенство $R \le 12$ мОм/км, а с учетом неизбежных потерь на корону (0.5...1% на каждую 1000 км ЛЭП) параметр R не может превышать 9-11 мОм/км. Потери XX в этом случае составили бы всего 6 %. Снижение потерь активной мощности в проводах за счет увеличения их волнового сопротивления ($Z_B = 278$ Ом) недопустимо, поскольку влечет за собой понижение величины натуральной мощности линии.

Включение в полуволновую линию 3-4 шунтирующих реакторов позволяет снизить потери XX на порядок, если месторасположение и параметры реакторов подобраны оптимальным образом. Что касается возможности уменьшения потерь при передаче натуральной мощности, то здесь все обстоит намного сложнее и такой впечатляющий эффект вряд ли достижим. Потери удается снизить не более чем на 2-3%, но этот вопрос уже является предметом другого исследования.

Распределение вдоль линии активной (a) и реактивной (b) мощности представлено на рис. 2.2 в режиме натуральной (кривые 1;2) и до натуральной мощности (3-5). Кривая 6 соответствует холостому ходу линии, когда нагрузка от нее отключена. Сопротивления нагрузки Z_S подобраны здесь таким образом, чтобы на конце линии (Шагол) иметь мощность в 760, 506, 430, 260 МВт как в эксперименте [7].

Уменьшение сопротивления нагрузки Z_S приводит к постепенному наращивании активной мощности (вплоть до выхода на режим передачи натуральной мощности) и снижению реактивной мощности, которая максимальна в режиме стоячих волн (XX) линии. Минимальные значения реактивной мощности в точке подключения генератора

наблюдаем при $Z_S=Z_B$. В этом случае коэффициент мощности в чисто активной нагрузке (по определению) равен 1, а у источника он очень близок к 1, что означает, что между генератором и приемником практически отсутствует двусторонний обмен электромагнитной энергией. При согласованной нагрузке $Z_S=Z_0$ распределение реактивной мощности вдоль линии носит линейный характер и составляет $Q_0=-32.30$ МВА на отправном конце и $Q_1=-24.85$ МВА на приемном, тогда как при $Z_S=Z_B$ соответственно имеем $Q_0=-8.60$ МВА и $Q_1=0$.

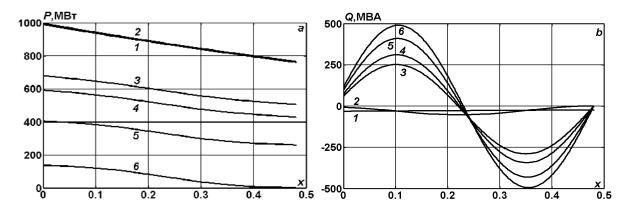


Рис. 2.2. Распределение вдоль линии активной (*a*) и реактивной (*b*) мощности при R = 7G = 0.48 и вариации сопротивления нагрузки $Z_S = Z_0$ (кривая 1); Z_B (2); 1.676 Z_B (3); 2.025 Z_B (4); 3.535 Z_B (5); ∞ (6)

На рис. 2.3 изображены эпюры модулей напряжений (*a*) и токов (*b*) при R = 7G = 0.48 и вариации сопротивления нагрузки $Z_S = Z_0$ (кривая 1); Z_B (2); $1.676 Z_B$ (3); $2.025 Z_B$ (4); $3.535 Z_B$ (5); ∞ (6).Потери напряжения (тока) при передаче натуральной мощности составляют порядка 12%, что согласуется с опытными данными [7].

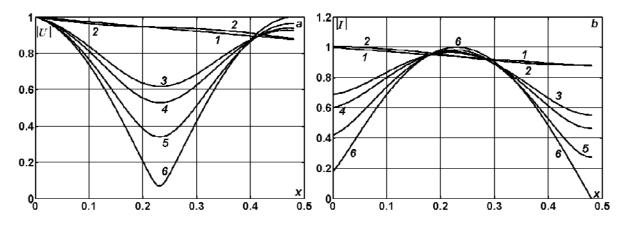


Рис. 2.3. Распределение вдоль линии модулей напряжений (\boldsymbol{a}) и токов (\boldsymbol{b}) при R = 7G = 0.48 и вариации сопротивления нагрузки $Z_S = Z_0$ (кривая 1); Z_B (2); $1.676Z_B$ (3); $2.025Z_B$ (4); $3.535Z_B$ (5); ∞ (6)

В установившемся режиме максимальные по модулю напряжения и в зависимости от волновой длины линии токи возникают или при XX или при K3 приемного конца (рис. 2.4). Минимальные значения напряжений и токов в электрической цепи имеют место при работе линии на согласованную нагрузку (кривые 1;2).

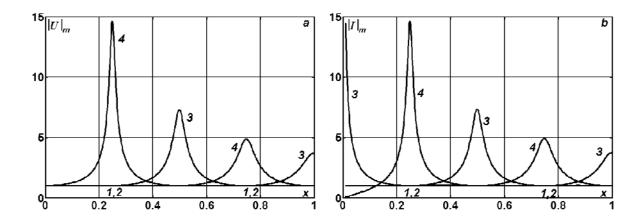


Рис. 2.4. Зависимость от длины линии x максимальных по модулю напряжений (a) и токов (b) при R = 7G = 0.48 и вариации сопротивления нагрузки $Z_S = Z_0$; (кривая 1); Z_B (2); 0 (3); ∞ (4).

В таблице 2.1 помимо максимальных напряжений $\|U\|_{\mathrm{m}}$, которые наблюдаются в линии при $x = x_{\rm m}$, представлены сдвиги фаз δ между напряжениями в концевых точках, коэффициенты мощности источника (cosφ₀), а также критические значения чисто активной нагрузки $Z_{\scriptscriptstyle S}$, обеспечивающие максимум передаваемой мощности и КПД. Указанные параметры установившегося процесса электропередачи весьма существенно зависят от длины l и сопротивления $Z_{\scriptscriptstyle S}$. Достаточно обратить внимание на то, что угол δ для полуволновой линии ($l=\lambda/2$) изменяется от $+0.9995\pi$ при $Z_S=Z_0=$ 1.0009 - j0.0327 до -0.9993π при $Z_S = Z_B = 1$. Максимальные кратковременные перенапряжения для линий с длиной, близкой к полуволновой, составляют от 5.2 до 7.3 номиналов. Также нельзя игнорировать и отличия во втором-третьем знаках значений передаваемой мощности и КПД в линиях, длина которых несколько или сильно отличается от полуволновой. Во многих случаях режим максимальной передаваемой (генерируемой) мощности или КПД практически нереализуем и на первый взгляд кажется, что он представляет только теоретический интерес, но это не совсем так. Во всяком случае, знание предельных режимов существенно расширяет традиционные представления о процессах передачи электромагнитной энергии по длинным линиям и оказывается весьма полезными при анализе аварийных и послеаварийных ситуаций, вызванных внезапным изменением параметров нагруженной электропередачи.

Таблица 2.1. Влияние длины линии l и сопротивления нагрузки Z_S на параметры электропередачи в установившемся режиме при R = 7G = 0.48

l	$Z_{\scriptscriptstyle S}$	P_0	P_1	η	$ I_0 $	$\cos \phi_0$	$ U_1 $	δ	$ U _{\mathfrak{m}}$	$x_{\rm m}$
	∞	0.0076	0.0000	0.0000	0.6658	0.0228	1.2011	-0.0054π	1.2011	0.0935
	0	0.0659	-0.0000	-0.0000	1.4977	0.0881	0.0000	-0.9876π	1.0000	0.0000
556 κм 0.0935 λ	Z_0	0.4990	0.4741	0.9500	0.9986	0.9995	0.9747	-0.1871π	1.0000	0.0000
0.0933 K	1	0.4853	0.4614	0.9506	0.9709	0.9998	0.9606	-0.1840π	1.0000	0.0000
	0.6677	0.5306	0.4964	0.9357	1.1204	0.9471	0.8142	-0.2414π	1.0000	0.0000
	1.9662	0.3253	0.3122	0.9596	0.7814	0.8328	1.1080	-0.1064π	1.1091	0.0850
743.5 км	∞	0.0179	0.0000	0.0000	0.9994	0.0358	1.4131	-0.0109π	1.4131	0.1250
λ/8	0	0.0504	0.0000	0.0000	0.9977	0.1010	0.0000	-0.5000π	1.0000	0.0000

	Z_0	0.4990	0.4660	0.9338	0.9986	0.9995	0.9663	-0.2501π	1.0000	0.0000
	1	0.4840	0.4524	0.9347	0.9686	0.9995	0.9512	-0.2451π	1.0000	0.0000
	1.0023	0.4840	0.4524	0.9348	0.9686	0.9994	0.9523	-0.2448π	1.0000	0.0000
	1.6817	0.4272	0.4024	0.9420	0.9723	0.8786	1.1633	-0.1732π	1.1652	0.1140
	8	7.2945	0.0000	0.0000	14.5921	0.9998	14.5786	-0.5039π	14.5786	0.2500
	0	0.0341	-0.0000	-0.0000	0.0683	0.9990	0.0000	1.0000π	1.0000	0.0000
<u>1487κм</u> λ/4	Z_0	0.4990	0.4351	0.8719	0.9986	0.9995	0.9338	-0.5003π	1.0000	0.0000
\ \tau /4	1	0.4978	0.4348	0.8736	0.9974	0.9981	0.9326	-0.4905π	1.0000	0.0000
	14.6337	3.6627	1.8164	0.4959	7.3320	0.9991	7.2911	-0.4968π	7.2912	0.2490
	1.0010	0.4982	0.4352	0.8736	0.9983	0.9981	0.9335	-0.4905π	1.0000	0.0000
	8	2.8030	0.0000	0.0000	8.5913	0.6525	8.6163	-0.7862π	8.6163	0.2643
	0	0.0349	-0.0000	-0.0000	0.1161	0.6016	0.0000	1.0000π	1.0038	0.0140
<u>1572 км</u>	Z_0	0.4990	0.4317	0.8651	0.9986	0.9995	0.9301	-0.5289π	1.0000	0.0000
0.2643 λ	1	0.5003	0.4336	0.8668	1.0025	0.9982	0.9313	-0.5192π	1.0000	0.0000
	8.6159	2.2422	1.3450	0.5999	4.8428	0.9260	4.8142	-0.6390π	4.8144	0.2628
	0.9616	0.4837	0.4193	0.8668	0.9696	0.9978	0.8980	-0.5182π	1.0000	0.0000
	8	0.1169	0.0000	0.0000	0.9961	0.2346	1.3977	-0.9676π	1.3977	0.3750
	0	0.0854	0.0000	0.0000	1.0010	0.1707	0.0000	-0.5000π	1.4045	0.1245
2230.5 KM	Z_0	0.4990	0.4063	0.8142	0.9986	0.9995	0.9023	-0.7504π	1.0000	0.0000
$3\lambda/8$	1	0.5125	0.4176	0.8150	1.0255	0.9994	0.9139	-0.7450π	1.0000	0.0000
	0.9990	0.5124	0.4176	0.8150	1.0255	0.9994	0.9135	-0.7449π	1.0000	0.0000
	0.8541	0.5061	0.4133	0.8167	1.0255	0.9869	0.8402	-0.7240π	1.0454	0.1160
	8	0.0683	0.0000	0.0000	0.1784	0.7653	0.9986	-0.9949π	1.0000	0.0000
2858 км	0	2.0170	0.0000	0.0000	5.5904	0.7216	0.0000	0.8712π	5.6034	0.2300
0.4805λ	Z_0	0.4990	0.3834	0.7684	0.9986	0.9995	0.8766	-0.9615π	1.0000	0.0000
	1	0.5028	0.3864	0.7685	1.0057	1.0000	0.8791	-0.9602π	1.0000	0.0000
	0.1789	1.4433	0.8094	0.5608	3.0869	0.9351	0.5381	-0.8732π	3.0566	0.2300
	0.9724	0.5134	0.3946	0.7686	1.0269	0.9999	0.8760	-0.9593π	1.0000	0.0000
	8	0.0679	0.0000	0.0000	0.1360	0.9990	0.9907	0.9999π	1.0000	0.0000
2974 κm λ/2	0	3.6643	-0.0000	-0.0000	7.3302	0.9998	0.0000	0.5000π	7.2893	0.2495
	Z_0	0.4990	0.3794	0.7602	0.9986	0.9995	0.8719	0.9995π	1.0000	0.0000
	1	0.4998	0.3800	0.7603	0.9996	1.0000	0.8718	-0.9993π	1.0000	0.0000
	0.1364	1.8665	0.8994	0.4818	3.7332	0.9999	0.4954	-0.9968π	3.6788	0.2495
	1.0018	0.4991	0.3795	0.7603	0.9982	1.0000	0.8720	-0.9993π	1.0000	0.0000
	8	0.0697	0.0000	0.0000	0.1906	0.7317	0.9979	0.9942π	1.0072	0.0195
3093 км	0	2.0259	0.0000	0.0000	5.2305	0.7747	0.0000	0.2862π	5.2390	0.2695
0.5200λ	Z_0	0.4990	0.3752	0.7519	0.9986	0.9995	0.8671	0.9594π	1.0000	0.0000
	1	0.4967	0.3736	0.7521	0.9934	1.0000	0.8643	0.9608π	1.0000	0.0000
	0.1912	1.3541	0.7337	0.5418	2.8512	0.9498	0.5297	0.8853π	2.8172	0.2695
	1.0304	0.4860	0.3655	0.7521	0.9720	0.9999	0.8679	0.9617π	1.0000	0.0000
L		·	L	L				L	L	<u> </u>

Приведенная в [7] серия аварийных режимов в нагруженной полуволновой электропередаче указывает на относительно высокую устойчивость последней при динамических переходных режимах. Внутренние перенапряжения на различных подстанциях не превосходили расчетного уровня изоляции ВЛ 500 кВ. Наибольшая зарегистрированная кратность перенапряжений в переходном процессе при КЗ длительностью 130...190 мс составила 1.75...1.95. Проверим, как эти экспериментальные данные согласуются с теоретическими расчетами на основе точных решений соответствующих краевых задач для телеграфных уравнений в динамической постановке.

Смоделируем вначале внезапное переключение приемного конца полуволновой линии с XX на K3 длительностью $\Delta t = 6.5$ (130 мс). Результаты расчетов показаны на рис. 2.5 в виде временных зависимостей напряжения (a) и мощности (b) на отправном и приемном конце линии. Кривые 2 и 3 соответствуют напряжениям на подстанциях Липецк и Арзамас. Как легко можно заметить из графиков, перенапряжения на подстанции Арзамас (см. кривую 3) в переходном процессе на стадии K3 длительностью всего 130 мс почти успевают достичь кратности 5.6, которая наблюдается в установившемся режиме в предположении, что K3 длится бесконечно долго. После перехода линии на режим XX в точке переключения на станции Шагол возникают шестикратные перенапряжения, которые затем довольно быстро затухают (кривая 4).

Максимальная кратность перенапряжений на подстанции Арзамас при КЗ в нагруженной электропередаче ($R_s=1$) остается такой же как при отключенной нагрузке (рис. 2.6). Максимальные напряжения в нагрузке на послеаварийной стадии длительностью около 20 мс (время двойного пробега волны по длине линии) достигли 4, а броски передаваемой мощности образуют два ярко выраженных пика с амплитудой 9. Ситуация с перенапряжениями в середине полуволновой линии и в нагрузке радикально не меняется, если отбор мощности уменьшить или увеличить, изменяя сопротивление нагрузки R_s . Вариация длины и погонных параметров линии в пределах 10...20% приводит к кратности перенапряжений в режиме КЗ не меньше 5. К эффектам второго порядка следует отнести и учет взаимовлияния проводов в трехфазной системе передачи энергии, которое не оказывает практически никакого влияния на кратность перенапряжений в поврежденной фазе как в установившемся, так и в переходном процессе, чему будет посвящено отдельное исследование.

Если точку КЗ переместить на подстанцию Арзамас (рис. 2.7), то максимальные перенапряжения возникнут на подстанции Липецк и составят всего 1.6, что совпадает с данными натурных испытаний [7]. Здесь следует отметить тот факт, что этот максимум имеет место на начальной стадии нестационарного процесса и оно больше установившегося значения, равного 1. Скачки напряжений и мощности в точке подключения нагрузки в этом случае не наблюдаются, а процесс передачи мощности в течение 20 мс после устранения КЗ практически возвращается в прежнее состояние.

Предположим теперь, что в этом же месте произошел кратковременный разрыв линии длительностью $\Delta t=3$ (60 мс). Из графиков на рис. 2.8 видим, что максимальные перенапряжения, как и броски мощности, возникают в нагрузке. Последействие аварийного события ощущаются только на интервале времени в 20 мс, после чего система «забывает» о нем. Таким образом, обрыв в середине полуволновой линии может иметь более опасные последствия, чем КЗ в ее конце.

По поводу столь быстрого восстановления системы отметим следующее. Из формул для тока и напряжения (1.10)-(1.11) видно, что влияние на текущее решение для тока i_{nA} во время действия режима K3 уменьшается со временем, так как

умножается на множитель $(z_{\gamma})^m = (ze^{-2\gamma\Delta})^m$. В данном конкретном случае влияние исчезает очень быстро, так как $R_S=1$ или z=0. Для неискажающей линии при z=0 решение восстанавливается спустя 19.22 мс (время двойного пробега волны по длине линии) как будто и не было предыстории, так как реализуется режим прохождения волн без отражения. Для линии с произвольными потерями чуть медленнее, но тоже довольно быстро решение «забывает» аварийное событие.

Итак, передача электрической энергии по длинным линиям имеет ряд особенностей, в том числе и в аварийных режимах, которые еще предстоит изучить более детально. Предложенный подход позволяет моделировать реальные аварийные ситуации и определять установившиеся и импульсные значения напряжений и токов в наиболее слабых точках электрической цепи.

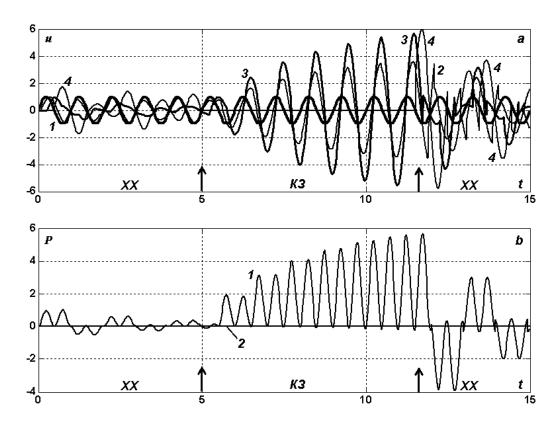
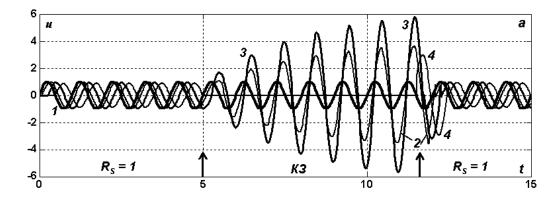


Рис. 2.5. Напряжения (*a*) и мощности (*b*) в ненагруженной электропередаче ($R_S = \infty$) при К3 длительностью $\Delta t = 6.5$ (130 мс) на приемном конце l = 0.4805 (2858 км)



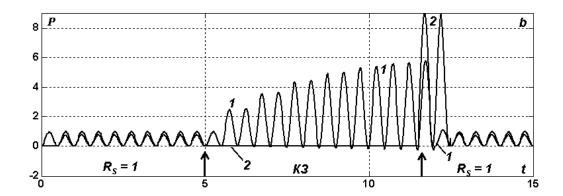


Рис. 2.6. Напряжения (*a*) и мощности (*b*) в нагруженной электропередаче ($R_S = 1$) при КЗ длительностью 6.5 (130 мс) в точке подключения нагрузки l = 0.4805 (2858 км)

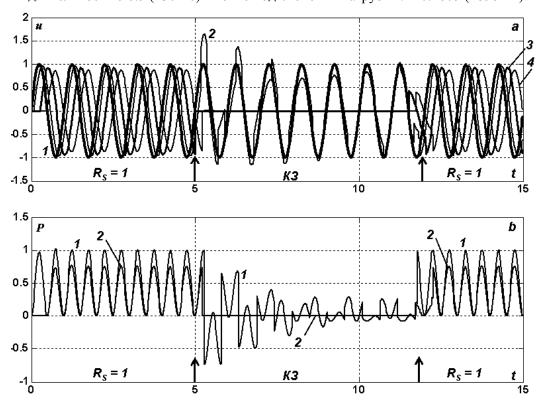
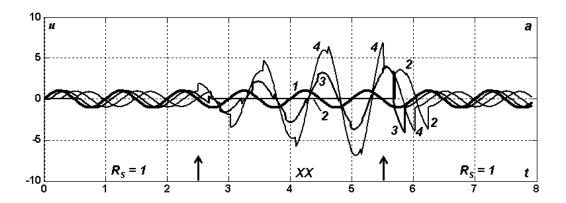


Рис. 2.7. Напряжения (a) и мощности (b) в нагруженной электропередаче ($R_S=1$) при КЗ длительностью 7 (140 мс) в точке x=0.2643 (1572 км)



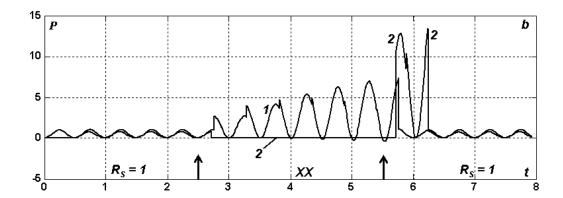


Рис. 2.8. Напряжения (a) и мощности (b) в нагруженной электропередаче ($R_S = 1$) при ее разрыве (XX) длительностью 3 (60 мс) в точке x = 0.2643 (1572 км).

Заключение

- 1. Изложена методика расчета переходных процессов, вызванных мгновенным изменением сопротивления нагрузки на приемном конце полуволновой электропередачи.
- 2. Сопоставление результатов расчета и натурных испытаний для полуволновой линии 500 кВ выявило их удовлетворительную согласованность с опытными данными для установившегося режима.
- 3. Расчетная кратность перенапряжений при КЗ в точке подключения нагрузки длительностью 130 мс и разрыве цепи в середине полуволновой линии длительностью 60 мс достигает 6 номиналов, что противоречит результатам натурного эксперимента.
- **V. Rimschi.** Dr. hab. în tehnică, cercetător științific principal la Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice: fizica matematică, metode numerice de calcul, mecanica și electrotehnica teoretică. Autor a peste 200 lucrări științifice, inclusiv 15 monografii.
- **V. Berzan.** Dr. hab. în tehnică, director adjunct pe probleme de știință a Institutului de Energetică al AŞM. Domeniul intereselor științifice: diagnoza indistructivă a echipamentului electroenergetic, procese nestaționare în circuite electrice neomogene, modelarea matematică, transportul energiei electrice la distanțe mari, surse regenerabile de energie. Autor a peste 160 lucrări stiintifice, inclusiv 10 monografii.
- **V. Pațiuc.** D.ș.f.-m. conferențiar universitar la Universitatea de Stat a Moldovei, cercetător științific la Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice: fizica matematică, metode numerice de calcul, mecanica și electrotehnica teoretică. Autor a peste 80 lucrări științifice, inclusiv 10 monografii.

Литература

- 1. *Круг К.*А. Основы электротехники. Л.: ОНТИ, 1936. –888с.
- 2. *Круг К.*А. Переходные процессы в линейных электрических цепях. М. –Л.: ГЭИ, 1948. –344с.
- 3. *Хаяси С*. Волны в линиях электропередачи. М. –Л.: ГЭИ, 1960. –343с.
- 4. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи /Учебник для ВТУЗов. М.: Высшая школа, 1984. 559с.
- 5. *Dragan G., Golovanov N., Mazzeti C. și al.* Tehnica tensiunilor înalte. Vol. II. București: Editura AGIR, 2001. –732p.
- 6. *Манн А.К., Спиридонов В.К.* Волновой метод определения расстояния до места повреждения кабельной линии. В кн.: Труды ВНИИЭ. Т.8. М. –Л.: ГЭИ, 1959, с. 28–43.

- 7. **Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В. и др.** Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ Европейской части СССР. Электричество, 1968, № 8, с. 10–16.
- 8. *Римский В.К., Берзан В.П., Тыршу М.С.* Волновые явления в неоднородных линиях. Т.1. Теория распространения волн потенциала и тока. Под ред. Римского В.К. Кишинев: Типография АНМ, 1997. 298с.
- 9. *Римский В.К.*, *Берзан В.П.*, *Пацюк В.И. и др.* Как увеличить передаваемую мощность в десятки раз. Кишинев: Типография АНМ, 2007. 178с.
- 10. *Римский В.К.*, *Берзан В.П.*, *Пацюк В.И. и др.* Волновые явления в неоднородных линиях. Т.4. Параметрические цепи. Кишинев: Типография АНМ, 2008. 552с.
- 11. *Александров Г. Н.* Передача электрической энергии. С.-П.: Изд-во Политехнического университета, 2007. 412c.
- 12. *Неклепаев Б.Н., Крючков И.П.* Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. Учеб. Пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат . 1989. 608с.
- 13. **Зильберман С.М., Самородов Г.И.** Возможные перспективы импорта электроэнергии в Республику Молдова из Тюменского региона. В кн.: Энергетика Молдовы 2005. Сборник докладов. Кишинев: Типография АНМ, 2005, с. 104–110.

Prezentat la 1 octrombrie a. 2008

НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ТОКЕ НА ВХОДЕ РАЗОМКНУТОЙ ЛИНИИ С ПОТЕРЯМИ

Пацюк В.И.

Институт энергетики Академии наук Молдовы Государственный университет Молдовы patsiuk@usm.md

Аннотация. Методом рядов Фурье решены классические задачи теоретической электротехники, какими являются включение разомкнутых (короткозамкнутых) линий на переменное напряжение (ток). Выявлены условия, при которых в линиях с ненулевыми потерями формируются несинусоидальные установившиеся режимы.

Ключевые слова: телеграфные уравнения, несинусоидальные напряжения и токи, полуволновые и четвертьволновые линии.

TENSIUNI NESINUSOIDALE CREATE DE CURENȚII SINUSOIDALI LA INTRAREA LINIILOR CU PERDERI ÎN REGIME DESCHISE

Patiuc V.I.

Rezumat. Utilizând metoda seriei Fourier sunt soluționate problemele clasice ale electrotehnicii către care pot fi aliniate conexiunea liniilor (circuitelor) deschise și scurtcircuite la surse de tensiuni alternative (curent). Sunt determinate condițiile când în liniile (circuitele) cu pierderi apar regimuri stabile nesinusoidale.

Cuvinte-cheie: ecuațiile telegrafiștilor, tensiuni și curenți nesinusoidali, linie (circuite) cu lungimea de o doime și o pătrime de undă.

THE NO SINUSOIDAL VOLTAGES UNDER THE SINUSOIDAL CURRENT AT THE ENTRY OF THE OPEN-ENDED LINE WITH REAL LOSS

Patsiuk V.I.

Abstract. The classical problems of the theoretical electrical engineering, such as open-ended (or short-circuited) line energization on alternating voltage (or current), are solved by means of Fourier series method. The conditions of creation of no sinusoidal steady-state regimes in the lines with nonzero loss are discovered. **Key words:** The telegraph equations, no sinusoidal voltage and current, half-wave and quarter-wave transmission lines.

Введение

В [1] показано почему нельзя использовать метод комплексных амплитуд (МКА) для расчета установившихся режимов электрических цепей, в которых отсутствует потери на эффект Джоуля — Ленца. В качестве примеров было рассмотрено подключение идеальных разомкнутых и короткозамкнутых линий к источнику синусоидального напряжения. Однако совершенно неожиданно выяснилось, что и в линиях с потерями при определенных условиях, которые нельзя считать столь уж экзотическими, тоже могут возникать вопреки традиционным представлениям несинусоидальные режимы.

1. Включение короткозамкнутой линии на переменное напряжение

Аксиоматическую структуру теории линейных электрических цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами составляют законы Ома и Кирхгофа, из которых неоспоримо вытекает следующее дедуктивное заключение. Если непосредственно к зажимам источника синусоидального напряжения (тока) подключить сосредоточенное устройство, состоящее из произвольного набора RLC —

звеньев, то, исходя из решения обыкновенного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами:

$$u = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_s} \int_0^t i(\tau) d\tau,$$

ток (напряжение) также будет изменяться во времени по синусоидальному закону [2]. Наличие в электрической цепи элементов с распределенными параметрами в виде длинной линии (соединительных проводов) делает такое утверждение далеко не столь очевидным даже для установившихся режимов. Его проверка на основе строго обоснованных решений корректно сформулированных начально-краевых задач для телеграфных уравнений привела к несколько парадоксальным результатам, которые требуют тщательного и всестороннего анализа.

Рассмотрим задачу определения функции напряжения u(x,t) и тока i(x,t), удовлетворяющие системе гиперболических уравнений

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0$$
 при $x \in (0, l), \quad t > 0$ (1.1)

и следующим начальным и граничным условиям:

$$u(x,0) = i(x,0) = 0, x \in [0,l];$$
 (1.2)

$$u(0,t) = U_0 \sin \omega t, \ u(l,t) = 0, \ t \ge 0.$$
 (1.3)

Так как в случае КЗ приемного конца линии переменного напряжения граничные условия формулируются только в терминах напряжения u(x,t), то исключая из (1.1) – (1.3) функцию тока i(x,t), получаем задачу относительно напряжений

$$LC\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - RGu$$

или

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (\gamma_R + \gamma_G) \frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma_R \gamma_G u \text{ при } x \in (0, l), \ t > 0;$$
 (1.4)

$$u(x,0) = \frac{\partial u}{\partial t}\Big|_{t=0} = 0, \quad x \in [0,l];$$

$$(1.5)$$

$$u(0,t) = U_0 e^{j\omega t}, \ u(l,t) = 0, \ t \ge 0.$$
 (1.6)

Здесь напряжение в начале линии задается в комплексной форме с использованием следующих обозначений: $\gamma_R = R/L$, $\gamma_G = G/C$, $a = 1/\sqrt{LC}$.

Решение задачи будем находить методом разложения его в ряды Фурье [3], что предполагает переход к нулевым граничным условиям. С этой целью переформулируем задачу (1.4) – (1.6) относительно новой функции $\widetilde{u}(x,t) = u(x,t) - U_0(1-x/l)e^{j\omega t}$:

$$\frac{\partial^2 \widetilde{u}}{\partial t^2} + (\gamma_R + \gamma_G) \frac{\partial \widetilde{u}}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \widetilde{u}}{\partial x^2} - \gamma_R \gamma_G \widetilde{u} + f(x, t) \text{ при } x \in (0, l), \ t > 0;$$
 (1.7)

$$f(x,t) = U_0(1-x/l)[(\omega^2 - \gamma_R \gamma_G) - j\omega(\gamma_R + \gamma_G)]e^{j\omega t} = U_0(1-x/l)\gamma_\omega e^{j\omega t};$$

$$\gamma_{\omega} = (\omega^2 - \gamma_R \gamma_G) - j\omega(\gamma_R + \gamma_G);$$

$$\widetilde{u}(x,0) = -U_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right), \quad \frac{\partial \widetilde{u}}{\partial t} \bigg|_{t=0} = -j\omega U_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right), \quad x \in [0,l]; \tag{1.8}$$

$$\widetilde{u}(0,t) = \widetilde{u}(l,t) = 0, \ t \ge 0. \tag{1.9}$$

Положим $\widetilde{u}(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) \sin \frac{\pi kx}{l}$, $f(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) \sin \frac{\pi kx}{l}$ и подставим эти выражения в (1.7). Тогда для амплитуд $c_k(t)$ получаем обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\ddot{c}_k(t) + (\gamma_R + \gamma_G)\dot{c}_k(t) + \gamma_k c_k(t) = f_k(t), \qquad (1.10)$$

$$\gamma_k = \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 + \gamma_R \gamma_G, \ f_k(t) = \frac{2U_0 \gamma_{\omega}}{\pi k} e^{j\omega t},$$

общее решение которого при условии выполнения неравенства $m_1 \neq m_2$ имеет вид

$$c_k(t) = c_{1k}e^{m_1t} + c_{2k}e^{m_2t} + F_k(t);$$

$$F_k(t) = \frac{2U_0 \gamma_{\omega}}{\pi k (j\omega - m_1)} \left(\frac{e^{j\omega t} - e^{m_2 t}}{j\omega - m_2} - \frac{e^{m_1 t} - e^{m_2 t}}{m_1 - m_2} \right),$$

а в случае кратных корней $m_1 = m_2$ получаем:

$$c_k(t) = (c_{1k} + c_{2k}t)e^{m_1t} + F_k(t);$$

$$F_k(t) = \frac{2U_0\gamma_{\omega}\left[e^{j\omega t} - \left(1 + t(j\omega - m_1)\right)e^{m_1 t}\right]}{\pi k(j\omega - m_1)^2}.$$

Числа m_1 , m_2 являются корнями характеристического уравнения $m^2 + (\gamma_R + \gamma_G)m + \gamma_k = 0$:

$$m_1 = -\alpha_k + \beta_k, m_2 = -\alpha_k - \beta_k, \ \alpha_k = 0.5(\gamma_R + \gamma_G), \beta_k = 0.5\sqrt{(\gamma_R - \gamma_G)^2 - \left(\frac{2a\pi k}{l}\right)^2}$$

Значения констант c_{1k} , c_{2k} находим из условия удовлетворения начальным условиям (1.8)

$$c_{1k} = -\frac{2U_0(j\omega - m_2)}{\pi k(m_1 - m_2)}, \ c_{2k} = \frac{2U_0(j\omega - m_1)}{\pi k(m_1 - m_2)}.$$

Тогда решение задачи (1.4) – (1.6) принимает следующий вид:

$$u(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{2U_0}{\pi k (m_1 - m_2)} \left((j\omega - m_1)e^{m_1 t} - (j\omega - m_2)e^{m_2 t} \right) + F_k(t) \right] \sin \frac{\pi kx}{l} + U_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right) e^{j\omega t}$$

или после некоторых преобразований

$$u(x,t) = 2U_0 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(a\pi k)^2}{l^2 (m_1 - m_2)} \left(\frac{e^{m_2 t}}{j\omega - m_2} - \frac{e^{m_1 t}}{j\omega - m_1} \right) + \frac{l^2 \gamma_{\omega} e^{j\omega t}}{(a\pi k)^2 - l^2 \gamma_{\omega}} \right] \frac{\sin(\pi kx/l)}{\pi k} + U_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right) e^{j\omega t} .$$

$$(1.11)$$

Функцию тока i(x,t) получим подстановкой выражения (1.11) в первое уравнение (1.1)

$$i(x,t) = \frac{2U_0}{Ll} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l} \right)^2 \frac{e^{-\gamma_R t} (j\omega + \gamma_G) \cos(\pi kx/l)}{(j\omega - m_1)(j\omega - m_2)(\gamma_R + m_1)(\gamma_R + m_2)} + \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l} \right)^2 \frac{\cos(\pi kx/l)}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 t}}{(j\omega - m_1)(\gamma_R + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_R + m_2)} \right) + \frac{e^{-\gamma_R t} - e^{j\omega t}}{2(j\omega + \gamma_R)} \left\{ -1 + 2\gamma_\omega \sum_{k=1}^{\infty} \frac{l^2 \cos(\pi kx/l)}{(a\pi k)^2 - l^2 \gamma_\omega} \right\}.$$

$$(1.12)$$

Формулу (1.12) можно существенно упростить. Ряды, содержащие в качестве множителя компоненту $e^{-\gamma_R t}$, взаимно сокращаются, а выражение в последней круглой скобке можно просуммировать. В результате получаем следующую формулу:

$$i(x,t) = -\frac{U_0 e^{-\gamma_R l}}{l \gamma_0 Z_0} + \frac{U_0 e^{j\omega t}}{Z_0 \operatorname{sh}(\gamma_0 l)} \operatorname{ch}\gamma_0 (l-x) + \frac{2U_0}{l L} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 \frac{\cos(\pi kx/l)}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 l}}{(j\omega - m_1)(\gamma_R + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_R + m_2)}\right). \quad (1.13)$$

Здесь комплексы $\gamma_0 = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$ и $Z_0 = \sqrt{(R+j\omega L)/(G+j\omega C)}$ обозначают коэффициент распространения электромагнитной волны и волновое сопротивление линии.

