

УДК 621.311.21

## СПОСОБ ПРИНЯТИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РАЗВИТИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Б. М. Гайсин

GB9688@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 17.06.2017

**Аннотация.** В описываемой работе сформирована обобщенная модель объединенной электроэнергетической системы (ЭС), в которой произведен расчет нормальных и аварийных режимов, определены возможные пути возникновения и развития аварийных каскадных процессов. На основе проведенных расчетов предложен инструмент повышения живучести и снижения риска возможности возникновения и развития каскадных процессов в ЭС. Данный инструмент позволяет принимать обоснованные технико-экономические решения на стадии проектирования и развития ЭС. По результатам исследования выполнено технико-экономическое сравнение вариантов развития ЭС, связанных с повышением живучести, в т.ч. с целью применения устройств, относящихся к активно адаптивным элементам ЭС, строительством новой линии электропередач, а также вариант, рассматривающий перераспределение потоков мощности при включении и отключении объектов генерации электроэнергии.

**Ключевые слова:** живучесть энергосистем; каскадный процесс; каскадные аварии; активно адаптивные элементы энергосистем; гибкие электропередачи переменного тока; FACTS.

### ВВЕДЕНИЕ

Важной целью управления характеристиками электроэнергетических систем (ЭС), является обеспечение требуемого уровня надежности и живучести, необходимого для бесперебойного электроснабжения потребителей. Надежность сегодня определяется сохранением устойчивости [1], балансовыми критериями ( $P_{\max} \leq P_{\text{допуст}}$ ) или прямыми критериями ( $U_{\min} \geq U_{\text{критич}}$ ), удобными с точки зрения практического применения ввиду простоты расчета и применения, в том числе при ведении режимов работы ЭС.

В системах России применение балансовых методов привело к избыточным требованиям при формировании надежных режимов в распределительных сетях 110–220 кВ, в то же время не обеспечивая достаточных мер для сохранения живучести – предотвращения каскадных процессов [2]. Это подтверждается происходящими периодически каскадными

авариями. Последняя крупная авария такого типа с погашением потребителей с суммарной нагрузкой 6800 МВт в России была в ЭС Сибири 22 июля 2016 г. Аварии такого типа происходят и в других странах мира, в разветвленных неоднородных сетях различного уровня напряжения.

Для повышения живучести и предотвращения возможности возникновения и развития каскадных процессов в рыночных условиях возрастают требования к максимальному использованию пропускной способности электрических сетей с целью повышения надежности функционирования ЭС России, что может обеспечиваться с помощью управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока (FACTS) [3].

Методические подходы по обоснованию эффективности применения управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока в условиях рыночных отношений

учитывают особенности использования гибких систем электропередач, к которым могут быть отнесены [3]:

- повышение пропускной способности электрических сетей высшего напряжения;
- перераспределение потоков мощности в основной сети в зависимости от спроса и его покрытия по узлам;
- повышение экономичности работы энергосистем за счет снижения потерь электроэнергии в сетях;
- ограничение токов КЗ, основанное на применении технологии *FACTS*;
- в определенных случаях устройства *FACTS* являются альтернативой сооружению дополнительных линий электропередач при выполнении заданных требований по надежности, например требования по критерию  $n-1$ .

#### ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА НАПРАВЛЕННОГО НА ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В соответствии с вышеизложенными особенностями возникает вопрос эффективности принимаемых технико-экономических решений при определении мест установки устройств *FACTS*.

В работе [2] предложен метод определения путей развития каскадных процессов в ЭС в соответствии с областями существующих режимов и вариантами развития переходов между ними. Согласно данному методу каскадный процесс рассматривается как процесс, в котором отключение одного элемента безусловно влечет за собой отключение следующего элемента. Тогда в этой модели каскадный процесс начинается задолго до лавинного процесса и продолжается до тех пор, пока отключение каждого следующего элемента приводит к отключению последующего. Если последующего отключения не происходит, то каскадный процесс прекращается. Каскадный процесс не обязательно заканчивается аварией с потерей устойчивости, в том числе по устойчивости по напряжению [2].

