

УДК 621.316.925.2

## Схемы управления симметрирующими устройствами в сети внешнего электроснабжения железных дорог<sup>\*</sup>

Т.Г. КРАСИЛЬНИКОВА, Б.А. АНОХИН

Предложены общие принципы создания системы автоматического управления симметрирующими устройствами (СУ), характеристика режимов и условий работы СУ в сетях с быстро изменяющейся несимметричной нагрузкой (на примере сети внешнего электроснабжения 220 кВ БАМ). Приведена структурная схема микропроцессорной системы автоматического управления применительно к схемам управляемого СУ на базе тиристорно-реакторной группы, а также на базе управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием.

**Ключевые слова:** симметрирующее устройство, несимметрия напряжений, система автоматического управления, качество электроэнергии, тиристорно-реакторная группа, подмагничиваемый реактор, фазные координаты.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема несимметрии напряжений наиболее актуальна для сетей внешнего электроснабжения железных дорог (сети 220 кВ). Уровень несимметрии в таких сетях определяется величинами токов, потребляемых однофазными нелинейными тяговыми нагрузками. Эти токи, в свою очередь, зависят от следующих взаимосвязанных факторов [1]:

- интенсивности движения поездов, определяемых массами движущихся составов и межпоездными интервалами;
- уровней напряжения в тяговой сети, зависящих от интенсивности движения, коэффициентов трансформации тяговых трансформаторов, режимов работы устройств компенсации реактивной мощности;
- величин стационарных нагрузок.

Уровень несимметрии в таких сетях может значительно превышать допустимые значения, при этом коэффициенты несимметрии в узлах сети постоянно меняются при движении железнодорожных составов. Указанные особенности сети диктуют необходимость применения СУ с системой автоматического управления, которая будет корректировать параметры СУ в зависимости от режима.

Параметры СУ определяются величиной режимного сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от напряжений прямой и обратной последовательности в месте установки СУ и входного сопротивления сети по обратной последовательности относительно пункта размещения СУ [2].

$$Z_{\text{реж}} = \frac{\dot{U}_1}{U_2} Z_{\text{вх}22} . \quad (1)$$

Изменение модуля напряжения прямой последовательности определяется требованием к допустимой величине его отклонения и поэтому составляет не более 14,5 %. Как показал анализ, изменение фазы напряжения прямой последовательности также находится в пределах нескольких процентов. Таким образом, с точки зрения выбора параметров СУ изменение напряжения прямой последовательности на межпоездном интервале не является определяющим.

Совершенно иная картина имеет место для напряжения обратной последовательности. Модуль напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале меняется в де-

---

<sup>\*</sup> Статья получена 3 мая 2013 г.

сятки раз (рис. 1), а фаза напряжения обратной последовательности в средней части межпоездного интервала претерпевает изменения близкие к  $180^\circ$  по сравнению с начальной и конечной частью межпоездного интервала (рис. 2). Отсюда вытекает определяющее влияние изменений напряжения обратной последовательности на выбор параметров СУ.

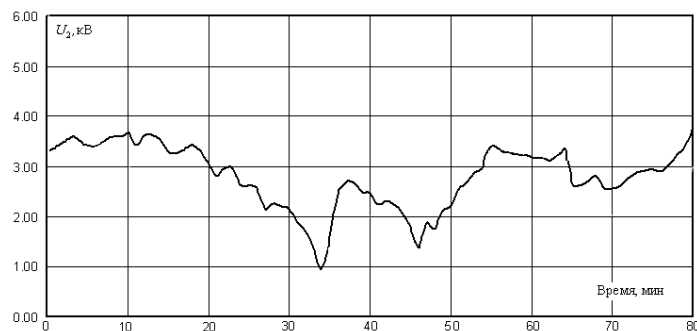


Рис. 1. Изменение модуля напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале для ПС Таксимо БАМ

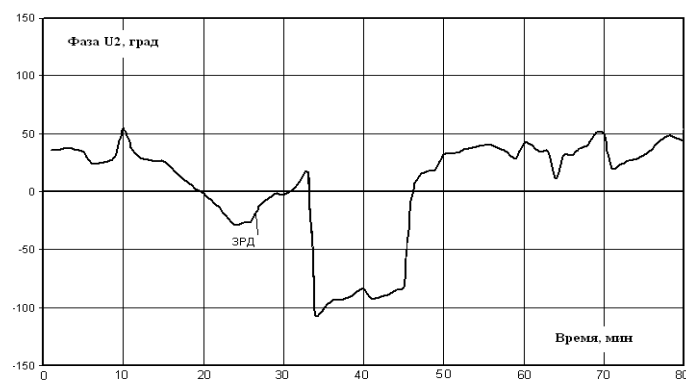


Рис. 2. Изменение фазы напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале для ПС БАМ

