

УДК 621.315.1.072

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТРЕХКОНТУРНОЙ КОМПАКТНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ УПРАВЛЯЕМОГО ТИПА

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

*Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт*

*Канд. техн. наук СЕЛИВЕРСТОВ Г. И.*

*Гомельский политехнический институт*

К перспективным направлениям транспорта электроэнергии воздушным путем относится создание электропередач управляемого типа. Их широкие функциональные возможности подтверждаются экспериментальными исследованиями, проведенными на созданной натурной воздушной линии напряжением 0,38 кВ протяженностью 1 030 м. Описание технических характеристик линии, в основу которой положена трехконтурная конструкция, приведено в [1], а результаты исследований ее рабочей индуктивности — в [2].

Настоящая статья посвящена изложению результатов дальнейших экспериментальных исследований электрических параметров трехконтурной компактной двухцепной управляемой электропередачи, в частности рабочей емкости  $C_p$ , и ее режимов.

В [2] отмечалось, что нахождение рабочей емкости фаз  $C_p$  трехконтурной двухцепной линии с попарно сближенными проводниками фаз разных цепей и фазовым сдвигом на угол  $\Theta$  приложенных к ним напряжений путем определения собственных и взаимных емкостей по входным параметрам стационарного режима линии с разомкнутыми концами ее фаз на промышленной частоте и измерения конденсаторной емкости отдельных проводов и проводов фаз линии по отношению к земле и между собой не дало желаемого результата.

Экспериментальное определение рабочих значений  $C_p$  фаз трехконтурной линии при изменении угла  $\Theta$  в диапазоне 0—180° выполнено с помощью разработанного и созданного высокочастотного источника питания [3] по параметрам стационарного режима моделируемой электропередачи с разомкнутыми фазами конца линии.

Высокочастотный источник питания представляет собой шестифазный генератор с выходной номинальной частотой, равной 10 кГц и предназначен для моделирования режимов управляемых электропередач. Генератор имеет следующие блоки: генератор задающих сигналов ( $G$ ); распределитель импульсов ( $PI$ ), формирующий две симметричные трехфазные системы векторов выходных напряжений; шесть фильтров низких частот ( $ФЧ$ ); трехполюсный переключатель на шесть положений ( $P$ ), обеспечивающий вращение на 360° с шагом 60° одной трехфазной системы векторов напряжений относительно второй; шесть фазных усилителей ( $ФУ$ ) (рис. 1).

Нахождение параметра  $C_p$  производилось двумя способами. Первый — заключался в измерении токов холостого хода (емкостных токов) фаз  $I_{\phi i}$ , определении емкости  $C_{p i}$  каждой фазы трехконтурной линии [4]

$$C_{pi} = \frac{I_{\Phi i}}{2\pi f U_i} \quad (1)$$

и ее эквивалентной рабочей емкости

$$C_p = \frac{1}{6} \sum_{i=6}^6 C_{pi}, \quad (2)$$

где  $f$  и  $U_i$  — частота и напряжение  $i$ -й фазы источника питания.

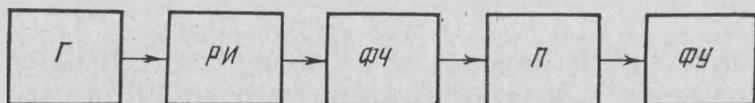


Рис. 1. Блок-схема высокочастотного шестифазного генератора

При втором подходе использовалось соотношение между напряжениями начала  $U_H$  и конца  $U_K$  линии электропередачи

$$U_K = \frac{U_H}{\cos \lambda}, \quad (3)$$

которое после преобразования имеет вид

$$C_{pi} = \frac{\left( \arccos \frac{U_H}{U_K} \right)^2}{12,96 \cdot 10^{-4} L_{pi} f_i^2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — волновая длина линии;

$L_{pi}$  — рабочая индуктивность  $i$ -й фазы линии электропередачи.

Активными сопротивлением и проводимостью моделируемой линии можно пренебречь, так как они значительно меньше реактивных параметров линии. Например, расчетное сопротивление линии при  $f = 10$  кГц и  $\Theta = 180^\circ$  равно 30,3 Ом, а активное сопротивление фазы с учетом поверхностного эффекта составляет всего 1,3 Ом, т. е. выполняется соотношение  $R^2 \ll \omega^2 L_p^2$  ( $\omega$  — угловая частота;  $L_p$  — рабочая индуктивность) для линии без потерь.

