

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОЙ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ТРЕХФАЗНЫХ ФАЗОИНВЕРТИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

МАКАРОВ А.В., канд. тех. наук., ТАЛАМАНОВ О.В., МАКАРОВ Н.А., аспиранты

Представлены результаты разработки математической модели управляемой межсистемной связи на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов для исследований в установившихся и переходных режимах.

*Ключевые слова:* трехфазные фотоинвертирующие трансформаторы, математическая модель, режим работы.

## THE MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED INTERSYSTEM CONNECTION ON THE BASIS OF THREE PHASE PHASE-INVERTING TRANSFORMERS

MAKAROV A.V., Ph.D., TALAMANOV O.V., MAKAROV N.A., postgraduate

The article contains the results of developed mathematical model controlled by intersystem connection on the basis of three phase phase-inverting transformers for research in steady and transition mode.

*Key words:* three phase photo-inverting transformers, mathematical model, operating mode.

**Введение.** Реструктуризация РАО «ЕЭС России», создание рынка электрической энергии наряду с известными преимуществами создает и обостряет проблемы, связанные с повышением эффективности использования существующих межсистемных связей и обеспечением их статической и динамической устойчивости [1, 2]:

1. Недостаточная пропускная способность межсистемных линий электропередачи ограничивает возможность параллельной работы ЕЭС России с отдельными энергосистемами (ОЭС Сибири, ОЭС Северного Кавказа, ОЭС Востока и др.), создает проблему «запертых» мощностей ряда электростанций (Печорской ГРЭС, Кольской АЭС и др.).

2. Неоптимальное распределение потоков мощности по параллельным линиям электропередачи различного класса напряжения вызывает рост потерь в сетях, а также ведет к недоиспользованию существующего оборудования электрических сетей.

3. Слабая управляемость электрических сетей и недостаточный объем устройств регулирования напряжения и реактивной мощности снижает надежность работы ЕЭС.

Одним из путей повышения эффективности работы межсистемных связей особенно в условиях либерализации рынка электрической энергии является использование управляемых межсистемных связей (УМС) – это связи, режим которых может быть задан вне зависимости от режимов работы любых других элементов управляемых электрических систем и управляется автоматически или по заданному закону. Применение их позволяет осуществлять независимое ведение режимов по частоте и напряжению в объединенных энергосистемах, локализацию возмущений в пределах одной части энергосистемы, «развязку» объединяемых энергосистем по токам короткого замыкания и, соответственно, сохранение на существующем уровне их величины. Указанные свойства приобретают особую ценность при решении задач повышения эффективности межсистемных связей. УМС наиболее полно удовлетворяют условиям межгосударственного и межрегионального обмена электроэнергией, в том числе, и при различии стандартов ее качества.

Наиболее проработанным вариантом УМС являются передачи и вставки постоянного тока (ППТ и ВПТ). ППТ и ВПТ удовлетворяют всем требованиям,

предъявляемым к УМС, однако сложность схем и высокая их стоимость, менее высокая надежность высоковольтных силовых полупроводниковых установок по сравнению с основным оборудованием энергосистем ограничивают их широкое применение [3, 4]. Альтернативные варианты построения УМС можно разделить на три группы: электромашинные устройства, устройства на основе высоковольтных полупроводниковых элементов и устройства на основе ферромагнитных управляемых элементов.

В связываемых электрических системах потоки мощности подчиняются закону Кирхгофа. Активная и реактивная мощности, передаваемые по линии между двумя энергосистемами, могут быть приближенно определены по выражениям:

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \delta_{12}; \quad Q_{12} = \frac{1}{X_{12}} (U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta_{12}), \quad (1)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  – модули напряжений соответственно первой и второй энергосистем;  $X_{12}$  – реактивное сопротивление линии;  $\delta$  – угол между векторами напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

Управляя величиной  $X_{12}$  или (и)  $\delta$ , можно изменять величину и направление потоков активной и реактивной мощностей. На этом основывается принцип действия устройств УМС.