Анализ изменения входного сопротивления сети относительно места установки СУ показал слабую его зависимость от момента времени на межпоездном интервале. Так, например, различие входных сопротивлений в конечных точках и в средней части межпоездного интервала составляет порядка одного процента. Более заметное различие входных сопротивлений имеет место при рассмотрении режимов в различные характерные дни (летний рабочий день, зимний выходной день и летний выходной день).

Рассмотрение несимметрии по обратной последовательности на межпоездном интервале показывает, что заметным образом несимметрия меняется каждые одну-две минуты. Поэтому вполне достаточно принять дискретность управления в пределах одной минуты.

Для того чтобы СУ обеспечивало полную компенсацию напряжения обратной последовательности, необходимо выбрать его параметры согласно методике описанной в [2]. Для этого в месте установки СУ должны быть замерены комплексные величины фазных напряжений и далее определены комплексы эквивалентных ЭДС прямой и обратной последовательности. Кроме того, необходимо знать входное сопротивление схемы по обратной последовательности относительно места установки СУ. Предварительно это входное сопротивление может быть оценено на основе теоретических расчетов [3]. Для характерных дней оно имеет определенное значение, слабо меняющееся на межпоездном интервале. Поэтому с использованием предварительной оценки входного сопротивления можно определить параметры СУ.

Если принятое входное сопротивление совпадает с реальным входным сопротивлением, то после установления на СУ рассчитанных параметров должны выполняться условия:

$$\dot{U}_2(t) = 0, \quad \dot{I}_1(t) = 0. \quad (2)$$

Если эти условия не выполняются, т. е. напряжение обратной последовательности и ток прямой последовательности в СУ не являются нулевыми, то это означает, что принятое входное сопротивление отличается от реальной величины, что и вносит отклонение в ожидаемый режим (при этом предполагается, что эквивалентные эдс прямой и обратной последовательности определены на основе замеров с необходимой степенью точности). Зафиксированные  $\dot{U}_1(t) = 0$  и отклонение  $\Delta \dot{U}_2(t)$  позволяют уточнить входное сопротивление на рассматриваемый момент времени:

$$Z_{\text{вх}22}(t) = \frac{\dot{U}_2(t) - \Delta \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_2(t)} = Z_{12}(t) \frac{\dot{U}_2(t) - \Delta \dot{U}_2(t)}{\dot{U}_1(t)}. \quad (3)$$

Это соотношение дает уточненное значение входного сопротивления на рассматриваемый момент времени. В процессе работы СУ коэффициент несимметрии в месте его установки должен оставаться в пределах некоторой заданной величины

$$K_{2U}(t) \leq K_{2U\text{пор}}. \quad (4)$$

Пороговая величина выбирается так, чтобы в любой точке сети коэффициент несимметрии в нормальных режимах не превосходил допустимой величины  $K_{2U\text{доп}} = 2\%$ . Предварительный анализ показал, что при этом в месте установки СУ можно допустить величину коэффициента несимметрии в пределах

$$K_{2U\text{пор}} \approx 0,3\% \quad (5)$$

Если в некоторый момент времени  $t$  коэффициент несимметрии превзошел пороговую величину, необходимо изменить параметры СУ, так чтобы обеспечивалась полная компенсация напряжения обратной последовательности, т. е.  $K_{2U}(t) = 0$ .

Подчеркнем, что для управления работой СУ достаточно лишь измерять комплексные величины фазных напряжений в месте его установки и далее по заданному алгоритму вычислять необходимые параметры этого устройства. При этом в процессе управления следует контролировать величину входного сопротивления сети по обратной последовательности относительно места установки СУ. Контроль этот осуществляется единожды на межпоездном интервале, т. е. для БАМ не чаще, чем один раз за час.

## 1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САУ ОБОБЩЕННОГО СУ

Для регулирования параметров СУ в его структуре невозможно использование механических переключателей типа вакуумных или элегазовых выключателей. Действительно, коммутационный ресурс этих выключателей в течение их срока службы составляет  $(10-40) \cdot 10^3$  коммутаций. В то время как при принятой скважности управления СУ количество переключений только в один год составит  $60 \cdot 8760 \sim 500 \cdot 10^3$ . Таким образом, регулирование параметров СУ должно осуществляться с использованием преобразовательной техники.