Результаты исследований зависимостей  $C_p = f(\Theta)$  электропередачи по параметрам ее стационарного режима на частоте 10 кГц приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие емкости фаз трехконтурной линии

Способ определения значений $C_p$	Величина параметра $C_p \cdot 10^9 \Phi$ при $\Theta$ , град			
	0	60	120	180
Выражения (1) и (2)	12,10	15,61	20,50	24,44
Выражения (4) и (2)	12,56	14,55	21,36	25,06
Расчет на ЕС ЭВМ	12,33	15,62	22,39	25,78

Зависимости  $C_p = f(\Theta)$ , установленные экспериментальным путем (табл. 1), носят одинаковый характер и имеют практически равные значения параметра  $C_p$  в диапазоне угла  $\Theta$  0—180°, что объясняется общностью физических процессов, описываемых выражениями (1) и (3). Наибольшее расхождение между этими зависимостями соответствует углу 60° и равно 6,8 %; наименьшее — углу 180° и составляет 2,5 %.

Общность процесса проявляется не только в характере зависимостей  $C_p = f(\Theta)$ , но и в изменении емкостей  $C_{pi}$  отдельных фаз, являющихся исходными для определения параметра  $C_p$ . Так, для углов  $\Theta$ , равных 0, 60, 120 и 180°, наименьшее и наибольшее значения  $C_{pi}$ , определенные по выражению (1), отличаются соответственно на 4,6; 9,4; 7,3 и 4 %, а значения

$C_{pi}$  для этих же углов и условий, найденные по выражению (3), имеют тот же характер изменения и составляют 4,0; 8,3; 7,6, и 6,8 %.

Отмеченные закономерности подтверждаются при различных вариациях значений частоты и напряжения источника питания.

Имеющиеся небольшие расхождения экспериментальных и рассчитанных на ЕС ЭВМ по методике [1] значений  $C_p$  (максимальное — 8,3 % ( $120^\circ$ ), минимальное — 1,3 % (0), табл. 1) объясняются двумя основными причинами. Первая из них определяется выбором габарита проводов до земли, равного 5,5 м. Наличие влияния последнего подтверждается результатами исследований в [2], проведенных с помощью мостового метода измерений на частоте 1 кГц и методики, описанной в [5].

Вторая причина обусловлена физикой процессов, протекающих в сближенных фазах и цепях трехконтурной линии электропередачи при углах  $\Theta$ , отличных от 0 и  $180^\circ$ , и особенно очевидна при  $\Theta = 120^\circ$  (табл. 1). Эти процессы связаны с явлением переноса реактивной и активной мощностей, приводящим в итоге к перераспределению параметров режима между сближенными фазами и цепями электропередачи и изменению параметров  $L_{pi}$ ,  $C_{pi}$  фаз.

На экспериментальной линии исследованы также режимы трехконтурной управляемой электропередачи на частотах 50 Гц и 10 кГц.

При исследовании режимных параметров трехконтурной электропередачи на промышленной частоте ставилась задача оценить ее возможности с точки зрения потерь напряжения  $\Delta U$  и активной мощности  $\Delta P$  в линии при регулировании угла  $\Theta$ .

В табл. 2 приведены параметры режимов электропередачи при подключении к ней максимальной нагрузки различных видов, использованной для определения рабочей индуктивности  $L_p$  фаз по параметрам стационарного режима [2].

Таблица 2

Угол фазового сдвига $\Theta$ , град	Нагрузка								
	активная			смешанная с преобладанием					
	P, Вт	$\Delta P$   $\Delta U$		активной			реактивной		
		%		P, Вт	%		P, Вт	%	
0	29310	8,6	9,1	29050	8,6	8,8	24080	14,0	10,0
180	29724	8,8	8,6	29040	8,5	8,4	24666	14,1	8,6

Из табл. 2 видно, что с изменением  $\Theta$  от 0 до  $180^\circ$  наряду со снижением  $X$  электропередачи [2] уменьшаются и потери  $\Delta U$  в линии. Следствием этого является некоторое снижение  $\Delta P$  при одинаковой передаваемой мощности и различных углах  $\Theta$  (вариант смешанной нагрузки с преобладанием активной). Особенность снижения значений  $\Delta U$  при регулировании угла  $\Theta$  и неизменной нагрузке была также проверена на варианте экспериментальной трехконтурной электропередачи с двойной длиной ее линии и углами  $\Theta$ , равными 60 и  $180^\circ$ . Образование линий двойной длины с указанными  $\Theta$  осуществлялось путем соответствующих переключений на коммутационной панели; в качестве нагрузок использовалась смешанная нагрузка с преобладанием реактивной [2].