В модели [2] принято, что токовая загрузка элемента энергосистемы выше допустимой приводит к его разрушению (отключению). Тогда необходимым условием существования каскадного процесса является неравенство:

$$I_{ji} + \Delta I_{ji} > I_{допji}, \quad (1)$$

которое должно выполняться на каждом следующем шаге аварийного отключения. Здесь  $\Delta I_{ji}$  – наброс тока на перегружаемый элемент,  $I_{допji}$  – допустимое значение тока для этого элемента.

Невыполнение неравенства (1) приводит к останову аварийного каскадного процесса.

Для предотвращения возможности возникновения и развития каскадных процессов в ЭС авторами в соответствии с методом [2] произведен расчет и технико-экономическое сравнение следующих вариантов повышения живучести ЭС:

- повышение пропускной способности за счет: применения устройств *FACTS*, строительства дополнительной линии электропередач (ЛЭП);
- перераспределение потоков мощности в сети за счет ввода в работу источников дополнительной генерации.

Для расчета нормальных и предельных по статической устойчивости режимов при условии возникновения каскадного процесса авторами была создана схема объединенной энергосистемы (ОЭС) с номинальным напряжением 515 кВ (рис. 1), состоящей из 36 узлов, в которую входят ЭС «А» (левая половина узлов) и ЭС «Б» (правая половина узлов), связанные шестью межсистемными ЛЭП (3-4, 8-9, 13-14, 18-19, 23-24, 33-34).

Суммарная генерируемая мощность в ЭС «А» составляет 3668 МВт, в ЭС «Б» – 1080 МВт. Суммарная потребляемая мощность в ЭС «А» составляет 800 МВт, в ЭС «Б» – 3948 МВт. В данном случае ЭС Б является дефицитной по вырабатываемой мощности, вследствие чего по межсистемным линиям происходит передача электроэнергии в объеме 2868 МВт.

Расчет установившихся режимов ЭС произведен в программном комплексе «RastrWIN». В ходе расчета рассматривались ремонтные и ремонтно-аварийные режимы ОЭС. В качестве примера расчета рассмотрим наложение ремонтного (ветвь 3-4) и аварийного (ветвь 8-9) режимов ЭС, при которых происходит возникновение и развитие каскадного процесса с последующим делением ОЭС и потерей устойчивости по напряжению.

Основные процессы – это в первую очередь процессы изготовления продукции основного производства согласно технологической документации (механообработка, сборка и т.д.). Также к множеству основных процессов можно отнести процессы, связанные с операциями контроля изготавливаемой продукции основного производства, процессы проведения приемо-сдаточных и иных испытаний продукции, процессы упаковки, маркировки и хранения произведенной продукции, складские операции для продукции основного производства (рис. 3).

В итоге формируется каскадный аварийный процесс, развивающийся по траектории с окончанием в области недопустимых режимов: 1 шаг – 8-9; 2 шаг – 9-14, 13-14; 3 шаг – 10-15, 18-19, 33-34, 34-35.

Схематично процесс изменения токов в межсистемных ветвях в результате каскадного процесса представлен на рис. 2, где значение длительно допустимого тока  $I_p^{доп}$  для элемента ОЭС представлено гистограммами с наклонной штриховкой, вертикальная штриховка указывает значения тока при начальных условиях  $I_{н.у.}$  (до возникновения каскадного процесса), горизонтальная штриховка показывает значения тока в ветвях  $I_{тек} + \Delta I$  после перехода ОЭС в аварийный режим.

Из рис. 2 видно, что аварийное отключение линии 8-9 при выведенной в ремонт линии 3-4 ведет к недопустимому перегрузу по току межсистемной линии 13-14, что приводит к возникновению и развитию каскадного процесса с последующей потерей устойчивости по напряжению.