Современный уровень развития измерительной и вычислительной техники позволяет создать микропроцессорную систему автоматического управления (САУ) симметрирующим устройством, структурная схема которой приведена на рис. 3.

Схема микропроцессорной САУ включает в свой состав процессорный блок и блок формирования управляющих сигналов.

Процессорный блок выполняется на основе промышленной микропроцессорной элементной базы. Он осуществляет обработку цифровой информации, поступающей от векторного регистратора, согласно алгоритму, предложенному в [2]. В результате в блок формирования

управляющих сигналов поступают данные о параметрах СУ (проводимостях отдельных фаз), обеспечивающих допустимый уровень несимметрии в сети 220 кВ.

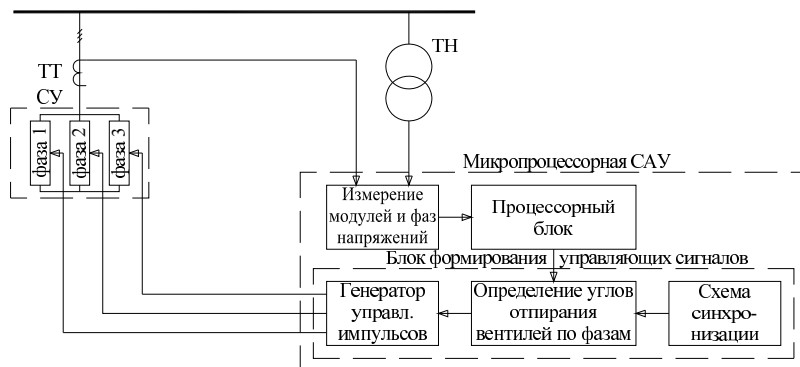


Рис. 3. Структурная схема микропроцессорной системы автоматического управления обобщенным симметрирующим устройством

Блок формирования управляющих сигналов должен обеспечивать три основные функции. Первая функция состоит в синхронизации моментов открытия тиристорных вентилей. Эта функция обычно обеспечивается схемой фазовой синхронизации, которая работает в синхронизме с напряжением на шинах высокого напряжения и генерирует соответствующие импульсы относительно амплитуды напряжения.

Вторая функция состоит в определении углов отпирания тиристорных вентилей. Для этого используются соотношения между поступающими из процессорного блока проводимостями отдельных фаз и соответствующими им углами отпирания тиристорных вентилей.

Третья функция заключается в генерации управляющих импульсов. Она выполняется генератором импульсов, которые производят необходимые управляющие воздействия на тиристорные вентили независимо для каждой из фаз симметрирующего устройства.

Далее приведено более детальное описание симметрирующих устройств, базирующихся на использовании либо тиристорно-реакторной группы (ТРГ), либо управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием (УШРП).

## 2. УПРАВЛЯЕМЫЕ СУ НА БАЗЕ ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНОЙ ГРУППЫ

Схема управляемого СУ на базе ТРГ и жестко подключенной конденсаторной батареи (КБ) показана на рис. 4.

Схема управляемого СУ включает также в свой состав фильтр высших гармоник и микропроцессорную САУ, описание которой было дано выше. В процессе управления предусматривается, чтобы проводимость СУ в каждой фазе могла изменяться в диапазоне

$$B_{CV} = B_{L\max} \div B_{C\max}, \quad (6)$$

где  $B_{L\max}$  – индуктивная проводимость при работе соответствующей фазы СУ в режиме максимального потребления;  $B_{C\max}$  – емкостная проводимость при работе соответствующей фазы СУ в режиме максимальной выдачи. Управление устройством симметрирования в указанном диапазоне осуществляется изменением индуктивной проводимости за счет воздействия на угол отпирания тиристорных вентилей согласно соотношению

$$B_L(\alpha) = -(|B_{L\max}| + |B_{C\max}|) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right), \quad (7)$$

где  $\alpha$  – угол отпирания тиристорного вентиля.

