

УДК 621.315.1

## ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ РАЗОМКНУТОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*Е.М. Шишков, А.В. Проничев, Е.О. Солдусова*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vgg41@yandex.ru, e.m.shishkov@ieee.org, teyoma@bk.ru, esoldusova@inbox.ru

*Для целей организации продольной компенсации на сверхдальних воздушных линиях электропередачи в предыдущих работах авторов предложен способ использования собственной распределенной емкости – построение разомкнутой линии электропередачи с расщепленной фазой, составляющие которой электрически изолированы друг от друга таким образом, что часть составляющих подключена только к шинам источника питания, а часть – только к шинам потребителя. В настоящей работе произведена оценка предела передаваемой мощности разомкнутых воздушных линий при различных значениях нагрузки. Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи использовались методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScape SimPowerSystems. Исходными данными для анализа являлись геометрические конфигурации опор воздушных линий и параметры сталеалюминиевых проводов. Составлена математическая модель для анализа режимов нагрузки и холостого хода разомкнутой линии. Определены длины трехфазной разомкнутой линии электропередачи, при которых наблюдается явление полной самокомпенсации. Проведен расчет значений передаваемой мощности, соответствующих различным установившимся значениям отклонения напряжения.*

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, продольная компенсация, самокомпенсированная линия.

### Введение

Установки продольной компенсации являются неотъемлемым элементом сверхдальних передач переменного тока [1]. Одним из способов достижения цели продольной компенсации – уменьшения продольной индуктивности воздушной линии (ВЛ) – является настройка линии на резонанс напряжений, или резонанс токов. Эта идея была предложена в работах И.И. Соловьёва и А.А. Вульфа [2] в первой половине XX века. Позднее профессором Н.Ф. Ракушевым в работе [3] был предложен способ реализации данной идеи – разомкнутая линия электропередачи, каждая фаза которой состоит из двух изолированных друг от друга проводников, один из которых (прямая составляющая) подключен к шинам передающей подстанции, а второй (встречная составляющая) – к шинам приемной. При достаточной длине линии взаимная емкостная проводимость, созданная между прямой и обратной составляющими, могла бы полностью скомпенсировать собственную индуктивность линии.

---

*Евгений Михайлович Шишков (к.т.н.), заместитель директора по науке, информатизации и инновациям филиала ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Новокуйбышевске.*

*Артем Валерьевич Проничев, студент.*

*Елена Олеговна Солдусова, студент.*

В работе [4] авторами предложена усовершенствованная конструкция разомкнутой ВЛ, выполненная по принципу расщепления фазы. В такой линии прямая и встречная составляющие расщепленной фазы подвешены на одной траверсе и отделены друг от друга диэлектрическими распорками. При этом на одной опоре могут располагаться все три фазы разомкнутой ВЛ. В работе [5] авторами предложена математическая модель в фазных координатах, учитывающая принципиальную несимметрию разомкнутой ВЛ как трехфазной системы, а в работе [6] – способ реализации этой модели в виде методик расчета установившегося режима линии.

В работе [7] рассматривался вопрос определения оптимальной конструкции расщепленной фазы разомкнутой воздушной линии, однако расчеты производились на однофазной модели.

Целью данного исследования является расчет и анализ режимов нагрузки предложенной в [4] конструкции трехфазной разомкнутой ВЛ.

### Материалы и методы исследования

Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи используются методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScare SimPowerSystems. Выполнен анализ режимов работы линий двух классов напряжения (500 и 750 кВ) и трех вариантов конструкций расщепленной фазы (рис. 1). Сведения об анализируемых линиях представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сведения об анализируемых линиях

Класс напряжения, кВ	Конфигурация пролета		
	Тип промежуточных опор	Высота подвеса фазы, м	Марка провода в фазе
500	Промежуточные опоры на оттяжках ПБ1	27,2	АС-700/86
750	Промежуточные опоры на оттяжках ПП750-1	35	АС-500/64

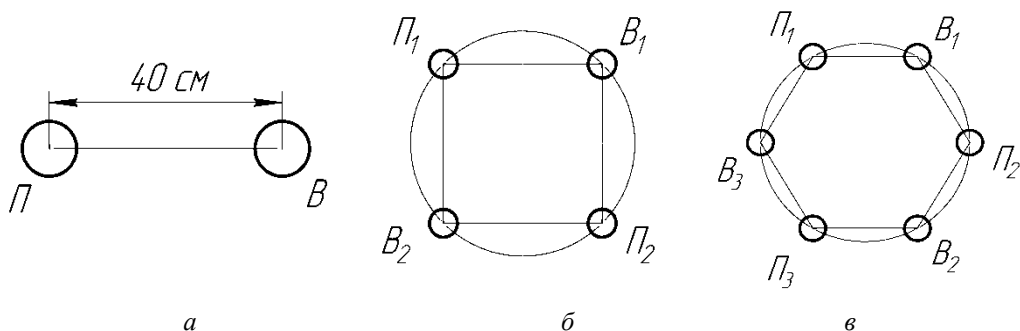


Рис. 1. Схема конструкции расщепленной фазы общего участка разомкнутой ВЛ: а – расщепление на 2 провода в фазе (класс напряжения 500 кВ); б – расщепление на 4 провода в фазе (класс напряжения 500 и 750 кВ); в – расщепление на 6 проводов в фазе (класс напряжения 750 кВ)

