

ВЫВОДЫ

1. Анализ результирующей устойчивости сложных электрических систем и условий деления систем целесообразно применять поэтапный алгоритм расчета. Это приводит к повышению точности вычислений и сокращению времени счета на ЦВМ вследствие уменьшения жесткости решаемой задачи.

2. Расчет результирующей устойчивости рекомендуется проводить либо неявными методами численного интегрирования, либо комбинированным применением явных и неявных методов. Это приводит к резкому сокращению времени счета на ЦВМ, не ухудшая точности расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах.— М.: Высшая школа, 1978.— 414 с.

2. Портной М. Г., Рабинович Р. С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости.— М.: Энергия, 1978.— 352 с.

3. Ракитский Ю. В., Устинов С. М., Чернооружский И. Г. Численные методы решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений: Уч. пособие.— Л., 1977.— 84 с.

4. Айрапетян Г. А., Саркисян Э. А. Некоторые вопросы переходных процессов в энергосистеме после нарушения динамической устойчивости.— В сб.: Науч. тр. Ереванского ПИ. Энергетика, сер. XIV, 1976. Вып. 1, с. 78—83.

5. Погосян Т. А. Методы расчета длительных электромеханических переходных процессов.— Энергетика и транспорт, 1983, № 6, с. 42—47.

6. Погосян Т. А. Устойчивость методов численного интегрирования дифференциальных уравнений при решении задач электроэнергетики.— Энергетика и транспорт, 1984, № 4, с. 32—39.

Представлена кафедрой
электрических систем

УДК 621.315.1.072

КОНСТРУКТИВНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЛИНИИ НОВОЙ КОМПАКТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Заслуженный деятель науки и техники БССР, докт. техн. наук,
проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е., канд. техн. наук, доц. ФЕДИН В. Т.,
инж. СЕЛИВЕРСТОВ Г. И.*

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт

Канд. техн. наук КУЦЕНКО Г. Ф.

Районное энергетическое управление, г. Гомель

Инж. ГОЛОВАЧ Ю. Д.

Гомельский политехнический институт

К перспективным направлениям повышения пропускной способности воздушных электропередач, регулирования их режимов и снижения экологического влияния относится создание компактных управляемых двухцепных линий [1, 2].

Теория расчета параметров таких линий нуждается во всестороннем экспериментальном подтверждении. Для этого при техническом содействии Буда-Кошелевского РЭС¹ (Гомельская область) была создана натурная линия напряжением 0,38 кВ протяженностью 1 030 м. В ее основу положена трехконтурная конструкция [2], имеющая следующие особенности.

¹ В организации и проведении комплекса технических работ, связанных со строительством линии, принимал участие начальник Буда-Кошелевского РЭС А. И. Рябков.

Каждая расщепленная фаза одной цепи линии расположена на отдельном контуре совместно с одной из расщепленных фаз другой цепи, причем провода этих фаз обеих цепей распределены по контуру равномерно и поочередно (рис. 1). Параметры линии — рабочие индуктивность L и емкость C , пропускную способность P — определяют число проводов в фазе, их взаимное расположение и угол фазового сдвига Θ между векторами напряжений, приложенных к проводам разных цепей, расположенных на отдельном контуре. В режиме противофазы ($\Theta = 180^\circ$) конструкция сближенных фаз позволяет максимально компенсировать

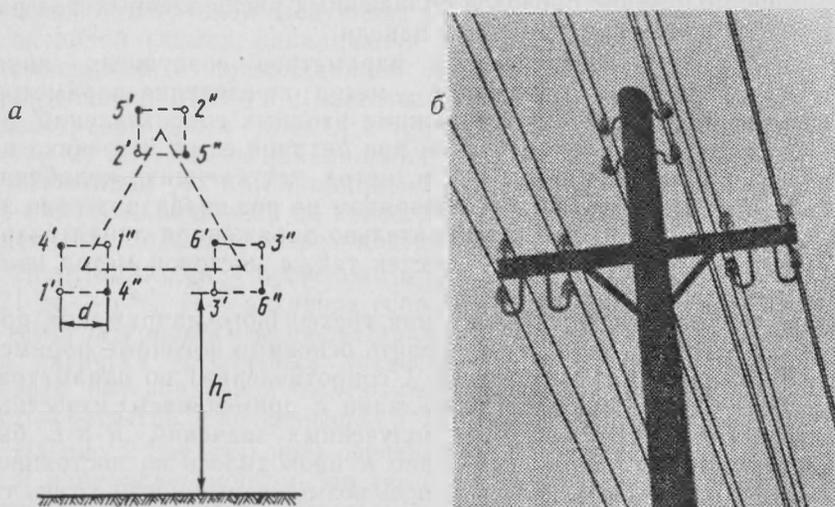


Рис. 1. Схема расположения в пролете (а) и подвеска на промежуточной опоре (б) проводов расщепленных фаз линии

электромагнитное поле составляющих в контурах. Это приводит к наибольшему эффекту увеличения величины P электропередачи, при котором параметр L линии наименьший, а C — наибольший.