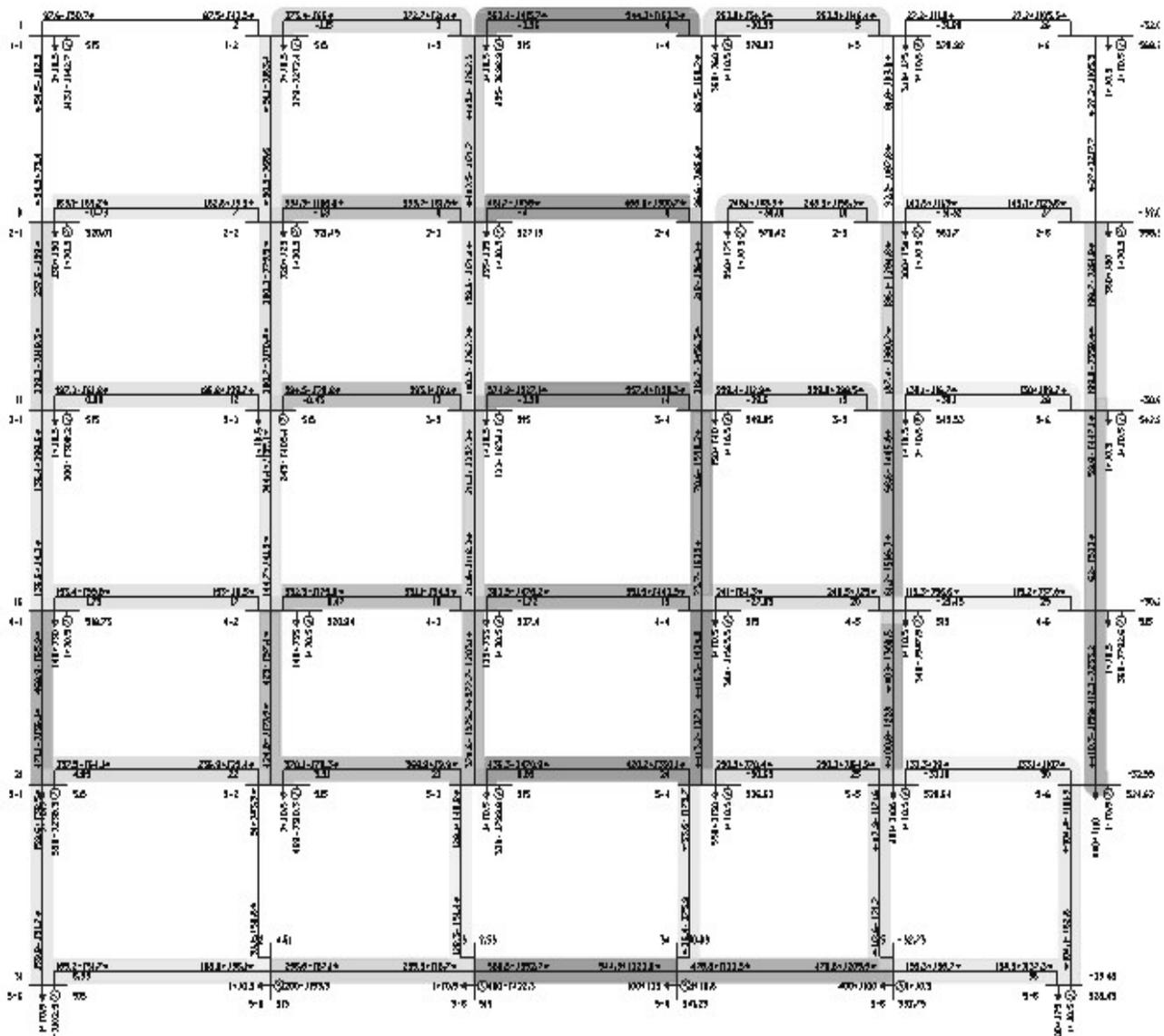


Рис. 1. Расчетная схема объединенной энергосистемы

Одним из вариантов решения задачи повышения живучести и предотвращения каскадного процесса в ОЭС является перераспределение потоков мощности в ОЭС за счет подключения дополнительных источников дорогой электроэнергии в ЭС «Б», загруженность которых в нормальном режиме минимальна, и соответствующего снижения генерации на максимально загруженных электростанциях с дешевой электроэнергией в ЭС «А».