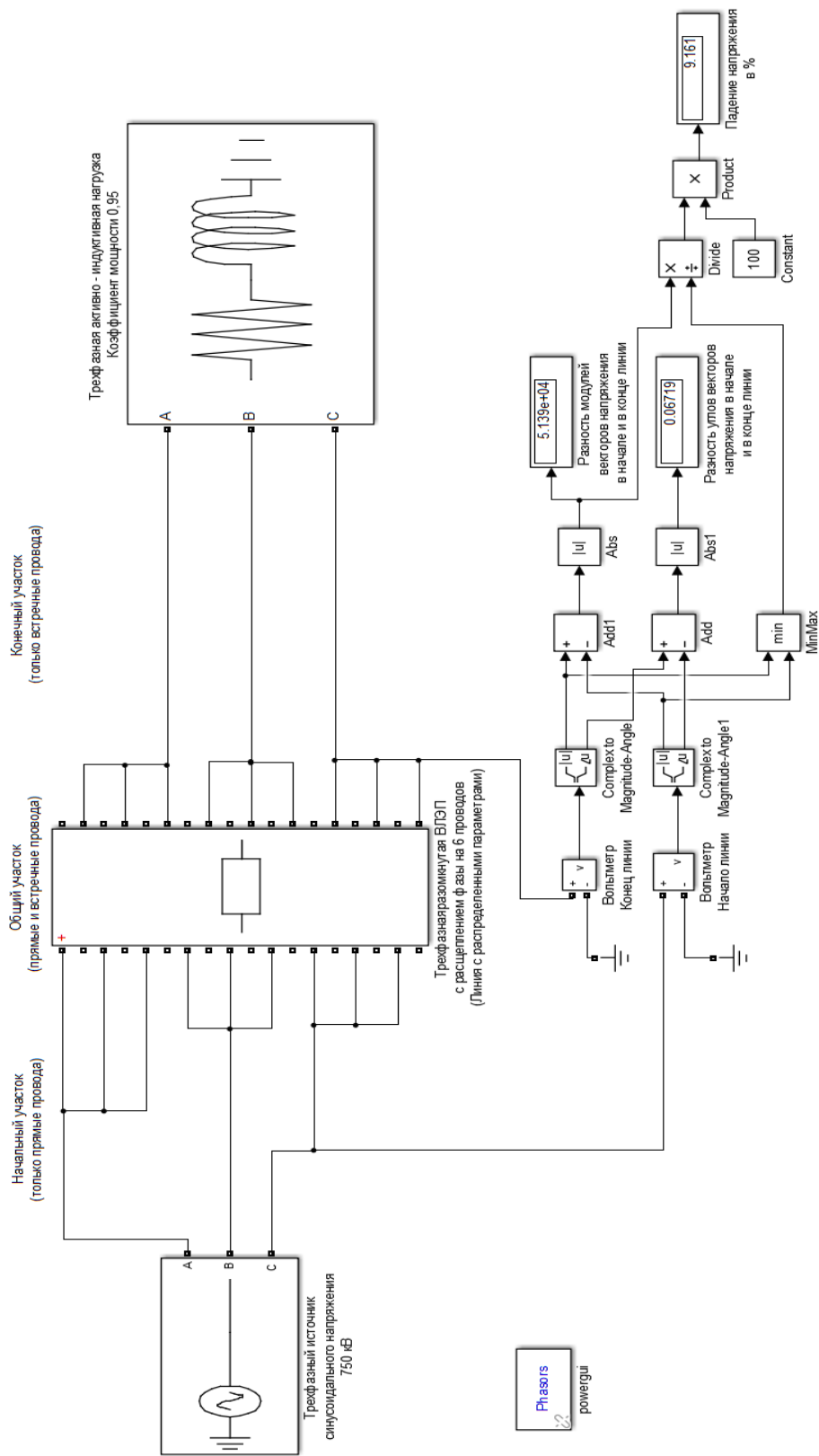


Рис. 2. Математическая модель в среде MATLAB/Simulink для расчета режимов нагрузки трехфазной разомкнутой ВЛ

При помощи математической модели для анализа режима холостого хода [7] были рассчитаны длины общего участка, при которых в трехфазной разомкнутой ВЛ наблюдается явление полной самокомпенсации.