В построенной линии каждая фаза в обеих цепях расщеплена на два провода (рис. 1): цепь 1 содержит провода $1'$ и $1''$ фазы A_1 , провода $2'$ и $2''$ фазы B_1 , провода $3'$ и $3''$ фазы C_1 ; цепь 2 — провода $4'$ и $4''$ фазы A_2 , провода $5'$ и $5''$ фазы B_2 , провода $6'$ и $6''$ фазы C_2 . Провода одноименных фаз цепей 1 и 2 — провода 1 и 4 фаз A_1 и A_2 , провода 2 и 5 фаз B_1 и B_2 , провода 3 и 6 фаз C_1 и C_2 — сближены и расположены в вершинах правильного многоугольника (квадрата) со стороной d , равной 0,3 м.

Подвеска проводов произведена с использованием горизонтальных траверс на 27 деревянных опорах, 4 из них — угловые. Это позволило расположить центры расщепленных фаз каждой цепи практически по вершинам равностороннего треугольника с основанием, равным 1,07 м, и сторонами 1,05 м (рис. 1). Надежное крепление и взаимную фиксацию проводов на угловых и концевых опорах обеспечивают двойные траверсы, выполненные без крюков и соединенные двумя раскосами. Материал траверс и раскосов — металлический уголок. Крюки, штыри и раскосы крепятся к траверсам сваркой, а изоляторы к линейной арматуре — посредством полиэтиленовых колпачков. Траверсы промежуточных опор со стойкой опоры имеют одно болтовое соединение, угловых и концевых — два.

Линия состоит из 25 пролетов по 40 м и одного — 17 м. Для удобства коммутационных переключений, контроля и измерения режимных и

электрических параметров трасса линии проложена по замкнутому контуру прямолинейными участками длиной 440, 80, 40, 440 и 17 м. Участки 80, 40 и 17 м обеспечивают поворот линии с углами менее 90°.

Для максимального ограничения контактных соединений в линии провода по контуру трассы выполнены сплошными. Марка проводов — А-16, их расчетный радиус — 0,25 см. Начало и конец каждого провода присоединены через изолированные алюминиевые выводы сечением 16 мм² к коммутационной панели реконструированной КТП 12-250 производства фирмы «Раде Кончар — Загреб» (Югославия). Двухрядное симметричное расположение 24 проходных изоляторов позволяет сохранять взаимное положение проводов сближенных расщепленных фаз разных цепей вплоть до коммутационной панели.

Для определения электрических параметров воздушных линий используются в основном два метода — метод определения параметров путем измерения в стационарном режиме входных сопротивлений разомкнутой и коротко замкнутой линии при питании ее от источника напряжения необходимой частоты f и метод затухающих колебаний. Последние создаются в линии либо разрядом на нее предварительно заряженной емкости, либо сама предварительно заряженная линия разряжается через индуктивность [3]. Известен также мостовой метод измерения входных сопротивлений.

Наличие мощного источника питания трехфазного напряжения промышленной частоты позволило определить основные погонные параметры линии (активное R и индуктивное X сопротивления) по параметрам стационарного режима нагруженной линии с применением известных формул пересчета. Для контроля полученных значений R и L был использован мостовой метод. Измерение R проводилось на постоянном токе, L — на частоте 1 кГц. Это оказалось возможным в связи с тем, что активное и омическое сопротивления проводов сечением до 150 мм² отличаются менее чем на 1%, а индуктивность фаз линии с алюминиевыми проводами без учета влияния земли не зависит от данного значения частоты. Определение L перечисленными методами базировалось на использовании следующих свойств трехфазной линии.