Для получения вещественного решения задачи (1.1) - (1.3) следует взять мнимые части формул (1.11) и (1.13).

Исследуем асимптотические свойства решения (1.13) для установившихся значений тока в начале линии x=0, когда $t\to\infty$. Так как корни характеристического уравнения $m_{1,2}$ имеют отрицательную вещественную часть, если $R\neq 0$ или $G\neq 0$, то при выполнении условия $t\to\infty$ последний член в (1.13) стремится к нулю, и получаем решение вида

$$i(0,t) = -\frac{U_0 e^{-\gamma_R t}}{l \gamma_0 Z_0} + \frac{U_0 e^{j\omega t}}{Z_0 \text{th}(\gamma_0 l)} = -\frac{U_0 e^{-\gamma_R t}}{l(R+j\omega L)} + I_0 e^{j\omega t},$$

где через I_0 обозначена комплексная амплитуда тока.

Далее, если $R \neq 0$, то в пределе получаем решение

$$i(0,t) = I_0 e^{j\omega t}, \quad I_0 = \frac{U_0}{Z_0 \operatorname{th}(\gamma_0 l)} = \frac{U_0}{Z_{BX}}, \quad Z_{BX} = Z_0 \operatorname{th}(\gamma_0 l),$$

которое совпадает с решением, получаемым по методу комплексных амплитуд (МКА). Если же R=0 и $G\neq 0$, то установившееся решение имеет вид

$$i(0,t) = -\frac{U_0}{j\omega Ll} + I_0 e^{j\omega t} = \frac{jU_0}{\omega Ll} + I_0 e^{j\omega t},$$

которое уже отличается от решения МКА на постоянную составляющую $I_{\scriptscriptstyle R} = U_0 \, / (\omega L l)$.

Рассмотрим также частный случай решения (1.13) для идеальной линии (R=G=0) при x=0. В этом случае $\gamma_R=\gamma_G=0$, $\gamma_0=j\omega/a$, $Z_0=Z_B=\sqrt{L/C}$ и корни характеристического уравнения имеют вид $m_{1,2}=\pm j(a\pi k/l)=\pm j(\pi k/\Delta)$, где $\Delta=l/a$ — время пробега волны по длине линии. Тогда ряд в (1.13) можно представить в виде

$$\frac{2U_0}{lL} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 \frac{\cos(\pi kx/l)}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 t}}{(j\omega - m_1)(\gamma_R + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_R + m_2)}\right) =$$

$$=\frac{2U_0}{lL}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{-\frac{\pi k}{\Delta}\sin\frac{\pi kt}{\Delta}+j\omega\cos\frac{\pi kt}{\Delta}}{\omega^2-\left(\frac{\pi k}{\Delta}\right)^2}.$$

Поскольку $lL = \Delta Z_B$, то из (1.13) получаем вещественное решение для идеальной линии

$$i(0,t) = \frac{U_0}{Z_B} \left[\frac{1}{\omega \Delta} - \text{ctg}(\omega \Delta) \cos(\omega t) + 2\omega \Delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\pi kt}{\Delta}}{(\omega \Delta)^2 - (\pi k)^2} \right].$$
 (1.14)

Формула (1.14) представляет собой алгебраическую сумму трех членов, каждый из которых является периодической функцией, но с разными периодами. Первый членэто константа; второй — содержит функцию $\cos(\omega t)$, т.е. периодическую функцию с периодом $T_1=2\pi/\omega$, и третий член представлен в виде ряда, который также является периодической функцией с периодом $T_2=2\Delta$. Поэтому функция тока i(0,t) будет периодической функцией с периодом T, если существуют два целых положительных числа k^* и n^* , для которых выполняется соотношение

$$T = k^* T_1 = n^* T_2$$
 или $\frac{T_1}{T_2} = \frac{\pi}{\omega \Delta} = \frac{n^*}{k^*} = \frac{1}{2\Delta} (\omega = 2\pi)$.

Таким образом, если $\omega = 2\pi$ и Δ является рациональным числом, то решение i(0,t) будет периодической функцией с периодом $T=k^*=2n^*\Delta$. Формуле (1.14) можно придать и замкнутую форму. Разложением в ряд Фурье нетрудно показать, что функция $\cos \omega (t-\Delta)$ на отрезке $t\in [0,2\Delta]$ представима в виде ряда

$$\frac{\cos \omega (t - \Delta)}{\sin(\omega \Delta)} = \frac{1}{\omega \Delta} + 2\omega \Delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\pi kt}{\Delta}}{(\omega \Delta)^2 - (\pi k)^2}, \quad t \in [0, 2\Delta].$$
 (1.15)

Так как $\cos \omega(t-\Delta)$ является периодической функцией с периодом 2Δ , то для любого значения t сумму ряда в (1.15) можно записать как

$$\frac{1}{\omega\Delta} + 2\omega\Delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos\frac{\pi kt}{\Delta}}{(\omega\Delta)^2 - (\pi k)^2} = \frac{\cos\omega(t - (2n-1)\Delta)}{\sin(\omega\Delta)}, \quad t \in [2(n-1)\Delta, 2n\Delta], n = 1, 2, 3, \dots$$

и тогда (1.14) преобразуется к виду

$$i(0,t) = \frac{U_0}{Z_B} \left[\frac{\cos \omega (t - (2n-1)\Delta)}{\sin(\omega \Delta)} - \cot(\omega \Delta) \cos(\omega t) \right], \quad t \in [2(n-1)\Delta, 2n\Delta], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.16)$$

После несложных преобразований для формулы (1.16) имеем следующее представление:

$$i(0,t) = \frac{U_0}{Z_B} \left[\sin(\omega t) + 2 \frac{\sin \omega (n-1)\Delta \sin \omega (t-n\Delta)}{\sin(\omega \Delta)} \right], \quad t \in [2(n-1)\Delta, 2n\Delta], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.17)$$

Идентичное выражение для тока было получено методом характеристик в параграфе 7 монографии [1]. В частности, для четвертьволновой линии ($\Delta=1/4$, $\omega=2\pi$, $\sin(\omega\Delta)=1$) с учетом $\cos(t-(2n-1)\Delta)=(-1)^{n-1}\sin(2\pi t)$ получаем из (1.16) совсем простенькое решение

$$i(0,t) = \frac{U_0(-1)^{n-1}\sin(2\pi t)}{Z_R}, \quad t \in [(n-1)/2, n/2], n = 1,2,3,...$$
 (1.18)

Из (1.13) получим решение и для неискажающей линии ($\gamma_R = \gamma_G = \gamma$) при x=0. В этом случае $\gamma_0 = (\gamma + j\omega)/a$, $\gamma_0 l = (\gamma + j\omega)\Delta$ $Z_0 = Z_B = \sqrt{L/C}$, $lL = \Delta Z_B$ и корни характеристического уравнения имеют вид $m_{1,2} = -\gamma \pm j(a\pi k/l) = -\gamma \pm j(\pi k/\Delta)$, где $\Delta = l/a$ — время пробега волны по длине линии. Тогда формулу (1.13) в точке x=0 можно представить в виде

$$i(0,t) = -\frac{U_0 e^{-\gamma_R t}}{l \gamma_0 Z_0} + \frac{U_0 e^{j\omega t}}{Z_0 \operatorname{sh}(\gamma_0 l)} \operatorname{ch}\gamma_0 l +$$

$$+ \frac{2U_0}{lL} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 \frac{1}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 t}}{(j\omega - m_1)(\gamma_R + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_R + m_2)}\right) =$$

$$= \frac{U_0 e^{j\omega t}}{Z_B} \operatorname{cth}\Delta(\gamma + j\omega) - \frac{U_0 e^{-\gamma t}}{Z_B(\gamma + j\omega)\Delta} -$$

$$- \frac{U_0 e^{-\gamma t}}{Z_B \Delta} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{e^{j\pi k t/\Delta}}{\gamma + j(\omega - \pi k/\Delta)} + \frac{e^{-j\pi k t/\Delta}}{\gamma + j(\omega + \pi k/\Delta)}\right) =$$

$$= \frac{U_0 e^{j\omega t}}{Z_B} \operatorname{cth}\Delta(\gamma + j\omega) - \frac{U_0 e^{-\gamma t}}{Z_B \Delta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\pi k t/\Delta}}{\gamma + j(\omega - \pi k/\Delta)}. \tag{1.19}$$

Непосредственным разложением в ряд Фурье нетрудно показать, что ряд в формуле (1.19) для любых значений t можно представить в следующей конечной форме:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\pi kt/\Delta}}{\gamma + j(\omega - \pi k/\Delta)} = \frac{2\Delta e^{(\gamma + j\omega)t}}{e^{2(n+1)(\gamma + j\omega)\Delta} - e^{2n(\gamma + j\omega)\Delta}} =$$

$$=\frac{2\Delta e^{(\gamma+j\omega)t}e^{-2(n+1)(\gamma+j\omega)\Delta}}{1-e^{-2(\gamma+j\omega)\Delta}}, t\in[2n\Delta, 2(n+1)\Delta], n=0,1,2,...$$

Заменяя этим выражением ряд в формуле (1.19), получаем конечное представление для тока в начале линии

$$i(0,t) = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{Z_B} \left(\coth\Delta(\gamma + j\omega) - \frac{2e^{-2(n+1)(\gamma + j\omega)\Delta}}{1 - e^{-2(\gamma + j\omega)\Delta}} \right), \quad t \in [2n\Delta, 2(n+1)\Delta], \quad n = 0,1,2,\dots$$
 (1.20)

В частности, для четвертьволновой линии ($\Delta = 1/4$, $\omega = 2\pi$) из (1.20) имеем вещественное решение

$$cth\Delta(\gamma + j\omega) = th(\gamma/4), \ e^{-2(n+1)(\gamma+j\omega)\Delta} = \left(-e^{-\gamma/2}\right)^{n+1},$$

$$i(0,t) = \frac{U_0 \sin(2\pi t)}{Z_B} \left(th(\gamma/4) - \frac{2\left(-e^{-\gamma/2}\right)^{n+1}}{1 + e^{-\gamma/2}}\right) =$$

$$= \frac{U_0 \sin(2\pi t)}{Z_B} \left(1 - 2e^{-\gamma/2} \frac{1 - (-1)^n e^{-n\gamma/2}}{1 + e^{-\gamma/2}}\right), \ t \in [n/2, (n+1)/2], \ n = 0,1,2,..., (1.21)$$

которое совпадает с таковым, полученным по методу характеристик [1].

2. Включение разомкнутой линии на переменный ток

Рассмотрим теперь задачу определения искомых величин в разомкнутой линии, когда на ее входе задан синусоидальный ток. Итак, требуется определить функции напряжения u(x,t) и тока i(x,t), удовлетворяющие системе телеграфных уравнений

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0$$
 при $x \in (0, l), \ t > 0$ (2.1)

и следующим начальным и граничным условиям:

$$u(x,0) = i(x,0) = 0, x \in [0,l];$$
 (2.2)

$$i(0,t) = I_0 \sin \omega t, \ i(l,t) = 0, \ t \ge 0.$$
 (2.3)

В случае XX линии граничные условия формулируются только в терминах тока. Поэтому, исключая из (2.1)-(2.3) функцию напряжения u(x,t), получаем следующую начально-краевую задачу относительно i(x,t):

$$LC\frac{\partial^{2} i}{\partial t^{2}} + (LG + RC)\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial^{2} i}{\partial x^{2}} - RGi$$

или

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (\gamma_R + \gamma_G) \frac{\partial i}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - \gamma_R \gamma_G i \text{ при } x \in (0, l), t > 0$$
 (2.4)

$$i(x,0) = \frac{\partial i}{\partial t}\Big|_{t=0} = 0, \ x \in [0,l];$$
 (2.5)

$$i(0,t) = I_0 e^{j\omega t}, \ i(l,t) = 0, \ t \ge 0.$$
 (2.6)

Задача (2.4)-(2.6) также решается методом разложения в ряды Фурье и ее решение можно представить в виде

$$i(x,t) = 2I_0 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(a\pi k)^2}{l^2 (m_1 - m_2)} \left(\frac{e^{m_2 t}}{j\omega - m_2} - \frac{e^{m_1 t}}{j\omega - m_1} \right) + \frac{l^2 \gamma_{\omega} e^{j\omega t}}{(a\pi k)^2 - l^2 \gamma_{\omega}} \right] \frac{\sin(\pi kx/l)}{\pi k} + I_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right) e^{j\omega t} .$$
(2.7)

$$u(x,t) = \frac{2I_0}{Cl} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l} \right)^2 \frac{e^{-\gamma_G t} (j\omega + \gamma_R) \cos(\pi kx/l)}{(j\omega - m_1)(j\omega - m_2)(\gamma_G + m_1)(\gamma_G + m_2)} + \right.$$

$$+\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^{2} \frac{\cos(\pi kx/l)}{m_{1}-m_{2}} \left(\frac{e^{m_{1}t}}{(j\omega-m_{1})(\gamma_{G}+m_{1})} - \frac{e^{m_{2}t}}{(j\omega-m_{2})(\gamma_{G}+m_{2})}\right) +$$

$$+\frac{e^{-\gamma_{G}t} - e^{j\omega t}}{2(j\omega + \gamma_{G})} \left(-1 + 2\gamma_{\omega} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{l^{2} \cos(\pi kx/l)}{(a\pi k)^{2} - l^{2} \gamma_{\omega}}\right) \right\}.$$
 (2.8)

Формулу (2.8) можно существенно упростить. Ряды, содержащие в качестве множителя $e^{-\gamma_G t}$, взаимно сокращаются, а выражение в последней круглой скобке можно просуммировать. В результате получаем следующее представление для функции напряжения:

$$u(x,t) = -\frac{I_0 Z_0 e^{-\gamma_G t}}{\gamma_0 l} + \frac{I_0 Z_0 e^{j\omega t}}{\sinh(\gamma_0 l)} \cosh\gamma_0 (l-x) + \frac{2I_0}{lC} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 \frac{\cos(\pi kx/l)}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 t}}{(j\omega - m_1)(\gamma_G + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_G + m_2)}\right).$$
(2.9)

Для получения вещественного решения задачи (2.1)-(2.3) следует взять мнимые части формул (2.7) и (2.9).

Рассмотрим решение (2.9) в начале линии (x=0) в установившемся режиме, когда $t\to\infty$. Так как корни характеристического уравнения $m_{1,2}$ имеют отрицательную вещественную часть, если $R\neq 0$ или $G\neq 0$, то при $t\to\infty$ последний член в (2.9) стремится к нулю и получаем решение вида

$$u(0,t) = -\frac{I_0 Z_0 e^{-\gamma_c t}}{\gamma_0 l} + \frac{I_0 Z_0 e^{j\omega t}}{\operatorname{th}(\gamma_0 l)} = -\frac{I_0 e^{-\gamma_c t}}{l(G + j\omega C)} + U_0 e^{j\omega t},$$

где через U_0 обозначена комплексная амплитуда напряжения.

Далее, если $G \neq 0$, то в пределе приходим к решению

$$u(0,t) = U_0 e^{j\omega t}, \quad U_0 = \frac{I_0 Z_0}{\operatorname{th}(\gamma_0 I)} = Z_{BX} I_0, \quad Z_{BX} = \frac{Z_0}{\operatorname{th}(\gamma_0 I)},$$

совпадающему с решением, получаемым по МКА. Если же G=0 и $R\neq 0$, то установившееся оно имеет вид

$$u(0,t) = -\frac{I_0}{j\omega Cl} + U_0 e^{j\omega t} = \frac{jI_0}{\omega Cl} + U_0 e^{j\omega t}.$$

Это решение уже отличается от решения МКА на постоянную величину $U_G = I_0/(\omega C l)$.

Рассмотрим частный случай решения (2.9) для идеальной линии (R=G=0) при x=0. В этом случае $\gamma_R=\gamma_G=0$, $\gamma_0=j\omega/a$, $Z_0=Z_B=\sqrt{L/C}$ и корни характеристического уравнения таковы: $m_{1,2}=\pm j(a\pi k/l)=\pm j(\pi k/\Delta)$, где $\Delta=l/a$ – время пробега волны по длине линии. Тогда ряд в (2.9) можно представить в виде

$$\begin{split} \frac{2I_0}{lC} \sum_{k=1}^{\infty} & \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 \frac{\cos(\pi kx/l)}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 t}}{(j\omega - m_1)(\gamma_G + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_G + m_2)}\right) = \\ & = \frac{2I_0}{lC} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{-\frac{\pi k}{\Delta} \sin\frac{\pi kt}{\Delta} + j\omega \cos\frac{\pi kt}{\Delta}}{\omega^2 - \left(\frac{\pi k}{\Delta}\right)^2} \,. \end{split}$$

Тогда с учетом, что $lC = \Delta/Z_{\it B}$, из (2.9) получаем вещественное решение для идеальной линии

$$u(0,t) = I_0 Z_B \left[\frac{1}{\omega \Delta} - \operatorname{ctg}(\omega \Delta) \cos(\omega t) + 2\omega \Delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\pi k t}{\Delta}}{(\omega \Delta)^2 - (\pi k)^2} \right]. \tag{2.10}$$

Формула (2.10) представляет собой алгебраическую сумму трех членов, каждый из которых является периодической функцией, но с разными периодами. Первый –

константа; второй содержит функцию $\cos(\omega t)$, т.е. периодическую функцию с периодом $T_1=2\pi/\omega$; третий член представлен в виде ряда, который также является периодической функцией с периодом $T_2=2\Delta$. Поэтому функция напряжения u(0,t) будет периодической функцией с периодом T, если существуют два целых положительных числа k^* и n^* , для которых выполняется соотношение

$$T = k^* T_1 = n^* T_2$$
 или $\frac{T_1}{T_2} = \frac{\pi}{\omega \Delta} = \frac{n^*}{k^*} = \frac{1}{2\Delta} (\omega = 2\pi)$.

Таким образом, если $\omega = 2\pi$ и Δ является рациональным числом, то решение u(0,t) будет периодической функцией с периодом $T=k^*=2n^*\Delta$. Формулу (2.10) можно представить в конечном виде. Разложением в ряд Фурье нетрудно показать, что функция $\cos \omega (t-\Delta)$ на отрезке $t\in [0,2\Delta]$ представима в виде ряда

$$\frac{\cos \omega (t - \Delta)}{\sin(\omega \Delta)} = \frac{1}{\omega \Delta} + 2\omega \Delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\pi kt}{\Delta}}{(\omega \Delta)^2 - (\pi k)^2}, \quad t \in [0, 2\Delta].$$
 (2.11)

Так как $\cos \omega (t-\Delta)$ является периодической с периодом 2Δ , то для любого значения t сумму ряда в (2.1) можно записать в форме

$$\frac{1}{\omega\Delta} + 2\omega\Delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos\frac{\pi kt}{\Delta}}{(\omega\Delta)^2 - (\pi k)^2} = \frac{\cos\omega(t - (2n-1)\Delta)}{\sin(\omega\Delta)}, \quad t \in [2(n-1)\Delta, 2n\Delta], n = 1, 2, 3, \dots$$

Поэтому (2.10) можно представить как

$$u(0,t) = I_0 Z_B \left[\frac{\cos \omega (t - (2n-1)\Delta)}{\sin(\omega \Delta)} - \operatorname{ctg}(\omega \Delta) \cos(\omega t) \right], \quad t \in [2(n-1)\Delta, 2n\Delta], \quad n = 1, 2, 3, \dots (2.12)$$

После несложных преобразований формулу (2.12) можно привести к виду

$$u(0,t) = I_0 Z_B \left[\sin(\omega t) + 2 \frac{\sin \omega (n-1)\Delta \sin \omega (t-n\Delta)}{\sin(\omega \Delta)} \right], \quad t \in [2(n-1)\Delta, 2n\Delta], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.13)$$

В частности, для четвертьволновой линии ($\Delta = 1/4$, $\omega = 2\pi$, $\sin(\omega \Delta) = 1$) с учетом $\cos(t - (2n-1)\Delta) = (-1)^{n-1}\sin(2\pi t)$ получаем из (2.12) решение

$$u(0,t) = I_0 Z_B(-1)^{n-1} \sin(2\pi t), \quad t \in [(n-1)/2, n/2], n = 1,2,3,...$$
 (2.14)

Рассмотрим частный случай решения (2.9) для неискажающей линии ($\gamma_R = \gamma_G = \gamma$) при x=0. В этом случае $\gamma_0 = (\gamma + j\omega)/a$, $\gamma_0 l = (\gamma + j\omega)\Delta$ $Z_0 = Z_B = \sqrt{L/C}$, $lC = \Delta/Z_B$ и корни характеристического уравнения имеют вид

 $m_{1,2} = -\gamma \pm j(a\pi k/l) = -\gamma \pm j(\pi k/\Delta)$, где $\Delta = l/a$ – время пробега волны по длине линии. Тогда формулу (2.9) при x=0 можно представить в виде

$$u(0,t) = -\frac{I_0 Z_0 e^{-\gamma_c t}}{\gamma_0 l} + \frac{I_0 Z_0 e^{j\omega t}}{\sinh(\gamma_0 l)} \cosh\gamma_0 l +$$

$$+ \frac{2I_0}{lC} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a\pi k}{l}\right)^2 \frac{1}{m_1 - m_2} \left(\frac{e^{m_1 t}}{(j\omega - m_1)(\gamma_G + m_1)} - \frac{e^{m_2 t}}{(j\omega - m_2)(\gamma_G + m_2)}\right) =$$

$$= I_0 Z_B e^{j\omega t} \coth\Delta(\gamma + j\omega) - \frac{I_0 Z_B e^{-\gamma t}}{(\gamma + j\omega)\Delta} -$$

$$-\frac{I_0 Z_B e^{-\gamma t}}{\Delta} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{e^{j\pi k t/\Delta}}{\gamma + j(\omega - \pi k/\Delta)} + \frac{e^{-j\pi k t/\Delta}}{\gamma + j(\omega + \pi k/\Delta)}\right) =$$

$$= I_0 Z_B e^{j\omega t} \coth\Delta(\gamma + j\omega) - \frac{I_0 Z_B e^{-\gamma t}}{\Delta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\pi k t/\Delta}}{\gamma + j(\omega - \pi k/\Delta)}. \tag{2.15}$$

Непосредственным разложением в ряд Фурье нетрудно показать, что ряд в формуле (2.15) для любых значений t можно представить в следующей конечной форме

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\pi kt/\Delta}}{\gamma + j(\omega - \pi k/\Delta)} = \frac{2\Delta e^{(\gamma + j\omega)t}}{e^{2(n+1)(\gamma + j\omega)\Delta} - e^{2n(\gamma + j\omega)\Delta}} =$$

$$= \frac{2\Delta e^{(\gamma + j\omega)t} e^{-2(n+1)(\gamma + j\omega)\Delta}}{1 - e^{-2(\gamma + j\omega)\Delta}}, \quad t \in [2n\Delta, 2(n+1)\Delta], \quad n = 0,1,2,...$$

Заменяя этим выражением ряд в формуле (2.15), получаем конечное представление для напряжения в начале линии

$$u(0,t) = I_0 Z_B e^{j\omega t} \left(\coth \Delta (\gamma + j\omega) - \frac{2e^{-2(n+1)(\gamma + j\omega)\Delta}}{1 - e^{-2(\gamma + j\omega)\Delta}} \right), \quad t \in [2n\Delta, 2(n+1)\Delta], \quad n = 0,1,2,... \quad (2.16)$$

В частности для четвертьволновой линии при $\Delta = 1/4$, $\omega = 2\pi$ из (2.16) получаем вещественное решение

$$\operatorname{cth}\Delta(\gamma+j\omega) = \operatorname{th}(\gamma/4), \ e^{-2(n+1)(\gamma+j\omega)\Delta} = \left(-e^{-\gamma/2}\right)^{n+1},$$

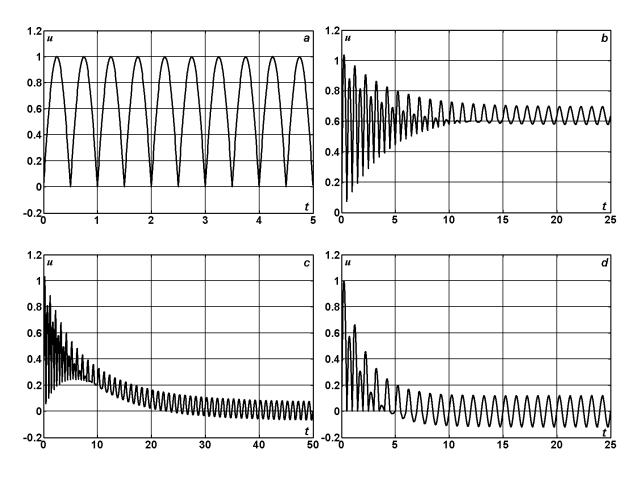
$$u(0,t) = I_0 Z_B \sin(2\pi t) \left(\operatorname{th}(\gamma/4) - \frac{2\left(-e^{-\gamma/2}\right)^{n+1}}{1+e^{-\gamma/2}} \right) =$$

$$=I_0 Z_B \sin(2\pi t) \left(1 - 2e^{-\gamma/2} \frac{1 - (-1)^n e^{-n\gamma/2}}{1 + e^{-\gamma/2}}\right), \quad t \in [n/2, (n+1)/2], \quad n = 0, 1, 2, \dots$$
 (2.17)

Итак, выражения для напряжений на входе идеальной и неискажающей линии (2.14) и (2.17) идентичны решениям, полученным по методу характеристик [1].

3. Апостериорный анализ точных решений

Для большей наглядности представим найденные решения для вырожденных режимов в графическом виде и проведем параметрический анализ влияния потерь на переходные и установившиеся процессы в ненагруженной линии. На рис. 3.1 представлено изменение во времени напряжений на входе разомкнутой четвертьволновой линии при R = G = 0 (a); R = 0.48, G = 0 (b); R = 0.48, G = R/5 (c); R = 0.48G = 0.48 (d); R = 4.8, G = 0 (e); R = 4.8, G = R/5 (f). Установившиеся синусоидальные режимы формируются только в тех случаях, когда имеет место утечка тока через изоляцию линии (G > 0) и эти режимы могут быть рассчитаны по МКА (см. рис. 3.1, c,d,f). При совершенной изоляции (G=0) получаем смещение напряжения на постоянную составляющую, которая что интересно зависит только от длины линии и не зависит от величины ее погонного активного сопротивления: $U_G = I_0 / (\omega C l)$. Более подробно см. таблицу 3.1, где даны точные значения напряжений в начале разомкнутой линии синусоидального тока для различных значений ее длины. Аналогичную картину получаем и для токов в короткозамкнутой линии синусоидального напряжения при R =0 (см. таблицу 3.2).



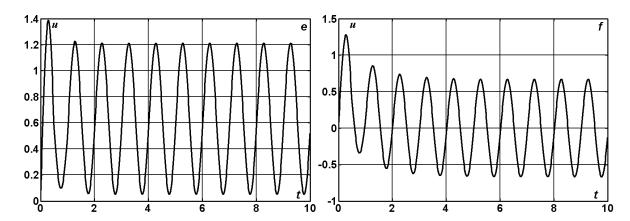


Рис. 3.1. Динамика напряжений на входе разомкнутой четвертьволновой линии при R = G = 0 (a); R = 0.48, G = 0 (b); R = 0.48, G = 0.48, G

Таблица 3.1. Установившиеся напряжения в начале разомкнутой линии синусоидального тока

R	G	l = 0.05	l = 0.125	l = 0.25	l = 0.375	l = 0.5	<i>l</i> = 5
0	0	6.2361; 0	2.2361; 0	1; 0	2.2361; -2	±∞	±∞
0.48	0	3.1831 ±3.0777	1.2732±1.0003	0.6366 ±0.0600	0.4244 ±1.0048	0.3183 ±8.3900	0.0318 ±1.2014
0.48	0.01	3.0777	1.0004	0.0612	1.0047	8.2203	1.1908
0.48	0.10	3.0774	1.0007	0.0724	1.0035	6.9572	1.1181
0.48	0.48	3.0694	1.0000	0.1194	1.0000	4.2464	1.0166
4.8	0	3.1831 ±3.0792	1.2732±1.0308	0.6366 ±0.5835	0.4244 ±1.2445	0.3183 ±1.3610	0.0318 ±1.1218
4.8	0.01	3.0793	1.0312	0.5845	1.2435	1.3598	1.1218
4.8	0.10	3.0801	1.0352	0.5934	1.2342	1.3492	1.1217
4.8	0.48	3.0767	1.0498	0.6297	1.2001	1.3068	1.1202

Таблица 3.2. Установившиеся токи в начале короткозамкнутой линии синусоидального напряжения

R	G	l = 0.05	l = 0.125	l = 0.25	l = 0.375	<i>l</i> = 0.5	<i>l</i> = 5
0	0	6.2361; 0	2.2361; 0	1; 0	2.2361; -2	<u>±</u> ∞	±∞
0	0.48	3.1831 ±3.0777	1.2732±1.0003	0.6366 ±0.0600	0.4244 ±1.0048	0.3183 ±8.3900	0.0318 ±1.2014
0.01	0.48	3.0777	1.0004	0.0612	1.0047	8.2203	1.1908
0.10	0.48	3.0774	1.0007	0.0724	1.0035	6.9572	1.1181
0.48	0.48	3.0694	1.0000	0.1194	1.0000	4.2464	1.0166
0	4.8	3.1831 ±3.0792	1.2732 ±1.0308	0.6366 ±0.5835	0.4244 ±1.2445	0.3183 ±1.3610	0.0318 ±1.1218
0.01	4.8	3.0793	1.0312	0.5845	1.2435	1.3598	1.1218
0.10	4.8	3.0801	1.0352	0.5934	1.2342	1.3492	1.1217
0.48	4.8	3.0767	1.0498	0.6297	1.2001	1.3068	1.1202

Не меньшее удивление вызывает и тот факт, что для сравнительно коротких линий установившиеся значения напряжений в режиме холостого хода очень слабо зависят от уровня активных потерь в линии. Весьма примечательным является рис. 3.2, на котором временные диаграммы напряжений для идеальной линии и линии с

достаточно большими потерями ($R=0.2244~{\rm Om/km}$) визуально почти неотличимы. Полученные результаты обладают новизной и явно нуждаются в более глубоком физическом анализе и экспериментальной проверке. Напомним, что для расчета этих вырожденных режимов МКА непригоден в принципе, поскольку они не являются синусоидальными.

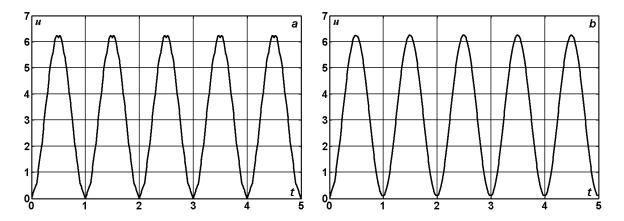


Рис. 3.2. Динамика напряжений на входе разомкнутой линии длиной l = 0.05 при R = G = 0 (**a**); R = 4.8, G = 0 (**b**).

Таким образом, представленные здесь строго обоснованные решения телеграфных уравнений еще более сужают класс задач, решаемых с помощью символического метода (см. таблицу 3.3). Чтобы повторить или воспользоваться полученными здесь в рамках классического дедуктивного подхода результатами необходимо знание основ математической физики и наличие интеллектуальной составляющей у пользователей. Для достижения этой цели гораздо проще освоить приведенную в [1] ЭВМ-программу "Альбатрос", в которой нет ничего, кроме четырех арифметический действий, но которая на удивление легко повторяет аналитические решения с любой степенью точности и предельно проста в эксплуатации. В этом может убедиться любой не лишенный любознательности читатель, хотя таковые вряд ли найдутся в обозримом будущем.

Таблица 3.3. Сравнительная характеристика методов расчета переходных и установившихся процессов в электрических цепях с распределенными и сосредоточенными параметрами.

Метод и его возраст	Точность	Область применения
1. Методу комплексных	Абсолютная	Установившиеся синусоидальные
амплитуд более 100 лет		режимы в кусочно-однородных цепях с
		ненулевыми потерями
2. Методу рядов Фурье около	Абсолютная	Переходные и установившиеся процессы
200 лет		в разомкнутых линиях переменного тока
		и короткозамкнутых линиях переменного
		напряжения с произвольными потерями
3. Методу характеристик	Абсолютная	Переходные и установившиеся процессы
(распространяющихся или		в кусочно-однородных идеальных и
бегущих волн) более 250 лет		неискажающих цепях с переменными во
		времени сосредоточенными параметрами
4. Универсальному сеточно-	От трех- четырех	Переходные и установившиеся процессы
характеристическому методу	значащих цифр и	в неоднородных параметрических цепях с

"Альбатрос" более 10 лет	выше	произвольными потерями и другими
		усложняющими факторами

Заключение

- 1. В общем виде представлены точные решения телеграфных уравнений для вырожденных режимов (КЗ и ХХ). Детально рассмотрены частные случаи решений для идеальной и неискажающей линии, что подтвердило их полное совпадение с найденными ранее по методу характеристик и сеточно-характеристическому алгоритму «Альбатрос».
- 2. Обнаружена неизвестная ранее постоянная составляющая во временных функциях токов и напряжений для короткозамкнутых и разомкнутых линий, подключенных к источнику синусоидального напряжения или тока.
- 3. Если в электрической цепи с распределенными реактивными элементами отсутствуют потери на эффект Джоуля Ленца, то в ней нельзя сформировать синусоидальный режим. В некоторых случаях таковой не формируется даже при наличие потерь в разомкнутых (короткозамкнутых) линиях.
- **V. Pațiuc.** D.ș.f.-m. conferențiar universitar la Universitatea de Stat a Moldovei, cercetător științific la Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice: fizica matematică, metode numerice de calcul, mecanica și electrotehnica teoretică. Autor a peste 80 lucrări științifice, inclusiv 10 monografii.