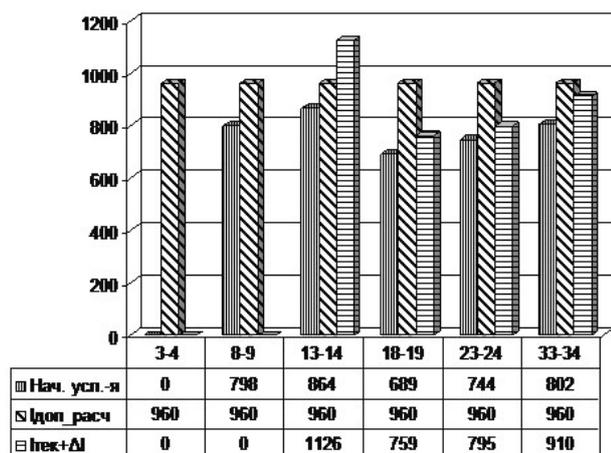


Рис. 2. Изменение токовой загрузки межсистемных ветвей после вывода в ремонт ветви 3-4 и КЗ на линии 8-9

В данном случае наличие электростанции с дорогой выработкой электроэнергии рассматривается в дефицитной ЭС «Б». Для предотвращения каскадного процесса на первом шаге производим снижение генерации дешевой электроэнергии в ЭС «А» и поднятие дорогой в ЭС «Б». В результате перераспределения потоков мощности, происходит снижение загруженности межсистемной линии 13-14 (1 шаг каскадного процесса) до допустимого значения по току (с 1126 А до 848 А).

Схематично значения токов в межсистемных ветвях при предотвращении 1 шага каскадного процесса, путем подъема дорогой генерации представлены на рис. 3.

Следующим шагом исследования является предотвращение каскадного процесса в рассматриваемой ОЭС за счет применения устройств, относящихся к активно адаптивным элементам сети *FACTS*, позволяющих повысить пропускную способность линии. В качестве устройств *FACTS* рассматрива-

ются: статический тиристорный компенсатор (СТК), статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ), управляемое устройство продольной компенсации (УУПК) и объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ). В данном случае наличие электростанции с дорогой выработкой электроэнергии рассматривается в дефицитной ЭС «Б». Для предотвращения каскадного процесса на первом шаге производим снижение генерации дешевой электроэнергии в ЭС «А» и поднятие дорогой в ЭС «Б». В результате перераспределения потоков мощности происходит снижение загруженности межсистемной линии 13-14 (1 шаг каскадного процесса) до допустимого значения по току (с 1126 А до 848 А).

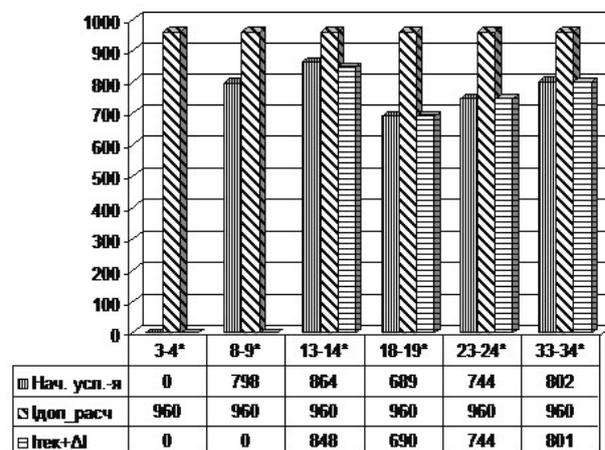


Рис. 3. Значения токов перегруженных ветвей до и после подъема дорогой генерации для сценария ремонтно-аварийного режима

Расчет применения средств *FACTS* производится в соответствии с [3–4]. В исследовании рассматривается повышение пропускной способности межсистемной линии 500 кВ в два раза, для этого необходимо скомпенсировать половину ее реактивного сопротивления, вследствие чего ток и мощности линии удвоятся.