Трехфазная линия с одинаковыми проводами, расположенными симметрично по вершинам правильного треугольника, имеет одинаковые собственные и взаимные индуктивности проводов. В этом случае индуктивности фаз равны между собой и вдвое меньше индуктивности, соответствующей однофазной линии с теми же проводами и таким же взаимным их расположением [4]. Отсюда следует, что при определенном присоединении проводов одноименных фаз на общие трехфазные шины со стороны передающего и приемного концов (источника питания и нагрузки) исследуемую двухцепную линию можно рассматривать как одноцепную трехфазную, что позволяет получить уменьшенные в два раза активные и индуктивные сопротивления фаз цепей линии с углами Θ между векторами токов попарно сближенных фаз, равными 0, 60, 120 и 180°. Для этих углов в табл. 1 приведены варианты схем соединения пар

Таблица 1

	Соединение проводов фазы	Θ , град	Соединение пар проводов	Провода фаз		
				А	В	С
Рис. 3	Параллельное	0	согласное	1,4	2,5	3,6
		60	встречное	1,(5)	2,(6)	3,(4)
		120	согласное	1,6	2,4	3,5
		180	встречное	1,(4)	2,(5)	3,(6)

проводов двухцепной линии, образующих одноцепные. Например, двухцепная линия с углом $\Theta=60^\circ$ реализуется следующим образом. Провода 1, 2, 3 цепи 1 одними концами (концами начала линии) присоединяются соответственно к трехфазным шинам А, В, С источника питания, другими концами (конца линии) — к шинам трехфазной нагрузки. В этом случае провода 5, 6, 4 цепи 2 включаются встречно. Провода 5, 6, 4 конца линии присоединяются соответственно к шинам А, В, С источника питания, а их свободные концы — к шинам нагрузки.

В качестве источника питания использовалась ТП 10/0,4 кВ.

Стационарный режим работы линии обеспечивался регулируемой трехфазной нагрузкой следующих видов:

активной (лампы накаливания общей мощностью 33 кВт);

смешанной с преобладанием активной (вентилятор-подогреватель электрический ВПЭ-6,3 с двигателем номинальной мощностью 7,5 кВт и подогревательным блоком с тремя ступенями регулирования мощностью 21 кВт, лампы накаливания);

смешанной с преобладанием реактивной (трансформатор типа ТМ-400/10, включаемый на холостой ход со стороны напряжения 0,4 кВ параллельно с вентилятором-подогревателем ВПЭ-6,3).

Испытания линии проведены при изменении температуры воздуха от $+21$ до -1°C , т. е. активное сопротивление проводов было подвергнуто температурному влиянию. Параметр L характеризовался для всех видов нагрузки устойчивым значением. Разброс определялся погрешностью, обусловленной полевыми условиями, классом приборов, точностью расчетов, и не превышал 5 %.

На рис. 2 представлены основные результаты исследований. Величина R измерялась мостом при температуре $16-18^\circ\text{C}$, а в стационарном режиме — при $4-8^\circ\text{C}$ и третьем виде нагрузки. Значения L для обоих методов при углах 0 и 180° отличаются соответственно не более чем на 1 и 2,5 %; при 60 и 120° — 12,5 и 10 %. Относительно большая погрешность в последнем случае объясняется нарушением симметрии расположения проводов при определении индуктивности однофазных линий мостовым методом [4]. Так, при $\Theta=120^\circ$ индуктивность, например фазы А одноцепной трехфазной линии, находится как средняя, уменьшенная в два раза величина из двух измеренных значений L однофазных линий, получаемых путем последовательного соединения проводов соответственно фаз А и В, А и С одноцепной линии (табл. 1). В этом случае для образования каждой линии используются четыре провода в одном контуре и по два провода в двух других.

Параметр L фазы двухцепной линии был дополнительно рассчитан по методике [1] с применением программы, составленной для ЕС ЭВМ (рис. 2). Максимальное расхождение между значениями L , полученными путем измерения в стационарном режиме и расчетом на ЭВМ, составляет 3,6 % и соответствует углу Θ , равному 180° .

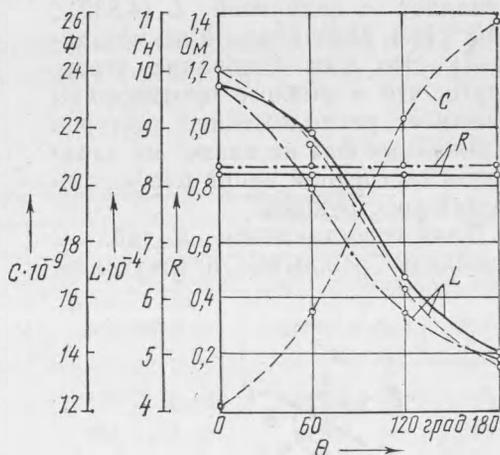


Рис. 2. Зависимости рабочих параметров R , L , C фазы двухцепной линии от угла фазового сдвига Θ при различных методах определения входных сопротивлений:

— — — стационарный режим; - - - - мостовой метод; - · - · - расчет на ЕС ЭВМ

Кроме того, исследовалось определение величины параметра L двухцепной линии в системе трех контуров в режиме противофазы. Расчетное значение индуктивности фазы в системе проводов своего контура совпало с величиной L , представленной на рис. 2 и определенной в системе проводов всех фаз двухцепной линии.