На рис. 2 представлена математическая модель для анализа режима под нагрузкой. Общий участок представлен схемой замещения с распределенными параметрами: к ее входу подключен трехфазный источник синусоидального напряжения, а к выходу – трехфазная активно-индуктивная нагрузка с коэффициентом мощности 0,95. Сигналы с вольтметров в начале и в конце линии преобразуются, и в качестве расчета режима принимаются значения установившегося отклонения напряжения на общем участке в процентах.

### Результаты

В табл. 2 представлены результаты расчета длины общего участка для четырех рассматриваемых конфигураций, полученные с использованием модели, изображенной на рис. 2. Полученные результаты отличаются от опубликованных ранее в [7], поскольку использованная в данной работе математическая модель представлена в многофазной постановке и поэтому учитывает процессы, связанные с влиянием на режим взаимной индуктивности между проводниками разных фаз, для компенсации которой требуется дополнительная емкость. Сравнение полученных результатов для линии 500 кВ, полученных с использованием математической модели в однофазной [7] и трехфазной постановках, представлено на рис. 3.

Таблица 2

Результаты расчета длины общего участка

Класс напряжения, кВ	Схема конструкции расщепленной фазы	Длина участка самокомпенсации, км
500	<i>a</i>	932
	<i>б</i>	705
750	<i>б</i>	697
	<i>в</i>	602

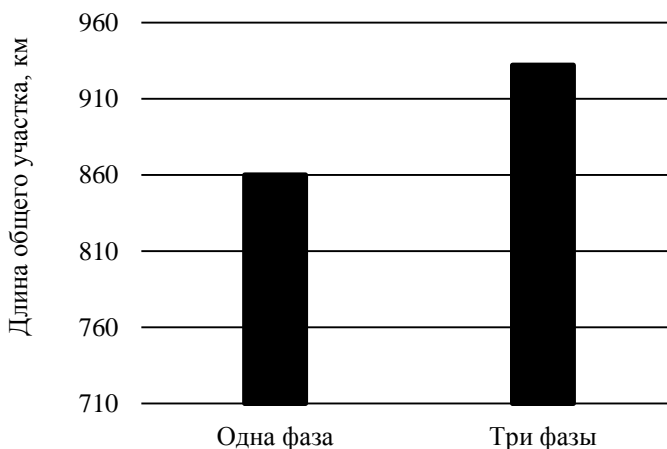


Рис. 3. Сравнение длин общего участка однофазной и трехфазной моделей разомкнутой ВЛ для конфигурации 500 кВ с расщеплением на два провода

В табл. 3 представлены рассчитанные значения передаваемой мощности четырех рассматриваемых конфигураций для двух значений установившегося отклонения напряжения  $|\delta U|$  в конце ВЛ – 5 и 10 %.

Таблица 3

**Значения передаваемой мощности**

Конфигурация	Передаваемая мощность, МВт	
	$ \delta U  = 5 \%$	$ \delta U  = 10 \%$
500 кВ – расщепление на 2 провода	1200	1900
500 кВ – расщепление на 4 провода	5000	6600
750 кВ – расщепление на 4 провода	7700	10400
750 кВ – расщепление на 6 проводов	15000	19000