В результате было подтверждено, что регулированием угла  $\Theta$  до  $180^\circ$  в управляемой электропередаче путем снижения параметра  $X$  линии можно достичь уменьшения потерь напряжения и активной мощности в ее цепях. Причем оно особенно эффективно в электропередачах, в которых индуктивное сопротивление значительно больше активного.

Созданный высокочастотный шестифазный генератор позволил смоделировать режимы электропередачи, соответствующие реальной длине ее линии при промышленной частоте до 200 км.

Некоторые результаты исследований параметров режима холостого

хода трехконтурной электропередачи при разомкнутых фазах цепей конца линии приведены на рис. 2.

Характер изменения параметров  $U_H$  и  $U_K$  при переходе от одного угла  $\Theta$  ко второму объясняется условиями проведения экспериментальных исследований. Они определялись особенностью установки значений выходных напряжений фаз высокочастотного генератора, отключенного от линии, для различных углов  $\Theta$ . Начальная величина модуля выходного напряжения составляла 6,33 В для  $\Theta=0$  и  $120^\circ$  и 6,76 В для  $\Theta=60$  и  $180^\circ$ .

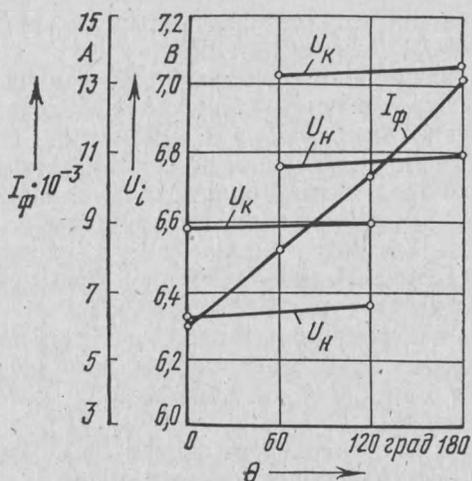


Рис. 2. Зависимости средних значений напряжения  $U_i$  и тока  $I_\phi$  холостого хода фазы линии электропередачи от угла фазового сдвига  $\Theta$

Из анализа параметров режима холостого хода электропередачи (рис. 2) видны те же закономерности, что и у электропередач традиционного исполнения. Так, напряжение  $U_K$  на разомкнутом конце линии для каждого из углов  $\Theta$  превышает значение  $U_H$  ее начала, а связь между ними описывается выражением (3).

Электропередача характеризуется также стоком зарядной мощности; величина тока  $I_\phi$  пропорциональна изменению рабочей емкости во всем диапазоне регулирования угла  $\Theta$  (табл. 1).

На основании представленных на рис. 2 зависимостей и других исследований подтверждается вывод, касающийся уровня напряжения при изменении угла  $\Theta$  в диапазоне  $0-180^\circ$ . В режиме холостого хода при регулировании реактивной мощности, модуль

же напряжения  $U_K$  разомкнутого конца линии практически постоянен. Это объясняется пропорциональным изменением рабочих параметров  $L_p$ ,  $C_p$  фаз линии электропередачи. Если  $C_p$  увеличивается в 2,1 раз (табл. 1), то  $L_p$  уменьшается во столько же раз [2]. Поэтому знаменатель выражения (3), так же как и произведение емкостного тока на индуктивность линии, с увеличением ее емкости остаются постоянными.

Режим нагрузки электропередачи для каждого из углов  $\Theta=0, 60, 120$  и  $180^\circ$  — имеет свои закономерности и особенности. Это следует из анализа режимов напряжения начала  $U_H$  и конца  $U_K$  линии нагруженной электропередачи при изменении сопротивления  $R_H$  нагрузки (рис. 3).