Рассчитаем номинальную мощность устройств *FACTS* для рассматриваемого варианта каскадного процесса [3–4], где после триггерного возмущения (КЗ на ЛЭП 8-9) происходит перегруз и отключение линий 9-14 и 13-14. Для разгрузки этих линий установим средства *FACTS* на линию 13-14, которая является межсистемной и имеет индуктивное сопротивление, равное  $x_{13-14} = 112,8$  Ом.

Приведем данное значение к относительным единицам. Примем базисные условия. Базисная мощность  $S_{\delta} = 100$  МВА, базисное напряжение  $U_{\delta} = 500$  кВ, тогда базисный ток определим как:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 500} = 0,12 \text{ кА} = 120 \text{ А.} \quad (2)$$

Далее найдем индуктивное сопротивление линии 3-4 в относительных единицах при базисных условиях:

$$\begin{aligned} x_{*13-14(\delta)} &= x_{13-14} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = \\ &= 1128 \cdot \frac{100}{500^2} = 0,045. \end{aligned}$$

Найдем значение напряжения устройства FACTS в относительных единицах при токе, равном номинальному  $I_H$  (длительно допустимому):

$$\begin{aligned} I_{*(\delta)} &= \frac{I_H}{I_{\delta}} = \frac{960}{120} = 8; \\ U_{*AAC(\delta)} &= \frac{x_{*13-14(\delta)}}{2} \cdot 2I_{*(\delta)} = \frac{0,45}{2} \cdot 2 \cdot 8,3 = 0,36. \end{aligned}$$

Напряжение устройства FACTS в именованных единицах:

$$U_{FACTS} = U_{*FACTS(\delta)} \cdot U_{\delta} = 0,36 \cdot 500 = 180 \text{ кВ.}$$

Мощность средства FACTS:

$$\begin{aligned} S_{FACTS} &= 3 \cdot (2I_H) \cdot U_{FACTS} = \\ &= 3 \cdot (2 \cdot 960 \cdot 10^{-3}) \cdot 180 = 1036,8 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Далее рассчитаем стоимость подъема дорогой генерации при предотвращении каскадного процесса на первом шаге (КЗ на ветви 8-9).

При расчетах стоимости подъема дорогой генерации используем следующие данные [5]:

- дешевой считается электроэнергия произведенная из расчета 310 г у.т. на 1 кВт·ч, принимаем ее стоимость 3,9 руб. за 1 кВт·ч;

- дорогой считается электроэнергия произведенная из расчета 650 г у.т.

на 1 кВт·ч, принимаем ее стоимость за 5 руб. за 1 кВт·ч.

Определим стоимость дорогой электроэнергии на начальном этапе до предотвращения каскадного процесса:

$$\sum C_{\text{шаг1}} = \sum P_{\text{дор}} \cdot C_{\text{дор}} = 4748 \cdot 3,9 = 18517,2 \text{ тыс. руб.}$$

Определим стоимость дорогой электроэнергии на начальном этапе до предотвращения каскадного процесса:

Суммарные затраты для предотвращения каскадного процесса определяем по формуле:

$$\begin{aligned} \sum C_{\text{шаг1}^*} &= \sum P'_{\text{дор}} \cdot C_{\text{дор}} + \sum P_{\text{деш}} \cdot C_{\text{деш}} = \\ &= (4748 - 617) \cdot 3,9 + 617 \cdot 5 = \\ &= 161109 + 3085 = 191959 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Сумма, которую переплачивает потребитель за подъем дорогой генерации:

$$\Delta \sum C_{\text{шаг1}} = \sum C_{\text{шаг1}^*} - \sum C_{\text{шаг1}} = 0,6787 \text{ млн руб.}$$

Стоимость применения устройств FACTS рассчитывается исходя из курса по состоянию на март 2017 г. 1 долл. = 60 руб. в зависимости от номинальной мощности устройства.

Для СТК стоимость составляет 30 долл./кВА, что соответствует 1800 руб./кВА.

Тогда стоимость одного комплекта СТК на напряжение 500 кВ при номинальной мощности  $S_H = 1036,8$  МВА составляет:

$$\begin{aligned} C_{\text{СТК}} &= C_{\text{уд.СТК}} \cdot S_H = \\ &= 1,8 \cdot 20381 = 366858 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Аналогично проводим расчет для СТАТКОМ, УУПК, ОРПМ, используя удельную стоимость (табл. 1) [4].