Экспериментальное подтверждение полученного результата проведено на базе исследования однофазной линии (ОЛ) 1, образованной проводами 4, 1 (рис. 1, табл. 2). При измерении режимных параметров этой

Таблица 2

Схемы, режимные и электрические параметры однофазных линий

Рис. 4а	ОЛ	Рис. 4б	P_a , кВт	P_n , Вт	ΔU , В	ΔP , Вт	R , Ом	$L \cdot 10^{-4}$, Гн
			1		2	5520	37,8	1633
			4	6680	37,5	1623	0,847	4,640
			6	7920	38,7	1725	0,844	4,690
			8	9064	40,8	1904	0,845	4,958
			10	10080	42,8	2120	0,838	4,715
	2	Рис. 4в	6	6988	76,4	3060	1,681	19,645
	3	Рис. 4г	6	6988	59,8	2060	1,681	9,793
	4	Рис. 4д	6	7280	47,6	2080	0,835	14,668

линии — мощности ее начала P_n , падения напряжения ΔU , потерь активной мощности ΔP и т. д. — в качестве нагрузки S_n использовались постоянно включенная обмотка фазы низкого напряжения трансформатора ТМ-400/10 мощностью $S_{T,x,x}$ и активная нагрузка P_a , величина которой приведена в табл. 2. Видно, что среднее значение индуктивности ($4,775 \cdot 10^{-4}$ Гн) ОЛ 1 практически совпадает с величиной L ($4,832 \times 10^{-4}$ Гн), рассчитанной по методике [1]. Это дает основание утверждать, что в режиме противофазы взаимное расположение контуров сближенных фаз не влияет на параметры двухцепной линии рассматриваемой конструкции.

Для сопоставления в табл. 2 приведены режимные и электрические

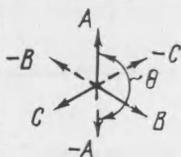


Рис. 3. Диаграмма векторов трехфазного источника

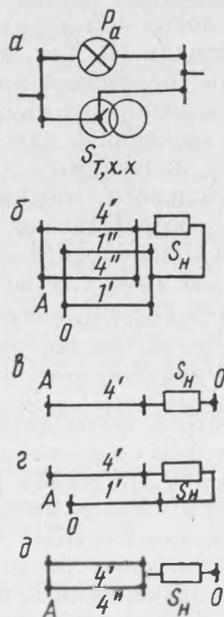


Рис. 4. Схема включения нагрузки S_n линии (а) и схемы однофазных линий (б—г)

ские параметры однофазных линий других конструкций. Числовые характеристики этих линий получены при общих условиях испытаний. Все найденные значения параметров R и L ОЛ хорошо согласуются с результатами мостового метода измерения, а индуктивностей — с результатами расчетов по [4].

Определение частичных собственных и взаимных емкостей фаз по входным параметрам стационарного режима линии с разомкнутыми концами на промышленной частоте и напряжении 0,38 кВ не дало желаемого результата. Поэтому измерение емкостей линии проводилось мостовым методом на частоте 1 кГц. Величина f выбрана из условия независимости емкости линии от частоты менее 1 МГц и при высоте подвеса проводов над землей не более нескольких десятков метров [3].

В процессе измерений определялась конденсаторная емкость отдельных проводов и проводов фаз линии по отношению к земле и между собой. Контакт с землей обеспечивался контуром заземления КТП 12-250, присоединенного для надежности контакта к контурам заземления осветительной сети 0,38 кВ и ТП 10/0,4 кВ.

Емкость одиночных проводов линии по отношению к земле лежит в диапазоне 6,88—7,15 нФ. Меньшее значение соответствует проводам 2'' и 5' (рис. 1). Величина емкости пар проводов 1 (4) и 3 (6) составила 10,46 нФ, а проводов 1,4 и 2,5 — соответственно 12,73 и 12,59 нФ. Приведенные и другие результаты измерений были сопоставлены с расчетными, полученными из соотношений [5], и отличались не более чем на 6 %.