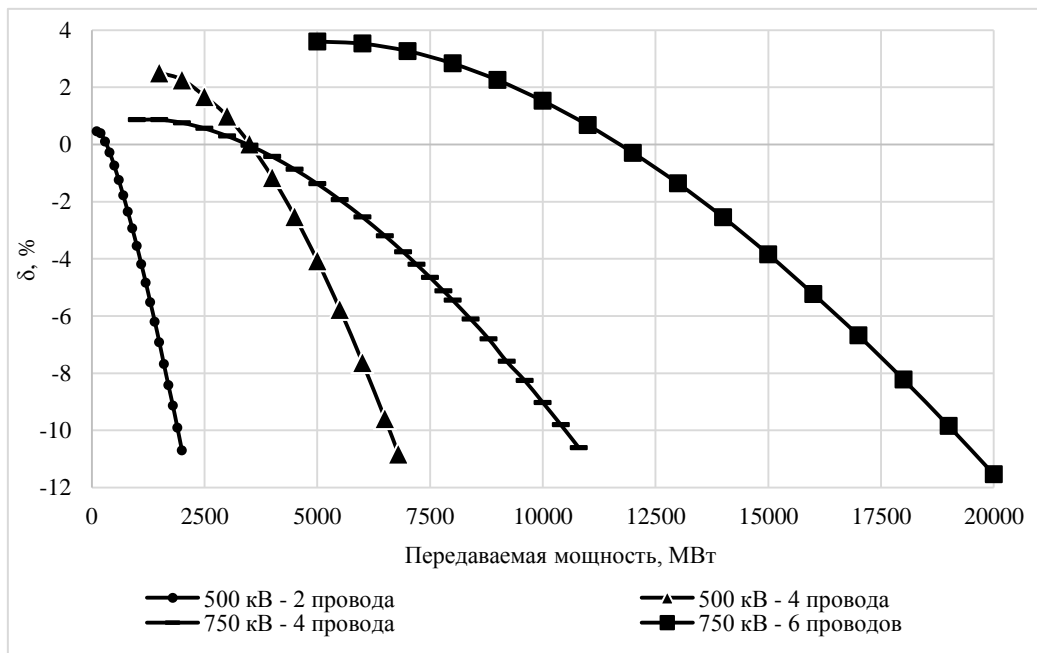


Рис. 4. График зависимости отклонения напряжения от передаваемой мощности

На рис. 4 представлена зависимость установившегося отклонения напряжения от передаваемой активной мощности для четырех рассматриваемых конфигураций фазы ВЛ. При начальных значениях передаваемой мощности наблюдается положительное отклонение напряжения. Это объясняется тем, что данные режимы характеризуются явлением перекомпенсации: продольное емкостное сопротивление незначительно превышает индуктивное. При постепенном росте нагрузки, а именно ее индуктивной составляющей, в линии достигается состоя-

ние полной самокомпенсации, в котором отклонение напряжения становится равным нулю. При дальнейшем увеличении нагрузки ВЛ отрицательное отклонение напряжения будет постепенно увеличиваться.

### **Выводы**

В работе построена математическая модель трехфазной разомкнутой ВЛ для расчета режимов нагрузки, учитывающая взаимное влияние фаз. При использовании трехфазной модели для определения длины общего участка, при которой наблюдается явление полной самокомпенсации, полученные результаты показывают необходимую длину до 8 % большую, чем при расчетах с использованием однолинейных моделей. Это объясняется появлением взаимной индуктивности между проводниками разных фаз.

Проведен расчет зависимости величины установившегося отклонения напряжения в конце линии от передаваемой мощности для четырех конфигураций трехфазной разомкнутой ВЛ. Величина предела передаваемой мощности может достигать 6600 МВт для разомкнутых ВЛ напряжением 500 кВ и 19000 МВт – для ВЛ напряжением 750 кВ, что является достаточным для использования разомкнутых ВЛ в качестве мощных межсистемных связей.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Готман В.И., Глазачев А.В., Бацева Н.В.* Продольная компенсация дальних электропередач с промежуточными системами // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 68-75.
2. *Вульф А.А.* Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. – М.: Госэнергоиздат, 1945. – 83 с.
3. *Ракушев Н.Ф.* Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 160 с.
4. Пат. 130458 РФ, МПК8 Н 02 J 3/20. Разомкнутая трехфазная воздушная линия электропередачи переменного тока / *В.Г. Гольдштейн, Е.М. Шишков*; Самарский государственный технический университет. № 2013103649/07; заявл. 28.01.2013; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.
5. *Шишков Е.М., Гольдштейн В.Г., Кривихин И.Н.* Математическая модель самокомпенсированной воздушной линии электропередачи // Сборник докладов VI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Иваново, 2015. – С. 620-623.
6. *Shishkov E., Goldstein V., Krivihin I.* Open Overhead Transmission Lines, Applied Mechanics and Materials, Vol. 792, pp. 293-299, 2015.
7. *Проничев А.В., Кривихин И.Н., Шишков Е.М., Гольдштейн В.Г.* Определение оптимальной конфигурации расщепленной фазы для самокомпенсированных разомкнутых линий электропередачи // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19–23 сентября 2016, Казань. – В 3 т. Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 198-201.

*Статья поступила в редакцию 2 февраля 2017 г.*

## ESTIMATING THE TRANSMISSION CAPACITY OF THE OPEN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE

*E.M. Shishkov, A.V. Pronichev, E.O. Soldusova*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*For the purpose of organizing longitudinal compensation for long-distance overhead power transmission lines, the authors proposed in previous works the method of using own distributed capacitance – the construction of the open power transmission line with a split phase, the components of which are electrically isolated from each other in such a way that a part of the components is connected only to the power supply buses, but part is only to the consumer's tires. In the present paper, the limit of the transmission capacity of open overhead lines for different load values is estimated. Mathematical modeling methods used in the MATLAB / Simulink environment using the SimScape SimPowerSystems element library to analyze the efficiency of using open power transmission lines. The initial data for the analysis were geometric configurations of overhead-lines supports and parameters of steel-aluminum wires. The mathematical model is developed for the analysis of load conditions and idling of the open line. The lengths of a three-phase open power transmission line are determined, under which the phenomenon of complete self-compensation is observed. The calculation of the transmission capacity values corresponding to different permanent voltage deviations is performed.*

**Keywords:** *electrical transmission line, longitudinal compensation, self-compensated line.*