Литература

- 1. *Римский В.К.*, *Берзан В.П.*, *Пацюк В.И. и др.* Волновые явления в неоднородных линиях. Т.4. Параметрические цепи. Кишинев: Типография АНМ, 2008. 552с.
- 2. *Круг К.*А. Основы электротехники. Л.: ОНТИ, 1936. –888с.
- 3. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 742с.

Получено редакцией 1 октября 2008 г.

Racordarea regulatorului parametric de putere cu linia de transport a energiei electrice

L.Kalinin, D.Zaiţev, M.Tîrşu

Rezumat. În lucrare sunt examinate condițiile de funcționare a regulatorului parametric de putere dirijat cu ajutorul convertizorului electronic de putere la instalarea dispozitivului la capătul de transmisie al liniei. Sunt prezentate caracteristicile de lucru ale instalației, ce permit determinarea domeniului de existență a regimului, de astfel, și estimarea prealabilă a puterii calculate a însăși convertizorului la diverse lungimi unghiulare a liniei.

Cuvinte-cheie: regulator parametric de putere, convertizor electronic de putere, linia de transport a energiei electrice, transformator cu decalaj de faza.

Согласование параметрического регулятора мощности с линией электропередачи Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Тыршу М.С.

Аннотация. В статье рассмотрены условия работы параметрического регулятора мощности, управляемого с помощью силового электронного преобразователя, при установке устройства на передающем конце линии. Представлены рабочие характеристики устройства, позволяющие определить область существования режима, а также предварительно оценить расчетную мощность собственно преобразователя при различной угловой длине линии.

Ключевые слова: параметрический регулятор мощности, силовой электронный преобразователь, линия электропередачи, фазосдвигающий трансформатор.

The coordination of a power parametrical regulator with a transmission line Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Tirsu M.S.

Abstract. There are considered the operating conditions of a power parametrical regulator controlled with the help of the power electronic converter, at installation of the device on the transmitting end of a line. Performance data of the device are submitted, allowing determining area of a mode existence, and also preliminary to estimate settlement power of the converter at various angular length of a line.

Key words: a power parametrical regulator, the power electronic converter, a transmission line, the phase-shifting transformer.

Introducere

Principiul de acțiune și condițiile de funcționare a regulatorului parametric de putere (RPP) dirijat cu ajutorul convertizorului electronic de putere la instalarea lui nemijlocită la substația de transformare dintre diferite șine de aceeași clasă de tensiune, sunt examinate detaliat în publicația [1], prezentată în nr.1 a ediției electronice prezente în a.2006. Acest mod de utilizare a instalației se întâlnește în cazul necesității limitării curenților de scurt circuit în condițiile schimbului reglabil de putere activă dintre șinele menționate [2]. În cazul conjugării regulatorului parametric de putere examinat cu linia de transport a energiei electrice ce posedă o destinație mai generală, apar un șir de noi particularități de care trebuie de ținut cont la soluționarea problemelor de utilizare a RPP cu executare constructivă tehnică asemănătoare. Depistării și utilizării acestor particularități este dedicat prezentul articol.

Particularitățile de bază a regimului static a regulatorului parametric de putere la funcționare concomitentă cu linia de transport a energiei electrice

Condițiile de funcționare a regulatorului parametric de putere analizat la racordarea lui la începutul liniei, le reflectă schema de substituire din Fig.1. Sistemul de transmitere este

reprezentat prin tensiunea U_l , iar sistemul de recepționare – de tensiunea $U_2 = U_l e^{j\delta}$. Totodată, vom reieși din faptul, că sistemele interconectate sunt capabile de a menține destul de exact egalitatea modulelor tensiunilor din rețea ($[U_1]=[U_2]$). Decalajul de fază δ dintre aceste tensiuni este o coordonată arbitrară (independentă de noi) de dirijare, ce se determină de regimul general al sistemului energetic și se modifică într–un oarecare diapazon limitat. Linia de transport a energiei electrice pentru expunerea simplificată ulterioară este prezentată prin reactanța inductivă X, ce la rândul său, determină unghiul de sarcină γ determinat de trecerea curentului I_r .

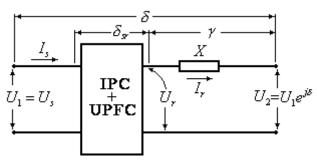


Fig.1. Condițiile de funcționare a regulatorului parametric de putere racordat la începutul liniei

În sine RPP dirijat prin intermediul convertizorului electronic de putere în Fig.1 este reprezentat prin blocul IPC+UPFC. Valorile electrice $(U_s, I_s, U_r, I_r, i_s, \delta_{sr})$ dependente de blocul susmenționat, corespund pe deplin schemei principiale și diagramei vectoriale a instalației descrise în [1]. La fel, este prezentat faptul, că puterea activă și reactivă la intrare (P_s, Q_s) și la ieșire (P_r, Q_r) în procesul reglării se modifică în corespundere cu egalitățile:

$$P_{r} = S_{m} \left[\cos \left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr} \right) + \frac{m}{\sin \frac{\psi}{2}} \sin \alpha \right];$$

$$P_{s} = S_{m} \left[\cos \left(\delta_{sr} - \frac{\psi}{2} \right) + \frac{m}{tg \frac{\psi}{2}} \frac{U_{s}}{U_{r}} \sin \left(\delta_{sr} - \frac{\psi}{2} + \alpha \right) \right];$$

$$Q_{r} = S_{m} \left[\sin \left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr} \right) - \frac{m}{\sin \frac{\psi}{2}} \cos \alpha \right];$$

$$Q_{s} = S_{m} \left[\sin \left(\delta_{sr} - \frac{\psi}{2} \right) - \frac{m}{tg \frac{\psi}{2}} \frac{U_{s}}{U_{r}} \cos \left(\delta_{sr} - \frac{\psi}{2} + \alpha \right) \right].$$

De menționat, că în corespundere cu [1] parametrii m și α caracterizează faza vectorului suplimentar de dirijare \dot{m} ce-l produce blocul UPFC, iar unghiul nereglabil Ψ este dat de transformatorul cu decalaj de fază din componența blocului IPC. Reglarea vectorului $\dot{m} = me^{j\alpha}$ este urmată de modificarea curentului de sarcină I_r ce se determină în felul următor:

$$|I_r| = I_{mr} \sqrt{1 + \frac{m^2}{\sin \frac{\psi}{2}} - 2 \frac{m}{\sin \frac{\psi}{2}} \sin \left[\left(\frac{\psi}{2} - \delta_{sr} \right) - \alpha \right]},$$

unde $I_{mr} = 2BU_s$, iar valoarea B - conductanța reactanțelor pare a instalației IPC.

Instalația IPC posedă o rezistență interioară mare, adică este o sursă de curent reglabil. Tensiunea U_r în punctul de racordare este foarte dependentă de valoare și faza curentului I_r . De aceia, examinarea ordonată a strategiei de dirijare cu regimul RPP cu utilizarea convertizorului electronic de putere poate fi asigurată numai în condițiile sarcinii concrete a regimului de funcționare după tensiune U_r . În dependență de cerințele din partea sistemului energetic, se poate formula un număr impunător de diferite condiții. Drept exemplu concret în baza căruia vom demonstra unul din variantele posibile a strategiei de dirijare, aplicăm cerința practică destul de răspândită ce se reduce la condiția de menținere a egalității tensiunilor de lucru de la intrare și ieșire a instalației, adică $U_r = U_s$.

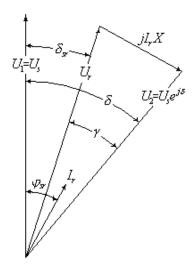


Fig.2 Diagrama vectorială pentru condiția de menținere a egalității tensiunilor de lucru de la intrare și ieșire $U_r = U_s$

Diagrama vectorială ce reprezintă această condiție este prezentată în fig.2. Din diagramă reiese, că condiția acceptată se îndeplinește în cazul când la modificarea spontană a unghiului δ , valoarea și faza curentului I_r se reglează astfel, încât triunghiul format din vectorii U_r , jI_rX și $U_2 = U_s e^{j\delta}$ să păstreze forma triunghiului isoscel.

Pentru aceasta este necesar de a menține permanent următoarele egalități, reieșind din diagrama vectorială:

$$\varphi_{sr} = \delta - \frac{\gamma}{2}; \quad \alpha_{1,2} = \frac{\gamma}{2} \pm \arccos \left[\frac{\sin \frac{\psi}{2}}{m} \sin \left(\frac{\psi}{2} + \frac{\gamma}{2} - \delta \right) \right],$$
unde $\gamma = arc \cos \left(1 - \frac{I_r^2 X^2}{2U_s^2} \right).$

Caracteristicile de calcul $\alpha(\delta)$, $\gamma(\delta)$ şi $I_r(\delta)$ ce reprezintă strategia de dirijare examinată, sunt prezentate în fig.3. Caracteristicile menționate corespund celor trei valori diferite a lungimii unghiulare de bază (γ_0) a liniei: $\gamma_0 = 0^\circ$ (linia lipsește), $\gamma_0 = 15^\circ$ și $\gamma_0 = 30^\circ$. Acestea și toate celelalte calcule sunt efectuate pentru m = 0,075 = const și restul condițiilor luate în calculele caracteristicilor respective [1].

În continuare se efectuează calculele caracteristicilor de lucru a regulatorului $P_r(\delta)$, $Q_r(\delta)$, $P_s(\delta)$ și $Q_s(\delta)$, ce determină domeniul de existență a regimului în condițiile date. Totalitatea caracteristicilor menționate este reprezentată în fig.4.

Rezultatele de calcul obținute denotă faptul, că pentru condiția $U_r = U_s$, domeniul de existență a regimului se deplasează pe axa δ în dependență de lungimea unghiulară a liniei. La proiectarea instalației valoarea γ_0 este o valoare acceptată (dată). De aceea condiția $U_r = U_s$ determină diapazonul valorilor unghiului δ în limita cărora regulatorul își îndeplinește funcția sa. De remarcat că necoincidența figurilor ovale ce caracterizează valorile limită P_r și P_s , crește cu majorarea γ_0 , totodată cea mai mare divergență se observă în parte stângă a diapazonului respectiv a valorilor unghiului δ . Diferența $(P_r - P_s)$ determină puterea activă transmisă prin convertizorul electronic de putere. Deoarece puterea reactivă prin convertizor nu trece, valoarea maximală a acestei diferențe caracterizează puterea de calcul a convertizorului. Caracteristicile respective sunt prezentate în Fig.5 de unde se observă că cu creșterea lungimii liniei, se majorează și puterea de calcul a convertizorului electronic.

De remarcat de astfel, că caracterul modificării puterii reactive Q_s pe șinele sistemului de transmitere este o urmare pasivă a strategiei de dirijare adoptate și, în special, la $\gamma_0 = 30^\circ$ această putere devine destul de impunătoare. De aceea, sistemul de transport a energiei electrice necesită o echipare cu mijloace respective de compensare transversală sau puterea deplină repartizată de substația de alimentare trebuie să depășească cu mult puterea liniei pentru care funcționează instalația IPC.

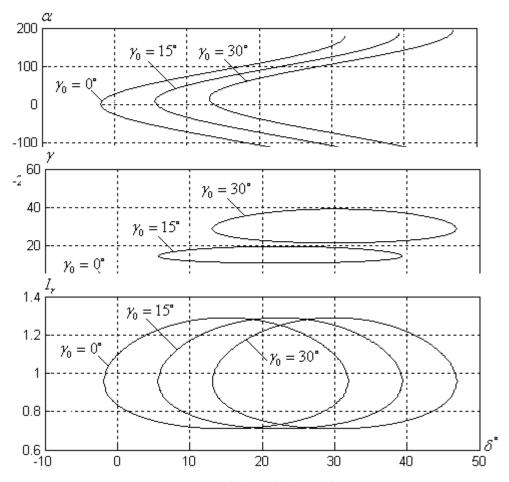


Fig.3. Caracteristicile de calcul $\,lphaig(\deltaig)$, $\,\gammaig(\deltaig)$ și $\,I_{r}ig(\deltaig)$ ce reprezintă strategia de dirijare

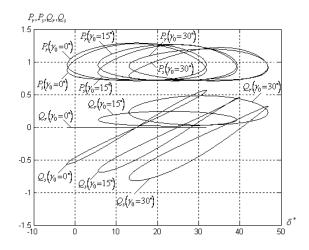


Fig.4. Caracteristicile de lucru a regulatorului $P_r(\delta),\ Q_r(\delta),\ P_s(\delta)$ și $Q_s(\delta)$

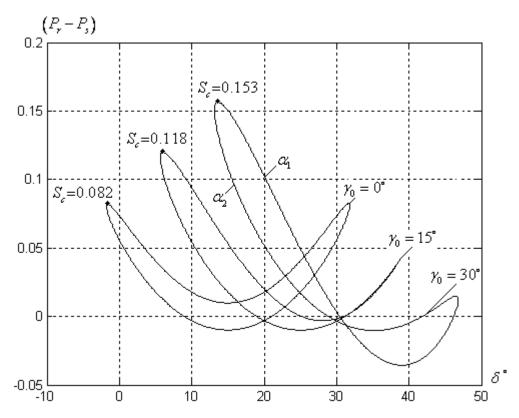


Fig.5. Puterea de calcul a convertizorului

Încheiere

Regulatorul parametric de putere este o sursă de curent reglabil. La funcționarea regulatorului concomitent cu linia de transport a energiei electrice, tensiunea de la ieșirea lui este dependentă de valoarea și faza curentului de lucru a instalației. Gradul dependenței menționate crește pe măsura majorării lungimii liniei. Utilizarea convertizorului electronic de putere, de asemenea, și selectarea strategiei de dirijare respective, permite asigurarea schimbului liber de putere activă dintre nodurile sistemului energetic cu ajutorul IPC la orice cerințe față de calitatea tensiunii de iesire a instalatiei.

Bibliografie

- [1]. Regulator parametric de putere cu două nivele de dirijare liberă, Kalinin L.P., Zaiţev D.A., Tîrşu M.S., Problemele energeticii regionale Nr.1, 2006.
- [2]. The IPC technology a new approach for substation uprating with passive short-circuit limitation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.1, January 1998.

Prezentat la 14 octombrie a. 2008

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРЕДИКТОРАХ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЖИЛЫХ МАССИВОВ ГОРОДА.

Вороненко Д. И. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Аннотация: Работа посвящена поиску и классификации метеорологических сценариев, для использования в качестве дополнительной входной информации в предикторах связного потребления электрической и тепловой энергии в коммунально-бытовом секторе. В качестве математического аппарата для кластеризации погодных данных использованы самоорганизующиеся карты Кохонена. Результаты работы позволили улучшить качество прогнозов энергопотребления.

Ключевые слова: прогнозирование электропотребления, метеосценарий, карты Кохонена.

CLASIFICAREA SCENARIILOR METEOROLOGICE PENTRU UTILIZAREA LOR ÎN PREDICTOARELE CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN CARTIERELE DE LOCUIT ORĂȘENEȘTI Voronenko D. I.

Universitatea Tehnică Națională "Kharkiv Polytechnic Institute"

Rezumat: Lucrarea este consacrată cercetării și clasificării scenariilor meteorologice pentru utilizarea lor în calitate de informație suplimentară de ieșire în predictoarele consumulului coerent al energiei electrice și termice în sectorul comunal. În calitate de aparat matematic pentru analiza de cluster a condițiilor meteo sunt utilizate hărțile autoorganizatoare ale lui Kohonen. Rezultatele lucrării au dat posibilitatea îmbunătațirii calității pronosticurilor consumului de energie.

Cuvinte-cheie: pronosticare a consumului de energie, scenariu meteo, hărți de Kohonen.

CLASIFICATION OF METEOROLOGICAL SCENARIOS FOR USING IN PREDICTORS OF RESIDENTIAL AREA POWER CONSUMPION Voronenko D. I.

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Abstract: The work is dedicated to identification and classification of meteorological scenarios for using them as additional input information in predictors of coherent consumption of electrical and thermal energy in residential area. Kohonen self-organized maps were used as mathematical apparatus for clusterization of weather data. Research results led to quality improvement of energy consumption forecasts.

Key words: energy consumption forecasting, meteorological scenarios, Kohonen maps.

Введение

В последние десятилетие наиболее быстро развивающимся и сложным по количеству влияющих сил и доступным методам регулирования сектором энергосистем постсоветских стран является коммунально-бытовой сектор потребления. На фоне снижения потребления электроэнергии промышленными предприятиями, вызванного финансово-экономическим кризисом конца 90-х, коммунально-бытовой сектор, вооружаясь все новыми обогревателями, кондиционерами и другими бытовыми приборами, постоянно повышает потребление. В этих условиях особую важность приобретает решение задачи точного оперативного прогнозирования бытового электропотребления.

Данная работа является частью комплексного исследования по построению предиктора связного потребления электрической и тепловой энергии на нужды отопления жилых массивов города, используемого при моделировании и управлении региональным энергопотреблением [5].

В качестве математического аппарата для моделирования энергопотребления используются искусственные нейронные сети, позволяющие воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости и обладающие повышенной надежностью при работе с искаженными и неполными данными. Предиктор энергопотребления жилого массива города, разработанный для теплового района Харьковской ТЭЦ, описывается следующим выражением:

$$W'(t+1) = \text{NN}\left(\rho(t+1), \gamma(t+1), \underline{T'}(t+1), \overline{T'}(t+1), \underline{T}(t), \overline{T}(t), Q'(t+1), Q(t), W(t)\right),$$

где t — индекс текущего дня; ρ — показатель продолжительности светлого времени суток; γ — тип дня недели; \underline{T}' — прогноз минимальной ночной температуры; \overline{T}' — прогноз максимальной дневной температуры; \underline{T} — фактическая минимальная ночная температура; \overline{T} — фактическая максимальная дневная температура; Q' — планируемый отпуск тепла жилому массиву; Q — потребление тепловой энергии жилым массивом; W — потребление электрической энергии; W' — прогноз потребления электрической энергии; $NN(\cdot)$ — выполняемое нейронной сетью функциональное преобразование вход-выход.

В рамках данной структуры входных параметров модели нейронная сеть может быть обучена выдавать как одношаговые (на сутки), так и многошаговые (до одного месяца) прогнозы с уровнем абсолютной ошибки 3-5%. При этом исследования, выполненные с использованием алгоритмов пошагового включения и исключения переменных модели, а также алгоритма вычисления важности входных переменных модели, статистически показали, что определяющее влияние на точность и устойчивость прогнозов имеют погодные факторы. А значит, наиболее перспективным путем повышения качества прогноза является их более тщательный учет.

Для решения этой задачи необходимо детально оценить влияние фактических и, особенно, прогнозных метеорологических данных и выбрать наилучший формат их представления в предикторе энергопотребления.

1. Роль метеоданных при прогнозировании энергопотребления жилых массивов

В отечественных гидрометеоцентрах для прогнозирования погоды применяется синоптико-гидродинамикостатистический метод, основанный на формах атмосферных циркуляций [2]. Для составления прогнозов погоды используют подробно наполненные фактическими метеорологическими данными синоптические карты, прогностические карты барического поля и способы расчета тех или иных метеорологических элементов. Этот метод хорош для прогнозирования погоды для относительно больших территорий. При необходимости же точного прогноза на региональном уровне он не всегда позволяет учесть микроизменения в атмосферных фронтах и влияния ландшафта.

Как известно, крупные города с большим количеством промышленных объектов создают специфический климат, являющийся результатом влияния хозяйственной деятельности человека. Поэтому изменения температуры в крупном городе, таком как

Харьков, отличаются от изменений идущих вместе с фронтом. Например, в работе [4] показано, что из-за особенностей застройки и характера подстилающей поверхности во время отопительного сезона температура наружного воздуха существенно различается в разных районах города и его окрестностях.

Нами была проанализирована база погодных данных (замеры каждые три часа) для города Харькова за период от 1 июля 2001 по 1 августа 2005 года, собранная аппаратно-программным комплексом «Зевс» ООО «Харьковская ТЭЦ-5». Для анализа изменчивости температуры в разные сезоны года были построены графики (см. рис. 1) среднесуточных температур в летние и зимние месяцы.

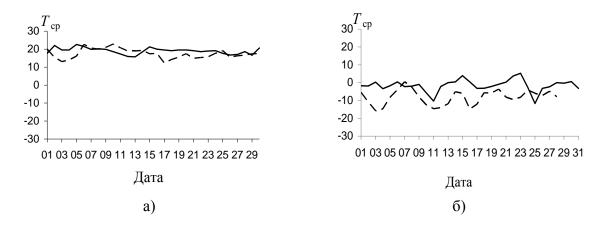


Рис. 1. Среднесуточная наружная температура в г. Харькове (2003 г.) а) июнь (———) и август (———); б) декабрь (———) и февраль (————)

Подтверждая результаты исследований предыдущих лет [5], кривые на графиках демонстрируют, что в климатической зоне г. Харькова температура в зимние месяцы меняется намного резче, чем в летние. Это, в свою очередь, негативно сказывается на оправдываемости прогнозов температуры воздуха. Так согласно [2], прежде всего, велика абсолютная ошибка прогнозов — около 5°С. В весенние и осенние месяцы прогнозы значительно точнее — абсолютная ошибка составляет 3,5°С. В летние месяцы абсолютная ошибка прогнозов уменьшается до 2,4°С.

Все это говорит о том, что качество синоптических прогнозов особенно в отопительный сезон не является оптимальным. И это не может не сказываться на эффективности работы региональных систем энергоснабжения и, в частности на качестве теплоснабжения населения. Как указывается в [4], потенциальный экономический эффект от использования идеальных прогнозов температуры воздуха на предприятиях муниципального теплоснабжения вместо оперативных прогнозов текущего уровня оправдываемости может составлять до 25–30%.

В свете вышесказанного, наиболее рациональным путем учета сезонных особенностей изменения погоды в модели энергопотребления представляется выделение и использование в качестве входных переменных не отдельных значений наружной температуры, а сценариев ее развития. Разбиение динамики изменения температуры за несколько дней на отдельные метеосценарии позволит упростить входную информацию предиктора энергопотребления и его внутренние связи на основе знаний, извлеченных из базы данных погоды, и полученных от экспертов.

Чтобы повысить уровень обобщения и уйти от абсолютных значений в метеосценарии, было предложено перейти к категориям, таким как изменение температуры вверх или вниз на определенное число градусов (или отсутствию значимого изменения за день).

Выбор количества дней, которые входят в метеосценарий, осуществлялся, руководствуясь следующими соображениями. Чтобы учесть естественный цикл смены тенденции погоды, установленный Мультановским [3] и равный 12 дням, необходимо, чтобы продолжительность цикла Мультановского была кратна количеству дней в метеосценарии. Таким образом, варианты следующие: 2, 3, 4, 6 дней. Два дня, очевидно, слишком малый промежуток для метеосценария, 3 дня дают 3^3 =27 вариантов изменения, если каждый день в ряду метеосценария кодировать одной из трех категорий (увеличение, уменьшение или неизменность температуры), 4 дня дают 3^4 =81 вариант, что представляется слишком сложным для экспертного и визуального анализа.

В поддержку выбора 3 дней для определения метеосценариев выступают также результаты работы проф. Вороновского [5], где показано, что наружная температура за 2 предыдущих дня еще влияет на энергопотребление, а большая история температуры не дает улучшения в качестве работы предиктора энергопотребления.

Таким образом, было решено при помощи статистических методов кластеризации выявить кластеры метеосценариев в базе архивных данных гидрометеоцентра г. Харькова за период с 1 октября 2001 года по 1 мая 2007 года и провести их анализ с экспертной точки зрения, чтобы использовать в дальнейшем данное разбитие на кластеры для прогнозирования температуры.

2. Выявление кластеров метеосценариев с помощью нейросетей Кохонена

Для статистического выявления кластеров метеосценариев было решено использовать нейросети Кохонена или самоорганизующиеся карты Кохонена, которые являются одним из наиболее передовых методов кластеризации. Нейросеть Кохонена учится понимать саму структуру данных, она может эффективно распознавать кластеры в данных, а также устанавливать близость классов [6], [7]. Эта ее особенность и явилась определяющей при выборе данного метода для решения задачи нахождения оптимального количества типов метеосценариев, исходя из структуры эмпирических данных, без вмешательства рассуждений экспертов и априорной информации, то есть исходя из данных нам Природой кластеров поведения погоды. Вместе с тем, к недостаткам карт Кохонена можно отнести наличие искажений, неизбежных при проецировании многомерного пространства на пространство меньшей размерности, а также зависимость результатов от параметров инициализации.

В связи с тем, что для практических задач оперативного управления энергоснабжением коммунально-бытовых потребителей, более важным является изменение температуры по сравнению с текущим значением, чем ее абсолютное значение, было решено использовать базу данных на основе изменений минимальной и максимальной температуры за последний и два предыдущих дня, а также средней текущей температуры. Данное разбиение является наиболее логичным, так как в данном случае мы ищем кластеры на основе изменений. Если искать кластеры на основе только абсолютных значений, то превалировать будут разбиения по принципу "тепло—холодно", что не имеет практического значения для выявления метеосценариев.

На первом этапе исследований в базу данных для поиска кластеров метеосценариев были включены следующие переменные: сезон S, месяц M, атмосферное давление P, изменение минимальной температуры $\Delta T_{\min}(t)$, изменение максимальной температуры $\Delta T_{\max}(t)$, изменение минимальной температуры день назад $\Delta T_{\min}(t-1)$, изменение максимальной температуры день назад $\Delta T_{\max}(t-1)$, изменение минимальной температуры 2 дня назад $\Delta T_{\min}(t-2)$, изменение максимальной температуры 2 дня назад $\Delta T_{\max}(t-2)$.

По результатам первого эксперимента было решено исключить из набора входных данных параметры сезон S и месяц M. Так как если в набор данных входят сезон и месяц, то наибольший вес получают 4 и 11 кластеров, что рефлексирует 4 сезона года и 12 месяцев в году. Как показало визуальное исследование результатов, данные за июнь и июль были сведены к одному кластеру, поэтому во втором случае количество кластеров 11, а не 12. После исключения сезона и месяца кластеризация проводится только на основе цифровых данных, без экспертного деления на категории. Однако чтобы все же дать нейросети информацию о периоде года, было решено включить среднесуточную температуру как базис, от которого может отталкиваться нейросеть для разделения метеосценариев и их вероятностей.

Также на этом этапе исследования из набора входных данных было исключено атмосферное давление P, оказавшееся малозначимым метеорологическим фактором. Его различные значения распределены по различным кластерам хаотично, поэтому удаление давления не привело к изменению количества или расположения кластеров.

Таким образом, для дальнейших экспериментов набор входных переменных стал следующим: изменение минимальной температуры $\Delta T_{\min}(t)$, изменение максимальной температуры $\Delta T_{\max}(t)$, изменение минимальной температуры день назад $\Delta T_{\min}(t-1)$, изменение максимальной температуры день назад $\Delta T_{\max}(t-1)$, изменение минимальной температуры 2 дня назад $\Delta T_{\min}(t-2)$, изменение максимальной температуры 2 дня назад $\Delta T_{\max}(t-2)$, среднесуточная температура T(t).

Карты Кохонена обучались со следующими настроечными параметрами: количество итераций -100; мера обучения -0.1; размер сети -40×40 ячеек; метрика для подсчета расстояния между точками — квадрат эвклидова расстояния.

После обучения набор данных был разделен на 25 кластеров. Разбиение на кластеры и характеристические проекции каждой входной переменной представлены на рис. 2.

Для характеристических проекций карт Кохонена координаты по оси абсцисс и ординат не несут информационной нагрузки, так как проекция формируется в зависимости от близости многомерных точек, основная цель — группировка многомерного пространства в кластеры. Основную информационную нагрузку несет цвет или оттенок цвета. Шкала цвета показана на каждой диаграмме справа.

Согласно теории анализа карт Кохонена [6], [7] после обучения необходимо провести первичный визуальный анализ карт, т.е. в нашем случае, провести проверку как соотносятся найденные кластеры с изменениями температур и средней температурой, для подтверждения правильности статистической разбивки на кластеры.

При визуальном анализе не сложно заметить, что переменные $\Delta T_{\min}(t)$ и $\Delta T_{\max}(t)$, $\Delta T_{\min}(t-1)$ и $\Delta T_{\max}(t-1)$, $\Delta T_{\min}(t-2)$ и $\Delta T_{\max}(t-2)$, сильно коррелируют попарно. Возможно, стоит взять вместо пары экстремальных соответствующую среднесуточную температуру. Такое упрощение, с одной стороны, исключит некоторую информацию, с другой стороны, исключит избыточность. Так как в данном исследовании не стоит задача прогнозирования погоды, а только задача поиска кластеров, такое упрощение входной информации, с одновременным исключением сильно коррелирующих переменных, является вполне допустимым.

Таким образом, набор входных переменных для экспериментов с картами Кохонена, редуцируется до следующего: среднесуточная температура T(t), изменение среднесуточной температуры между сегодняшним и вчерашним днем $\Delta T(t)$, изменение среднесуточной температуры между вчерашним и позавчерашним днем $\Delta T(t-1)$, изменение среднесуточной температуры между позавчерашним днем и 3 днями назад $\Delta T(t-2)$.

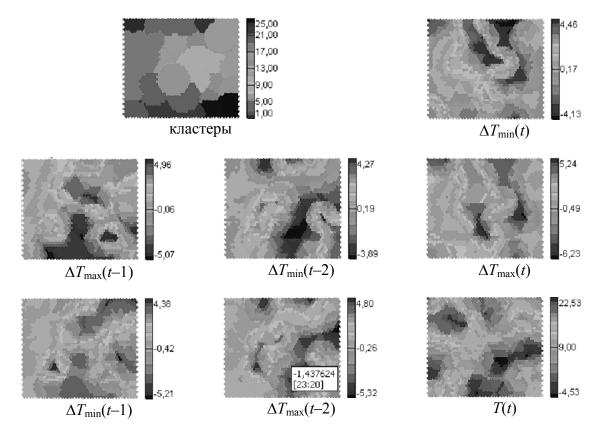


Рис. 2. Разбиение на кластеры и характеристические проекции входных переменных

При таком наборе, визуальный анализ (рис. 3) четко показывает, что все переменные описывают разные области пространства, т.е. эффективно разделяют пространство на кластеры.

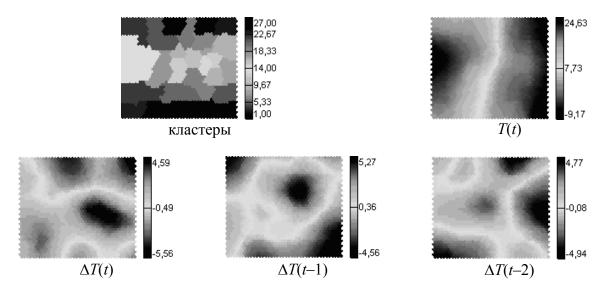


Рис. 3. Разбиение на 27 кластеров

Следующим вопросом является определение оптимального количества кластеров в наборе данных. Для его решения разработано несколько методов иерархической кластеризации. В данной работе был использован метод среднего объединения [7], который показал, что со статистической точки зрения оптимальными являются варианты: 2, 4, 7 и 27 кластеров. Поочередно тренируя и визуализируя нейросеть

Кохонена при разбиении на указанное число кластеров, было выявлено, что наибольшим уровнем детальности и практической значимости обладает вариант 27 кластеров, который и принят для дальнейшего анализа.

3. Экспертное выделение базовых метеосценариев

Для выделения базовых метеосценариев был проведен следующий вид анализа – поиск практически значимых зависимостей внутри кластера. Он выполняется при помощи анализа визуального представления откликов нейросети Кохонена для записей, принадлежащих одному кластеру.

Основной задачей анализа откликов было извлечение знаний из кластерного разбиения, произведенного статистическим методом на основе исторических данных. Для каждой записи (т.е. для каждого дня и двух предыдущих дней) анализировалась ее одновременная принадлежность к тому или иному кластеру и паттерну (шаблону) изменения температуры. Чтобы соотнести непрерывные изменения дискретным паттернам, вычислялось изменение среднесуточной температуры для двух смежных дней. Если оно больше на 2°C, то следующий день считался днем повышения температуры; если меньше на 2°C - днем понижения температуры; если изменение не превышает 2°C в любую сторону, то погода считалась неизменной.

Уровень категоризации в метеосценариях, равный 2° С был выбран исходя из того, что обычно метеопрогноз считается оправдавшимся, если разница на текущий день составляет $1,5^{\circ}$ С, на первые сутки -2° С, на вторые $-2,5^{\circ}$ С и на третьи -3° С [1].

Некоторые значимые паттерны, такие как неизменность температуры на протяжении 3-х дней или непрерывное повышение температуры на протяжении 3-х дней были видимы сразу, т.е. почти все записи, относящиеся к этим кластерам, соответствовали этому паттерну. Такие кластеры были названы гомогенными. В остальных кластерах записи, входящие в паттерн распределялись на несколько категорий. Методом проб и ошибок был выведен уровень гомогенности равный 84%, при котором кластеры оказалось возможным объединить в группы и получить экспертно значимое разбиение на 9 кластеров. Эти 9 кластеров названы базовыми метеосценариями поведения погоды за три последних дня.

Для удобства анализа базовых метеосценариев введено их графическое, мнемоническое и числовое кодирование, представленное в табл. 1.

В столбце «Графическое отображение метеосценария» прямая горизонтальная линия означает, что температура постоянна (т.е. изменилась не более чем на 2°С); наклонная линия вверх означает повышение температуры более чем на 2°С; наклонная линия вниз означает понижение температуры более чем на 2°С; горизонтальная линия из точек означает любой тип изменения температуры (понижение, повышение или неизменность температуры). Для удобства в столбце «Мнемоническое обозначение» каждому сценарию сопоставлена буква латинского алфавита или символ, напоминающий своей формой график движения температуры. В последнем столбце представлено числовое кодирование метеосценариев, используемое в разработанном программном обеспечении. Здесь «—1» обозначает понижение температуры в соответствующий день из тройки анализируемых, «1» — повышение температуры, «0» — неизменность температуры и «*» означает любое поведение в соответствующий день.