Работа электропередачи с  $\Theta=0$  соответствует варианту традиционной электропередачи. Величина нагрузки с  $R_H > 286$  Ом соответствует работе электропередачи в режиме передачи мощности меньше натуральной ( $U_K > U_H$ ). Для значения  $R_H$ , равного волновому сопротивлению линии  $Z_B = 286$  Ом, имеем режим натуральной мощности ( $U_K = U_H$ ). При этом параметр  $Z_B$ , равный 286 Ом, получен как экспериментальным путем по рабочим параметрам фаз, так и расчетным. Работа электропередачи с  $R_H < 286$  Ом отвечает режимам нагрузки, величина которой больше натуральной мощности. В этом случае  $U_H > U_K$  (рис. 3).

Закономерности, отмеченные для электропередачи с углом  $\Theta=0$  и изменяющейся нагрузкой, проявляются в электропередаче и при  $\Theta=180^\circ$ , режим натуральной мощности которой обеспечивается при сопротивлении  $R_H$  равном  $Z_B = 136$  Ом (рис. 3).

Режимы управляемой электропередачи при углах  $\Theta$ , отличных от 0 и  $180^\circ$ , имеют свои особенности. Прежде всего они заключаются в перераспределении мощности между цепями. Цепь электропередачи с отстающей на угол  $\Theta$  трехфазной системой векторов напряжений загружается в большей степени. Это обусловлено переносом электрической энергии из одной цепи в другую индукционным путем и путем электростатической

индукции. При этом с изменением нагрузки каждой цепи на одну и ту же величину отношение мощностей в цепях друг к другу остается практически постоянным.

Для исследуемой электропередачи при  $\Theta = 60^\circ$  и изменении  $R_H$  в диапазоне 106 ÷ 286 Ом отношение мощностей  $S_2$  цепи 2 к мощности  $S_1$  цепи 1, измеряемых на выходе генератора, лежит в пределах 1,31 ÷ 1,33. Аналогичные соотношения  $S_2$  и  $S_1$  с теми же сопротивлениями  $R_H$  имеют место и при  $\Theta = 120^\circ$ , что указывает на одинаковую природу физических процессов в электропередаче при углах  $\Theta$ , равных 60 и  $120^\circ$ , выражающихся в равенстве по величине и знаку мнимых частей комплексных значений индуктивности и емкости фаз при указанных углах [1].

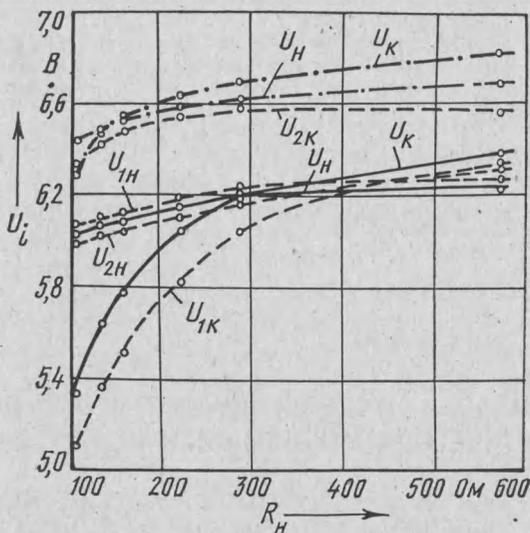


Рис. 3. Зависимость параметра  $U_i$  режима трехконтурной электропередачи от сопротивления активной нагрузки  $R_H$  при различных углах фазового сдвига  $\Theta$ :

— — — — — 0; - - - - - 120°; — — — — — 180°

Одинаковая природа естественного распределения по цепям передаваемой мощности проявляется и в одинаковом характере распределения напряжений при постоянной и переменной нагрузках электропередачи. На рис. 3 приведены зависимости напряжений начала  $U_{1H}$  и конца  $U_{1K}$  цепи 1 и начала  $U_{2H}$  и конца  $U_{2K}$  цепи 2 линии электропередачи с  $\Theta = 120^\circ$  от параметра  $R_H$ . Из зависимостей видно, что с уменьшением величины  $R_H$  напряжения  $U_{1H}$ ,  $U_{1K}$  цепи 1 повторяют характер изменения параметров  $U_H$ ,  $U_K$  трехконтурной электропередачи при работе ее с углом фазового сдвига  $\Theta$ , равным нулю. Однако во всем диапазоне изменения  $R_H$  напряжения конца  $U_{2K}$  цепи 2 превышает напряжение ее начала  $U_{2H}$ . Причем по абсолютному значению разница между  $U_{2K}$  и  $U_{2H}$  весьма существенна.