Электромашинные устройства УМС состоят из специальных машин переменного тока (по типу асинхронных машин с фазным ротором) и преобразователя частоты в роторной цепи [5]. Данные устройства выгодно отличаются от передач и вставок постоянного тока низким содержанием высших гармоник в токе и напряжении, возможностью их одновременного использования в качестве источника реактивной мощности. Однако достаточно высокая стоимость оборудования, сложность обслуживания, низкая маневренность, ограниченный диапазон скольжения по частоте связываемых систем (не более 0.5 Гц) и проблемы, связанные с построением агрегатов большой мощности, ограничивают область применения установок данного типа.

В последнее время широко исследуются и массированно рекламируются, но пока ограниченно внедряются устройства «гибких передач переменного тока» на основе высоковольтных полупроводниковых элементов, известные в западной литературе как устройства FACTS (Flexible alternative current transmission) [6–9].

Комплексное применение устройств данного типа позволяет значительно повысить эффективность использования межсистемных связей. Главным их достоинством является высокая маневренность. Основным недостатком устройств FACTS, так же, как и передач и вставок постоянного тока, является использование полупроводниковых элементов на стороне высокого напряжения. Это приводит к снижению общей надежности и существенному повышению стоимости устройства. Следует отметить, что предложения по внедрению этих устройств исходят, как правило, от разработчиков систем на основе силовой электроники, а не от специалистов по передаче электроэнергии, поскольку электроэнергетика является гигантским по емкости рынком для корпораций, производящих силовую полупроводниковую технику.

Перспективными в качестве УМС представляются устройства на основе ферромагнитных управляемых элементов (ФУЭ МС). История их разработки и создания имеет более чем пятидесятилетнюю историю. Трудности создания быстродействующих систем управления, сложность реализации алгоритмов управления током подмагничивания этих устройств препятствовали созданию установок УМС данной группы. Возможности современной цифровой и преобразовательной техники позволяют эффективно решить указанные проблемы. Основными достоинствами устройств этой группы является простота, надежность, низкая стоимость, высокая маневренность. Главным преимуществом ФУЭ МС перед FACTS-установок является использование силовой электроники в цепях управления, а не на стороне высокого напряжения. Наиболее привлекательным техническим решением среди устройств ФУЭ МС являются устройства на основе фазоинвертирующих трансформаторов (ФИТ МС) [10–13]. С помощью устройств данного типа имеется возможность осуществлять не только управляемый направленный обмен мощностью между связываемыми энергосистемами, но и «развязку» по токам короткого замыкания. Исследования, проведенные методами математического моделирования на физических моделях и опытных образцах, позволяют сделать вывод о возможности создания простой и надежной, с достаточно высокими технико-экономическими показателями [14–16] УМС. Результатом исследований и конструкторских разработок, проведенных в 1985–1995 годах, стало создание опытно-промышленной установки УМС на основе фазоинвертирующих трансформаторов, смонтированной на Волховской ГЭС (ОАО «Ленэнерго») [17]. Примененные конструкторские решения были ориентированы на создание опытного полигона для исследования установок УМС на основе ферромагнитных управляемых элементов, поэтому в качестве универсального базового модуля использовался однофазный трехмоточный трансформатор. Это позволило исследовать различные варианты и схемные решения устройств УМС при минимальных материальных и временных затратах в условиях реальной электроэнергетической системы. При создании промышленных установок ФИТ МС данная модульная реализация, очевидно, и экономически и технологически неэффективна. Целесообразным представляется использование установок ФИТ МС на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов. При использовании трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов (ФИТ) улучшаются энергетические характеристики

установки, уменьшается суммарная масса магнитопроводов, снижается мощность источников подмагничивания и, соответственно, улучшаются технико-экономические показатели.

Создание и проектирование промышленного образца установки ФИТ МС на основе трехфазных ФИТ требует решения целого комплекса взаимосвязанных задач, первоочередными из них являются выбор оптимальной конструкции и синтез, а также аппаратная реализация системы управления. Решение этих задач невозможно без полной математической модели всей установки, позволяющей получить статические и динамические характеристики объекта, а также проводить математические эксперименты по исследованию функционирования установки в различных режимах.