Таблица 1 – Базовые метеосценарии

№	Графическое отображение	Мнемоническое	Числовое
	базового метеосценария	обозначение	кодирование
1		«A»	*, 1, -1

2	«V»	*, -1, 1
3	 « - »	0, 0, 0
4	«/»	1, 1, 1
5	«\»	-1, -1, -1
6	«F»	*, 1, 0
7	«L»	*, -1, 0
8	«Т»	*, 0, -1
9	«J»	*, 0, 1

4. Статистический анализ предикативной способности метеосценариев

В рамках исследований также был выполнен статистический анализ предикативной способности метеосценариев. Ниже представлена часть его результатов.

В табл. 2 приведено распределение наступления последующего метеосценария в зависимости от начального. Другими словами — вероятность следования одного метеосценария за другим. Каждая строка указывает начальный метеосценарий, столбцы — следующий за ним. Суммирование процентов в таблицах осуществляется по строкам.

Таблица 2 – Распределение частот следования базовых метеосценариев, %

	«A»	«V»	<	«/»	«/»	«F»	«L»	«T»	«J»
«A»	26,80	15,46	0	18,56	0	0	0	0	39,18
«V»	17,98	28,09	0	0	19,10	0	0	34,83	0
<<->>>	0	0	63,06	0	0	18,79	18,15	0	0
«/»	0	9,68	0	19,35	0	0	0	0	70,97
«/»	11,86	0	0	0	18,64	0	0	69,49	0
«F»	0	15,87	0	11,81	0	36,53	0	0	35,79
«L»	18,68	0	0	0	12,06	0	34,63	34,63	0
«Т»	0	0	40,74	0	0	40,74	18,52	0	0
«J»	0	0	28,49	0	0	26,26	45,25	0	0

В табл. 3 приведено относительное распределение поведения температуры на следующий день после каждого из базовых метеосценариев. Каждая строка указывает начальный метеосценарий, столбцы – поведение температуры на следующий день

Таблица 3 – Распределение поведения температуры после метеосценария

Базовый	метеосценария, %		
метеосценарий	снижение	постоянность	повышение

«A»	34,02	49,48	16,49
«V»	16,85	48,31	34,83
~~ >>	20,95	62,86	16,19
«/»	29,03	51,61	19,35
«\»	18,64	52,54	28,81
«F»	24,35	58,30	17,34
«L»	11,67	56,81	31,52
«T»	25,47	55,28	19,25
«J»	21,23	54,19	24,58

Как видно, почти для всех метеосценариев неизменная температура на следующий день проявляется в среднем в 50% случаев, что в очередной раз подтверждает практичность инерционного прогноза в случае отсутствия хорошей статистической модели. Однако, наиболее важно то, что некоторые метеосценарии с большей вероятностью предвосхищают повышение температуры на следующий день, например, такие как «V», «\» и «L», а некоторые – снижение, например, такие как «А» и «/».

Заключение

В ходе анализа базы данных погодных условий для города Харькова за 2001-2007 гг. с помощью кластерного анализа были найдены 27 статистических кластеров, на базе которых с помощью самоорганизующихся карт Кохонена были выделены 9 базовых метеосценариев.

Следует отметить, что преобразование указанных 27 статистических кластеров в 9 практически значимых базовых классов произошло в основном за счет индифферентности к поведению температуры в наиболее удаленный день (как можно заметить, в табл. 1 обозначение «*» встречается только для кодирования изменения произошедшего два дня назад). Таким образом, автоматическая кластеризация подтвердила, что более дальнее по времени изменение погоды играет меньшую роль, причем с точки зрения не только числового, но и сценарного подхода.

В качестве полученных новых знаний можно также отметить некоторые «нелогичности» в распределении метеосценариев по группам, например, с точки зрения экспертов кажется более правильным объединить сценарии типа «-1, 0, 1» и «0, -1, 1», как отображающие точку перегиба или смены в тенденциях погоды. Однако, согласно статистическим данным сценарий «-1, 0, 1» объединен со сценариями «0, 0, 1» и «1, 0, 1», что доказывает большее влияние поведения температуры в предыдущий день на прогноз поведения погоды на завтра, чем влияние общей формы движения температуры.

Категоризиция динамики изменения температуры на метеосценарии позволяет осуществить более полный учет метеоданных во входной информации предиктора энергопотребления без резкого увеличения вектора его входов и, соответственно сложности настройки. Выявленные в результате данной работы типы метеосценариев были использованы как дополнительные входные параметры для предиктора энергопотребления. Это, совместно с переходом от прямого прогнозирования энергопотребления к прогнозированию его категорий, позволило повысить качество прогнозов.

Так как часть работы по оценке динамики изменения погоды фактически уже была выполнена кластерным анализом до начала статистического прогноза

энергопотребления, вновь синтезированный предиктор для Алексеевского жилого массива г. Харькова показал увеличение числа верно предсказанных значений. И хотя прирост составляет порядка 2,5% от всех тестовых данных, он соответствует тем критическим ситуациям, в которых предыдущие версии предикторов давали неустранимый высокий уровень ошибки, затруднявший их практическое применение.

Литература

- 1. Сорочинский М.А Гидрометеорологическое обеспечение организаций топливно-энергетического комплекса и пути его совершенствования // Труды ГНЦ СССР. 1989. вып. 302, с. 3-13.
- 2. Бурлуцкая В.М., Князева В.И. Опыт применения синоптикогидродинамикостатистического метода к прогнозу температуры на третьи и пятые сутки. // Труды ГНЦ СССР. 1978. вып. 205, с. 26-37.
- 3. Мультановский Б.П. Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. М.: ЦУУГМС, 1933. Ч.1.
- 4. Хандожко Л.А. Методика оценки экономического эффекта прогноза температуры воздуха для ТЭЦ // Труды Главной геофизической обсерватории. 1989. № 528. C.58-74.
- 5. Вороновский Γ . К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях X.: Изд-во «Харьков», 2002.— 240 с.
- 6. Kohonen T. Self organized formation of topologically correct feature maps. // Biological Cybernetics. 1982. N43.- N.59-69.
- 7. Christopher M. Bishop Neural Networks for Pattern Recognition Oxford University Press, Oxford, 1995. 482 p.

Сведения об авторах

Д. И. Вороненко – аспирант кафедры электрических станций Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Украина, область научных интересов: применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования в энергетике, e-mail: dvonko@gmail.com

Получено редакцией 4 сентября 2008 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ

Шит М.Л., Журавлев А.А., Шит Б.М.

Республика Молдова, MD2028, Кишинев, Академическая, 5 Институт энергетики Академии наук Молдовы, E-mail:ieasm@ie.asm.md

Аннотация: Рассматриваются динамические характеристики газоохладителя теплового насоса, полученные путем решения уравнений его динамики. Рассмотрена система управления газоохладителем теплового насоса для подогрева сетевой воды, поступающей от ТЭЦ в централизованную систему теплоснабжения. Показана возможность использования ПИД-регулятора с коэффициентами, изменяющимися в зависимости от режима работы газоохладителя для контура компенсации возмущений по температуре прямой сетевой воды, поступающей на узел смешения прямой и обратной сетевой воды. Ключевые слова: тепловые насосы, диоксид углерода, системы управления.

DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DINAMICE ALE RĂCITORULUI DE GAZE A POMPEI DE CĂLDURĂ ÎN CICLUL TRANSCRITIC

Rezumat. Sunt examinate caracteristicile de dinamică ale răcitorului de gaze al pompei de căldură, care sunt obținute prin soluționare a equațiilor lui de dinamică în derivate particulare. Este examinat sistemul de dirijare a răcitorului de gaze pentru încălzire a apei de rețea, care este livrată de la CET în sistemul centralizat de termoficare. Este demonstrată posibilitate a utilizării regulatorului PID cu coeficienții variabili în dependență de regimul de funcționare a răcitorului de gaze. Răcitorul de gaze este o parte a sistemului de stabilizare a apei tur în sistemul de termoficare după nodul de amestec al apei retur și apei tur de la CET.

Cuvinte-cheie: pompele de căldură, bioxid de carbon, sisteme de dirijare.

EVALUATION OF DYNAMIC CARACTERISTICS OF GAS COOLER OF THE CARBON DIOXIDE HEAT PUMP ÎN THE TRANSCRITICAL CYCLE

Abstract. There are examined dynamic characteristics of heat pump gas cooler, which are obtained by means of the solution of equations of dynamics in partial derivatives. It is examined the control system of the heat pump, which is used for the heating of the heating—system water, supplied from CHP to the district heating system. Possibility of PID-controller with gain scheduling utilization with the coefficients changing depending on gas cooler mode of operation for temperature disturbances compensation of direct heating—system water is shown. **Key words:** heat pumps, carbon dioxide, gas cooler, control systems.

y words. Heat pumps, eardon dioxide, gas cooler, control syst

1. Введение.

Настоящая работа является продолжением цикла работ авторов, посвященных использованию тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения с целью экономии газа на отопление. В предыдущих работах были предложены структурные схемы тепловых насосов на диоксиде углерода (ТНСО2) для решения поставленной задачи, и показана экономическая эффективность для условий цен на газ и электрическую энергию в условиях Республики Молдова [1-7]. В соответствии с методикой [8] был рассчитан газоохладитель, выполненный на базе кожухозмеевикового противоточного теплообменника. При этом задача, связанная с расчетом динамических характеристик ТН к настоящему времени не решена в литературе по тепловым насосам на диоксиде углерода. Проблема заключается в том, что тепловой насос для рассматриваемой задачи работает в сверхкритическом цикле, и

характеристики газа меняются по длине газоохладителя (ГО) значительно. Методы расчета постоянных времени и коэффициентов усиления ГО в литературе отсутствуют. Это связано с трудностью решения уравнений динамики ГО, которые записываются в уравнений в частных производных. Работы, связанные с описанием теплообменников, как объектов управления с распределенными параметрами велись академиком Девятовым и его школой [9-11]. В этих работах предложен общий вид уравнений и указано, что для упрощения исследований необходимо свести эти уравнения к двумерным передаточным функциям. В дальнейших работах проф. Шевяковым [12,13] было показано, как перейти от систем уравнений в частных производных к отдельным уравнениям, не связанным между собой. В последующих работах L. Malinovsky [14], N.H.Abu-Hamdeh [15], D.Averous и др. [16], предлагались различные схемы численного решения уравнений динамики противоточного теплообменника. Однако и там задача решалась для объектов, где свойства теплоносителей не изменялись. Нами решена задача определения переходных характеристик ГО на СО2 на основании численного решения системы уравнений динамики с переменными коэффициентами. Рассмотрена структурная схема системы и построены переходные процессы для одного из контуров системы.

Условные обозначения: T_1 — температура газа после газоохладителя, T_2 — температура воды после газоохладителя, T_C — температура стенки, dt— интервал времени дискретизации, dx— шаг дискретизации по длине Γ O.

2. Объект управления

Принцип действия системы заключается в следующем. ТЭЦ, получая обратную воду от системы теплоснабжения, нагревает ее по пониженному температурному графику, причем требуемый догрев воды у потребителя обеспечивается за счет применения теплонасосных установок, установленных на ЦТП системы теплоснабжения. Обратная сетевая вода от ЦТП захолаживается в ТНУ и поступает обратно на ТЭЦ. При такой схеме обеспечивается значительная экономия газа на ТЭЦ, но при этом расходуется электроэнергия на привод ТНУ. При условиях, характерных для сложившегося уровня цен на тепловую энергию, газ и электрическую энергию в Республике Молдова эта схема является инвестиционно привлекательной и имеет простой срок окупаемости до 3-х лет при цене за 1 кВт ТНУ до 250 долл. США за 1 кВт тепловой мощности [1-5].

Суть работы системы управления температурой воды в т.1 схемы (рис.1) состоит в изменении температуры газа на выходе из газоохладителя 3 за счет скоординированного управления между мощностью компрессора 2, температуры газа на входе в компрессор и давления компрессора. Из трех компонентов управления самой инерционной является система регулирования температуры газа после перегревателя газа после испарителя. Дополнительно отметим, что рассматривается система качественного регулирования режима системы теплоснабжения, когда расход воды через отапливаемое здание не изменяется при изменении метеоусловий. В этой системе регулирование температуры воды осуществляется за счет работы подмешивающего насоса 4. Под номерами 6, 7 и 8 обозначены перегреватель газа, испаритель и переохладитель газа. Расход воды через насос 4 корректируется регулирующим вентилем 5.

Как показали результаты предварительно выполненных расчетов, передаточная функция замкнутой системы управления перегревателем газа по каналу «задание – температура газа на выходе» может быть аппроксимирована звеном с передаточной функцией вида:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{(T_{11}p+1)(T_{22}p+1)}. (1)$$

Управление такого вида вносит дополнительные требования к регулятору системы температуры газа после газоохладителя.

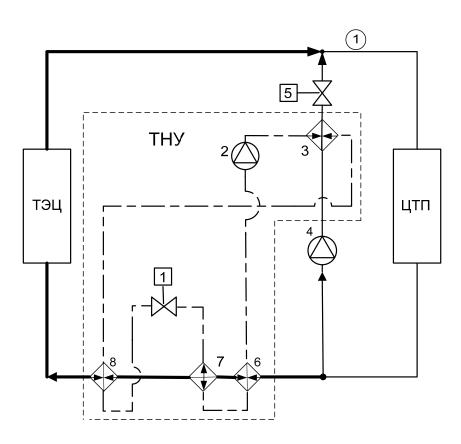


Рис.1.Схема использования ТНУ в системе теплоснабжения

Сокращения на рис.1: ЦТП – центральный тепловой пункт системы теплоснабжения. ТНУ – теплонасосная установка.

3. Математическая модель газоохладителя

Модели теплообменников «газ-жидкость», как объектов с распределенными параметрами исследовалась в работах В.Н. Девятова [8-10], Шевякова [11,12], однако, в их работах рассматривались теплообменники с параметрами теплоносителя, которые практически постоянны. Нами рассматривается работа теплообменника в сверхкритическом цикле, когда его параметры изменяются в зависимости от температур, давлений и расходов теплоносителей. Для определения статического режима работы газоохладителя использована методика, разработанная И.В. Деревичем и Е.Г. Смирновой [8].

Для определения инерционности газоохладителя (противоточного теплообменника «газ–жидкость») без учета тепловой инерционности стенки использованы уравнения В.Н. Девятова.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + v_1 \frac{dT_1}{dx} = K_{12}(v_1, v_2, c_1, \rho_1, c_2, \rho_2) \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} - v_2 \frac{dT_2}{dx} = K_{13}(v_1, v_2, c_1, \rho_1, c_2, \rho_2) \cdot (T_1 - T_2)$$
(2)

Газоохладитель ТНУ при работе в сверхкритическом цикле представляет собой динамическое звено с переменными параметрами.

При необходимости учета теплоемкости стенки газоохладитель, может быть описан системой из трех дифференциальных уравнений в частных производных [Девятов 1978, Шевяков, 1985]:

$$c_{G}G_{G}\frac{\partial T_{G}}{\partial t} + c_{G}m_{G}\frac{dT_{G}}{dx} = \alpha_{G}f_{G} \cdot (T_{C} - T_{G});$$

$$c_{S}G_{S}\frac{\partial T_{C}}{\partial t} = \alpha_{W}f_{W} \cdot (T_{W} - T_{C}) - \alpha_{G}f_{G} \cdot (T_{C} - T_{G});$$

$$c_{W}G_{W}\frac{\partial T_{W}}{\partial t} - c_{W}m_{W}\frac{dT_{W}}{dx} = \alpha_{W}f_{W} \cdot (T_{W} - T_{S})$$

$$(3)$$

при граничных условиях $T_G(0,t) = T_{G0}$, $T_W(L,t) = T_{W0}$ и нулевых начальных условиях.

Выходной величиной объекта управления является температура воды после газоохладителя $-T_2$. Управляющими воздействиями являются температура рабочего тела $T_1(0,t)$, и скорость его движения v_1 . Подобные задачи рассматривались в ряде работ, назовем, например [6]. Однако, в рассматриваемом случае в уравнениях (1) и (2) коэффициент α_G зависит от значений величин c_G, m_G, v_G . Решение этой системы уравнений может быть найдено методами приближенного интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных. В работе [16] показано, что для построения статической модели кожухозмеевикового теплообменника, работающего на диоксиде углерода в сверхкритическом цикле теплового насоса необходимо использовать метод расчета [16], а не дискретный метод (разбиение на участки (или ε – NTU метод)).

Были сделаны следующие предпосылки при решении системы уравнений (1):

- 1. Потерь тепла в окружающее пространство нет.
- 2. Скорость теплопередачи по всей длине аппарата пропорциональна разности первых степеней температур сред.
- 3. Периметр поперечного сечения поверхности раздела сред постоянен по всей длине аппарата.
- 4. Смешение теплоносителя в направлении движения сред незначительно и не учитывается.
- 5. Тепловая емкость стенки мала по сравнению с тепловой емкостью движущихся масс обменивающихся теплотой сред и не учитывается.
- 6. Свойства диоксида углерода изменяются по длине аппарата в зависимости от температуры и давления газа.
- 7. Именно п.6 является «камнем преткновения» при определении динамических характеристик теплообменника. В этом случае «не работают» методы передаточных функций [Шевяков, Девятов и др.], которыми обычно аппроксимируют системы (1) и (2). Решение задачи осложняется также и тем, что скорость газа намного превосходит скорость жидкости, и системы (1) и (2) становятся «жесткими». При этом способ решения приходится искать среди множества методов решения гиперболических систем дифференциальных

уравнений в частных производных. Нами решена эта система с использованием одного из явных методов Эйлера [17].

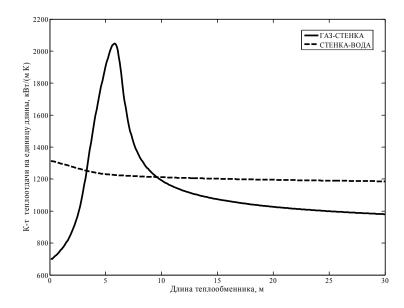


Рис.2. Коэффициенты теплоотдачи на единицу длины трубки.

Здесь частная производная по пространству аппроксимирована с помощью центральной разности первого порядка, а частная производная по времени аппроксимирована разности вперед. Эта схема оказалась устойчивой и имеет погрешность аппроксимации $O(\Delta t, \left(\Delta x^2\right))$.

$$T_{1,i}^{j+1} = T_{1,i}^{j} - \frac{dt}{2 \cdot dx} \cdot v_{1}(j-1,i) \Big[T_{1,i+1}^{j} - T_{1,i-1}^{j} \Big] + dt \cdot K_{12}(j-1,i) \Big(T_{2,i}^{j} - T_{1,i}^{j} \Big)$$

$$T_{2,i}^{j+1} = T_{2,i}^{j} + \frac{dt}{2 \cdot dx} \cdot v_{2}(j-1,i) \Big[T_{2,i+1}^{j} - T_{2,i-1}^{j} \Big] + dt \cdot K_{13}(j-1,i) \Big(T_{1,i}^{j} - T_{2,i}^{j} \Big)$$

$$(4)$$

В результате компьютерного моделирования ГО при скачке температуры газа на входе равном $5^{\circ}C$ получена следующая переходная функция (рис.2).

В таблице 1 приведены данные о температуре на выходах газоохладителя в конце переходного процесса при двух значениях температур газа на его входе.

Таблица 1. Температуры газа и воды на входе и выходе из газоохладителя, °С

Температура газа на	Температура газа на	Температура воды на	Температура
входе в ГО	выходе из ГО	входе в ГО	воды на выходе
			из ГО
70	28.1468	27,01	47.5391
75	28.2023	27,01	49.3320

Как показывает анализ таблицы 1, выходная температура газа после газоохладителя при ее скачке на входе изменилась всего на 0, 05°С. Все это дает возможность утверждать, что возмущения по температуре газа на переохладитель газа а, следовательно, и на испаритель и перегреватель газа будут минимальны. Отметим также, что для данного случая влиянием тепловой емкости разделяющей теплоносителя

стенки можно пренебречь исходя из следующих соображений. Постоянная времени стенки может быть определена по формуле [18], стр.150.

$$T_{CT} = \frac{M_{CT}c_{CT}}{F_2\alpha_2(1+\theta)}; \theta = \frac{F_1\alpha_1}{F_2\alpha_2},$$

где $M_{\it CT}$ – масса 1 м стенки, $c_{\it CT}$ – удельная теплоемкость стенки, $\alpha_{\it 1},\alpha_{\it 2}$ – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки трубы с газом, $F_{\it 1},F_{\it 2}$ – соответственно внутренняя и наружная поверхности 1 м стенки. Для рассматриваемого случая при исходных данных трубки, представленных ниже, и значениях коэффициентов теплоотдачи (см. рис.2), постоянная времени стенки находится в диапазоне значений (1...2,5c), что является величиной одного порядка с наибольшей постоянной времени объекта управления.

Анализ решения системы уравнений (2) показывает, что динамические свойства газоохладителя по каналу «температура газа — температура воды» могут быть аппроксимированы передаточной функцией второго порядка следующего вида:

$$W(p) = \frac{k_1}{(T_{11}p+1)(T_{21}p+1)(T_{31}p+1)}. (5)$$

Для кожухозмеевикового газоохладителя, состоящего из 7 параллельно включенных по газу и воде блоков, в которых длина трубки (материал – сталь) составляет 30м., внутренний диаметр трубки 0,01м., толщина стенки трубки 0,001 мм, диаметр навивки трубки -0.25м., при общем расходе газа 5.5 м 3 /с и расходе воды 5.84м³/час и давлении газа 9 МПа, температуре газа от 30°C до 80°C получены следующие $T_{11} = 1, 1; T_{12} = 0, 22; T_{13} = 0,004; k_1 = 0,368.$ значения коэффициентов: динамическая модель аппроксимации показывает. что кожухозмеевикового газоохладителя теплового насоса, работающего на диоксиде сверхкритическом цикле, может быть представлена динамическим звеном передаточной функцией третьего порядка.

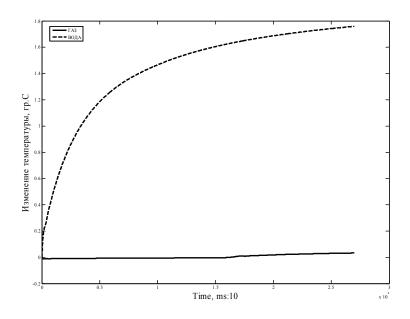


Рис.3. Изменение температуры воды (точечная линия) и газа (жирная линия) на выходе газоохладителя

Полученная передаточная функция объективно описывает динамику газоохладителя по исследуемому каналу. Передаточные функции газоохладителя по каналам «температура газа перед газоохладителем – расход газа» и «температура воды после газоохладителя – расход газа» могут быть, соответственно, аппроксимированы передаточными функция следующего вида:

$$W(p) = \frac{k1}{(1+T1p)} \tag{6}$$

$$W(p) = \frac{k(1 + \text{sgn}(\Delta v) \cdot T_1 p)}{(1 + T_2 p)},$$
(7)

где, Δv – изменение расхода газа относительно базового значения.

Для газоохладителя с параметрами, указанными в статье, при отрицательном скачке давления газа в 0,5МПа при исходном значении давления газа 8 МПа коэффициенты в формуле (6) имеют следующие значения: k = 1, 43; T1 = 5, 2; при положительном значении скачка газа в 1МПа относительно 8 МПа коэффициенты имеют следующие значения: k = 2, 2; T1 = 5, 87. Для газоохладителя с параметрами, указанными ранее, при отрицательном скачке давления газа в 0,5МПа при исходном значении давления газа 8 коэффициенты формуле (7) имеют следующие значения: $k = 3,17; T_1 = 0,07; T_2 = 1,5;$ при положительном значении скачка газа в 1МПа 8 МΠа коэффициенты относительно имеют следующие значения: $k = 3,17; T_1 = 0,07; T_2 = 1,5$.

4. Проектирование закона управления

Рассмотрим систему при возмущении температуры воды, поступающей от ТЭЦ. Критерием качества работы теплонасосной установки является обеспечение максимального значения коэффициента тепловой эффективности (СОР). Для системы управления газоохладителем в динамике это означает требование апериодического переходного процесса сигнала температуры воды с минимальным временем переходного процесса. Результаты численного решения уравнений динамики газоохладителя в виде системы дифференциальных уравнений с распределенными параметрами полностью учитывают динамику объекта. При таком подходе, который мы назовем агрегированным, предварительный выбор коэффициентов регулятора является более обоснованным, чем при использовании других методов [11-13] так как отсутствуют промежуточные преобразования передаточных функций, их упрощение и неизбежные при этом погрешности.

Наиболее инерционным из трех регулирующих элементов газоохладителя (компрессор, регулирующий клапан контура компрессора, перегреватель газа), является перегреватель газа. Поэтому качество его переходных процессов и будет определять, в основном, динамику работы газоохладителя. По аналогии с [18] передаточная функция перегревателя газа по каналу «температура газа — температура воды» имеет вид:

$$W_1(p) = \frac{k_2}{(T_{21}p+1)(T_{31}p+1)}. (8)$$

В этой передаточной функции коэффициенты зависят от свойств газа, которые являются переменными (рассматриваемый перегреватель газа работает в широком диапазоне давлений). Поэтому для его системы управления (рис.4) можно выбрать из класса ПИД–регуляторов с переменными коэффициентами.

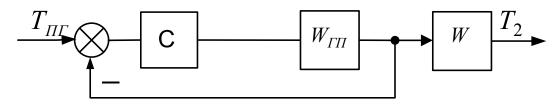


Рис.4. Структурная схема системы регулирования температуры газа после газоохладителя

На рис.5 $T_{\Pi\Gamma}, T_{\Gamma O}$ — задание температуры газа после перегревателя газа и температура воды после газоохладителя, $W_{\Gamma\Pi}$ — передаточная функция перегревателя газа, C — Π ИД—регулятор. На рис.5 показаны переходные процессы на выходе перегревателя газа для случая регулятора с переменными и постоянными коэффициентами. Из рассмотрения рис.5 очевидно, что при постоянных настройках Π ИД—регулятора внутреннего контура и при переменных характеристиках объекта управления в переходном процессе появляется перерегулирование (график с пунктирными линиями), что является нежелательным. Для устранения этого необходимо использовать Π ИД—регулятор с параметрами настройки, изменяемыми в зависимости от параметров объекта управления (график со сплошными линиями).

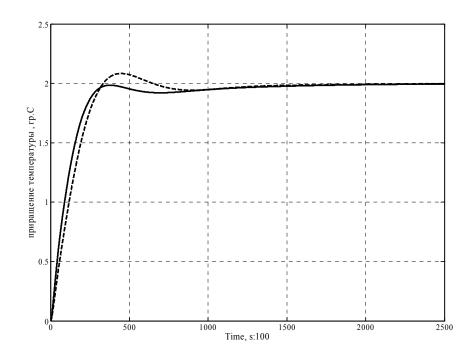


Рис.5. Переходный процесс в системе при разных давлениях в объекте и неизменных параметрах регулятора

5. Заключение.

Предложен подход к проектированию системы управления газоохладителем теплового насоса на диоксиде углерода в сверхкритическом цикле работы, когда коэффициенты регулятора вычисляются непосредственно по результатам анализа переходного процесса модели газоохладителя, построенной на базе системы дифференциальных уравнений с распределенными параметрами. В этом случае первые приближения коэффициентов закона управления вычисляются с большей надежностью и достоверностью, что повышает качество проектирования системы управления.

Литература

- 1. *A.Juravleov, M.Sit, B.Sit, O.Poponova, Timcenco D.* The use of heat pump systems in district heating. Analele Universității din Craiova, Seria: Inginerie Electrica, nr.31, 2007, Vol.II, p.229-232.
- 2. *Шит М.Л., Журавлев А.А., Попонова О.Л., Шит Б.М., Тимченко Д.В.* Применение теплонасосных установок в квартальных тепловых сетях. III Международная конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». 13-15 ноября 2007 г., СПбГУНиПТ.с.117-124.
- 3. *Шит М.Л., Журавлев А.А., Попонова О.Л., Шит Б.М., Тимченко Д.В.* Применение теплонасосных установок в квартальных тепловых сетях централизованного теплоснабжения. IV Международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика», 24-25 октября 2007 г., Москва. Тезисы докладов, с. 57...61.
- 4. *Б.М. Шит, А.А. Журавлев, М.Л. Шит.* Повышение энергетической эффективности теплонасосной установки на диоксиде углерода в системе комбинированного теплоснабжения за счет оптимизации ее системы управления. Проблемы региональной энергетики, N1, 2008, http://ieasm.webart.md/data/m71_2_61.doc.
- 5. Журавлев А.А., Шит М.Л., Шит Б.М., О.Б. Попонова, А.Л. Зубатый. «Система регулирования газоохладителя теплонасосной установки в комбинированной системе теплоснабжения в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки». Проблемы региональной энергетики, N2, 2008, http://ieasm.webart.md/data/m71_2_67.doc.
- 6. *Juravleov A.A.*, *Sit M.L.*, *Sit B.M.*, Optimization of the thermodynamic cycle and control system of heat pump station in the wide range of heat capacity variation. International Conference. International Seminar "Heat pipes, heat pumps, Refrigeration, Power Sources", 8–13 September, Minsk, 20086 pp.438-444.
- 7. Журавлев А.А., Шит М.Л., Шит Б.М. "Управление теплонасосной установкой на диоксиде углерода в широком диапазоне изменения тепловой ннагрузки". Наукові праці Одеської Національной Академії Харчових Технологій, Том.32, V1, 2008.
- 8. *I.V. Derevich and E.G. Smirnova* Calculating the Parameters of Heat Transfer between Countercurrent Flows with Variable Thermophysical Properties. Theoretical Foundations of Chemical Engineering., Vol 36, No4, pp.341–345.
- 9. *Б.Н. Девятов* «Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления». Новосибирск, Наука, 1964.
- 10. *Б.Н. Девятов, Н.Д. Демиденко, В.А. Охорзин.* Динамика распределенных процессов в технологических аппаратах, распределенный контроль и управление. Красноярск, 1976, – 310 с.
- 11. *Б.Н. Девятов, Н.Д. Демиденко* Теория и методы анализа управляемых распределенных процессов. Новосибирск: Наука, 1983. 271 с.
- 12. А.А. Шевяков и Р.В. Яковлева Управление тепловыми процессами с распределенными параметрами. Энергоатомиздат, Москва, 1985, 205 с.
- 13. А.А. Шевяков и Р.В. Яковлева. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968.–240 с.

- 14. Malinowski L. Equations for transient behaviour of parallel flow multichannel heat exchangers. Heat and Mass Transfer, 39 (2003), pp.321–325
- 15. N.H. Abu–Hamdeh Control of a liquid–liquid heat exchanger. Heat and Mass Transfer, 38 (2001), pp.687–693.
- 16. *D. Averous, K. Hammadi, H. Pingaud, X. Joulia, P. Guittard* Dynamic simulation of Brazed Plate–Fin Heat Exchangers. http://www.prosim.net/pdf/pubs/03_cche_1995_dynamicsimulationofbrazedplatefinheate xchangers.pdf.
- 17. *Anderson D.A., Tannehill J.C., Pletcher R.H.* Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. New York, Hemisphere, 1984.
- 18. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов. Под ред. Е.Г. Дудникова.–М.; Химия, 1987.– 368 с.

Поступила в редакцию 1.09.2008

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЧАСТЬ 2

Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю.

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований в области пленочных течений в тепломасообменных аппаратах. Уточнены значения критического числа Рейнольдса и средние значения толщин жидкостных пленок. Особое внимание уделено выявлению оптимального значения параметра регулярной шероховатости поверхности, обеспечивающего интенсификацию процессов тепломасообмена. Полученные результаты использоваться проектирования ΜΟΓΥΤ ДЛЯ тепломассообменных аппаратов в холодильных, кондиционирующих и энергетических системах (альтернативная энергетика).

Ключевые слова. Тепломассообменная аппаратура, пленочное течение, альтернативная энергетика.

PERFECȚIONAREA ECHIPAMENTULUI DE SCHIMB DE CĂLDURĂ ȘI MASĂ PENTRU SISTEMELE ENERGETICE. (PARTEA 2) Doroșenko A. V., Vasiutinskii S. Iu.

Rezumat. Sunt prezentate rezultatele cercetărilor experimentale în domeniul curgerilor peliculare în echipamentul de schimb de căldură și masa. Sunt precizate valorile coeficientului critic lui Reynolds și valorile medii ale grosimilor peliculelor lichidului. Atenție deosibită a fost acordată determinării stabilirii valorii optime a asperității de suprafață, care asigură intensificarea proceselor de schimb de căldura și masa. Rezultatele obținute pot fi utilizate pentru proiectarea echipamentului pentru schimb de căldură și masa în sistemele frigorifice, de climatizare, energetice (energetica alternativă).

Cuvinte-cheie: echipamentul pentru schimb cu căldura și masa, curgere peliculară, energetica alternativă.

HEAT – AND MASS TRANSFER EQUIPMENT DEVELOPMENT FOR POWER SYSTEMS (PART 2)

Doroshenko A. V., Vasyutynsky S. Y.

Abstract. The results of experimental investigations in film flow area in heat and mass exchangers are given. Values of critical number of Reynolds and average values of the liquid film thickness are adjusted. The special attention is given to the revelation of the optimal value the regular roughness of the surface, providing an intensification of heat and mass exchanging processes.

It is possible to use the results which are obtained for designing heat – and mass exchangers in the refrigerate technique, air conditioning and generally, in power systems (alternative energetics).

Keywords. Heat – and mass transfer apparatus, film currents, alternative energetics.

Экспериментальное изучение пленочных течений по поверхности полимерных листов с регулярной шероховатостью

Имеющиеся публикации по экспериментальным исследованиям обобщены в [1,2,4]. Задачами настоящего исследования явились:

• изучение особенностей пленочного течения на плоских листах с РШ типа «впадина» на поверхностях из полимерных материалов ПМ для одно- и двухфазной области течений:

- определение оптимального диапазона параметра шероховатости k=p/e и анализ механизма интенсификации, получение расчетных зависимостей для средней и максимальной толщины пленки $\overline{\delta}_w$;
- изучение особенностей пленочного течения на плоских листах из ПМ с капиллярно-пористыми покрытиями (КПП) поверхности;
 - определение соотношения поверхностей тепло и массопереноса.

В многочисленных экспериментальных работах, где изучались особенности течения жидкостной пленки по вертикальным поверхностям, рассмотрено преимущественно течение по трубкам, либо плоской гладкой поверхности. Число работ, где изучали течения по плоской поверхности незначительно. Наиболее распространён при изучении двухфазных систем метод электропроводности. Он обеспечивает возможность изучения большого числа параметров (волновые характеристики, газосодержание, характер течения); может использоваться в каналах сложной конфигурации; обладает хорошей воспроизводимостью полученных результатов; может использоваться как при наличии, так и в отсутствие газового потока; пригоден для локальных измерений при наличии большого числа датчиков, причём в поток не вносится возмущений.