Устранить указанное можно рядом технических и режимных мероприятий, прошедших апробацию на экспериментальной электропередаче, однако изложение их выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, в процессе теоретических и экспериментальных исследований компактной управляемой электропередачи получен ряд результатов: диапазон изменения электрических параметров трехконтурной линии при регулировании угла  $\Theta$  соответствует расчетному; уровень напряжений на разомкнутом конце линии в режиме холостого хода электропередачи при  $\Theta = \text{var}$  слабо зависит от его величины; регулирование угла  $\Theta$  в пределах до  $180^\circ$  приводит к изменению потерь напряжения и активной мощности; физические процессы в электропередаче в режиме ее холостого хода при  $\Theta = \text{var}$  и в нагрузочном при  $\Theta = 0$  и  $180^\circ$  описываются известными соотношениями; при углах, отличных от 0 и  $180^\circ$ ,

нагрузочный режим связан с перераспределением мощности между цепями, причем для  $\Theta=60$  и  $120^\circ$  и естественном ее распределении загрузка цепей осуществляется в одинаковой пропорции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г. Е., Федин В. Т., Селиверстов Г. И. Возможности компактной управляемой электропередачи // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1985.— № 3.— С. 51—60.
2. Конструктивные и электрические параметры экспериментальной линии новой компактной конструкции / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, Г. И. Селиверстов и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений).— 1985.— № 9.— С. 8—14.
3. Елисеев Г. А., Селиверстов Г. И. Высокочастотный шестифазный генератор с регулируемым фазовым сдвигом / Белорусский политехнический ин-т.— Минск.— 1987.— 11 с.— Деп. в Информэнерго 09.03.1987.— № 2464-эн87.
4. Измерение низкочастотных параметров линии 750 кВ Конаково—Москва / Д. Е. Артемьев, Л. Л. Дюкова, В. В. Крыжановский и др. // Дальние электропередачи 750 кВ: Воздушные линии; Под ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна.— М.: Энергия.— 1974.— Ч. 1.— С. 183—188.
5. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости.— Л.: Энергия, 1969.— 240 с.

Представлена кафедрами  
электрических систем БПИ и электроснабжения  
сельского хозяйства Гомельского ПИ

Поступила 4.11.1987

УДК 621.311.1.016.35

### АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

*Канд. техн. наук, доц. АСАМБАЕВ С. Н., канд. техн. наук  
ШТРОБЕЛЬ В. А., инженеры МАРКОВСКИЙ А. Е., НУРГАЗИЕВ А. А.*

*Алма-Атинский энергетический институт*

Раннее выявление сохранения, а особенно нарушения параллельной синхронной работы электрических станций имеет большое значение для управления переходными режимами, возникающими в электроэнергетических системах (ЭЭС) при больших возмущениях.

Для этих целей был разработан метод экспресс-оценки устойчивости, обоснование которого для ЭЭС различной структуры и при учете различных устройств автоматики и регулирования приводится в ряде работ. Некоторое обобщение результатов этих работ сделано в [1, 2].

При этом обоснование проводилось на математических моделях путем проведения расчетов на ЭВМ переходных режимов реальных ЭЭС различной структуры и различном их представлении. Причем для объективности получаемых результатов в качестве исходных данных для метода экспресс-оценки устойчивости служили параметры режимов, найденные при использовании для математического моделирования переходных режимов в рассмотренных ЭЭС промышленных программ, таких, как КУ-3 и ПАУ-2М.

Хотя объективность полученных результатов в силу указанных причин не вызывает сомнений, было принято решение провести экспериментальную проверку работоспособности метода экспресс-оценки устойчивости на физической модели энергосистем, так как она наиболее полно отражает все свойства энергосистемы, а также позволяет оценить возможность применения имеющихся измерительных устройств или определить необходимые требования к ним при реализации предлагаемого метода оценки устойчивости в темпе процесса. Для этого была разработана программа экспериментальных исследований с использованием автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) кафедры электрических систем МЭИ, представляющей собой электродинамическую (физическую) модель энергосистем, измерительную технику, управляющую