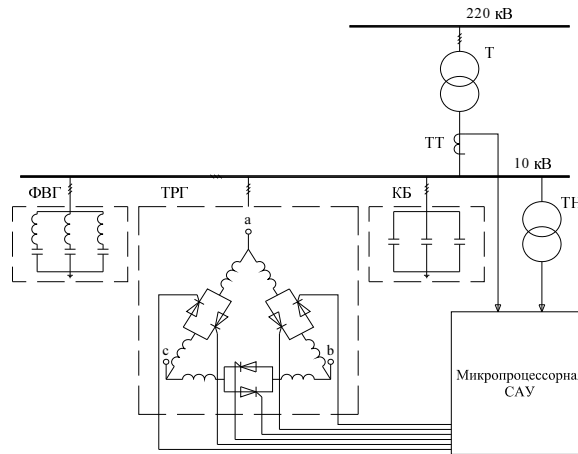


Рис. 4. Схема управляемого СУ на базе тиристорно-реакторной группы и некоммутируемой конденсаторной батареи

Тогда соответственно для проводимости СУ в целом имеем

$$B_{CY}(\alpha) = B_{C\max} + B_L(\alpha). \quad (8)$$

На рис. 5 показана зависимость фазной проводимости СУ от угла отпирания тиристорного вентиля, которая позволяет определить этот угол по информации о фазных проводимостях, рассчитываемых в процессорном блоке. В результате подаются соответствующие управляющие импульсы на вентили каждой фазы.

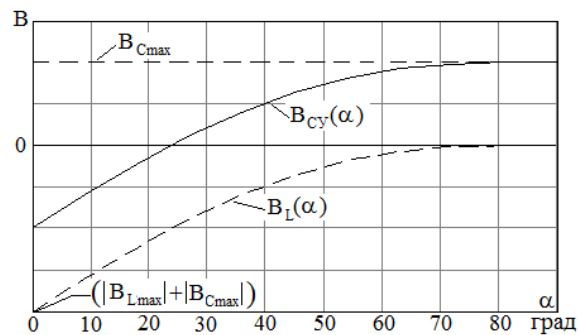


Рис. 5. Характер изменения проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от угла отпирания вентилей

Недостатком рассмотренного регулируемого СУ является то обстоятельство, что мощность ТРГ должна не только обеспечивать работу фаз СУ в индуктивном режиме, но и компенсировать мощность постоянно подключенной КБ. Избавиться от этого недостатка можно за счет использования тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи, как это показано на рис. 6.

Характер управления СУ в этом случае (рис. 7) определяется соотношением

$$B_{CY}(\alpha) = \begin{cases} B_L(\alpha) & \text{при } B_C = 0, \\ B_{C\max} + B_L(\alpha) & \text{при } B_C = B_{C\max}. \end{cases} \quad (9)$$

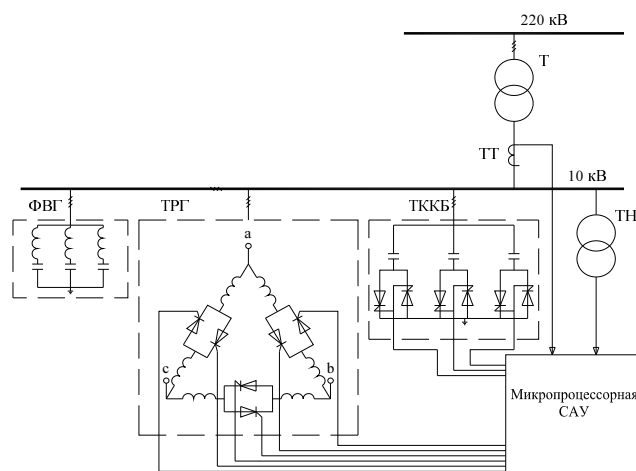


Рис. 6. Схема управляемого СУ на базе тиристорно-реакторной группы и тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи

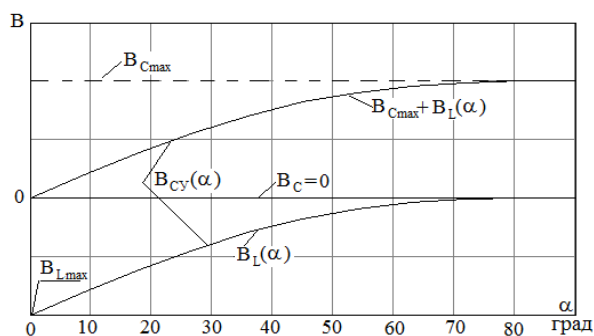


Рис. 7. Характер изменения проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от угла отпирания вентилей (вариант с тиристорно коммутируемой конденсаторной батареей)

При работе СУ в индуктивном режиме конденсаторная батарея находится в отключенном состоянии. При подключении КБ тиристорами симметрирующее устройство работает в емкостном режиме, и при этом управление емкостной проводимостью осуществляется путем изменения индуктивной проводимости тиристорно-реакторной группы за счет регулирования угла отпирания тириستоров независимо для каждой фазы.