**Объект моделирования.** В качестве объекта моделирования выбрана установка УМС на основе трехфазных ФИТ. Устройство состоит из четырех трехфазных ФИТ, двух источников напряжения подмагничивания (управляемых выпрямителей) и системы управления. К каждой фазе подключены четыре обмотки, установленные на каждом из четырех трансформаторов. Обмотки первой связываемой энергосистемы соединены между собой последовательно-согласно. Обмотки второй связываемой энергосистемы соединены парно-согласно, а пары объединяются между собой последовательно-встречно. К первому источнику напряжения подмагничивания подключаются обмотки подмагничивания первого и второго ФИТ, ко второму источнику подмагничивания подключаются обмотки подмагничивания третьего и четвертого ФИТ. Магнитопровод ФИТ включает в себя три стержня, на которых располагаются первичные и вторичные обмотки фаз связываемых энергосистем, и два боковых стержня, на которых располагаются обмотки подмагничивания.

**Основные допущения и математическое описание объекта.** При математическом описании данной установки приняты следующие допущения:

- объединяемые энергосистемы заданы синусоидальными источниками ЭДС с постоянным внутренним сопротивлением;
- индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов приняты линейными;
- не учитываются потери в стали магнитопроводов на гистерезис и вихревые токи;
- не учитываются магнитные потоки в верхнем и нижнем ярмах трансформатора;

При описании магнитной цепи приняты следующие обозначения:  $s, s_0, l, l_0$  – сечение и средняя длина фазных стержней и стержней с обмоткой подмагничивания магнитопровода соответственно;  $w_1, w_2, w_0$  – число витков первичной и вторичной обмоток и обмотки подмагничивания. Схемы замещения электрической цепи установки ФИТ МС и магнитной цепи трехфазного ФИТ приведены на рис. 1 и 2. Основная кривая намагничивания  $B(H)$  задается с использованием кусочно-линейной аппроксимации:

$$H = a \cdot B + b,$$

$$a = \begin{cases} a_1 & \text{при } B \leq B_n, \\ a_2 & \text{при } B > B_n, \end{cases} \quad b = \begin{cases} b_1 & \text{при } B \leq B_n, \\ b_2 & \text{при } B > B_n, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a, b$  – коэффициенты аппроксимации;  $B_n$  – индуктивность насыщения ФИТ.