Предварительная часть исследования с РШ типа «выступ» было проведено в ОГАХ, совместно с ИНХП АН СССР [1] с использованием оборудования ИНХП. Эта работа в рамках настоящего исследования была дополнена в результате совместных исследований ОГАХ с институтом проблем химической физики ИПХФ РАН (новое название ИНХП) в 2006 году, применительно к новым задачам, возникшим в результате использования пленочных полимерных ТМА в испарительных системах. В первую очередь это касается формы РШ типа «впадина».

Суть метода состоит в измерении омического сопротивления жидкостной плёнки с помощью нескольких электродов, располагаемых на поверхности листов чтобы не образовывался выступ [1,3]. При исследовании образом, использовалась водопроводная вода, естественная электропроводность которой достаточна для проведения измерений. С целью устранения эффекта поляризации использован переменный ток. Значение $\delta_{_{\! M\! C}}$ на изучаемом участке определяли исходя из сопротивления плёнки R_f и столба жидкости R_f^* , что соответствует полному заполнению жидкостью экспериментального канала. Исходя из закона Ома, $\overline{\delta}_{_{\!L}} = D' \cdot R_{_{\!f}}^* \, / \, R_{_{\!f}}$, где D' - ширина канала, выбранная из условий: $D' >> \mathcal{S}_{_{\!f}}^*$ ($\delta_{_{\!f}}^*$ предельное значение $\delta_{_{\!\mathcal{M}}}$) и $D \leq L$ (L- длина измерительного участка канала). Тогда R_f и R_f^* будут приблизительного одного порядка, т.е. наклон линии $R_a = f \cdot \frac{1}{\sqrt{g}}$ будет практически постоянным. Выбрана рабочая частота равная 5 кГц, принадлежащая линейному участку зависимости во всём диапазоне изменений $\delta_{_{\text{мс}}}$. Использовалась схема из двух электродов, расположенных вдоль течения жидкости. Для проверки метода проведён эксперимент в канале с шириной (зазором) переменной высоты, полностью заполненном жидкостью, что равносильно построению тарировочной кривой.

Стенд — одноканальная модель (статья «Совершенствование тепломассообменной аппаратуры для энергетических систем», первая часть, рис. 4) был доработан с учетом нового типа изучаемой поверхности из ПМ с РШ типа «впадина» и обеспечивал проведение исследований, как в отсутствие, так и при наличии газового потока. Плоские листы были выполнены из поликарбонатной пластины с РШ в виде

равномерно рассредоточенных по поверхности листа горизонтальных впадин. Глубина впадин 0,3 мм, ширина у основания 1 мм. Величина k=p/e в опытах изменялась дискретно ($k=2,5,\ 11;\ 25;\ 30;\ 55;\ 100$). Значения $\delta_{_{\mathcal{H}}}$ усреднялись по ширине канала. Исследование выполнено как в отсутствие, так и при наличии газового потока, причём в последнем случае особое внимание уделялось вопросам устойчивости течений. Первый случай соответствует отсутствию гидродинамического взаимодействия фаз. Основные полученные результаты приведены на рис. 1-3. Получены следующие результаты:

- Переход от ламинарной к турбулентной области течения ($\operatorname{Re}_{\infty}^*$) зависит от наличия регулярной шероховатости и величины k. Наличие двумерной шероховатости ускоряет переход, снижая пороговое значение $\operatorname{Re}_{\infty}^*$. (рис. 1).
- На гладком листе и листах с k > 50 наблюдается слабо выраженное нерегулярное волновое течение. При k < 10 формируется монотонное и периодическое волновое течение, причем длина начального участка уменьшается со снижением k. Одновременно утолщается пленка. При достаточно больших значениях величины k, условия течения пленки приближаются к характерным для гладкого листа без РШ. С уменьшением величины k происходит утолщение пленки, что связано с ростом влияния капиллярных сил на задержку жидкости.

Особый интерес представляет диапазон значений k = 10 - 30, где имеются оптимальные условия проявления шероховатости и обеспечивается максимальная интенсивность протекания процессов переноса в жидкой пленке.

Влияние газового потока изучали применительно к противо- и поперечноточной схемам контактирования. Для противотока зафиксировано отсутствие этого влияния до значений $w_r < 6.0 \, \text{м/c}$, при котором развивается явление гидродинамического влияния контактирующих потоков, в дальнейшем переходящее в режим «захлебывания». Для поперечного тока $w_r < 9.0 \, \text{м/c}$; при более высоких скоростях движения воздуха может иметь месть продольный снос жидкостной пленки и частичное оголение поверхностей переноса. То есть для поперечного тока возможно наращивание нагрузок по газу и жидкости, при, естественном возрастании аэродинамического сопротивления. На рисунке 2 приведены результаты для: шероховатости типа "впадина" с параметром k = 30; листа полимерной насадки с капиллярно-пористым покрытием поверхности КПП из флизелина с толщиной равной 0,6 мм. Оба типа формирования поверхности листа и воздействия на жидкостную пленку а через ее волнообразную поверхность на газовый поток, обеспечивают благоприятные условия протекания процессов переноса в жидкостной пленке. Средняя толщина пленки возрастает при наличии РШ поверхности, а граница смены режимов течения смещается в сторону меньших значений $\mathrm{Re}_{_{\infty}}^*$ от 1650 до 800 — кривая 2. Для листа с КПП покрытием поверхности граница течений остается неизменной по сравнению с гладким листом, но существенно возрастает средняя толщина жидкостной пленки – кривая 3.

Важнейшим является вопрос о величине смоченной поверхности насадки, поскольку это и определяет в конечном итоге эффективность реализуемого процесса. Это особенное значение приобретает для насадки из ПМ. Устойчивое фронтальное течение по вертикальной плоскости с РШ наблюдается лишь при больших расходах жидкости, распадаясь с уменьшением расхода жидкости $G_{\rm sc}$ на отдельные струйки.

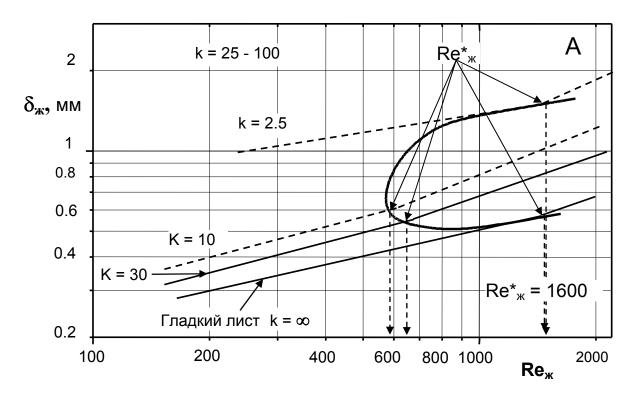


Рис. 1. Результаты экспериментального изучения пленочных течений в тепломассообменных аппаратах с полимерной насадкой из поликарбонатных плит с РШ поверхности. Зависимость δ_{∞} (Re_{∞} , k) для плоского листа с РШ (∞ -гладкий лист)

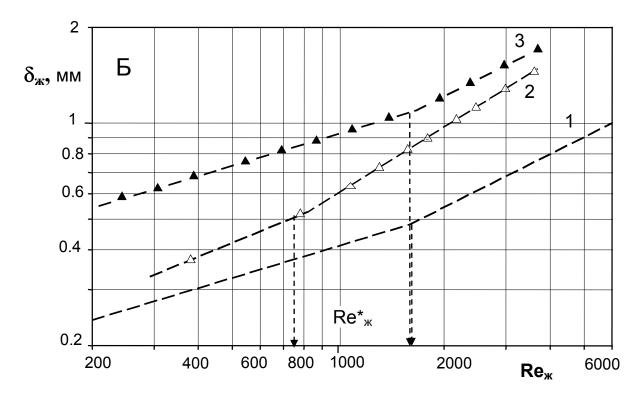


Рис. 2. Зависимость $\delta_{\mathcal{H}}$ ($Re_{\mathcal{H}}$) для полимерного плоского листа с регулярной шероховатостью поверхности: 1- гладкий лист; 2 — РШ типа «впадина» (величина k = 30); 3 — капиллярно- пористое покрытие поверхности, $\delta_{\kappa n M}$ = 0,6 мм)

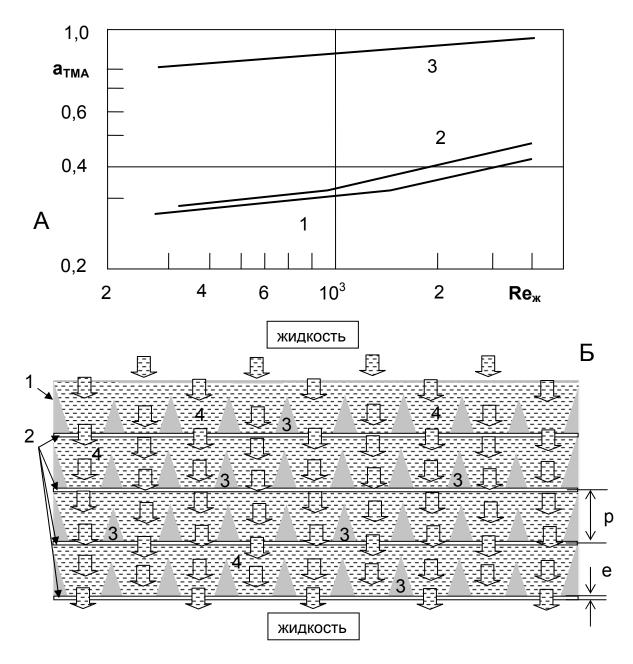


Рис. 3. Результаты экспериментального изучения пленочных течений в тепломассообменных аппаратах. А – величина соотношения поверхностей массо- и теплообмена в тепломасообменных аппаратах с листами насадки из ПМ: – без регулярной шероховатости поверхности (РШ), 2 – с РШ поверхности (k = 30); k – с капиллярно-пористым покрытием поверхности. Б – характер распределения сухих (3) и смоченных (4) участков поверхности листа (1) с РШ в виде «впадин» (2)

Данные по величине смоченной поверхности получены методом визуализации течений, путем добавления красящей жидкости в стекающую пленку, с последующим планиметрированием поверхности по контуру отложений. Наличие РШ типа «впадина» значительно улучшает ситуацию с распределением жидкостной пленки по поверхности полимерного листа насадки. Хорошо видно, что канавки РШ (впадины) обеспечивают

перераспределение стекающей пленки, играя роль накопителей и перераспределителей жидкости, и повышая тем самым реальную величину смоченной поверхности (рис. 3.2 — Б). Величина $a_{TMO} = F_M / F_T$ получена расчетом из опытных данных. В среднем, соотношение поверхностей a_{TMO} составляет 0,3—0,6 (что несколько больше, чем для плоского листа с РШ типа «выступ» [1]) и было в дальнейшем использовано при расчетах коэффициентов переноса. Капиллярно-пористое покрытие поверхности приближает величину a к 100% (линия 3 на рис. 2). Полученные результаты подтверждают высокую устойчивость пленочного течения по поверхности полимерного листа с РШ типа «впадина» и значительный рост удельной смоченной поверхности листа.

Выводы по работе

- 1. Наличие двумерной шероховатости поверхности ускоряет переход ламинарной формы течения в турбулентную, снижая пороговое значение $Re_{,\kappa}^*$. Механизм интенсификации процесса в пленке и газовом потоке можно объяснить формированием регулярноволнового режима с преобладанием стоячих волн и, в толщине пленки вторичных течений; в диапазоне значений параметра РШ поверхности $k_{onm}=10-30$ отмечается стабильный регулярноволновой режим течения, практически отсутствует участок формирования волн и минимально брызгообразование; этот диапазон значений k_{onm} является условием интенсификации процесса совместного тепломассообмена.
- 2. Вертикальный плоский лист с РШ типа «впадина» рекомендован в качестве базового элемента при создании рабочих поверхностей пленочных ТМА для испарительного охлаждения при противо или поперечноточной схеме контактирования. Для аппаратов НИО рекомендовано использование в качестве основных элементов насадки многоканальных плит из поликарбоната с аналогичной структурой внешней поверхности, по которой стекает жидкостная пленка.

Литература

- 1. Дорошенко, А. В. Компактная тепломассообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика): Дис. докт. техн. наук. Одесса, 1992, 340 с.
- 2. Горин А.Н., Дорошенко А.В. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. Донецк: Норд-Пресс, 2006. 341 с.
- 3. Васютинский С.Ю. Моделирование рабочих процессов и совершенствование косвенно-испарительных воздухоохладителей: Дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1996, 160с.
- 4. Интенсификация тепло и массообмена в энергетике / Б.В. Дзюбенко и др.; под ред. Ю.А. Кузма-Кичты.- М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2003, 240с.

Поступила в редакцию 4 февраля 2008 г.

РАЗРЯД ДВИЖУЩЕГОСЯ КОНДЕНСАТОРА НА ДЛИННУЮ ЛИНИЮ

Пацюк В.И.

Институт энергетики Академии наук Молдовы Государственный университет Молдовы patsiuk@usm.md

Аннотация. С помощью метода характеристик решен класс нестационарных задач о разряде перемещающегося с различными скоростями электрического конденсатора вдоль длинной линии. **Ключевые слова:** телеграфные уравнения, разряд конденсатора, линия с потерями.

DESCĂRCAREA CONDENSATORULUI MOBIL PE LINIA LUNGĂ

Paţiuc V.I.

Rezumat. În baza metodei caracteristicilor au fost soluționate un set de probleme nestaționare privind descărcarea condensatorului mobil, ce se mișcă cu vitezele diferite de-a lungul unei linii lungi. **Cuvinte-cheie:** ecuațiile telegrafiștilor, descărcarea condensatorului, linie lungă.

MOVING CAPACITOR DISCHARGE ON THE LONG TRANSMISSION LINE

Patsiuk V.I.

Abstract. The class of nonstationary problems about the moving electric capacitor discharge on the long-distance transmission line is solved by means of characteristics method. The different velocities of the capacitor's motion are considered.

Key words: cable equations, capacitor discharge, transmission line with losses.

Введение

Разряд движущегося с постоянной скоростью конденсатора на идеальную линию рассматривался в [1]. Перемещая источник напряжения со скоростями, большими или меньшими скорости света авторы пытались в рамках линейной электродинамической модели обнаружить эффект замедления времени. Поскольку таковой, как и следовало ожидать, себя не проявил, авторы сделали вывод о том, что полученный ими результат является достаточным основанием для опровержения СТО.

В настоящей статье с помощью метода характеристик [2] исследована эволюция нестационарного разряда конденсатора на длинную линию. На основе точных решений краевых задач для телеграфных уравнений установлено, что при определенном соотношении между емкостью источника напряжения и потерями в линии распределение электромагнитной энергии в ней носит симметричный характер и не зависит от скорости движения конденсатора. Обнаружен эффект увеличения скорости разряда электрической емкости при скоростях превышающих скорость распространения волн потенциала и тока в линии. Решена также нелинейная задача о разряде конденсатора при его движении с постоянным ускорением.

1. Решение телеграфных уравнений для неискажающей линии методом характеристик

Рассмотрим бесконечную двухпроводную длинную линию, к которой в начальный момент времени t=0 подключается заряженный конденсатор с емкостью C_n и потенциалом U_0 (рис. 1.1). При замыкании контакта по линии потечет ток, и

потенциал будет распространяться в обе стороны от точек подключения конденсатора со скоростью a, которую для простоты изложения будем считать равной скорости света.

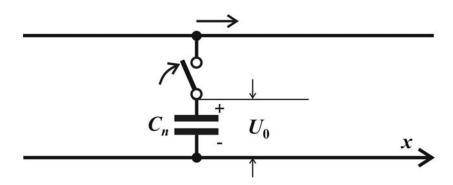


Рис. 1.1. Двухпроводная длинная линия с подключаемым конденсатором

Требуется определить функции напряжения u(x,t) и тока i(x,t), удовлетворяющие системе телеграфных уравнений

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad x \in (-\infty, \infty), t > 0$$
 (1.1)

при следующих начальных и граничных условиях:

$$u(x,0) = i(x,0) = 0, \ x \in (-\infty,\infty),$$
 (1.2)

$$C_n \frac{du(0,t)}{dt} = i(0-0,t) - i(0+0,t), \quad x = 0, t \ge 0.$$
(1.3)

В случае неискажающей линии: $R/L = G/C = \gamma$ решение задачи (1.1) – (1.3) можно построить методом характеристик [2]. Так как рассматривается линия неограниченной протяженности, то волны потенциала и тока распространяются влево и вправо от источника без отражений. Это означает, что для x > 0 вдоль характеристик at+x=const имеет место соотношение $Z_{\scriptscriptstyle B}\,i-u=0$, где $Z_{\scriptscriptstyle B}=\sqrt{L/C}$ и $a=1/\sqrt{LC}$ обозначают волновое сопротивление линии и скорость распространения электромагнитной волны. В то же время для x < 0 вдоль характеристик с положительным наклоном at - x = const имеет место соотношение $Z_B i + u = 0$. Исключая при помощи этих зависимостей токи из граничного условия (1.3), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение относительно напряжения конденсаторе

$$C_n \frac{du(0,t)}{dt} = -\frac{2}{Z_B} u(0,t), \quad x = 0, t > 0, \quad u(0,t) = U_0,$$

откуда вытекает решение в виде

$$u(0,t) = U_0 e^{-\lambda_0 t}, \ \lambda_0 = \frac{2}{C_n Z_B}, \ t \ge 0.$$
 (1.4)

Электрическая энергия, сосредоточенная в конденсаторе, также убывает с течением времени по экспоненциальному закону и вычисляется по формуле

$$W_n(t) = \frac{C_n u^2}{2} = \frac{C_n U_0^2}{2} e^{-2\lambda_0 t} = \frac{U_0^2}{\lambda_0 Z_R} e^{-2\lambda_0 t}.$$
 (1.5)

Решение исходных уравнений (1.1) - (1.2) при краевом условии (1.4), определяемое по методу характеристик можно записать как

$$u(x,t) = U_0 e^{-\lambda_0 t + (\lambda_0 - \gamma)x/a}, \quad i(x,t) = u(x,t)/Z_B, \quad 0 < x < at,$$

$$u(x,t) = U_0 e^{-\lambda_0 t - (\lambda_0 - \gamma)x/a}, \quad i(x,t) = -u(x,t)/Z_B, \quad -at < x < 0,$$

$$u(x,t) = i(x,t) = 0, \quad x < -at \quad \text{или} \quad x > at.$$
 (1.6)

Из (1.6) легко видеть, что распределение потенциала зависит только от времени в возмущенной области и не зависит от продольной координаты x при выполнении условия $\lambda_0 = \gamma$. Также очевиден и симметричный характер нестационарного процесса распространения волн вправо и влево от точки подключения заряженной емкости.

Эволюция нормированных относительно U_0 напряжений вдоль идеальной и неискажающей линии представлена на рис. 1.2-1.4 для моментов времени t=1 (a); (b); (c); (c); (d)0 при различных соотношениях емкости конденсатора (C_n) 0 потерь в линии (c)0.

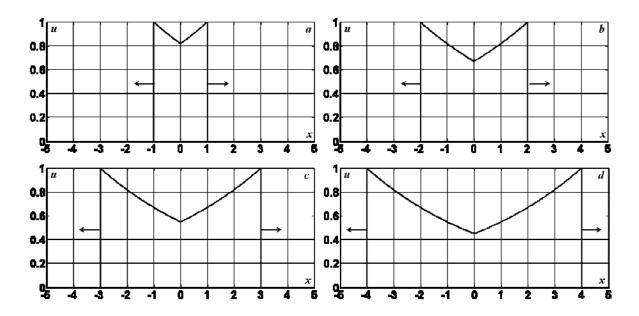


Рис. 1.2. Распределение напряжения вдоль идеальной линии ($\gamma=0$) на различные моменты времени при $C_n=1$, $\lambda_0=2$

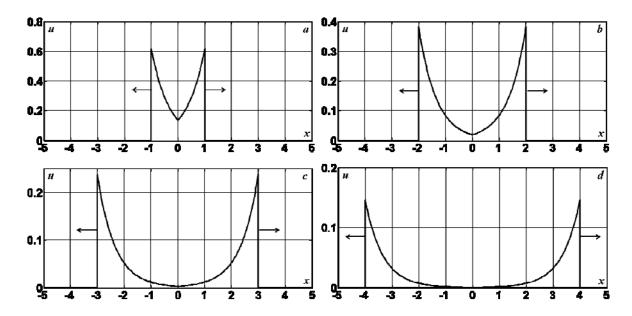


Рис. 1.3. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma=0.48$) на различные моменты времени при $C_n=1$, $\lambda_0=2$

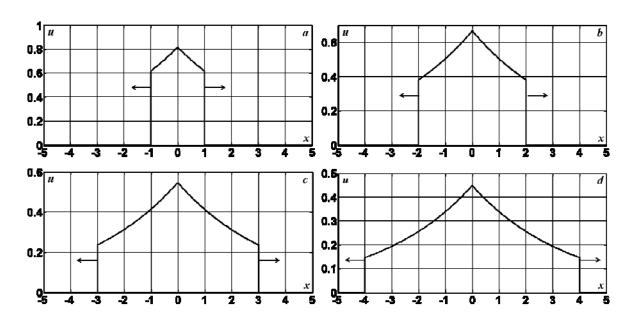
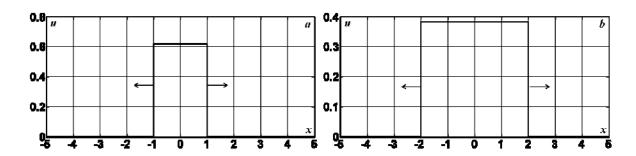


Рис. 1.4. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma=0.48$) на различные моменты времени при $C_n=10$, $\lambda_0=0.2$



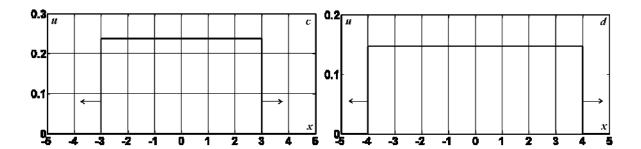


Рис. 1.5. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 4.16667$, $\lambda_0 = \gamma = 0.48$

Электромагнитная энергия, накопленная в линии к моменту времени t вычисляется по формуле

$$W_{\pi}(t) = \frac{1}{2} \int_{-at}^{at} \left(Cu^2 + Li^2 \right) dx = \frac{C_n U_0^2}{2 - \gamma C_n Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t} \right) =$$

$$= \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma) Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t} \right), \tag{1.7}$$

а выражение для полной энергии $W(t) = W_n(t) + W_n(t)$ имеет вид

$$W(t) = \frac{C_n U_0^2}{2 - \gamma C_n Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - \frac{\gamma C_n Z_B}{2} e^{-2\lambda_0 t} \right) = \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma) Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - \frac{\gamma}{\lambda_0} e^{-2\lambda_0 t} \right). \tag{1.8}$$

Из формулы (1.8) видно, что для неискажающей линии: $\gamma > 0$ суммарная энергия с течением времени стремится к нулю, тогда как для идеальной линии: $\gamma = 0$ она остается постоянной величиной, равной энергии конденсатора в начальный момент времени

$$W(t) = W_n(t) + W_n(t) = \frac{C_n U_0^2}{2} = \frac{U_0^2}{\lambda_0 Z_R}.$$
 (1.9)

2. Перемещение конденсатора с постоянной скоростью

Рассмотрим теперь аналогичную задачу, но с условием, что разряжающийся конденсатор движется с постоянной скоростью $v \le a$ и v > a в правую от исходного положения сторону. В этом случае зависимости (1.1) - (1.4) принимают форму

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad x \in (-\infty, \infty), t > 0$$
 (2.1)

$$u(x,0) = i(x,0) = 0, \ x \in (-\infty,\infty),$$
 (2.2)

$$u(x_v(t),t) = U_0 e^{-\lambda_0 t}, \ \lambda_0 = \frac{2}{C_n Z_R}, \ x_v(t) = vt, \ t \ge 0.$$
 (2.3)

Здесь $x_v(t)$ обозначает траекторию движения конденсатора на плоскости Oxt (рис. 2.1), которая в данном случае представляет собой прямую линию OA.

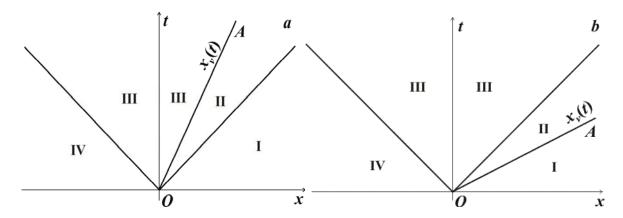


Рис. 2.1. Расположение областей решения задачи на плоскости Oxt при перемещении конденсатора с постоянной досветовой (a) и сверхсветовой (b) скоростью.

Решение этой задачи при v < a (рис. 2.1, a), определяемое по методу характеристик, имеет следующий вид. В областях I и IV, куда еще не дошла электромагнитная волна, решение – нулевое:

$$u(x,t) = i(x,t) = 0, x < -at$$
 или $x > at$. (2.4)

В области ІІ распространяется прямая волна, которая двигается вправо:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\gamma \frac{x - vt}{a - v}} e^{-\lambda_0 \frac{at - x}{a - v}} = U_0 e^{-\frac{(\gamma - \lambda_0)x + (a\lambda_0 - \gamma v)t}{a - v}},$$

$$i(x,t) = u(x,t)/Z_R, \quad vt < x < at$$
(2.5)

и в III области распространяется обратная волна, которая двигается влево:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\gamma \frac{vt - x}{a + v}} e^{-\lambda_0 \frac{at + x}{a + v}} = U_0 e^{-\frac{(\lambda_0 - \gamma)x + (a\lambda_0 + \gamma v)t}{a + v}},$$

$$i(x,t) = -u(x,t)/Z_B, -at < x < vt,$$
(2.6)

Электромагнитная энергия, накопленная в линии к моменту времени t, вычисляется по формуле

$$W_{_{\mathcal{I}}}(t) = \frac{1}{2} \int_{-at}^{at} \left(Cu^{2} + Li^{2} \right) dx = \frac{C_{n}U_{0}^{2}}{2 - \gamma C_{n}Z_{B}} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_{0}t} \right) =$$

$$= \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma)Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t} \right), \tag{2.7}$$

а полная энергия $W(t) = W_n(t) + W_n(t)$ записывается как

$$W(t) = \frac{C_n U_0^2}{2 - \gamma C_n Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - \frac{\gamma C_n Z_B}{2} e^{-2\lambda_0 t} \right) = \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma) Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - \frac{\gamma}{\lambda_0} e^{-2\lambda_0 t} \right). \tag{2.8}$$

Из формулы (2.8) видно, что для неискажающей линии: $\gamma > 0$ суммарная энергия с течением времени стремится к нулю, тогда как для идеальной линии: $\gamma = 0$ она остается постоянной величиной, равной энергии конденсатора в начальный момент времени

$$W(t) = W_n(t) + W_n(t) = \frac{C_n U_0^2}{2}.$$
 (2.9)

Таким образом, при перемещении со скоростью, меньшей скорости электромагнитной волны, конденсатор разряжается с той же скоростью, что и неподвижный конденсатор.

Решение задачи при перемещении конденсатора со скоростью электромагнитной волны v=a получается как частный случай решения (2.4) — (2.6). В этом случае область II отсутствует, а в остальных решение имеет следующий вид. В областях I и IV, куда еще не дошла электромагнитная волна, решение — нулевое:

$$u(x,t) = i(x,t) = 0, x < -at$$
 или $x > at$ (2.10)

и в III области распространяется обратная волна, которая двигается влево:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\frac{(\lambda_0 - \gamma)x + a(\lambda_0 + \gamma)t}{2a}},$$

$$i(x,t) = -u(x,t)/Z_B, -at < x < at,$$
(2.11)

Энергия, накопленная в линии к моменту времени t, вычисляется по формуле

$$W_{\pi}(t) = \frac{1}{2} \int_{-at}^{at} \left(Cu^2 + Li^2 \right) dx = \frac{C_n U_0^2}{2 - \gamma C_n Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t} \right) =$$

$$= \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma) Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t} \right), \tag{2.12}$$

а полная энергия $W(t) = W_n(t) + W_n(t)$ выглядит так

$$W(t) = \frac{C_n U_0^2}{2 - \gamma C_n Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - \frac{\gamma C_n Z_B}{2} e^{-2\lambda_0 t} \right) = \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma) Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - \frac{\gamma}{\lambda_0} e^{-2\lambda_0 t} \right). \quad (2.13)$$

Из формулы (2.13) видно, что для неискажающей линии: $\gamma > 0$ суммарная энергия с течением времени стремится к нулю, тогда как для идеальной линии: $\gamma = 0$ она, как и в случае v < a, остается постоянной величиной, равной энергии конденсатора в начальный момент времени

$$W(t) = W_n(t) + W_n(t) = \frac{C_n U_0^2}{2}.$$
 (2.14)

Распределение напряжения по идеальной и неискажающей линии для моментов времени t=1; 2; 3; 4 при v=0.8 < a=1 изображены на рис. 2.2-2.5. Здесь как видим, волновая картина имеет явно несимметричный вид и количество энергии, уносимое электромагнитными волнами в противоположные стороны, разнится.

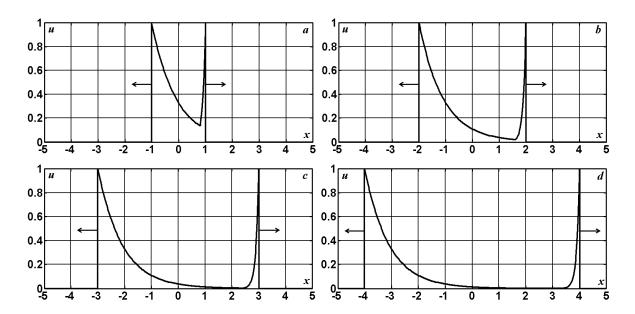
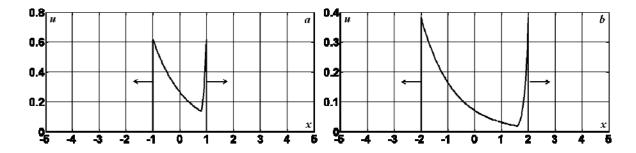


Рис. 2.2. Распределение напряжения вдоль идеальной линии ($\gamma = 0$) на различные моменты времени при $C_n = 1$, $\lambda_0 = 2$ и движении конденсатора с постоянной скоростью $\nu = 0.8$



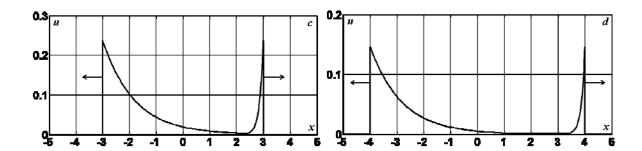


Рис. 2.3. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 1$, $\lambda_0 = 2$ и движении конденсатора с постоянной скоростью $\nu = 0.8$

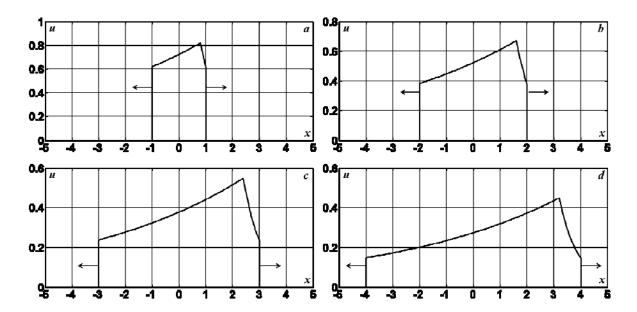


Рис. 2.4. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 10$, $\lambda_0 = 0.2$ и движении конденсатора с постоянной скоростью $\nu = 0.8$

Действительно, из графиков на рис. 2.2-2.4 видно, что количество энергии в линии, накапливаемой с течением времени в отрицательной области x < 0, отличается от энергии в области x > 0. Используя решение (2.4) - (2.6), получаем количественную оценку этого дисбаланса:

$$W_{-}(t) = \frac{1}{2} \int_{-at}^{0} \left(Cu^{2} + Li^{2} \right) dx = \frac{U_{0}^{2}(a+v)}{2a(\lambda_{0} - \gamma)Z_{B}} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-\frac{2(a\lambda_{0} + \gamma v)t}{a+v}} \right),$$

$$W_{+}(t) = \frac{1}{2} \int_{0}^{at} \left(Cu^{2} + Li^{2} \right) dx = \frac{U_{0}^{2}}{2a(\lambda_{0} - \gamma)Z_{B}} \left((a + v)e^{-\frac{2(a\lambda_{0} + \gamma v)t}{a + v}} + (a - v)e^{-2\gamma t} - 2ae^{-2\lambda_{0}t} \right).$$

Рассмотрим разность энергий $\Delta W(t) = W_{+}(t) - W_{-}(t)$:

$$\Delta W(t) = W_{+}(t) - W_{-}(t) = \frac{U_{0}^{2}}{a(\lambda_{0} - \gamma)Z_{B}} \left((a + v)e^{-\frac{2(a\lambda_{0} + \gamma v)t}{a + v}} - ve^{-2\gamma t} - ae^{-2\lambda_{0}t} \right) = 0$$

$$= \frac{U_0^2}{adZ_B} e^{-\frac{2(a\lambda_0 + \gamma v)t}{a+v}} \left[1 - \frac{v}{a+v} e^{2adt} - \frac{a}{a+v} e^{-2vdt} \right], \quad d = \frac{\lambda_0 - \gamma}{a+v}. \tag{2.15}$$

Производная по параметру d от выражения в квадратных скобках формулы (2.15) имеет следующие знаки:

$$F(d) = 1 - \frac{v}{a+v}e^{2adt} - \frac{a}{a+v}e^{-2vdt}, \quad F'_d = -\frac{2avt}{a+v}\Big[e^{2adt} - e^{-2vdt}\Big] = \begin{cases} >0, \text{ при } d < 0 \\ <0, \text{ при } d > 0 \end{cases}$$

Значит, функция F(d) является выпуклой и в точке d=0 достигает максимального значения равного нулю. А это означает, что функция F(d) для любых значений параметра d принимает только неположительные значения. С учетом знака коэффициента $U_0^2/(adZ_R)$ в формуле (2.15), получаем:

$$\Delta W(t)>0,\ W_-(t)< W_+(t)\quad \text{при}\quad \lambda_0<\gamma,\ v\neq 0\,,$$

$$\Delta W(t)<0,\ W_-(t)>W_+(t)\quad \text{при}\quad \lambda_0>\gamma,\ v\neq 0\,,$$

$$\Delta W(t)=0,\ W_-(t)=W_+(t)\quad \text{при}\quad \lambda_0=\gamma\ \text{или}\ v=0\,.$$

Отсюда следует, что при $\lambda_0 = \gamma$ в линии накапливается одинаковое суммарное количество энергии в отрицательной и положительной областях. В этом случае формула (2.7) для энергии в линии содержит неопределенность типа 0/0, раскрывая которую по правилу Лопиталя имеем:

$$W_{\pi}(t) = \frac{U_0^2}{Z_B} \lim_{\gamma \to \lambda_0} \frac{e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t}}{\lambda_0 - \gamma} = \frac{U_0^2}{Z_B} \lim_{\gamma \to \lambda_0} \frac{-2te^{-2\gamma t}}{-1} = \frac{2U_0^2}{Z_B} te^{-2\lambda_0 t}.$$
 (2.16)

Ниже на рис. 2.5 приведено распределение напряжения по линии для случая $\lambda_0 = \gamma = 0.48$. Так как скорости затухания в линии и разряжения конденсатора совпадают, то профили напряжения приобретают симметричную прямоугольную форму, как и при неподвижном конденсаторе.