Таблица 1

Ориентировочная удельная стоимость устройств FACTS

Устройство	СТК, \$	СТАТКОМ, \$	УУПК, \$	ОРПМ, \$
Цена за 1кВА	30	45	47	120

Рассчитаем стоимость традиционного решения – строительства новой дополнительной воздушной линии 500 кВ.

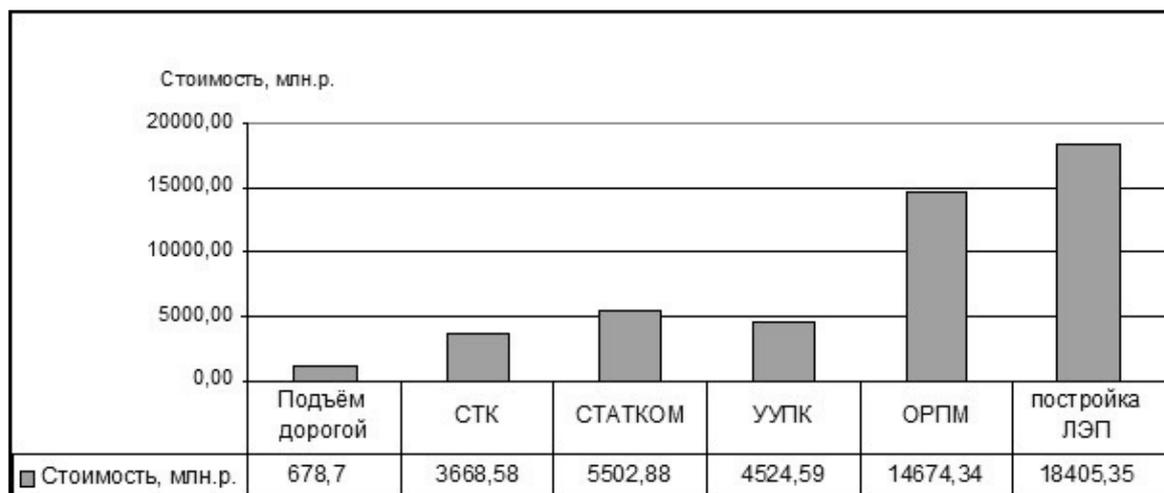


Рис. 4. Сравнение затрат по предотвращению первого шага каскадного процесса

Согласно [6] объем финансовых потребностей на строительство (реконструкцию) воздушной линии (ВЛ) 500 кВ определяется на основе параметров инвестиционного проекта, района строительства и включает в себя: укрупненные нормативы цены (УНЦ), затраты на демонтаж, затраты на проектно-изыскательские работы (ПИР). При этом не учитываются затраты на демонтаж, т.к. это новая ВЛ.

Для региона Республика Башкортостан при использовании провода на напряжение 500 кВ, сечением 500 мм<sup>2</sup> (количество проводов в фазе – 3) стоимость капитального строительства 1 км линии составляет 20,023 млн руб. Тогда УНЦ аналога межсистемной линии 8-9 (800 км), являющейся триггерным элементом в каскадном процессе, составит:

$$C_{\text{КП}} = C_{\text{УНЦ}} \cdot l_{8-9} = \\ = 20023 \cdot 800 = 16018,400 \text{ млн руб.}$$

Рассчитаем затраты на ПИР для линии 500 кВ с помощью метода линейной интерполяции, при протяженности линии длиной 800 км –  $C_{\text{ПИР}, 800\text{км}} = 340$  млн руб.

Тогда для строительства новой ВЛ потребуются затраты, равные:

$$C_{\text{ВЛ}, 800\text{км}} = C_{\text{КП}, 800\text{км}} + C_{\text{ПИР}, 800\text{км}} = \\ = 16018,4 + 340 = 16358,4 \text{ млн руб.}$$

Далее, используя разницу затрат, определим суммарные затраты за год при вводе в работу «дорогих» электростанций и срав-

ним их с затратами на приобретение устройств *FACTS*, а также с затратами на сооружение новой линии электропередачи. Результаты сравнения показаны на рис. 4.