Для прямолинейного провода (например, 1') конечной длины, параллельного проводящей плоскости (земле), расхождение результатов составляет 4,6 %, для проводов фазы A_1 — 5,5, а фаз A_1, A_2 — 5,4 %. Емкость проводов фаз $A(C), B$ (табл. 1), определенная по методике [1] при $\Theta=0$, совпала с рассчитанной по [5]. В расчетах эквивалентное значение габарита h_r проводов линии до земли принималось равным 5,5 м (рис. 1а). Величина параметра h_r принята на основании средней высоты подвеса проводов на опорах (6 м), разницы в высоте подвеса (до 1,7 м) и стрелы провеса проводов. Расхождение результатов, полученных путем измерения и расчетов емкости между отдельными проводами и системами проводов линии без учета влияния земли, составляет менее 4 %. Так, для емкости проводов 1', 3' различие равно 3,4 %, проводов 3', 6'' — 3,3 %.

Измеренная емкость между проводами сближенных фаз в 1,2 раза превышает емкость фазы по отношению к земле. Этот факт, во-первых,

Таблица 3

Конструкции и электрические параметры трехфазных линий

Линия	Провода фаз			Средние рабочие параметры фаз			
	A	B	C	R, Ом	$L \cdot 10^{-4}$, Гн		$C \cdot 10^{-9}$, Ф
				измерения	расчеты на ЕС ЭВМ		
ВЛ 1	4'	5'	6'	1,720	13,129	12,967	9,473
ВЛ 2	4'1''	5'2''	6'3''	0,823	7,80	7,778	15,719
ВЛ 3	4'1''1'	5'2''2'	6'3''3'	0,552	5,885	5,885	20,779
ВЛ 4	4'	1''	1'	1,714	10,637	10,615	11,701
ВЛ 5	4'6'	1''3''	1'3'	0,832	5,426	5,309	23,446
ВЛ 6	4'6'5'	1''3''2''	1'3'2'	0,566	3,610	3,501	35,297

подтверждает наличие большой емкостной связи между сближенными фазами линий рассматриваемой конструкции; во-вторых, указывает на существенное влияние упомянутой связи на величину параметра C линии при регулировании угла Θ в пределах $0-180^\circ$. Выполненный, согласно методике [1], расчет показывает, что емкость фазы изменяется в 2,1 раза и при 180° достигает значения, равного 25,78 нФ (рис. 2). При этом исследования подтверждают также независимость величины параметра C ($\Theta=180^\circ$) от взаимного положения контуров с попарно сближенными фазами разных цепей линии.

Для сопоставления полученных результатов в табл. 3 приведены параметры одноцепных линий с различным числом проводов в фазах.

Расположение проводов фаз линий в системе трех контуров производилось двумя способами. В первом случае провода одноименных фаз располагаются только в одном контуре (ВЛ 1, ВЛ 2 и ВЛ 3), во втором — провода разноименных фаз последовательно располагаются в каждом контуре (ВЛ 4, ВЛ 5 и ВЛ 6). Параметры линий определялись описанными выше методами. В связи с хорошим согласованием полученных данных результаты мостового метода измерений входных сопротивлений не приводятся.

ВЫВОДЫ

1. Созданная экспериментальная линия и составленная авторами для ЕС ЭВМ программа позволили исследовать параметры и режимы воздушных линий различных конструкций.

2. Экспериментальные исследования, проведенные на этой линии, подтверждают теорию расчета параметров компактных управляемых электропередач.

3. В режиме противофазы электрические параметры трехконтурной компактной линии не зависят от взаимного расположения контуров попарно сближенных фаз разных цепей.

4. Большие возможности компактных двухцепных электропередач со сближенными фазами с равномерным и поочередным расположением проводов на отдельном контуре указывают на целесообразность их широкого применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Параметры компактных управляемых двухцепных линий электропередачи концентрической конструкции / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, Г. И. Селиверстов и др. — Изв. вузов СССР — Энергетика, 1984, № 11, с. 10—15.

2. А. с. 945933 (СССР) Электропередача переменного тока / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, М. С. Чернецкий. — Оpubл. в Б. И., 1982, № 27.

3. Измерение низкочастотных параметров линии 750 кВ Конаково — Москва / Д. Е. Артемьев, Л. Л. Дюкова, В. В. Крыжановский и др. — В кн.: Дальние электропередачи 750 кВ. Ч. 1. Воздушные линии; Под ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна. — М.: Энергия, 1974, с. 183—188.

4. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. — Л.: Энергия, 1970. — 416 с.

5. Иоссель Ю. Я., Качанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 288 с.

Представлена кафедрой
электрических систем
Белорусского политехнического
института