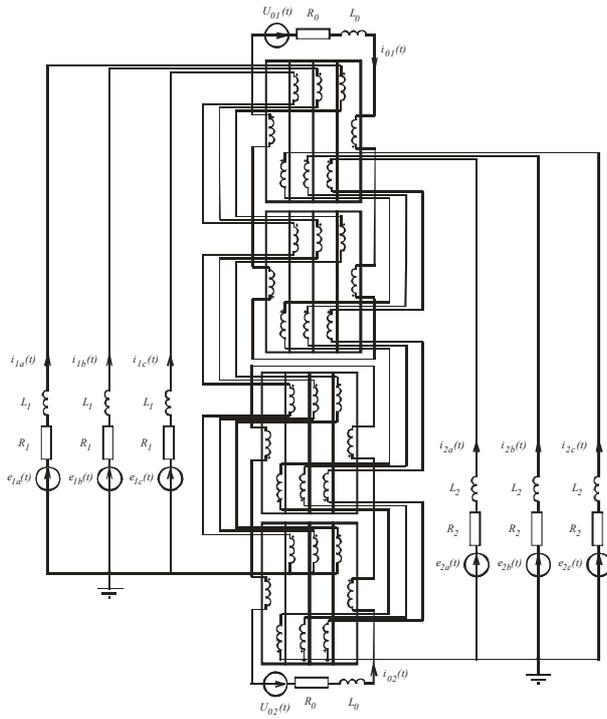


Рис. 1. Схема замещения электрической цепи установки ФИТ МС

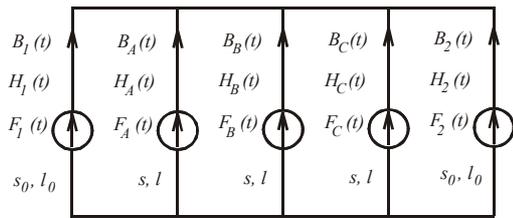


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи трехфазного ФИТ

Для электрической и магнитной схем замещения составляются системы уравнений по законам Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 w_1 s \frac{dB_{1a}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{2a}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{3a}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{4a}}{dt} + L_1 \frac{di_{1a}}{dt} &= E_{1a} - r_1 i_{1a}; \\
 w_1 s \frac{dB_{1b}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{2b}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{3b}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{4b}}{dt} + L_1 \frac{di_{1b}}{dt} &= E_{1b} - r_1 i_{1b}; \\
 w_1 s \frac{dB_{1c}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{2c}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{3c}}{dt} + w_1 s \frac{dB_{4c}}{dt} + L_1 \frac{di_{1c}}{dt} &= E_{1c} - r_1 i_{1c}; \\
 w_2 s \frac{dB_{1a}}{dt} + w_2 s \frac{dB_{2a}}{dt} - w_2 s \frac{dB_{3a}}{dt} - w_2 s \frac{dB_{4a}}{dt} + L_2 \frac{di_{2a}}{dt} &= E_{2a} - r_2 i_{2a}; \\
 w_2 s \frac{dB_{1b}}{dt} + w_2 s \frac{dB_{2b}}{dt} - w_2 s \frac{dB_{3b}}{dt} - w_2 s \frac{dB_{4b}}{dt} + L_2 \frac{di_{2b}}{dt} &= E_{2b} - r_2 i_{2b}; \\
 w_2 s \frac{dB_{1c}}{dt} + w_2 s \frac{dB_{2c}}{dt} - w_2 s \frac{dB_{3c}}{dt} - w_2 s \frac{dB_{4c}}{dt} + L_2 \frac{di_{2c}}{dt} &= E_{2c} - r_2 i_{2c}; \\
 w_0 s \frac{dB_{11}}{dt} - w_0 s \frac{dB_{21}}{dt} - w_0 s \frac{dB_{22}}{dt} + w_0 s \frac{dB_{12}}{dt} + L_{01} \frac{di_{01}}{dt} &= U_{01} - r_{01} i_{01}; \\
 w_0 s_0 \frac{dB_{31}}{dt} - w_0 s_0 \frac{dB_{41}}{dt} - w_0 s_0 \frac{dB_{42}}{dt} + w_0 s_0 \frac{dB_{32}}{dt} + L_{02} \frac{di_{02}}{dt} &= U_{02} - r_{02} i_{02};
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 F_1 - F_a &= H_1 l_0 - H_a l; \\
 F_1 - F_b &= H_1 l_0 - H_b l; \\
 F_1 - F_c &= H_1 l_0 - H_c l; \\
 F_1 - F_2 &= H_1 l_0 - H_2 l_0; \\
 B_1 s_0 + B_2 s_0 + B_a s + B_b s + B_c s &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Выражая производные индукции через токи из (2) и (4) и подставляя полученные выражения в (3), после алгебраических преобразований и введения дополнительных обозначений была получена независимая система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в установке ФИТ МС на основе трехфазных ФИТ:

$$\begin{aligned}
 4w_1^2 s \frac{di_{1a}}{dt} (C_1 + D_1 + C_2 + D_2) + 4w_1 w_2 s \frac{di_{2a}}{dt} (C_1 + D_1 - C_2 - D_2) - \\
 - 2w_1^2 s \frac{di_{1b}}{dt} (D_1 + D_2) - 2w_1 w_2 s \frac{di_{2b}}{dt} (D_1 - D_2) - \\
 - 2w_1^2 s \frac{di_{1c}}{dt} (D_1 + D_2) - 2w_1 w_2 s \frac{di_{2c}}{dt} (D_1 - D_2) + L_1 \frac{di_{1a}}{dt} = E_{1a} - r_1 i_{1a}; \\
 - 2w_1^2 s \frac{di_{1a}}{dt} (D_1 + D_2) - 2w_1 w_2 s \frac{di_{2a}}{dt} (D_1 - D_2) + \\
 + 4w_1^2 s \frac{di_{1b}}{dt} (C_1 + D_1 + C_2 + D_2) + 4w_1 w_2 s \frac{di_{2b}}{dt} (C_1 + D_1 - C_2 - D_2) - \\
 - 2w_1^2 s \frac{di_{1c}}{dt} (D_1 + D_2) - 2w_1 w_2 s \frac{di_{2c}}{dt} (D_1 - D_2) + L_1 \frac{di_{1b}}{dt} = E_{1b} - r_1 i_{1b}; \\
 - 2w_1^2 s \frac{di_{1a}}{dt} (D_1 + D_2) - 2w_1 w_2 s \frac{di_{2a}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_1^2 s \frac{di_{1b}}{dt} (D_1 + D_2) - \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{2b}}{dt} (D_1 - D_2) + 4w_1^2 s \frac{di_{1c}}{dt} (C_1 + D_1 + C_2 + D_2) - \\
 - 4w_1 w_2 s \frac{di_{2c}}{dt} (C_1 + D_1 - C_2 - D_2) + L_1 \frac{di_{1c}}{dt} = E_{1c} - r_1 i_{1c}; \\
 4w_1 w_2 s \frac{di_{1a}}{dt} (C_1 + D_1 - C_2 - D_2) + 4w_2^2 s \frac{di_{2a}}{dt} (C_1 + D_1 + C_2 + D_2) - \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1b}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_2^2 s \frac{di_{2b}}{dt} (D_1 + D_2) - \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1c}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_2^2 s \frac{di_{2c}}{dt} (D_1 + D_2) + L_2 \frac{di_{2a}}{dt} = E_{2a} - r_2 i_{2a}; \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1a}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_2^2 s \frac{di_{2a}}{dt} (D_1 + D_2) + \\
 + 4w_1 w_2 s \frac{di_{1b}}{dt} (C_1 + D_1 - C_2 - D_2) + 4w_2^2 s \frac{di_{2b}}{dt} (C_1 + D_1 + C_2 + D_2) - \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1c}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_2^2 s \frac{di_{2c}}{dt} (D_1 + D_2) + L_2 \frac{di_{2b}}{dt} = E_{2b} - r_2 i_{2b}; \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1a}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_2^2 s \frac{di_{2a}}{dt} (D_1 + D_2) - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1b}}{dt} (D_1 - D_2) - \\
 - 2w_1 w_2 s \frac{di_{1c}}{dt} (D_1 - D_2) - 2w_2^2 s \frac{di_{2c}}{dt} (D_1 + D_2) + L_2 \frac{di_{2c}}{dt} = E_{2c} - r_2 i_{2c}; \\
 12w_0 s \frac{d(i_{01} w_0)}{dt} D_1 + L_{01} \frac{di_{01}}{dt} = U_{01} - r_{01} i_{01}; \\
 12w_0 s_0 \frac{d(i_{02} w_0)}{dt} D_2 + L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = U_{02} - r_{02} i_{02};
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{s_0 l}{\alpha_1 l_0 (2s_0 l + 3s l_0)}; & C_2 &= \frac{s_0 l}{\alpha_3 l_0 (2s_0 l + 3s l_0)}; \\
 D_1 &= \frac{s l_0}{\alpha_1 l_0 (2s_0 l + 3s l_0)}; & D_2 &= \frac{s l_0}{\alpha_3 l_0 (2s_0 l + 3s l_0)}.
 \end{aligned}$$

Аналитическое решение системы (5) затруднено, поэтому она решается числовыми методами в среде MathCAD с использованием метода Эйлера. На основе разработанной математической модели были получены угловые характеристики передаваемой активной и потребляемой реактивной мощности установки УМС на основе трехфазных ФИТ. Пример статических угловых характеристик передаваемой активной и потребляемой реактивной мощностей, полученных с использованием разработанной модели, приведен на рис. 3.

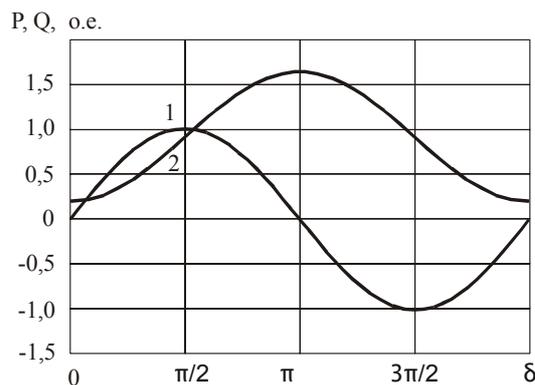


Рис. 3. Угловые статические характеристики ФИТ МС: 1 – угловая характеристика активной мощности; 2 – угловая характеристика реактивной мощности

Сравнение результатов математического моделирования и полученных на опытно-промышленном образце ФИТ МС подтверждает достоверность модели.