Рис. 4 показывает, что повышение живучести ЭС посредством традиционного решения в виде строительства новой ВЛ 500 кВ является наиболее дорогостоящим, тогда как наиболее экономичным является перераспределение потоков мощности за счет подключения дорогой (резервной) генерации за один расчетный год, при этом установка устройств *FACTS* в технико-экономическом плане также является более предпочтительным вариантом по сравнению с строительством новой ВЛ. Учитывая, что срок службы устройств *FACTS* составляет около 30 лет [3], применение таких устройств является наиболее рациональным решением для увеличения пропускной способности ЛЭП, особенно в ЭС с высокой плотностью электрических сетей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье предложен инструмент повышения живучести и снижения риска возможности возникновения и развития каскадных процессов в ЭС, позволяющий принимать обоснованные технико-экономические решения на стадии проектирования и развития ЭС, в т.ч. с целью применения устройств *FACTS*, а также для определения мест размещения объектов генерации электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СО 153-34.20.576-2003.** Методические указания по устойчивости энергосистем. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2003. 15 с. [ *Instructional guidelines for stability of power supply systems*, standard of organization SO 153-34.20.576-2003, М., Innovation Center «ENAS», 2003. ]

4. **Шахмаев И. З.** Каскадные процессы в электротехнических системах и методы их предотвращения: дис. канд. техн. наук Уфа, 2012. 142 с. [ I. Z. Shahmaev, *Cascade processes in electrical systems and methods for their prevention*, (in Russian). The thesis Ph.D. Ufa, 2012. ]

3. **СТО 56947007-29.240.019 - 2009.** Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России. М.: ОАО «НТЦ электроэнергетики», 2009. 35 с. [ *The technique for estimating technical-and-economic efficiency of applying FACTS in UNPG of Russia*, М. 2009. ]

4. **Шакарян Ю. Г.** Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока, ОАО ВНИИЭ. [ Shakaryan Yu. G. Controlled (flexible) AC transmission systems - flexible AC transmission system FACTS, ARSRIEPI. ]

5. **Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии:** сайт открытого акционерного общества [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atsenergo.ru> (дата обращения 19.05.2017). [ *Mercantile system manager* (2017, May 19). *databases* of JSC [Online]. Available: <http://www.atsenergo.ru> ]

6. **Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства:** Приказ Минэнерго России от 08.02.2016 N 75. (Зарегистрировано в Минюсте России 21.03.2016 N 41481), 2016. С. 28. [ Order of the Ministry of Energy of Russia from 08.02.2016 no 75. "On approval of consolidated standards for the price of typical technological solutions for the capital construction of power facilities in the electric grid facilities" (Registered in the Ministry of Justice of Russia on March 21, 2016 N 41481), 2016. ]

## ОБ АВТОРЕ

**ГАЙСИН Булат Маратович**, асс. каф. электромеханики. Дипл. инж. по электроэнергетич. сист. и сетям (УГАТУ 2010). Иссл. в обл. повышения живучести и предотвращения возможности возникновения и развития аварийных каскадных процессов в электроэнергетических системах и сетях.

## METADATA

**Title:** Method of taking effective decisions to increase survivability in design and development of power systems.

**Author:** B. M. Gaisin

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** gb9688@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 3 (77), pp. 47-53, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** This article discusses issues of ensuring the power systems stability. The way to increase the liveness of the power system is described.. Particular attention is paid to flexible alternating current transmission system (FACTS) application.

**Key words:** survivability of power systems; cascade process; cascade accidents; actively adaptive elements of power systems; flexible AC power transmission; FACTS.

**About authors:**

**GAISIN, Bulat Maratovich**, assistant of electromechanics department. Dipl. Ing. by elektroenergetich. syst. and grids (USATU, 2010). Research in the field of increasing survivability and preventing the occurrence and development of cascading emergency processes in electric power systems and networks.