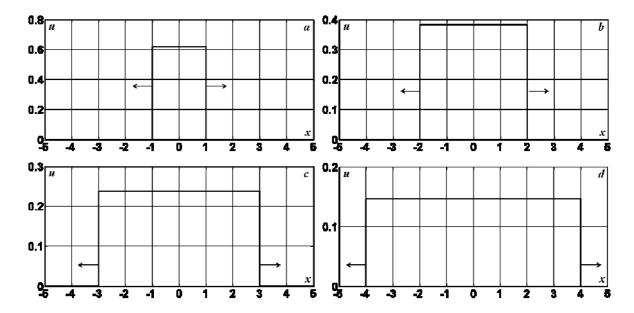


Рис. 2.5. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 4.16667$, $\lambda_0 = \gamma = 0.48$, $\nu = const < a = 1$

Рассмотрим теперь случай движения конденсатора со скоростью v>a (рис. 2.1,b). В этом случае энергия в линии на момент времени t занимает область [-at,vt], большую чем [-at,at] при $v\leq a$. Поэтому, если электрическая емкость разряжается с прежней скоростью: $\lambda_0=2/(C_nZ_B)$, то в идеальной линии накапливается большая, чем начальная энергия, что противоречит закону сохранения энергии. Поэтому предположим, что конденсатор разряжается с другой скоростью λ_v , которую определим из условия закона сохранения суммарной энергии для идеальной линии. В этом случае задача (2.1)-(2.3) принимает вид

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad x \in (-\infty, \infty), t > 0$$
 (2.17)

$$u(x,0) = i(x,0) = 0, \ x \in (-\infty,\infty),$$
 (2.18)

$$u(x_v(t),t) = U_0 e^{-\lambda_v t}, \ x_v(t) = vt, \ t \ge 0.$$
 (2.19)

Решение этой задачи при v > a (рис. 2.1,b), определяемое по методу характеристик, имеет вид. В областях I и IV, куда еще не дошла электромагнитная волна, решение — нулевое:

$$u(x,t) = i(x,t) = 0, x < -at$$
 или $x > at$. (2.20)

В III области распространяется обратная волна, которая двигается влево:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\frac{(\lambda_v - \gamma)x + (a\lambda_v + \gamma v)t}{a + v}} = U_0 e^{-\gamma t} e^{-\frac{\lambda_v - \gamma}{a + v}(x + at)} \,,$$

$$i(x,t) = -u(x,t)/Z_{R}, -at < x < at,$$
 (2.21)

В области II распространяются обе волны, а именно — прямая и обратная, порожденные граничным условием на прямой OA (рис. 2.1,b):

$$u(x,t) = U_0 e^{-\gamma t} \left[e^{-\frac{\lambda_v - \gamma}{v - a}(x - at)} + e^{-\frac{\lambda_v - \gamma}{v + a}(x + at)} \right],$$

$$i(x,t) = \frac{U_0 e^{-\gamma t}}{Z_B} \left[e^{-\frac{\lambda_v - \gamma}{v - a}(x - at)} - e^{-\frac{\lambda_v - \gamma}{v + a}(x + at)} \right], \quad at < x < vt.$$
 (2.22)

Энергия, накопленная в линии κ моменту времени t, вычисляется по формуле

$$W_{\pi}(t) = \frac{1}{2} \int_{-at}^{vt} \left(Cu^2 + Li^2 \right) dx = \frac{vU_0^2}{a(\lambda_v - \gamma)Z_B} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_v t} \right), \tag{2.23}$$

а полная энергия $W(t) = W_n(t) + W_n(t)$ имеет вид

$$W(t) = \frac{U_0^2}{(\lambda_v - \gamma)Z_B} \left[\frac{v}{a} e^{-2\gamma t} - \left(\frac{v}{a} - \frac{\lambda_v - \gamma}{\lambda_0} \right) e^{-2\lambda_v t} \right]. \tag{2.24}$$

Для идеальной линии: $\gamma = 0$ полная энергия записывается как

$$W(t) = \frac{U_0^2}{\lambda_{\nu} Z_B} \left[\frac{v}{a} - \left(\frac{v}{a} - \frac{\lambda_{\nu}}{\lambda_0} \right) e^{-2\lambda_{\nu} t} \right] = \frac{U_0^2}{(\lambda_{\nu} a/\nu) Z_B} \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda_{\nu} a/\nu}{\lambda_0} \right) e^{-2\lambda_{\nu} t} \right]. \quad (2.25)$$

Из формулы (2.25) видно, что для выполнения закона сохранения, т.е. чтобы $\forall t>0$ полная энергия равнялась начальной энергии в конденсаторе: $W(t)=U_0^2/(\lambda_0 Z_B)$, необходимо задать $\lambda_v a/v=\lambda_0$. Отсюда получаем искомое значение скорости разряда конденсатора $\lambda_v=\lambda_0 v/a$.

Таким образом, при перемещении со скоростью, большей скорости электромагнитной волны в линии, конденсатор разряжается быстрее, чем при $v \le a$.

Из (2.21) – (2.22) видно, что распределение потенциала зависит только от времени в возмущенной области и не зависит от продольной координаты x при выполнении условия $\lambda_v = \gamma$ или $\lambda_0 = a\gamma/v$, $C_n = 2/(\lambda_0 Z_B) = 2v/(a\gamma Z_B)$.

Распределение напряжения вдоль идеальной и неискажающей линии для моментов времени t=1; 2; 3; 4 при v=1.2 > a=1 изображены на рис. 2.6-2.9.

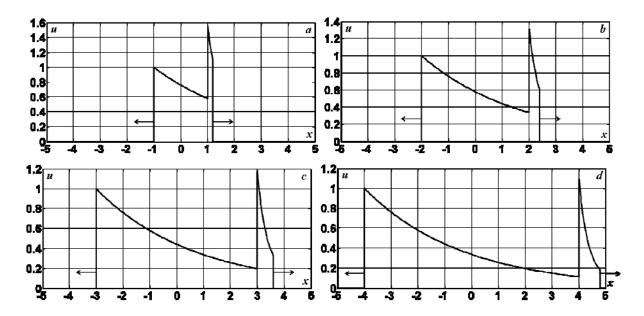


Рис. 2.6. Распределение напряжения вдоль идеальной линии ($\gamma=0$) на различные моменты времени при $C_n=4$, $\lambda_0=0.5$, $\lambda_v=0.6$ и движении конденсатора с постоянной скоростью v=1.2

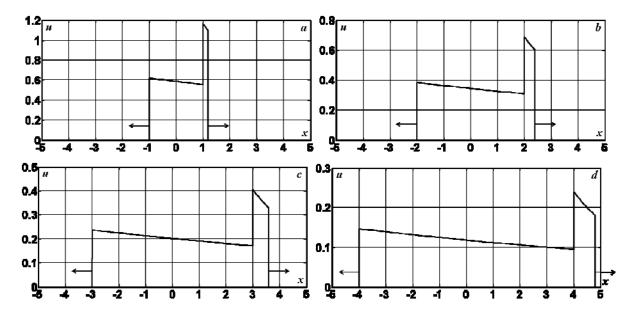
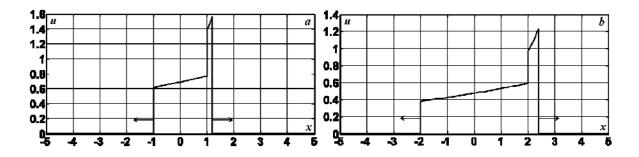


Рис. 2.7. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma=0.48$) на различные моменты времени при $C_n=4$, $\lambda_0=0.5$, $\lambda_{\nu}=0.6$ и движении конденсатора с постоянной скоростью $\nu=1.2$



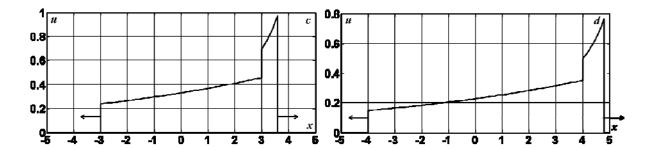


Рис. 2.8. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma=0.48$) на различные моменты времени при $C_n=10$, $\lambda_0=0.2$, $\lambda_v=0.24$ и движении конденсатора с постоянной скоростью v=1.2

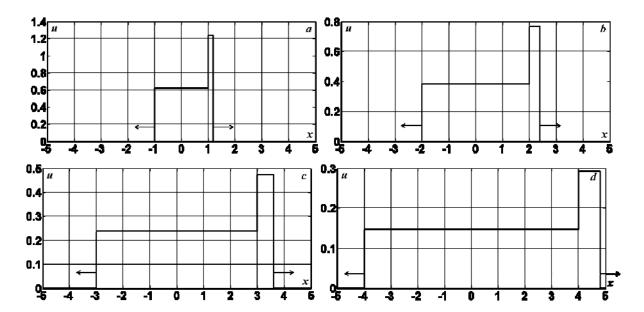


Рис. 2.9. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 5$, $\lambda_0 = 0.4$, $\lambda_v = 0.48$ и движении конденсатора с постоянной скоростью v = 1.2

Из графиков на рис. 2.6-2.9 видно, что количество энергии в линии, накапливаемой с течением времени в отрицательной области x < 0, отличается от энергии в области x > 0. Действительно, используя решение (2.20)-(2.22), получаем

$$W_{-}(t) = \frac{1}{2} \int_{-at}^{0} \left(Cu^{2} + Li^{2} \right) dx = \frac{U_{0}^{2}(a+v)}{2a(\lambda_{v} - \gamma)Z_{B}} \left(e^{-2\gamma t} - e^{-\frac{2(a\lambda_{v} + \gamma v)t}{a+v}} \right),$$

$$W_{+}(t) = \frac{1}{2} \int_{0}^{vt} \left(Cu^{2} + Li^{2} \right) dx = \frac{U_{0}^{2}}{2a(\lambda_{v} - \gamma)Z_{B}} \left((a + v)e^{-\frac{2(a\lambda_{v} + \gamma v)t}{a + v}} + (v - a)e^{-2\gamma t} - 2ve^{-2\lambda_{v}t} \right).$$

Рассмотрим разность энергий $\Delta W(t) = W_{+}(t) - W_{-}(t)$

$$\Delta W(t) = W_{+}(t) - W_{-}(t) = \frac{U_{0}^{2}}{a(\lambda_{v} - \gamma)Z_{B}} \left((a + v)e^{-\frac{2(a\lambda_{v} + \gamma v)t}{a + v}} - ae^{-2\gamma t} - ve^{-2\lambda_{v}t} \right) =$$

$$= \frac{U_0^2}{adZ_B} e^{-\frac{2(a\lambda_v + \gamma v)t}{a+v}} \left[1 - \frac{a}{a+v} e^{2adt} - \frac{v}{a+v} e^{-2vdt} \right], \quad d = \frac{\lambda_v - \gamma}{a+v}.$$
 (2.26)

Производная по параметру d от выражения в квадратных скобках формулы (2.26) имеет следующие знаки

$$F(d) = 1 - \frac{a}{a+v}e^{2adt} - \frac{v}{a+v}e^{-2vdt},$$

$$F'_d = \frac{2t}{a+v} \left[v^2 e^{-2vdt} - a^2 e^{2adt} \right] = \begin{cases} > 0, \text{ при } d < \frac{\ln(v/a)}{(a+v)t} \\ < 0, \text{ при } d > \frac{\ln(v/a)}{(a+v)t} \end{cases}.$$

Значит, функция F(d) является выпуклой и в точке $d=\frac{\ln(v/a)}{(a+v)t}$ достигает максимального положительного значения. А это означает, что функция F(d) для различных значений параметра d принимает положительные и отрицательные значения. С учетом знака коэффициента $U_0^2/(adZ_B)$ в формуле (2.26) получаем, что ΔW как функция от параметра d является убывающей и для $d=d_v$ принимает значение ноль. Значения d_v зависят от времени t и определяются как корни трансцендентного уравнения $ae^{2adt}+ve^{-2vdt}=a+v$. Таким образом, имеем

$$\Delta W(t) > 0, \ W_-(t) < W_+(t) \quad \text{при} \quad \lambda_{\nu} - \gamma < (a+\nu) d_{\nu}(t) \, ,$$

$$\Delta W(t) < 0, \ W_-(t) > W_+(t) \quad \text{при} \quad \lambda_{\nu} - \gamma > (a+\nu) d_{\nu}(t) \, ,$$

$$\Delta W(t) = 0, \ W_-(t) = W_+(t) \quad \text{при} \quad \lambda_{\nu} - \gamma = (a+\nu) d_{\nu}(t) \, .$$

Таким образом, чтобы в линии на момент времени t накапливалось одинаковое количество энергии в отрицательной и положительной областях (что означает симметрию потенциала) емкость C_n должна быть переменной (регулируемой) и обеспечивать выполнение условия: $\lambda_v = \gamma + (a+v)d_v(t)$.

3. Перемещение конденсатора с постоянным ускорением

Рассмотрим теперь задачу, в которой разряжающийся конденсатор начинает двигаться с постоянным ускорением b и начальной скоростью v, а при достижении скорости конденсатора значения, равного a, в дальнейшем он перемещается с этой постоянной скоростью. В этом случае задача (2.1) - (2.3) принимает вид

$$L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad x \in (-\infty, \infty), t > 0$$
(3.1)

$$u(x,0) = i(x,0) = 0, \ x \in (-\infty,\infty),$$
 (3.2)

$$u(x_{\nu}(t),t) = U_0 e^{-\lambda_0 t}, \ \lambda_0 = \frac{2}{C_n Z_p},$$
 (3.3)

$$x_{v}(t) = \begin{cases} \frac{bt^{2}}{2} + vt, & 0 \le t \le t_{a}, \ t_{a} = \frac{a - v}{b}, \ x_{a} = \frac{a^{2} - v^{2}}{2b}, \ t \ge 0. \end{cases}$$

Здесь $x_v(t)$ соответствует траектории движения конденсатора в плоскости переменных x, t, которая на рис. 3.1 обозначена буквами OAB и состоит из двух участков: на участке OA кривая $x_v(t) = \frac{bt^2}{2} + vt$ представляет собой параболу, а на участке AB — это прямая линия $x_v(t) = at$.

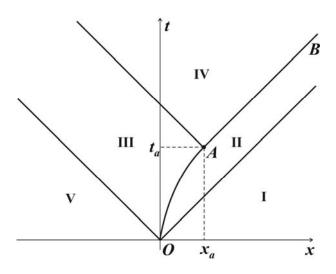


Рис. 3.1. Расположение областей решения задачи на плоскости *Oxt* для конденсатора, перемещающегося с постоянным ускорением вплоть до достижения световой скорости

Решение этой задачи, определяемое по методу характеристик, имеет различную форму в каждой из пяти областей плоскости Oxt (рис. 3.1). В областях I и V, куда еще не дошла электромагнитная волна, решение нулевое:

$$u(x,t) = i(x,t) = 0$$
, при $x < -at$ или $x > at$, $t \ge 0$. (3.4)

В области ІІ распространяется прямая волна, которая двигается вправо:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\gamma(t-t^+)} e^{-\lambda_0 t^+} = U_0 e^{-\gamma t - (\lambda_0 - \gamma)t^+}, \quad i(x,t) = u(x,t)/Z_B, \tag{3.5}$$

$$t^{+} = t^{+}(x,t) = \frac{a-v}{b} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2b(at-x)}{(a-v)^{2}}} \right]$$

при

$$\frac{bt^2}{2} + vt < x < at, \ \ 0 \le t \le t_a \quad \text{ или} \quad a(t-t_a) + x_a < x < at, \ \ t > t_a \,.$$

В III области распространяется обратная волна, которая двигается влево:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\gamma(t-t^-)} e^{-\lambda_0 t^-} = U_0 e^{-\gamma t - (\lambda_0 - \gamma)t^-}, \quad i(x,t) = -u(x,t)/Z_B,$$

$$t^- = t^-(x,t) = \frac{a+v}{b} \left[\sqrt{1 + \frac{2b(at+x)}{(a+v)^2}} - 1 \right]$$
(3.6)

при

$$-at < x < \frac{bt^2}{2} + vt$$
, $0 \le t \le t_a$ или $-at < x < -a(t-t_a) + x_a$, $t > t_a$.

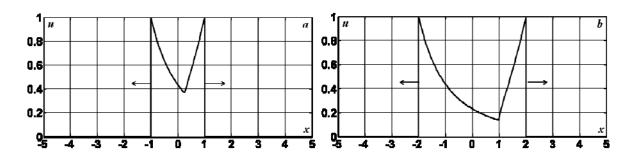
И в IV области распространяется также обратная волна, которая двигается влево:

$$u(x,t) = U_0 e^{-\frac{(\gamma + \lambda_0)t}{2}} e^{-\frac{\lambda_0 - \gamma}{2a}(x + at_a - x_a)}, \quad i(x,t) = -u(x,t)/Z_B,$$
(3.7)

при

$$-a(t-t_a) + x_a < x < a(t-t_a) + x_a, \ t \ge t_a$$
.

Распределение напряжения вдоль идеальной и неискажающей линии для моментов времени $t=1.0;\,2.0;\,3.0;\,4.0$ при v=0 , b=0.5 ($x_a=1$, $t_a=2$) изображены на рис. 3.2-3.4.



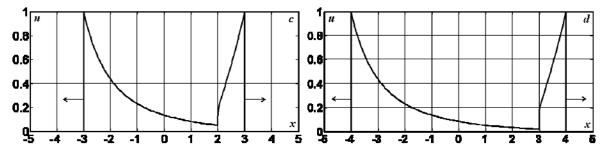


Рис. 3.2. Распределение напряжения вдоль идеальной линии ($\gamma = 0$) на различные моменты времени при $C_n = 1$, $\lambda_0 = 2$ и движении конденсатора с постоянным ускорением b = 0.5

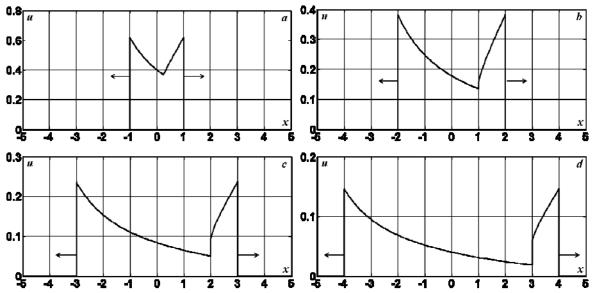


Рис. 3.3. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 1$, $\lambda_0 = 2$ и движении конденсатора с постоянным ускорением b = 0.5

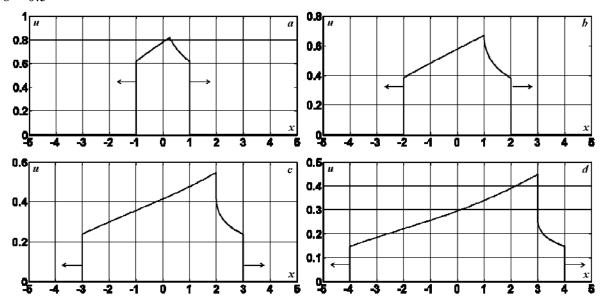


Рис. 3.4. Распределение напряжения вдоль неискажающей линии ($\gamma = 0.48$) на различные моменты времени при $C_n = 10$, $\lambda_0 = 0.2$ и движении конденсатора с постоянным ускорением b = 0.5

Из формул (3.4) — (3.7) и рисунков 3.2 — 3.4 видно, что решение u(x,t) является непрерывной функцией по переменной x до момента времени t_a , т.е. до момента достижения двигающимся конденсатором скорости электромагнитной волны a. В дальнейшем при $t > t_a$ функция u(x,t) претерпевает скачок в точках $x = a(t-t_a) + x_a$, т.е. вдоль прямой AB на границе раздела областей II и IV (рис. 3.1). Величина этого скачка равна

$$u(x+0,t) - u(x-0,t) = U_0 e^{-\gamma t} \left[e^{-(\lambda_0 - \gamma)t_a} - e^{-(\lambda_0 - \gamma)t/2} \right],$$

который аннулируется при $\lambda_0 = \gamma$.

Энергия, накопленная в линии к моменту времени t, вычисляется по формуле, которая совпадает с формулой для энергии (2.12) в случае движения конденсатора с постоянной скоростью $v \le a$

$$W_{II}(t) = \frac{U_0^2}{(\lambda_0 - \gamma)Z_{II}} \left[e^{-2\gamma t} - e^{-2\lambda_0 t} \right], \quad t \ge 0.$$

Для идеальной линии ($\gamma = 0$) полная энергия остается постоянной величиной, равной энергии конденсатора в начальный момент времени

$$W(t) = W_n(t) + W_n(t) = \frac{C_n U_0^2}{2} = \frac{U_0^2}{\lambda_0 Z_R}.$$

Заключение

- 1. На основе строгих решений телеграфных уравнений исследована динамика разряда конденсатора на длинную линию. При определенном соотношении между электрической емкостью источника напряжения и потерями в линии распределение суммарной энергии в ней становится симметричным и не зависит от скорости движения конденсатора.
- 2. Обнаружен релятивистский эффект пропорционального увеличения скорости разряда электрической емкости при скоростях ее движения превышающих скорость распространения волн потенциала и тока в линии. Решена также нелинейная задача о разряде конденсатора при его перемещении с постоянным ускорением вплоть до достижения им световой скорости.
- **V. Pațiuc.** D.ș.f.-m. conferențiar universitar la Universitatea de Stat a Moldovei, cercetător științific la Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice: fizica matematică, metode numerice de calcul, mecanica și electrotehnica teoretică. Autor a peste 80 lucrări științifice, inclusiv 10 monografii.

Литература

- 1. *Кулигин В.А., Кулигина Г.А., Корнева М.В.* Разряд движущегося конденсатора. http://314159.ru/kuligin/kuligin5.htm
- 2. *Римский В.К.*, *Берзан В.П.*, *Пацюк В.И. и др.* Волновые явления в неоднородных линиях. Т.4. Параметрические цепи. Кишинев: Типография АНМ, 2008. 552с.

Получено редакцией 1 октября 2008 г.

Productivitatea energetică a terenurilor la suprafață

A.Guţu, E.Radjbhandari

Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat. Este prezentată o încercare de apreciere a gradului de eficiență a utilizării suprafeței solului prin diferite metode de valorificare a radiației solare incidente. Sunt analizate metode tehnice (colectoare solare, baterii fotovoltaice, Centrale Termoelectrice Solare), plantații de culturi energetce și agrotehnice (arbuști, grâu, porumb, floarea–soarelui, rapița, sorg zaharat) și culturi de microalge. Sunt relatate avantajele și dezavantajele fiecărui din aceste trei grupuri. Din punct de vedere al eficienței utilizării suprafeței de producție metodele tehnice sunt superioare, de ele se apropie metodele de utilizare a culturilor de microalge.

Cuvinte–cheie: radiație solară, producție energetică, colectoare solare, instalații electrogeneratoare, biocombustibili, microalge.

Энергетическая производительность поверхности почвы А.Гуцу, Э.Раджбхандари

Технический университет Молдовы

Аннотация. Представлена попытка оценки степени эффективности использования поверхности земли для освоения солнечной радиации различными методами. Проведен анализ технических методов (солнечные коллекторы, фотоэлектрические батареи, солнечные тепловые электростанции), плантаций энергетических и агротехнических культур (кустарники, пшеница, кукуруза, подсолнух, рапс, сорго) и культуры микроводорослей. Приведены преимущества и недостатки каждой из этих групп методов. С точки зрения эффективности использования производственной площади технические методы предпочтительны, к ним близок метод использования микроводорослей.

Ключевые слова: солнечная радиация, солнечные коллекторы, биотопливо, микроводоросли.

Power productivity of the ground surface A. Gutu, E. Radgbhandari

Technical University of Republic of Moldova

Abstract. There is presented an attempt to estimate the efficiency degree when working with soil surface through the different methods of valorization incident solar radiation. Such technical methods are being analyzed as (solar collectors, photovoltaic cells, solar thermal power plants), power cultures field (bushes, wheat, sunflower, maize, rape, sorghum) as well as microalgae crops. Here is the description of advantages and disadvantages for each group in part out of these three. The technical methods are up to date from the efficiency utilization view-point of industrial area. Microalgae crops are similar to technical methods from this point of view.

Key words: solar radiation, power production, solar collectors, electricity generating installations, biofuels, microalgae.

Încălzirea globală cauzată de emisiile de gaze cu efect de seră emise la arderea combustibililor fosili și situația economică legată de creșterea vertiginoasă a prețurilor la combustibili, rezervele cărora sunt pe cale de a se iepuiza către sfârșitul secolului trecut au impus țările industrial dezvoltate să-și direcționeze economiile naționale spre producerea biocombustibililor. Dublarea în anii 2007-2008 a prețurilor la culturile alimentare [1, 2, 3] a atras atenția asupra altei probleme acute cu care se confruntă populația globului – criza alimentară. Una din cauzele de bază a creșterii prețului la alimente a fost numită de multe surse producerea biocarburanților: bioetanolul și biodieselul [2, 3, 4 ș.a.]. În același timp, Brazilia –cel mai mare exportator de bioetanol în lume, susține că la un management bun al solurilor și culturilor folosite influența excesivă a producerii de biocarburanți asupra prețurilor la alimente se poate reduce la o valoare neînsemnată[5]. Necesitatea alegerii culturilor este relatată și de alți participanți la debatele pe această temă [3, 6 ș.a.]. Deci se pune problema utilizării eficiente a suprafețelor solului. Savantul ucrainean prof. L. Bozhkov propune pentru acest caz un indice denumit ponderea de putere energetică sau productivitate energetică, având ca unitate de baza W/m² [7].

Debatele indicate mai sus se duc numai referitor la biocarburanții folosiți în transport, care în bilanțul mondial de energie constituie mai puțin de o treime. În plus, în transport tot mai pe larg se folosește energia electrică, biogazul, pe viitor se preconizează hidrogenul. De aceea, noi considerăm necesară includerea în analiza eficienței utilizării suprafețelor a biomasei în integral și, luând în considerație că energia biomasei are la bază radiația solară incidentă pe suprafața solului, de asemenea, includerea formelor tehnice de valorificare a energiei solare. Considerăm că indicile propus de L. Bozhkov poate fi aplicat, împreună cu alte caracteristici, la toate aceste metode de utilizare a suprafețelor terenurilor pe care se valorifică radiația solară.

Au fost analizate următoarele metode:

- încălzirea apei în colectoare solare.
- generarea energiei electrice în baterii de elemente fotovoltaice,
- generarea energiei electrice la centrale termoelectrice solare,
- producerea combustibililor solizi în plantații energetice de arbuști,
- producerea combustibililor lichizi şi solizi prin cultivarea rapiţei,
- producerea combustibililor lichizi și solizi prin cultivarea sorgului zaharat,
- producerea biocombustibililor prin cultivarea microalgelor.

Tabelul 1. Analiza comparativă a metodelor de utilizare a energiei solare

	Metoda	Productivita	Intensitate		Intensitate	
		te anuală,	energetică,	Randament,	exergetica,	
		GJ/ha	W/m^2	%	W/m^2	
Cole	ectoare solare	22000 70		47	6,3	
Instalații fotovoltaice		7300	7300 23 15		23	
CTE solare		9300	30	20	30	
Plant	ații energetice	140	0,44 0,3		0,50	
	bioetanol	35	0,11	0,075	0,115	
Grâu	solid	25	0,08	0,05	0,084	
	total	60	0,190	0,129	0,198	
	biodiesel	6	0,019	0,013	0,020	
Porumb	solid	31	0,098	0,07	0,102	
	total	37	0,117	0,079	0,122	
Eleane	biodiesel	35	0,106	0,07	0,111	
Floarea— soarelui	solid	18	0,058	0,04	0,061	
Soarciui	total	53	0,164	0,110	0,171	
	biodiesel	42	0,13	0,09	0,14	
Rapiță	solid	80	0,25	0,1 7	0,26	
	total	112	0,38	0,26	0,40	
Sorg zaharat	bioetanol	66	0,21	0,14	0,23	
	solid	320	1,02	0,68	1,07	
	total	386	1,23	0,82	1,30	
Micro-	obținut	605	1,92	1,3	2,0	
alge	teoretic	16005000	516	3,510,0	5,215,7	

S-au determinat: producția anuală de energie la un hectar, intensitatea energetică medie anuală în W/m² (indicele Bozhkov), randamentul utilizării energiei solare incidente. Deoarece avem de a face cu producție de calitate foarte diferită: căldură, energie electrică și combustibil, s-a determinat și intensitatea exergetică.

Energia solară incidentă pe o suprafață orizontală timp de un an în condițiile zonei de centru a Republicii Moldova s-a considerat, conform [8], 4676 MJ/m², sau 46,76 TJ/ha.

Productivitatea câmpurilor de colectoare solare pentru apă caldă s-a determinat pentru energia incidentă pe o suprafață amplasată sub un unghi optim - $4871~\text{MJ/m}^2$ [8] și randamentul captatoarelor 0,45. Productivitatea baterielor fotovoltaice s-a calculat pentru aceeași cantitate de energie la randamentul de 0,15. Energia produsă de CTE solare s-a calculat la același randament de 0,15, dar la radiația incidentă pe heliostate – $6230~\text{MJ/m}^2$ pe an

Productivitatea plantațiilor energetice de arbuști s-a considerat de 10 t/ha [9; 10] de biomasă cu căldura de ardere la masa fixă de 15 MJ/kg.

Productivitatea de masă solidă pentru culturile agricole, conform [11], s-a considerat: grâu – 1,8 t/ha, porumb – 2,2 t/ha, floarea—soarelui – 1,3 t/ha, iar producția de biocarburanți, conform [12], respectiv, - 980 l/ha, 168 l/ha și 953 l/ha.

Pentru plantațiile de sorg zaharat, conform [13], s-au considerat: producția de bioetanol – 3500 l/ha, producția de masă solidă – 20 t/ha, pentru plantațiile de rapiță, conform [13] și [14] - producția de biodiesel – 0,9 t/ha, producția de masă solidă – 5 t/ha.

Datele pentru microalge au fost luate de pe site-ul Permaculture Activist [12].

Exergia apei calde s-a determinat, considerând temperatura ei 65 °C iar temperatura mediului înconjurător - 9 °C. Pentru electricitate exergia și energia sunt numeric egale. Având în vedere conținutul foarte mic sau lipsa practică a sulfului, cenușii și umidității în biocombustibili, s-a luat în calcul numai raportul hidrogen/carbon (pentru combustibilii solizi calculele s-au efectuat la masa fixă).

Rezultatele sunt prezentate în tabelul de mai sus.

După cum se vede din tabel, eficiența **metodelor tehnice** este cu mult superioară celor fitotehnice: productivitatea anuală a primelor este de ordinea miilor și chiar zecilor de mii de GJ la un hectar, pe când cea a ultimilor – de ordinea sutelor de GJ/ha. Eficiența energetică cea mai mare o are încălzirea apei în colectoare solare, însă eficiența exergetică cea mai mare este la instalațiile electogeneratoare. Un alt avantaj al acestor metode constă în faptul că ele nu prezintă careva cerințe față de sol și nu afectează fertilitatea lui. Dezavantajele lor sunt: investițiile inițiale mari și imposibilitatea de stocare pe o perioadă îndelungată a energiei obținute.

Dintre plantele agricole eficiență mai mare o are sorgul zaharat, atât în privința carburantului cât și a combustibilului solid, producția căruia este superioară inclusiv și celeia a plantațiilor de arbuști. El este urmat de rapiță. Trebuie însă să menționăm că destinația bioetanolului și a biodieselului sunt diferite, de aceea abordarea problemei va fi separată. Culturile alimentare tradiționale grâul, porumbul și floarea-soarelui se evidențiază cu o productivitate energetică net mai mică. Prin urmare, cultivarea lor în scopuri pur energetice nu poate fi considerată ca ratională. Dacă randamentul utilizării radiației solare incidente în cazul plantelor energetice este de două ordine mai mic decât a metodelor tehnice, referitor la microalge, rezultatele obținute sunt cu mult mai superioare celorlalți biocombustibili, iar cele teoretice se apropie de eficiența metodelor tehnice. De menționat, că, spre deosebire de celelate culturi energetice, din microalge se obtin numai combustibili de calitate superioară: carburanți și biogaz. Un alt avantaj față de acestea este raportul cu solul: ca și metodele tehnice, cultivarea microalgelor nu prezintă careva cerințe față de acesta și nu afectează fertilitatea lui. Avantajele microalgelor fată de metodele tehnice constau în posibilitatea stocării energiei prin păstrarea îndelungată a combustibilului și utilizarea lui în cantitatea necesară la vremea necesară. Deoarece cercetările în acest domeniu sunt la faza inițială și instalație industrială nu există, este complicat de apreciat partea financiară a metodei, dar investițiile probabil vor fi de ordinea celor din metodele tehnice, iar cheltuielile de întreținere și exploatare – nu mai mici decât ale metodelor agricole.

Trebuie să menționăm că productivitatea energetică a suprafeței este una din ansamblul de caracteristici ale metodelor de valorificare a radiației solare. La selectarea metodei potrivite în fiecare caz va fi necesar de asemenea de luat în considerație felul și destinația energiei sau combustibilului, terenul și solul disponibil, volumul investițiilor necesare, cheltuielile de întreținere și exploatare ș.a.

Concluzii

- 1. Una din condițiile compromisului în soluționarea problemelor globale ale energiei și hranei este utilizarea eficientă a suprafețelor solului.
- 2. Productivitatea energetică a suprafeței solului la valorificarea radiației solare prin metode tehnice este de ordinea miilor și chiar zecilor de mii de GJ/ha, pe când prin metode agricole se poate obține o producție de ordinea sutelor de GJ/ha.
- 3. Culturile alimentare tradiționale grâul, porumbul și floarea—soarelui au productivitatea energetică cu mult inferioară celei a rapiței și sorgului zaharat.
- 4. Rezultatele obținute la cultivarea microalgelor sunt cu mult superioare celorlalți biocombustibili, iar cele teoretice se apropie de eficiența metodelor tehnice.