### Заключение

В результате проведенных экспериментов разработана математическая модель межсистемной связи на основе трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов, которая позволяет исследовать процессы в установившихся и переходных режимах и может быть использована для синтеза алгоритмов и структуры системы управления. Применение трехфазных фазоинвертирующих трансформаторов для создания межсистемной связи позволяет повысить надежность межсистемной связи и улучшить ее технико-экономические показатели.

### Список литературы

1. Реформирование компании РАО ЕЭС России. <http://www.rao-ees.ru/ru/reforming/reason/>
2. Макаров А.А. Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство. – М.: Атомэнергиздат, 1998.
3. Кощеев Л.А. Передачи постоянного тока. Нужны ли они России? // Электричество. – 1999. – № 3. – С. 30–36.

Макаров Аркадий Владиславович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
телефон (4932) 26-99-03,  
e-mail: makarov@dsn.ru

Таламанов Олег Викторович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
телефон (4932) 26-99-08,  
e-mail: zav@toe.ispu.ru

Макаров Никита Аркадьевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
телефон (4932) 26-99-08,  
e-mail: zav@toe.ispu.ru

4. Александров Г.Н. Передачи постоянного тока. Нужны ли они России? Дискуссии // Электричество. – 1999. – № 11. – С. 67–68.

5. Алексеев Б.А., Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Регулирование режимов работы электроэнергетических систем с помощью асинхронизированных машин // Электрические станции. – 1998. – № 12. – С. 45–53.

6. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System. – New York: Wiley-IEEE Press, 1999. – P. 452.

7. Gerbex S., Cherkaoui R., Germond A.J. Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms // IEEE Transactions on Power Systems. – Aug. 2001. – Vol. 16. – № 3. – P. 537–544.

8. Singh S.N., David A.K. A New Approach for Placement of FACTS Devices in Open Power Markets // IEEE Power Engineering Review. – Sep. 2001. – Vol. 21. – № 9. – P. 58–60.

9. Cai L. Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems. Dissertation. Universität Duisburg-Essen. – Berlin, 2004. – S. 172

10. А.с. 1340546 СССР. Устройство для объединения энергосистем / Г.М. Павлов, В.М. Баранов, С.Г. Зайцев, А.В. Макаров, С.А. Казаров, Ю.А. Лысов.

11. А.с. 1417749 СССР. Устройство для объединения энергосистем / Г.М. Павлов, В.М. Баранов, С.Г. Зайцев, А.В. Макаров, С.А. Казаров, Ю.А. Лысов.

12. А.с. 1669364 СССР. Устройство для объединения энергосистем / Г.М. Павлов, В.М. Баранов, С.Г. Зайцев, А.В. Макаров, С.А. Казаров, Ю.А. Лысов.

13. Патент на полезную модель РФ № 44891. Устройство для объединения трехфазных энергосистем на основе подмагничиваемых трансформаторов / А.В. Макаров, О.В. Таламанов.

14. Макаров А.В. Разработка и исследование системы управления межсистемной несинхронной связи на основе ферромагнитных элементов: Дис... канд. техн. наук. 05.14.02. – Л.: ЛПИ, 1985.

15. Баранов В.М. Исследование характеристик и разработка системы регулирования управляемой связи электрических систем на основе ферромагнитных элементов: Дис... канд. техн. наук. 05.14.02. – Л.: ЛПИ, 1987.

16. Макаров А.В. Математическая модель управляемой межсистемной связи на основе ферромагнитных управляемых элементов // Вестник ИГЭУ. – 2003. – № 3. – С. 62–69.

17. Макаров А.В. Экспериментальные исследования опытной установки управляемой межсистемной связи на основе фазоинвертирующих трансформаторов // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 1. – С. 72–81.