Bibliografie

- 1. **Food prices. The end of cheap food.** Dec 6th 2007. From *The Economist* print edition. http://www.economist.com/research/
- 2. Donald Mitchell. **A Note on Rising Food Prices**. The World Bank Development Prospects Group. WPS4682, 2008/07/01. http://www-wds.worldbank.org/external
- 3. Food vs fuel. http://en.wikipedia.org/wiki/Food vs fuel.
- 4. Грант Феррет. Эксперт OOH: биотопливо вместо еды это преступление. Би-би-си, Нью-Йорк. http://news.bbc.co.uk/hi/russian/sci/tech
- 5. **Brazil says biofuel production not to blame for food crisis.** Rainforest Portal. June 2, 2008 http://www.rainforestportal.org/
- 6. **Fuel vs. Food: Debate Flares.** By Seth Borenstein, Associated Press 29 April 2008, http://www.livescience.com/environment/080429-ap-biofuels-food.html.
- 7. Humboldt Kolleg. Integrating science and technology for a sustainable and secure future: energy, environment, informatics and human health. SSF-2008, Minsk.
- 8. C.Guţu Caracteristicile radiaţiei solare pe teritoriul Republicii Moldova. "PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE " Revista electronica № 1 (2007), IE ASM, p.655-659.
- 9. Энергетический лес. http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%
- 10. Д.Стребков. Энергетическое использование биомассы. http://www.nestor.minsk.by/sn/2006/26/sn62607.html
- 11. V.Arion, C.Bordeianu ș.a. **Biomasa și utilizarea ei în scopuri energetice**. Ch. Ed. "Garomond-Studio" SRL, 2008, -268 p.
- 12. http://www.permacultureactivist.net/Holmgren/holmgren.htm
- 13. I.Hăbăşescu. **Biomasa sursă energetică de perspectivă pentru Moldova.** INTERNATIONAL CONFERENCE ENERGY OF MOLDOVA 2005 September 21-24, 2005 Chisinau, Rep.Moldova. p.727-729.
- 14. T.Bounegru, N.Barbă, V.Boţan. Cu privire la producereabiocombustibilului din ulei de rapiţă în Republica Moldova. Lucrările Conferinţei Ştiinţifice "Sporirea eficienţei de utilizare a Energiei şi apei în agricultura Moldovei. Chişinău, 2001, p.38-47.

Prezentat la 14 octombrie a. 2008

Комплексная биоэнергетическая установка

М.Тыршу, Н.Константинов, М.Узун

Институт энергетики АНМ, ул. Академическая 5, Кишинев, МD2028

e-mail: mtirsu@ie.asm.md

Реферат. Предложена технологическая схема комплексной биоэнергетической установке для производства электроэнергии, горячей воды и газа при использование в качестве сырья навоза, птичьего помета и твердых органических отходов. Предложенное техническое решение обеспечивает практически 100% использование энергии сжигаемого газа за счет внедренной обратной связи между электростанцией и биореактором. Также, разработаны рекомендации для наилучшего использования установки в Республики Молдова.

Ключевые слова биогаз, биогазовая установка, производство биогаза, навоз и твердые органические отходы.

Instalație complexă bioenergetică M.Tîrşu, N.Constantinov, M.Uzun

Institutul de Energetică al ASM, Chișinău, str. Academiei 5, MD2028

e-mail: mtirsu@ie.asm.md

Rezumat. În lucrarea dată este propusă schema tehnologică a instalației complexe bioenergetice destinată producerii energiei electrice, căldurii și apei calde, precum și a gazului la utilizarea în calitate de materie primă a băligarului, găinațului și altor deșeuri organice solide. Soluția tehnică propusă asigură practic utilizarea integrală (100%) a energiei gazului ars datorită introducerii legăturii inverse dintre stația electrică (generator diesel) și bioreactor. De asemenea sunt elaborate recomandări de utilizare mai eficientă a instalațiilor de biogaz în Republica Moldova.

Cuvinte-cheie: biogaz, instalație de biogaz, producerea biogazului, băligar, găinat, deșeuri organice solide.

Complex biopower installation M.Tirshu, N.Konstantinov, M.Uzun

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova, st. Academiei, 5, Chisinau, MD2028 e-mail: mtirsu@ie.asm.md

Abstract. It is presented the technological scheme of complex biopower installation for manufacture of the electric power, hot water and gas at use as raw material of manure, bird's dung and firm organic waste products. The suggested technical solution provides practically 100 % use of energy of burnt gas due to the introduced feedback between power station and a bioreactor. Recommendations for the best use of installation in Republics Moldova are developed as well.

Key words: biogas, biogas installation, biogas production, manure and firm organic waste products.

1. ВВЕДЕНИЕ

Биогаз является высококачественным и полноценным носителем энергии и может многосторонне использоваться как топливо в домашнем хозяйстве, в среднем и мелком предпринимательстве для приготовления пищи, производства электроэнергии, отопления жилых и производственных помещений, кипячения, сушки и охлаждения.

Особенно, если учитывать что Республика Молдова не имеет своих собственных энергоресурсов, а зависит практически на 100% от импорта, то является очень актуальным использовать как можно шире возобновляемые виды энергии. Республика Молдова является аграрной страной, поэтому располагает огромным запасом сырья необходимого для производства биогаза, за счет которого можно получить и электроэнергию и тепла, и горячей воды, и высококачественное удобрение и т.д. Тем более, что использование биогазовых установок имеет огромные экологические выгоды: уменьшение выброса в атмосферу метана (парниковый газ); уменьшение количества сжигаемого угля, дров или топлива для выработки электроэнергии, и как следствие уменьшение образуемого углекислого газа (парниковый газ) и вредных продуктов сгорания; уменьшение сброса в окружающую среду загрязненных вод; очищение загрязненных вод от органических веществ и микроорганизмов; сохранение леса от вырубки; уменьшение необходимости в химических удобрениях; очищение воздуха в доме и селе от продуктов сгорания угля;

уменьшение загрязнения воздуха азотистыми соединениями, дезодорирование воздуха [1-3].

В какой степени биогаз может заменить традиционное топливо, зависит от объёма и эффективности установки. Опыт других стран в использовании БГУ [4] показывает, что установка объёмом 8 куб. м., работающая на свином навозе может полностью заменить газ пропан, используемый для приготовления пищи в семье из пяти человек. БГУ объемом 60 куб.м может использоваться для отопления жилого помещения площадью 200 кв.м и производственного помещения размером 400 кв.м.

В нашей стране существует множество малых и средних индивидуальных предприятий, которые занимаются производством свиней, коров, птиц, овец и т.д. А также, существуют более крупные производители, которые занимаются производством вина, пиво и т.д. И у тех и у других предпринимателей имеется огромное количество органических отходов, с которыми они не знают что делать. А с другой стороны, это является хорошим сырьем для производства биогаза и удобрения. Поэтому, если внедрить в широком масштабе использование биоустановок, то это приведет к снижению импорта энергоресурсов, и уменьшения выбросов в атмосферу. А также, решит проблему с избавлением от органического мусора.

В данной работе предлагается технологическая схема комплексной биоэнергетической установки имеющая улучшенные показатели по сравнению с другими установками [4] в области процента использования энергии выработанного газа, а также приводится результаты анализа производства биогаза в зависимости от сырья и условиях сбраживания.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК В СФЕРЕ «МАЛОГО БИЗНЕСА»

Анализ возможностей использования биоэнергетических установок в агропромышленном комплексе Молдовы в сфере «Малого бизнеса» показал значительное отличие вариантов использования биогаза, как в технологическом плане, так и в гибкости используемых видов энергии.

Так, например, использование биогазовой установки (БГУ) в крупных животноводческих и птицеводческих комплексах в первую очередь предусматривает решение таких экологических проблем как:

- накопление больших объемов биомасс загрязняющих окружающую среду, их безопасную переработку и получение сырья для производства витаминов и качественных удобрений;
- проблемы плодородия земель и других.

Использование биогазовых установок в сфере «Малого бизнеса» имеет целый ряд отличительных особенностей:

- ежесуточный выход биомассы в зависимости от конкретных объемов производства составляет от 0.5 до 1.0 м 3 в сутки;
- как правило «Малый бизнес» является, хоть и необъемной, но многопрофильной деятельностью.

Отсюда и требование к разносторонности видов энергии:

- водяное отопление производственных помещений и офиса;
- использование биогаза в пищеприготовлении и работе дизельной электрической станции;
- использование переработанной массы в качестве удобрений.

В результате выполнения исследований была разработана и сконструирована биогазовая установка для использования в сфере «малого бизнеса», которая представлена на рис.1.

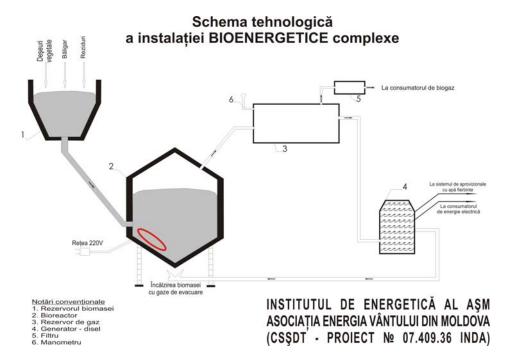


Рис.1. Технологическая схема комплексной биоэнергетической установки

Предложенная установка состоит из следующих частей: 1- резервуар приема биомассы, 2 — биореактор, газгольдер, дизель генератор, фильтр, указатель давления. Работает она следующим образом: В бункер 1 заливается сырье и доводится до нужной кондиции (влажность 90%). После этого подготовленная биомасса загружается в биореактор 2. Для улучшения процесса ферментации добавляется катализатор в определенных пропорциях и поддерживается мезофильный или термофильный режим. Выработанный газ накапливается в газгольдере 3. Отсюда он поступает на электрическую станцию 4 (в данном случае дизель генератор), который в нужное время производит электрическую энергию. Охлаждение ДВС осуществляется водой, которая используется потребителем для обогрева или других нужд. Электростанция имеет обратную связь с биореактором, который при работе поддерживает заданную температуру сбраживания. Параллельно газ из газгольдера через понижающий редуктор поступает на газовую плиту для приготовления пищи.

Основные отличия этой БГУ заключаются в следующем:

- небольшие габаритные размеры;
- технически реализован вариант подогрева биомассы двумя способами: термоэлектронагревательным элементом (ТЭН) и выхлопными газами работающей на биогазе дизельной электростанции (рис.1);
- наличие двух способов подогрева биомассы позволяет легко переводить БГУ в мезофильный (33-38 0 C) или в термофильный (53-60 0 C) режим.

Каждый из этих режимов имеет свои плюсы и минусы [3,5].

Мезофильный режим ферментации:

Плюсы

- Производительность газа практически не снижается при отклонении температуры на $1-2^{0}$ C от оптимума;
- -Требуется меньше энергетических затрат на поддержание температуры.
- -Продолжительность сбраживания субстрата -25-30 дней;

Минусы

- Выделение газа менее интенсивно;
- Биошлам полученный при данном режиме не является полностью стерильным.

Термофильный режим ферментации

Плюсы

- Выделение газа интенсивнее;
- Требуется меньше времени до полного разложения субстрата 12 дней;
- Биошлам полученный при данном режиме является полностью стерильным и поэтому его можно применять в качестве кормовых добавок животным.

Минусы

- Производительность газа значительно снижается при отклонении температуры на $1-2^{0}$ С от оптимума;
- Требуется больше энергетических затрат на поддержание температуры.

Также, количество произведенного газа из 1 куб.м. зависит:

- от сырья. Сырьем для БГУ может быть навоз домашних животных, растительная масса и другие органические остатки. В зависимости от используемого субстрата, производительность биогаза варьирует. Примерные данные указаны в таблице №1.

Таблица №1. **Производительность биогаза в зависимости от используемого сырья за** период ферментации

	mopmon wop
Сырье (субстрат)	Биогаз (м3 на м3 субстрата)
Куринный помет	53,71
Конский навоз	40,60
Навоз КРС	32,40
Навоз КРС (свежий)	76,69
Овечий навоз	162,00
Свиной навоз	25,52

- от влажности загружаемого субстрата; Процесс брожения может происходить при влажности от 50% до 95%, однако учеными доказано для животноводческих отходов процесс метанообразования оптимально протекает при влажности сырья от 90-95%.
- от времени пребывания субстрата в реакторе; Оптимальное время пребывания субстрата в реакторе различается в зависимости от рабочей температуры и вида сбраживаемого сырья. При мезофильном режиме ферментации -25- 30 дней, при термофильном 10-15дней.

Еще одна особенность использования БГУ в сфере «Малого бизнеса» заключается в том, что система водяного охлаждения дизельной электростанции, работающей на биогазе, подключена к системе отопления офиса (рис.1). Таким образом, достигается полное использование энергии сжигаемого газа (режим когенерации).

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА

Биогаз — это газ, который получается в результате метанового сбраживания [2]. Метановое брожение по другому называется анаэробным брожением и как результат получаем:

органические соединения + H2O \rightarrow CH4+CO2+C5H7NO2+NH4+HCO3.

Нерастворимые органические вещества (белки, углеводы, жиры), которые присутствуют в биомассе, начинают распадаться на простейшие органические соединения (аминокислоты, сахара, жирные кислоты). Эта стадия называется — гидролизом и протекает под воздействием ацидогеных бактерий. На второй стадии происходит гидролизное окисление части простейших органических соединений под воздействием гетероацетогеных бактерий, в результате которой получается ацетата, двуокись углерода и свободный водород. Другая часть органических соединений с полученным ацетатом на 2 стадии ацетатом образует С1 соединения (простейшие органические кислоты). Полученные вещества являются питательной средой для метанобразующих бактерий 3 стадии. 3 стадия протекает по двум процессам, вызванные различной группой бактерий. Эти две группы бактерий преобразуют питательные соединения 2-й стадии в метан СН4, воду Н2О, двуокись углерода.

В качестве органических отходов используются: навоз, зерновая и мелассная послеспиртовая барда, пивная дробина, свекольный жом, фекальные осадки, отходы рыбного и забойного цеха (кровь, жир, кишки, каныга), трава, бытовые отходы, отходы молокозаводов — лактоза, молочная сыворотка.

Принцип производства биогаза заключается в экологически чистой безотходной переработке органических отходов. Выход биогаза зависит от содержания сухого вещества и вида используемого сырья. Из тонны навоза крупного рогатого скота получается 30–50 м³ биогаза с содержанием метана 60%, 150—500 м³ биогаза из различных видов растений с содержанием метана до 70%. Максимальное количество биогаза — это 1300 м³ с содержанием метана до 87% — можно получить из жира.

В соответствии с функциональной схемой перечисленные виды отходов накапливаются в специальном бункере. В этот бункер осуществляется предварительная подготовка биомассы и в жидком виде подается в метантенке (биореактор).

В зависимости от суточного выхода навоза, помета и других отходов, а также от объема потребности биогаза в тот или иной период выбирается мезофильный или термофильный режим работы биореактора. Очень важно при первичной загрузке биореактора смешать коровий навоз и птичий помет приблизительно в равных пропорциях.

Процесс сбраживания может проходить при использование или не использования катализатора. На рис.2 представлен процесс получения биогаза в созданной установке объемом биореактора 0,26 куб.м. и объемом газгольдера 0,080 куб.м. без использования катализатора и с использованием птичьего помета в качестве сырья.

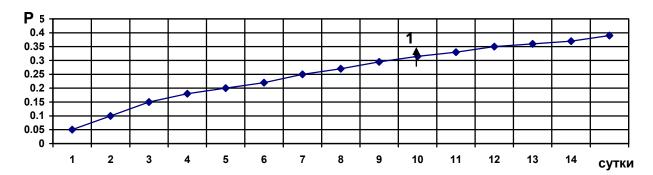


Рис.2. Динамика роста давления в метантенке от начало загрузки сырья до получения товарного (горючего) газа без использования катализатора и температура сбраживания 20^{0} C. Точка 1, является точкой получения горючего газа CH₄, углекисленного газа и водорода $\approx 50\%$.

Как видно из рис.2 горючий газ получается только на 10 сутки. Продолжительность сбраживания 20–30 суток. Выбранный режим сбраживания и использование катализаторов решающим образом влияет как на начало выдачи товарного (горючего) газа, так и на продолжительность сбраживания. Поскольку биогаз расходуется неравномерно, а установка вырабатывает его постоянно, то возникает вопрос об его аккумулировании. С этой целью, предложенная установка снабжена газгольдером.

При использовании катализаторов, процесс сбраживания происходит более интенсивно, как это видно из рис.3.

На рис.3 показан процесс сбраживания также для птичьего помета но при других условиях:

- Катализатор меласса 5% от объема загрузки;
- Температура сбраживания 37°C;

Продолжительность сбраживания 17-25 суток в зависимости от качества сырья.

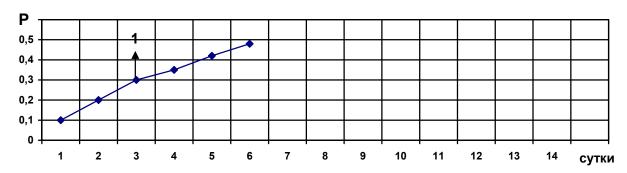


Рис.3. Динамика роста давления в метантенке от начало загрузки сырья до получения товарного (горючего) газа с использованием катализатора и температура сбраживания 37^{0} С. Точка 1, является точкой получения горючего газа CH_{4} .

Хорошим катализатором сбраживания биомассы является меласса (патока). Поэтому, на рис.3 представлены полученные результаты при использовании мелассы в пропорциях 5% от объема загружаемого биомассы. Тип ферментации был выбран мезофильный. Как видно из результатов представленных на рис.3 горючий газ получается

уже на 3 сутки. Продолжительность сбраживания при этих условиях составляет 17-25 суток в зависимости от качества сырья.

Первичный запуск биореактора осуществляется путем подогрева и поддерживания температуры биомассы при использовании традиционных видов энергии (электрическая энергия, дрова, пропан — бутан и др.). Режим работы биореактора контролируется манометром высокого давления, манометром низкого давления и датчиком температуры. При появлении горючего газа (55-60% CH_4 и 40-45% CO_2) подача тепловой или электрической энергии от постороннего источника прекращается и дальнейшее поддерживание режима работы биореактора осуществляется в соответствии с функциональной схемой.

4. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ БГУ

Суточная производительность БГУ зависит от объема перерабатываемого сырья, его качества и режима работы биореактора (мезофильный или термофильный). Усредненная производительность при переработке $0.5 \, \mathrm{M}^3$ биомассы составляет $6.8 \, \mathrm{M}^3$ газа с теплопроводностью 5500-5600 кка, что эквивалентно $3.6-4.8 \, \mathrm{M}^3$ природного газа.

При использовании БГУ в сфере «Малого бизнеса» совсем необязательно использовать биогаз в режим ON-LINE. Вполне допустимо его накапливать и использовать по мере необходимости (например в системах орошения для питания дизельных насосов). В таких случаях объем газгольдера определяется не от суточного выхода биогаза, а в зависимости от цикличности работы оросительных установок или других потребителей газа. Требование к очистке выработанного биогаза зависит от вида потребителей. Так, использование биогаза в оросительных котлах фактически не требует очистки, а для работы двигателя внутреннего сгорания требуется фильтр.

5. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Сфера «Малого бизнеса» появилась в период разгосударствления крупнотоварного производства в силу его нерентабельности. В интересах малого бизнеса Российские товаропроизводители предлагают БГУ с рабочим объемом биореактора 2,5-20 м³.

Стоимость этих БГУ без учета газосжигающего оборудования составляет 6,0-12 тысяч евро. Срок окупаемости по утверждению производителей составляет 1,1-2.2 года.

Однако в условиях Молдовы уровень первичных затрат на строительство биогазовых установок можно снизить в разы. Дело в том, что в Молдове в связи с повышением требований к качеству виноматериалов, практически на всех винзаводах идет реконструкция с освобождением огромного количество стальных цистерн емкостью 10m^3 и более. Эти цистерны можно фактически без доработки использовать в качестве биореакторов (метантенков) и газгольдеров. Стоимость их будет исчисляться ценой металлолома.

Кроме того, в конце XX века в Молдове долгое время имели место «веерные» отключения электроэнергии. Это привело к тому, что в сфере малого бизнеса и в частном секторе накопилось большое количество бензиновых и дизельных электростанций, которые с большим успехом могут использоваться как газосжигающее оборудование.

Также, нужно учесть, что при производстве биогаза получается биошлам. Биошлам используется как удобрение на полях хозяйства, при полной переработке субстрата в реакторе установки, биошлам можно использовать как добавку в корм свиньям и

домашней птице. После несложной обработки (фильтрация и сушка) биошлама его можно реализовывать в коммерческих целях. Потенциальные покупатели удобрения из биошлама - садоводческие хозяйства, дачные кооперативы и пр.

Соответственно не придется искать кредитные схемы с их высокими издержками. Смонтированная БГУ не требует значительных трудозатрат на обслуживание (2-3 человека/часа в день).

Поэтому, такие работы могут выполнятся сторожевым или другим низкоквалифицированным персоналом. По мере дальнейшего повышения цен на энергоносители всех видов и, особенно, с учетом того, что энергоемкость ВВП Молдовы в 3-4 раза выше среднеевропейской, использование БГУ в сфере малого бизнеса крайне важно.

6. ВЫВОДЫ

Предложена комплексная биоэнергетическая установка для производства электрической энергии, газа и тепла, использующая в качестве сырья навоз, птичий помет и другие твердые органические отходы. Предложенное схемное решение обеспечивает 100% использование энергии сжигаемого газа за счет внедрения обратной связи между электростанцией и биореактором.

Представлены оптимальные необходимые условия для ускорения процесса сбраживания, а как результат уменьшение времени необходимого для получения горючего газа.

7. НАУЧНАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования были проведены при финансовой поддержке Высшего Совета по Науке и Технологическому Развитию Академии Наук Республики Молдова в рамке молодежного проекта №07.409.36 INDA.

Литература

- 1. Biogas production. http://www.habmigern2003.info/PDF/methane-digester.pdf
- 2. Biogas. http://en.wikipedia.org/wiki/Biogas
- 3. Harold House, P.Eng. ALTERNATIVE ENERGY SOURCES BIOGAS PRODUCTION. http://www.londonswineconference.ca/proceedings/2007/LSC2007 HHouse.pdf
- 4. Биореакторы для переработки биологических отходов. http://www.koud.ru/
- 5. Калмыкова Ю., Герман А., Жирков В. Твердые бытовые отходы. Утилизация и переработка бытовых отходов. Вторичное сырье. Основы производства биогаза. http://www.solidwaste.ru/publ/view/34.html

Получено редакцией 16 октября 2008 г.

Высоковольтный резистивный делитель на базе литого микропровода в стеклянной изоляции на рабочие напряжения 6 – 24 кВ переменного тока промышленной частоты.

Журавлев А.А., Шит М.Л (Институт Энергетики Академии Наук Молдовы) **Колпакович Ю.И., Кожокару** Д.И., **Клейменов В.Г.** (Институт "ELIRI" S.A.,)

Аннотация. Приведен расчет и описание конструкции высоковольтного резистивного делителя на базе литого микропровода в стеклянной изоляции на рабочие напряжения 6 кВ – 24 кВ переменного тока промышленной частоты. Приводится методика компенсации частотной погрешности при производстве делителей и результаты испытаний экспериментального образца делителя напряжения.

Ключевые слова: высоковольтные делители напряжения переменного тока, измерение высокого напряжения переменного тока.

Divizor rezistiv de tensiune pe baza microfirelor turnate în izolație din sticlă la tensiune de lucru 6-24 kV de curent alternativ de frecvența industrială

Juravliov A., Şit M., (Institutul de Energetică al AȘM), Colpacovici I., Cojocaru D., Cleimenov V. (Institutul "ELIRI" S.A.)

Rezumat. Este prezentată analiza şi descrierea construcției a divizorului rezistiv de tensiune pe bază microfirelor turnate în izolație din sticlă la tensiune de lucru 6–24 kV de curent alternativ de frecvența industrială. Este prezentată metoda de compensare a erorii de frecvență la producerea divizoarelor şi rezultatele ale încercărilor eşanționului experimental al divizorului de tensiune.

Cuvinte-cheie: divizoare de tensiune, măsurarea tensiunei de curent alternativ.

High Voltage Resistive Divider Based on Cast Microwire in Glass Insulation on 6–24 kV Alternating Current of Commercial Frequency.

A. Juravleov, M. Sit (Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova), Colpacovich I., Cojocaru D., Cleimenov V. (Institute "ELIRI" S.A.)

Abstract. It is presented the analysis and description of the construction of the high voltage resistive divider on the base of cast microwire in glass insulation on 6–24 kV alternating current of commercial frequency. It is presented the procedure of compensation of frequency error during the process of fabrication of divides and results of tests of the sample model of the divider as well.

Key words: high voltage dividers, high voltage measurement.

1. Введение

В настоящее время отмечается рост требований к качеству электроэнергии, повышению точности измерений высокого напряжения и мощности. Снижение коммерческих потерь является важнейшим показателем работы энергосбытовой организации. С точки зрения интересов сторон, отпускающей, распределяющей и потребляющей электрическую энергию, целесообразно перенести точку учета электроэнергии от потребителей с сети 0,4 кВ на сети 6-10 кВ, на границу балансовой принадлежности. В случае воздушных линий сейчас начинают использовать высоковольтные пункты учета электроэнергии наружной установки на напряжении 6 - 10 кВ и в столбовом исполнении с их установкой на опоры высоковольтных линий [1].

Однако схемотехнические, конструктивные и метрологические решения по первичному высоковольтному и вторичному измерительному оборудованию отстают от существующих практических потребностей. В первую очередь это связано со сложностью реализации преобразователей высокого напряжения. Основными требованиями преобразования являются высокая точность коэффициента

преобразования по амплитуде, отсутствие фазовой погрешности, стабильность во времени.

В большинстве случаев в качестве первичных измерительных преобразователей высокого напряжения в цепях учета электроэнергии в основном используются индуктивные преобразователи - измерительные трансформаторы (ИТ) переменного тока, в измерительных поверочных установках высокого напряжения используют как индуктивные преобразователи, так и преобразователи напряжения на основе емкостных делителей напряжения.

Измерительные трансформаторы напряжения имеют ряд недостатков, вытекающих из самой природы электромагнитных трансформаторов [2]. К таким недостаткам можно отнести явления резонанса, гистерезиса, насыщения, остаточного намагничивания. В процессе эксплуатации трансформаторов необходимо строго соблюдать требования регламентов по обеспечению постоянного контроля состояния наполнителя (масла или элегаза). На каждый измерительный трансформатор расходуется десятки килограмм трансформаторного железа и электротехнической меди. Они имеют значительный вес (от 26 до 29 кг) и габариты [3], неудобны для монтажа. Все эти давно известные недостатки традиционных измерительных трансформаторов побуждают искать новые подходы и принципы работы высоковольтных преобразователей.

Емкостные делители напряжения [4] имеют меньшие габаритные размеры и массу, осуществимость крайне ограничена однако ИΧ наличием высокоточных высоковольтных конденсаторов. Высоковольтные конденсаторы на основе различных диэлектриков характеризуются диэлектрическими потерями и имеют существенную зависимость электрической емкости от приложенного напряжения. Как результат, емкостные делители напряжения имеют меньшую точность. электромагнитная экранировка таких делителей затруднена из-за сложности обеспечения достаточной электрической прочности и необходимостью паразитных емкостей на экран.

Как ИТ, так и емкостные делители напряжения имеют основной недостаток - зависимость входного и выходного импеданса от частоты, невозможность работы на постоянном токе. Определенные трудности имеются также в воспроизведении коэффициентов деления выраженных нецелыми числами, например с множителями $\sqrt{3}$ [5, 6].

В то же время для решения задачи масштабного преобразования напряжения переменного тока могут использоваться резистивные делители напряжения. Известные конструкции таких делителей [7], представляют собой множество резистивных элементов собранных в длинные гирлянды для уменьшения проходной (сквозной) паразитной емкости. Такие конструкции очень громоздки и нетранспортабельны. Для корректного функционирования таких делителей необходимо, чтобы окружающие предметы находились на достаточно большом расстоянии. Применение таких делителей в мобильных установках не представляется возможным.

Уменьшение габаритных размеров высоковольтных измерительных преобразователей, удовлетворение требованиям стабильности, автономной проверки, мобильности и транспортабельности может быть достигнуто за счет резистивных делителей напряжения на основе микропровода в стеклянной изоляции [8].

Целью данной работы является разработка конструкции и проведение поверочного расчета параметров высоковольтного резистивного делителя на базе литого микропровода в стеклянной изоляции на рабочие напряжения 6 кВ - 24 кВ переменного тока промышленной частоты, обеспечивающей класс точности не ниже 0,1.

2. Выбор и обоснование технических характеристик

В качестве типовых номинальных входных напряжений делителя, в соответствии с ГОСТ выбраны напряжения:

- $-6~{\rm kB}$ для делителей с рабочим напряжением от 1,2 до 7,2 кВ (20-120% номинального);
 - -12 кВ для делителей с рабочим напряжением от 2,4 до 14,4 кВ;
 - -25 кВ для делителей с рабочим напряжением от 5 до 30 кВ.

Исходя из требований ГОСТов номинальное выходное напряжение делителя равно 100 В переменного тока, в случае если он будет подключаться к стандартным приборам учета, применяемых на электрических подстанциях и 2,5; 5 В переменного тока при подключении к электронным счетчикам и низковольтным вторичным преобразователям.

Предел допускаемого значения основной погрешности коэффициента передачи по напряжению для измерительных трансформаторов согласно ГОСТ 1983-2001 должен выбираться из ряда 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0, по ГОСТ 23625-2001 добавлен также класс 0,05.

Делитель напряжения проектируется на классы точности 0,1; 0,2; 0,5. Угловая погрешность устанавливается пропорционально соответствующему классу точности.

Входное сопротивление делителя напряжения должно выбираться исходя из допустимого тока, рассеиваемой мощности, габаритных размеров делителя напряжения. Для уменьшения потребляемого тока и рассеиваемой мощности, вызывающей нагрев делителя, желательно входное сопротивление выбирать более $100\,$ М Ω , однако слишком большие значения сопротивления ведут к ухудшению частотных характеристик и увеличению габаритных размеров делителя напряжения. Конкретное значение определяется путем компромиссного расчета для соответствующих максимальных входных напряжений.

3. Обоснование конструкции и проведение поверочного расчета

Ответственной частью высоковольтного делителя напряжения является высоковольтная резистивная секция (рис.2), которых в зависимости от величины рабочего напряжения может быть несколько.

В качестве таких секций используются высоковольтные резисторы, сопротивление которого образовано обмоткой высокоомного микропровода с погонным сопротивлением 40- 150 кОм/м при диаметре провода 5-15 мкм. Индуктивность и емкость обмотки такого резистора, а также емкость токоподводов составляют паразитные параметры секции и существенно влияют на частотную погрешность делителя напряжения.

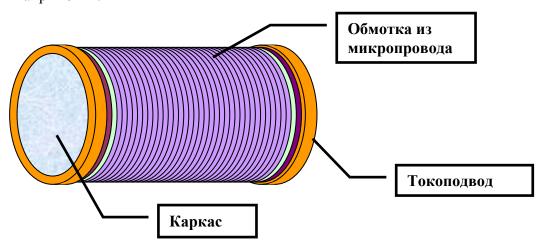
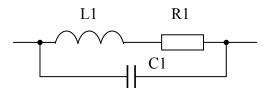


Рис. 1. Резистивная секция высоковольтного делителя напряжения

Рассмотрим упрощенную эквивалентную схему резистивной секции плеча делителя в соответствии с рис.2.



R1- сопротивление секции (или плеча делителя)

С1- собственная паразитная емкость

L1 - собственная паразитная индуктивность

Рис.2. Упрощенная эквивалентная схема резистивной секции или плеча делителя напряжения.

Так как при проведении расчета была принята упрощенная схема замещения, то результаты расчета могут использоваться как первое приближение к обоснованию конструктивных параметров делителя напряжения. В последующем требуется экспериментальные исследования и наладка делителя.

Модуль комплексного сопротивления |Z1|:

$$|Z1| = \frac{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1 - \omega^3 L_1^2 C_1 - \omega R_1^2 C_1)^2}}{(1 - \omega^2 L_1 C_1)^2 + (\omega R_1 C_1)^2}$$
1)

Фаза φ (или угловая, фазовая погрешность):

$$\varphi = arctg \frac{\omega L_1 - \omega^3 L_1^2 C_1 - \omega R_1^2 C_1}{R_1}$$
 2)

где ω - круговая частота.

Для оценки влияния паразитных емкости и индуктивности приведем их оценочный расчет.

Индуктивность резистивной секции. Индуктивность секции определим как индуктивность однослойной катушки, так как микропроволочные сопротивления по конструкции представляют собой катушки из высокоомного провода:

$$L_1 = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot D^2 n^2}{9D + 20H} \tag{3}$$

где D - диаметр намотки (диаметр каркаса резистивной секции),

H - длина намотки (длина каркаса резистивной секции),

п - число витков намотки (число витков резистивной секции):

$$n_s = \frac{R_s}{R_0 \pi D_s} \tag{4}$$

где R_s - сопротивление секции,

 D_s , H_s - диаметр и длина намотки секции,

 $R_{\rm 0}$ - погонное сопротивление микропровода.

Для секции делителя сопротивлением $R_s=50\cdot 10^6\,Ohm$ диаметром $D_s=25\cdot 10^{-3}\,m$, длиной $H_s=70\cdot 10^{-3}\,m$, погонным сопротивлением $R_0=10^5\,Ohm\,/\,m$ число витков n=6370.

Из (3) индуктивность секции $L_s=0.312H$. Общая индуктивность делителя напряжения сопротивлением $R_1=10^9\,Ohm$, состоящим из $N=20\,$ секций, при условии, что взаимоиндукцией между секциями можно пренебречь, $L_1=NL_s=6.24H$.

Собственная емкость секций и плеч делителя напряжения. Для определения собственной емкости обмотки рассмотрим емкость отдельного витка секции, как показано на рис.4.

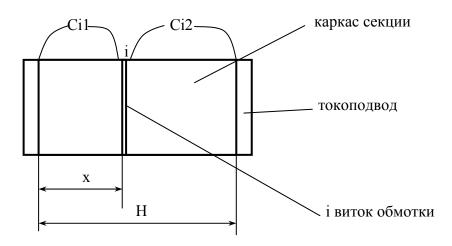


Рис.3. Схематичное изображение емкости витков обмотки секции

Емкость i витка обмотки можно представить как последовательное соединение емкости C_{i1} на левый токоподвод и емкости C_{i2} на правый токоподвод резистивной секции делителя напряжения:

$$C_{i} = \frac{C_{i1} \cdot C_{i2}}{C_{i1} + C_{i2}}$$
 5)

где

$$C_{i1} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{\nu}}{x} \tag{6}$$

$$C_{i2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_v}{H - x} \tag{7}$$

- соответственно емкости виток - токоподвод,

$$x = \frac{H}{n}i$$
 8)

- расстояние от левого пояска,

$$S_{v} = \pi D d_{1} \tag{9}$$

- площадь витка,

$$d_1 = \sqrt{4\rho/\pi R_0} \tag{10}$$

- диаметр жилы микропровода,
- $-\rho = 1,4 \cdot 10^{-6}$ Ohm/m удельное сопротивление материала жилы.

Подставив (8) и (9) в (6) и (7) и произведя суммирование по всем виткам секции, получим:

$$C_s = \sum_{i=1}^{n} C_i = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \pi D d_1}{H} n$$
 11)

из которой видно, что для уменьшения собственной емкости необходимо уменьшать как диаметр провода, так и число витков, а для этого необходимо применение более высокоомного микропровода.

Для секции делителя сопротивлением $R_s=50\cdot 10^6\,Ohm$ диаметром $D_s=25\cdot 10^{-3}\,m$, длиной $H_s=70\cdot 10^{-3}\,m$, погонным сопротивлением $R_0=10^5\,Ohm/m$, числе витков n=6370,

 $d_1=4,2\cdot 10^{-6}\,m$ при относительной электрической проницаемости $\varepsilon=4$, электрической постоянной $\varepsilon_0=8,85\cdot 10^{-12}\,F/m$ из (11) емкость обмотки секции $C_s=1,06\,pF$. Добавим емкость $C_c=0,14\,pF$ между токоподводами резистивной секции и получим $C_1=1,2\,pF$

Поскольку общая высота и число общее витков обмотки делителя пропорциональны числу секций, то паразитная емкость высоковольтного плеча делителя будет также определяться формулой (11).

Обозначим погрешность модуля сопротивления резистивной секции как $\delta_{\scriptscriptstyle R}$:

$$\delta_R = (|Z1| - R_1) / R_1 \tag{12}$$

и тогда

$$|Z1| = R_1(1 + \delta_R) \tag{13}$$

В табл.4 приведены расчетные данные высоковольтной секции делителя напряжения общим сопротивлением $R_1 = 10^9 \, Ohm$ при различных значениях погонного сопротивления, индуктивности и емкости секции.

Из расчетов получается, что практически для всех значений индуктивности секции, погрешность модуля и фазы сопротивления принимает одинаковые значения на частотах до 400 Hz. Основной влияющей величиной на погрешность модуля и фазы сопротивления является емкость секции.

С учетом сказанного, воспользовавшись первыми членами разложения в ряд Тейлора, выражения для погрешности модуля и фазы сопротивления:

$$\delta_R = -(\omega \cdot R_1 \cdot C_1)^2 / 2$$

$$\varphi_R = -\omega \cdot R_1 \cdot C_1$$
(14)

Уменьшением емкости резистивной секции за счет повышения погонного сопротивления и уменьшения общего числа витков, можно добиться малых значений

погрешности модуля сопротивления, однако фаза, которая определяет угловую погрешность делителя напряжения, имеет значительную величину.

Табл.4. Составляющие погрешности высоковольтного плеча делителя напряжения f=50 Hz

R_0 ,		Погрешность модуля, $\delta_{\scriptscriptstyle R}$, %				Фаза, $\varphi_{\scriptscriptstyle R}$, grad			
Ohm/m	L_1 ,H	C1=0,5pF	C1=1pF	C1=1,5pF	C1=2pF	C1=0,5pF	C1=1pF	C1= 1,5pF	C1= 2pF
50.10^3	24,9								
$100 \cdot 10^3$	6,24	-0,012	-0,046	-0,095	-0,153	- 8,9	-17,4	-25,2	-32,1
$150 \cdot 10^3$	2,77								
$200 \cdot 10^3$	1,56								
f=400 Hz									
	24,9	-0,038	-0,630	-0,744	-0,804	-51,5	-68,3	-75,1	-78,7
$100 \cdot 10^3$	6,24								
$150 \cdot 10^3$	2,77								
$200 \cdot 10^3$	1,56								

Экранированный делитель напряжения.

Делитель напряжения без экрана имеет ограниченное применение, поскольку на его погрешность модуля и фазы оказывают значительное влияние окружающие предметы. Введение экрана оказывает значительное воздействие на модуль и фазу сопротивления секции.

Влияние экрана на сопротивление секции рассмотрим на следующей эквивалентной схеме для одного витка.

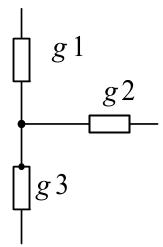


Рис.4. Эквивалентная схема замещения резистивной секции с учетом влияния емкости на экран i-го витка секции.

На рис.5 обозначено g1 - проводимость секции выше i-го витка, g2 - проводимость секции ниже i - го витка, g3 - проводимость емкости i - го витка:

$$g1 = \frac{1}{(n-i)R_1} \tag{15}$$

$$g2 = \frac{1}{i \cdot R_1}$$

$$g3 = j \cdot \omega \cdot C_{ei}$$
(16)

Погрешность модуля сопротивления, обусловленную влиянием емкости на экран i – го витка:

$$\delta_{ei} = \frac{(n-i)^2 \cdot i^2}{2 \cdot n^2} \cdot (\omega \cdot R_V \cdot C_{ei})^2$$
18)

где $R_{\scriptscriptstyle V}$ - сопротивление одного витка резистивной секции

Погрешность модуля сопротивления, обусловленную влиянием емкости на экран всех витков секции:

$$\delta_{ce} = \sum_{i=1}^{n} \delta_{ei} = \frac{(\omega \cdot R_V \cdot C_{ei})^2}{2 \cdot n^2} \sum_{i=1}^{n} (n-i)^2 \cdot i^2$$
19)

Из (19) найдем

$$\delta_{ce} = \frac{n^3}{60} (\omega \cdot R_V \cdot C_{ei})^2 = \frac{1}{60 \cdot n} (\omega \cdot R_1 \cdot C_{1e})^2$$
20)

где через $C_{1e} = n \cdot C_{ei}$ обозначена емкость резистивной обмотки на экран.

Аналогично, погрешность фазы сопротивления, обусловленную влиянием емкости на экран i – го витка:

$$\varphi_{ei} \approx tg\varphi_{ei} = \frac{(n-i)\cdot i}{n}\cdot (\omega\cdot R_V\cdot C_{ei})$$

И угловая погрешность сопротивления, обусловленная влиянием емкости на экран всех витков секции:

$$\varphi_{ce} = \frac{n^2}{6} (\omega \cdot R_V \cdot C_{ei}) = \frac{1}{6} (\omega \cdot R_1 \cdot C_{1e})$$
(22)

Емкость между резистивной обмоткой и экраном зависит от диаметра провода и числа витков обмотки. Примем, что емкость между обмоткой и экраном определяется выражением:

$$C_{1e} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \pi D \sqrt{4\rho/\pi R_0}}{\ln(De/D)} n$$
23)

где *De* - диаметр экрана.

На рис.5 представлен экранированный делитель напряжения.

Составляющая погрешности коэффициента передачи делителя напряжения по модулю (или погрешность по напряжению), обусловленная проходными емкостями C1 и C2, определяются из выражения

$$\Delta c = \omega^2 \cdot (R1^2 C1^2 - R2^2 C2^2)$$
24)

Составляющая погрешности коэффициента передачи делителя напряжения, обусловленная емкостями Cs1 и Cs2 между резистивным плечом и металлическим экраном делителя, определяются из выражения

$$\Delta cs = -\omega^2 \cdot (R1^2 Cs1^2 - R2^2 Cs2^2)$$
25)

Для высоковольтных делителей напряжения R1>>R2, R1Cs1>>R2Cs2 и тогда из выражений (24) и (25) можно получить выражение для погрешности делителя по напряжению, обусловленное емкостными параметрами:

$$\Delta_{UC} = (\omega R1C1)^2 - (\omega R2C2)^2 - (\omega R1Cs1)^2$$
 (26)

В табл.5 приведены расчетные данные высоковольтной секции делителя напряжения общим сопротивлением $R_1 = 10^9 \, Ohm$ при различных значениях погонного сопротивления и диаметров экрана для каркаса, указанного ранее.

Табл.5. Составляющие погрешности экранированного высоковольтного плеча делителя напряжения

f=50 Hz

R_0 ,	П	огрешност	гь модуля,	δ_{ce} , %	Фаза, φ_{ce} , grad			
Ohm	De=50mm	De=	De=	De=	De=	De=	De=	De=
Onin		100mm	150mm	200mm	50mm	100mm	150mm	200mm
50·10 ³	0,00959	0,00240	0,00143	0,00107	366	183	141	122
$100 \cdot 10^3$	0,00240	0,00060	0,00036	0,00027	129	64,6	50,0	43,1
$150 \cdot 10^3$	0,00107	0,00027	0,00016	0,00012	70,4	35,2	27,2	23,5
$200 \cdot 10^3$	0,00060	0,00015	0,00009	0,00007	45,7	22,9	17,7	15,2

f=400 Hz

R_0 ,]	Погрешност	ъ модуля,	δ_{ce} , %	Фаза, φ_{ce} , grad			
Ohm	De=	De=	De=	De=	De=	De=	De=	De=
Ollili	50mm	100mm	150mm	200mm	50mm	100mm	150mm	200mm
50·10 ³	0,614	0,153	0,092	0,068	2930	1460	1130	975
$100 \cdot 10^3$	0,153	0,038	0,023	0,017	1030	517	400	345
$150 \cdot 10^3$	0,068	0,017	0,010	0,008	563	281	218	188
$200 \cdot 10^3$	0,038	0,009	0,006	0,004	366	183	141	122

Аналогично, составляющая угловой погрешности делителя напряжения

$$\Delta_{\varphi C} = \omega R1C1 - \omega R2C2 - \omega R1Cs1 \tag{27}$$

Из выражений (26) и (27) следует, что компенсация погрешности по напряжению и по фазе может быть достигнута, если выполняется условие:

$$\omega R1C1 - \omega R1Cs1 \ge 0$$

Тогда регулированием емкости С2 можно достичь компенсации погрешности по напряжению или угловой погрешности. Установлено, что при $Cs2\approx 6\cdot C1$ происходит компенсация угловой погрешности делителя напряжения. В результате моделирования и экспериментальных исследований найдено оптимальное соотношение конструктивного отношения диаметров экрана и резистивной секции, в зависимости от ее сопротивления. При этом достигается минимальное значение фазовой погрешности делителя - до 10 мин, при погрешности коэффициента деления не превышающей 0,1-0,2% на частоте 50 Гц. Компенсация погрешности по напряжению происходит при других соотношениях величин емкости на экран и проходной емкости. Поэтому

достичь одновременной компенсации погрешности по напряжению и погрешности и угловой погрешности в простом экранированном делителе напряжения не удается.

Кроме этого, в таком делителе напряжения выполнение условия (5) связано со значительным увеличением размеров экрана, так как величина емкости высоковольтного плеча делителя на экран имеет достаточно большую величину.

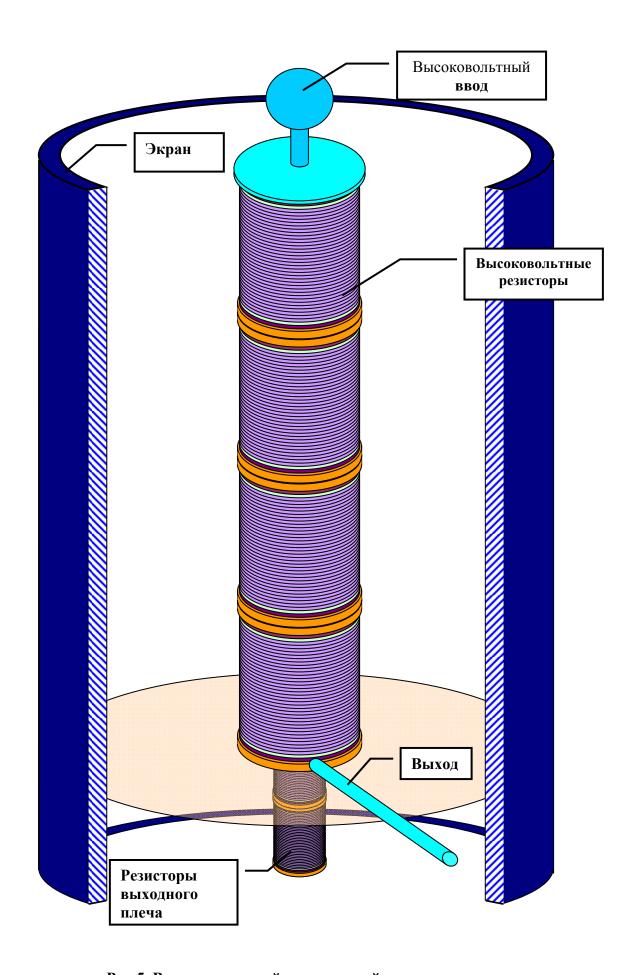


Рис.5. Высоковольтный резистивный делитель в экране

Эквипотенциальное экранирование делителя напряжения.

С целью уменьшения емкости высоковольтного плеча делителя на экран (R1) и одновременно решения задачи компенсации погрешности делителя напряжения, как по модулю, так и угловой погрешности, введен дополнительный резистивный экран, измерительным расположенный между высоковольтным плечом делителя напряжения и металлическим экраном. Эквивалентная схема делителя напряжения с резистивным экраном представлена на рис 6. На рис. 6 - С1 - емкость высоковольтного плеча, С2 - емкость низковольтного плеча. Входная цепь высоковольтного резистивного экрана (верхняя часть резистора Rp1) соединена с цепью измерительного плеча, а на выходной цепи высоковольтного резистивного экрана поддерживается потенциал, равный выходному потенциалу измерительного выходного плеча (R2) делителя напряжения.

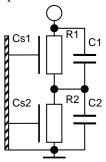


Рис. 6. Эквивалентная схема делителя напряжения с резистивным экраном

Введение резистивного экрана позволило значительно уменьшить величину емкости Cs1 между измерительным плечом делителя напряжения и внешним экраном, и удовлетворить требование (5). Компенсация погрешности по напряжению и одновременно по фазе достигается созданием неравномерного распределения потенциала вдоль резистивного экрана. Для этой цели высоковольтное измерительное и резистивное экранирующее плечи реального делителя напряжения выполнены из нескольких высоковольтных цилиндрических резистивных элементов (от 4 до 10), причем измерительное плечо находится внутри защитного плеча, как показано на рис.8.

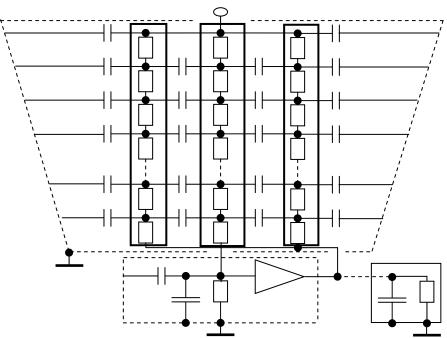


Рис. 7. Полная эквивалентная схема высоковольтного резистивного делителя напряжения с защитным резистивным экраном

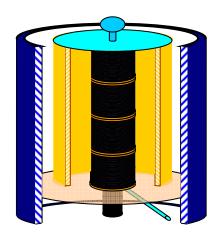


Рис. 8. Делитель напряжения с резистивным экраном

Создание неравномерного распределения потенциала вдоль защитного экрана достигается подбором величины сопротивления резистивных элементов экрана по определенному закону. Поэтому, данный способ экранирования, можно условно назвать квазиэквипотенциальным экранированием, поскольку, на самом деле, нет полного соответствия распределения напряжения вдоль длины измерительного и защитного плеча делителя напряжения, равенство потенциалов имеется только в верхней (входной) и нижней (выходной) цепи делителя.

Некоторое дополнительное компенсирование частотной погрешности делителя напряжения создается также за счет конусообразной формы проводящего наружного экрана.

Конечно, приведенные расчеты являются приближенными, так как не учитывается ряд факторов, таких как емкость между токоподводами и экраном и др., формула для емкости витка приблизительная и т.д. Однако полученные результаты позволяют судить о поведении делителя на переменном токе, показывают возможность компенсации реактивности обмотки резистивных секций, поскольку погрешность модуля и фазы сопротивления от собственной емкости и от емкости на экран имеют противоположные знаки.

Встроенный буферный повторитель напряжения.

Для устранения влияния на коэффициент деления входного импеданса внешних подключаемых приборов на выходе делителя напряжения встроен высокоточный повторитель напряжения, питание которого может осуществляться как от внешнего источника напряжения, так и от внутреннего аккумулятора. Выходное напряжение делителя напряжения составляет от 1 до 10В, по требованию заказчика. Это напряжение определяет диапазон рабочих напряжений буферного повторителя напряжения, которое может составлять +12 В и –12 В при питании от аккумуляторов. Для питания от промышленной сети необходим источник питания с хорошей развязкой от сетевых помех и емкостных связей с питающей сетью.

Принципы настройки частотной погрешности делителей напряжения

Как было ранее показано, внешний экран и защитное экранирование существенно влияют на частотную погрешность резистивных делителей напряжения. Исходя из изложенного, могут быть осуществлены следующие методы подстройки частотной погрешности делителей напряжения:

• методом изменения диаметра внешнего экрана;

- методом осевого перемещения резистивного высоковольтного плеча внутри экрана с переменным диаметром;
- методом регулирования распределенной емкости на экран емкости изменением диэлектрического заполнения пространства между высоковольтным плечом и экраном методом регулировки высоты дополнительного экрана, находящегося между высоковольтным плечом и внешним экраном;
- методом квазиэквипотенциального экранирования, с подбором сопротивления дополнительного резистивного экрана;
 - комбинированный метод на основе предыдущих.

Применение того или иного метода должно обуславливаться, прежде всего, требованием обеспечения заданной точности делителя напряжения при соблюдении требований к габаритным размерам, массе и величине испытательного напряжения.

4. Описание конструкции экспериментальных образцов делителей напряжения

Конструктивно делитель напряжения состоит из цилиндрического экранированного корпуса, в котором размещен 1 (для напряжений 6-10 кВ) или 2 резистора (для напряжений до 35 кВ) диаметром 25 или 40 мм.

Входное сопротивление делителя, в зависимости от рабочего напряжения составляет от 100~MOm (1 резистор) и до 200~MOm (2 резистора). Резисторы делителя напряжения изготовлены из микропровода и имеют малое значение температурного коэффициента деления, не превышающего $5\cdot10^{-6}\text{K}^{-1}$, а также характеризуются ничтожным значением коэффициента напряжения (нелинейности).

Кроме сказанного, следует отметить, что указанные делители имеют низкое значение входной и выходной емкости, не превышающей единиц pF, что обусловлено способом компенсации его частотной погрешности. Наличие экранирующей оболочки существенно устраняет влияние внешних предметов на коэффициент деления и значительно уменьшает воздействие внешних электромагнитных воздействий и помех.

Для настройки частотной погрешности предусмотрены как подвижный дополнительный цилиндрический экран, так и подвижный диэлектрический стакан и стержни.

Дополнительный экран и диэлектрический экран охватывают резисторы высоковольтного плеча и их положение вдоль оси может регулироваться путем перемещения вдоль опорного стержня с резьбой. После настройки частотной погрешности экраны фиксируются (стопорятся).

Результаты испытаний экспериментальных образцов делителей различной конструкции представлены в протоколах испытаний.

Но фото показаны экспериментальные образцы делителей напряжения на 6 и 25 кВ.



5. Области применения

Указанные делители напряжения могут найти применение в приборах учета электроэнергии в энергетике, а также на электрическом транспорте. По своим массогабаритным параметрам делители напряжения из микропровода значительно эффективнее традиционно применяемых трансформаторов напряжения.

Выводы

- 1. Теоретические расчеты, экспериментальные исследования показывают, что на основе высоковольтных резисторов из микропровода возможно создания серии высоковольтных делителей напряжения 6-25 кВ с высокими метрологическими характеристиками класса точности 0,1 0,2.
- 2. Проверено несколько способов настройки частотной погрешности делителей напряжения. Установлено, что частотный диапазон делителей напряжения может быть от постоянного тока до 200 и более Гц при дополнительной погрешности до 0,5 %.
- 3. Рабочий диапазон температур проверен до температуры 50°С. Дополнительная погрешность не превышает 0.2~% .
- 4. Делители напряжения могут использоваться вместо трансформаторов напряжения в ПКУ (пультах коммерческого учета) электроэнергии в высоковольтных сетях. Для этого необходимо согласование требований по выходному напряжению с производителями ПКУ в части требований международных стандартов, а также разработка методов питания выходных буферных повторителей напряжения.

Данная работа выполнена в рамках Госпрограммы «Ingineria şi tehnologiile electronice în relansarea economiei» по проекту <u>08.808.05.04A</u> Convertoare rezistive electronice şi echipament de măsurare a tensiunilor 6,3 -25 kv de curent alternativ.

Литература.

- 1. Учет количества электроэнергии в распределительных сетях 6 10 кB. http://www.ipenet.ru/stat1.shtml.
- 2. Власов М., Сердцев А. Высоковольтные преобразователи для систем измерения и анализа качества электрической энергии. Энергорынок, №10, 2006 г.
 - 3. Трансформатор НОЛ-08. ОГГ.671.019ТУ. http://www.elektro.kz/
- 4. 4860 Standard electronic voltage divider. Tettex Instruments. Catalog 2006, pp.418 420.
 - 5. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
- 6. ГОСТ 23625-2001. Трансформаторы напряжения измерительные лабораторные. Общие технические условия.
- 7. A.J.Schwab. Hochspannung messtechnik messgerate und messverfahren. Springer-Verlag, Heidelberg, 1981.
- 8. E.Badinter, N.Berman, I.Drabenco, V.Zaborovskii, Z.Zelikovskii, V.Ceban. Cast microwire and it properties/ Kishinev, Stiinta, 1973.

Получена редакцией 8 октября 2008 г.

MODELUL MATEMATIC "LINIE ELECTRICĂ – INSTALAȚIE EOLIANĂ"

V. Merenco, doctorand IE AŞM

Rezumat. În lucrare se examinează problema întocmirii modelului matematic a sistemului "linie electrică - instalație eoliană" pentru analiza regimului de funcționare prin simulări matematice. Modelul se bazează pe utilizarea metodei caracteristicilor, ține cont de structura neomogenă a circuitului și permite efectuarea procedurilor de schimbare a regimului și structurii schemei echivalente prin atribuirea valorilor limită a unor mărimi din circuitele cu parametri concentrați.

Cuvinte-cheie: linie electrică, instalație eoliană, model matematic, metoda caracteristicilor.

Математическая модель «электрическая линия – ветроагрегат» Меренко В., аспирант ИЭ АНМ

Аннотация. В работе рассмотрена проблема составления математической модели для цепи « электрическая линия — ветроагрегат» с целью анализа режимов работы методом математического моделирования. Математическая модель базируется на метод характеристик, учитывает неоднородность цепи и позволяет реализовать различные режимы и изменений в структуре цепи простым изменением значений величин заданных как сосредоточенные параметры.

Ключевые слова: электрическая линия, ветроагрегат, математическая модель, метод характеристик.

Mathematical model "The electric line - wind farm" V. Merenco, post-graduate student of the IPE ASM

Abstract. It is considered the problem of finding of the mathematical model of a circuit "electric line – wind farm" with the purpose of analysis of operating modes by a method of mathematical simulation. The mathematical model is based on a method of characteristics, takes into account heterogeneity of a circuit and allows realizing various modes and changes in structure of a circuit simple change of values of sizes set as the concentrated parameters. **Key words**: electric line, wind farm, mathematical model, method of characteristics.

Introducere

Instalațiile eoliene au o gamă largă de puteri și pot funcționa atât în regim autonom, cît și în paralel cu rețeaua de distribuție. La funcționarea în paralel cu rețeaua sunt posibile multiple regimuri tranzitorii, condiționate de viteza variabilă a vântului [1-6]. Pulsațiile puterii active, variația tensiunii generatorului instalației eoliene pot influența asupra regimului rețelei. Studierea experimentală a acestor regimuri este destul de dificilă, deoarece factorii exteriori, care influențează asupra regimului au un caracter aleator. Ca formă de cercetare a acestor regimuri se prezintă simulările matematice [1-6]. Modelele matematice utilizate se bazează pe prezentarea echipamentelor reale prin cuadripoli, a circuitelor prin scheme echivalente monofilare cu sursa de generare și sarcina conectată la capetele marginale a circuitului electric[1,3], convertorul electromecanic (generatorul) se prezintă în sistemul de coordonate d-q [4].

În lucrarea dată se abordează problema includerii în circuitul linii electrice a sursei de generare, a cărui regim de funcționare depinde de viteza vântului, este conectată la linei într-un punct aliator și totodată să se țină cont de parametrii acestei linii electrice, care în regimuri tranzitorii se poate comporta ca o porțiune de circuit cu parametri distribuiți.

Modelul matematic "linie electrică – instalație eoliană".

Linia electrică prezintă un circuit cu parametri distribuiți și procesele nestaționare în ea se descriu de ecuațiile telegrafiștilor [7]. La linie se poate conecta o instalație sau mai multe instalații eoliene de putere mică. În comparație cu linia aceste surse se pot prezenta în schemă echivalentă cu parametri concentrați. În fig.1 se prezintă schema echivalentă a liniei alimentată de la bare cu puterea nelimitată și de o instalație eoliană amplasată în punctul cu coordonata x_k .

unde l – lungimea liniei;

L, C, R, G – parametrii distribuiți ai liniei;

 Z_s – sarcina liniei;

 Z_g – impedanța internă a generatorului;

 $e_g(t,v)$ – tensiunea electromotoare a generatorului instalații eoliene.

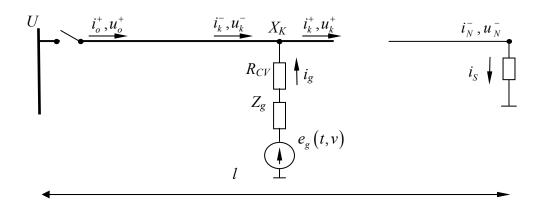


Fig.1. Schema echivalentă a circuitului "linei electrică -instalație eoliană"

La faza curentă a studiului vom admite, că ne este cunoscută relația funcțională a evoluției tensiunii de ieșire a generatorului în funcție de viteza vântului $e_g = f(t,v)$. Impedanța interioară Z_g a generatorului determină puterea nominală a acestei surse.

La funcționarea în paralel cu linia a instalației eoliene sunt posibile regimurile, când tensiunea electromotoare a generatorului $e_g = E_{g.\text{max}} sin\omega t$ depășește valoarea tensiunii $u_k = U_{k.\text{max}} \sin \omega t$ a rețelei în punctul x_k și generatorul furnizează energie în rețea. Dar este posibilă și varianta $E_{g.\text{max}} < U_{k.\text{max}}$ și ca urmare instalația eoliană se va transforma în consumator de energie. Acest regim se exclude prin deconectarea de la rețea a instalației eoliene de un comutator dirijat automat.

Deoarece procesele electromagnetice în linie derulează cu o viteză limitată, reiese că în circuitul examinat persistă fenomenele de întârziere privind evoluția undelor de tensiune.

Particularitățile evidențiate anterior trebuie să fie percepute de modelul matematic. Se pot propune următoarele ipoteze și soluții privind realizarea modelului matematic al liniei și instalației eoliene:

1) comutatorul se modelează cu ajutorul unui rezistor R_c introdus în serie cu circuitul generatorului;

2)conexiunea instalației eoliene la linie în model se face cu o întârziere de timp; coordonata punctului x_k coincide cu coordonata nodului întreg al rețelei de calcul;

3)impedanța Z_g include componenta activă R_g și componenta inductivă X_g ;

4)în schema de calcul numeric mărimii R_c i se atribuie valoarea R_c =0, dacă se îndeplinește condiția $P_g = E_g I_g cos \varphi_g \ge 0$ și $R_c = \infty$, dacă se îndeplinește condiția $P_g = E_g I_g cos \varphi_g < 0$.

În circuitul din fig. 1 se pot evidenția trei puncte caracteristice: $x_o = 0$ – începutul liniei; x_k – punctul de conexiune a instalației eoliene; x_N – sfârșitul liniei la care este conectată în caz general sarcina cu caracter $R_sL_sC_s$.

Pentru a realiza modelul matematic este necesar, ca în aceste puncte să fie definite condițiile de limită și inițiale:

a) $i_0 = i_{1/2}^+$; $u_{1/2}^+ = U_m sin\omega t$ pentru x = 0, t > 0;

b)
$$i_k^- + i_g^- - i_k^+ = 0$$
; $u_k^- = u_k^+ = u_k^- = -R_c i_g^- - R_g i_g^- - L \frac{di_g^-}{dt} + e_g^-(t, v)$, pentru $x = x_k^-$, $t \ge n\tau$;

c)
$$i_N^- = i_s$$
; $u_N^- = u_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_s dt$, pentru $x = l$, $t > 0$.

Modelul matematic al circuitului examinat se poate prezenta în diferențe finite de ecuația matriceală [8]

$$BX=Y, (1)$$

unde: X – vectorul transpus al variabilelor necunoscute u_i , i_i ;

Y – vectorul coloană a mărimilor cunoscute (din dreapta) pentru sistemul neomogen de ecuații în diferențe finite;

B- matricea coeficienților de pe lângă variabilele necunoscute a sistemului de ecuații prezentat în diferente finite.

Expresiile mărimilor B, X, Y pentru punctele marginale ale liniei x = 0 și x = l sunt prezentate în [8]. Pentru punctul $x = x_k$ de conexiune la linie a instalației eoliene componentele relației (1) se prezintă de următoarele expresii:

 $X = (i_k^-, i_k^+, i_g^-, u_k^-, u_k^+, u_k^-)^T$ - vectorul transpus al variabilelor necunoscute în punctul $x = x_k$.

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & aC & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -aC & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & b_{63} & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} - \text{matricea coeficienților,}$$

a – viteza de propagare a undelor de curent și tensiune în linie și $a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$;

L, C – inductanța și capacitatea lineică a liniei;

 $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6)^T$ - vectorul transpus a mărimilor cunoscute:

unde
$$Y_1 = i_{n-1/2} + aCu_{n-1/2}$$
; $Y_2 = i_{n+1/2} - aCu_{n+1/2}$; $Y_3 = Y_4 = Y_5 = 0$; $Y_6 = -\frac{L_g i_n}{\tau}$
$$b_{63} = \frac{-L_g}{\tau} - R_c - R_g + e_g(t, v).$$

 $Valorile \text{ mărimilor } i_{n-\frac{1}{2}}, \quad u_{n-\frac{1}{2}} \text{ si a mărimilor } i_n, \quad u_n \text{ se determină după metoda}$ caracteristicilor pentru $t_{n+1} = t_n + \tau$ [8], unde

 τ - pasul de discretizare a timpului în schema numerică de calcul;

n – numărul de cicluri elementare efectuate pentru care sunt cunoscute valorile $i_{n-\frac{1}{2}},\ u_{n-\frac{1}{2}},\ i_{n+\frac{1}{2}},\ u_{n+\frac{1}{2}},\ u_{n+\frac{1}{2}}$, în seminoduri ale rețelei numerice de calcul (pentru timpul t_n).

Concluzie.

O particularitate a modelului propus constă în aceea că este posibilă schimbarea valorilor parametrilor concentrați în timpul procedurii de calcul numeric neîntrerupt. Astfel este ușor de modelat regimurile de conectare și deconectare a circuitelor cu parametri concentrați la linie, de exemplu prin atribuirea valorilor zero sau infinit (foarte mare) mărimii R_{CV} din circuitul generatorului sau pentru formarea regimului conectat sau deconectat a sarcinii de la capătul

liniei, deci iarăși prin simpla atribuire a valorilor zero sau infinit, de exemplu a componentei R_s sarcinii Z_s . Modalitatea propusă permite efectuarea multiplelor simulări matematice a regimului în acest circuit pentru diferite viteze ale vântului v, care și determină valoarea tensiunii electromotoare a generatorului. Ridicarea complexității modelului se face prin extinderea in programul de calcul numeric a numărului de puncte specifice care corespund conexiunilor noilor instalații eoliene.

Bibliografia

- 1 Sorensen P. Hansen A.D., Bllaabjwerg F., Bech J. Dynamic Models for Interaction between Wind Turbines and Power Systems. http://www.actapress.com/Content Of Proceeding.aspx?
- 2 Muljadi E., Butterfield C.P., Conto J., Donoho K. ERCOT's Dynamic Model of Wind Turbine Generators. *Conference Paper*, NREL/CP-500-38126, August 2005
- 3 Electrical Guide to Utility Scale Wind Turbines. AWEA. Policy Department, 1101 14th Street NW, Washington, DC 2005, 31 p.
- 4 Pierik J.T.G. (ECN), Morren J. (TUD). Variable Speed Wind Turbine Dynamic Model Validation. JWT measurements and simulations. ECN-E-07-008, ECN project numbers: 7.4336 and 7.9463, January 2007
- 5 Soens J., Driesen J., Belmans R. Interaction between Electrical Grid Phenomena and the Wind Turbine's Behaviour. K.U.Leuven, Department Electrotechnical Engineering ESAT-ELECTA Kasteelpark Arenberg 10, B-3001, Heverlee, Belgium. E-mail: joris.soens@esat.kuleuven.ac.be
- 6 Hassan H. El-Tamaly, Mohamed A. A. Wahab and Ali H. Kasem. Simulation of Directly Grid-Connected Wind Turbines for Voltage Fluctuation Evaluation. International Journal of Applied Engineering Research. ISSN 0973-4562 Vol.2, No.1 (2007), pp. 15–30
- 7 Bessonov L.A. BTE. Electriceschie tepi.M: Vîsşaia şcola,1984.-559p.
- 8 Berzan V., Rimschi V. Procese nestaționare în circuite electrice nneomogene./Sub red. Prof. Petru Postolache. Combinatul Poligrafic.Chisinău: 1998. -412p.

Lucrarea este îndeplinită în cadrul proiectului "Elaborarea și încercarea generatorului asincron trifazat cu turații joase și cu excitație capacitivă", cifrul 44.001P, Hotărârea CSŞDT nr. 2 din 28.01.05, Programul de stat "Asigurarea competitivității produselor industriale în construcția de mașini în baza inovațiilor Know-How, materialelor noi și a tehnologiilor avansate"

Informații despre autor.

V. Merenco. Doctorand al Institutului de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei. Primul an de studii cu frecvență redusă.

Prezentat: 03.11.2008