### 3. УПРАВЛЯЕМЫЕ СУ НА БАЗЕ УПРАВЛЯЕМЫХ РЕАКТОРОВ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора (УШРП) и жестко подключенной конденсаторной батареи показана на рис.8. Основными элементами УШРП являются системная обмотка (СО), обмотка управления (ОУ) и полупроводниковый преобразователь (ПП), обеспечивающий необходимую регулируемую величину постоянного тока в обмотке управления. Кроме того, в состав УШРП входит устройство коррекции формы тока, представляющее трехфазную батарею силовых конденсаторов. Это устройство обеспечивает фильтрацию гармоник холостого хода и сглаживание формы рабочего тока реактора. В начальный момент при токе управления равно нулю в реакторе протекает ток, вызванный емкостью устройства коррекции формы. Величина этого тока составляет 3–4 % номинального тока реактора. При небольшом увеличении тока управления емкостная составляющая компенсируется и соответственно дальнейший рост тока управления переводит УШРП на работу в индуктивном режиме.

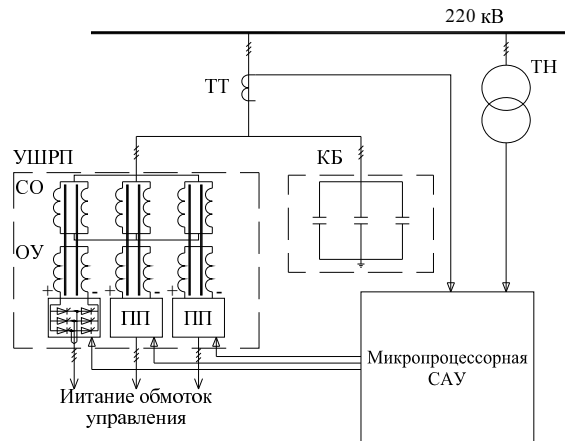


Рис. 8. Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием и некоммутуруемой конденсаторной батареи.

Как и в случае СУ на базе ТРГ, проводимость СУ с использованием УШРП процессе управления должна изменяться в каждой фазе в диапазоне, определяемом соотношением (6).

Управление устройством симметрирования в указанном диапазоне осуществляется изменением проводимости УШРП за счет воздействия на ток обмотки управления согласно соотношению

$$B_L(i_y^*) = -(|B_{L\max}| + |B_{C\max}|)(i_y^* - 0,04), \quad (10)$$

где  $i_y^*$  – ток управления, отнесенный к его номинальной величине.

Соответственно проводимость СУ в целом определится как

$$B_{СУ}(i_y^*) = B_{C\max} + B_L(i_y^*). \quad (11)$$

На рис. 9 показана зависимость фазной проводимости СУ от тока в обмотке управления, которая позволяет определить этот ток по информации о фазных проводимостях, рассчитываемых в процессорном блоке.

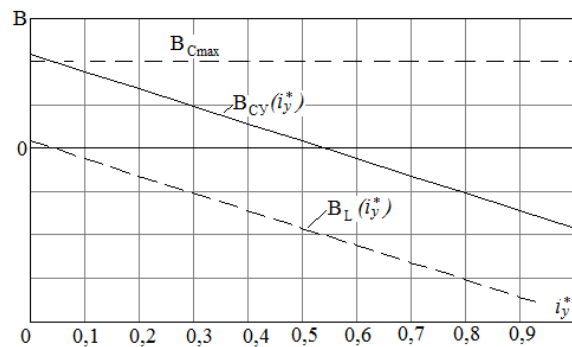


Рис. 9. Характер изменения проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от тока в обмотке управления

Далее учитывается связь между током управления и углом отпирания тиристорных вентилей полупроводниковых преобразователей

$$i_y^* = i_y^*(\alpha). \quad (12)$$

Угол отпирания преобразователя меняется в диапазоне

$$\alpha_{xx} \leq \alpha \leq \alpha_H, \quad (13)$$

где  $\alpha_{xx}$  – угол отпирания при работе фазы УШРП в режиме холостого хода;  $\alpha_H$  – угол отпирания при работе фазы УШРП в номинальном режиме.

В результате на основе соотношения (12) вырабатываются соответствующие управляющие импульсы, которые подаются на вентили преобразователей каждой фазы. Недостатком рассмотренного регулируемого СУ, как и в случае СУ с ТРГ и постоянно подключенной КБ, является избыточная мощность УШРП, необходимая для компенсации мощности конденсаторной батареи. Этот недостаток исключается за счет использования тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи, как это показано на рис. 10.

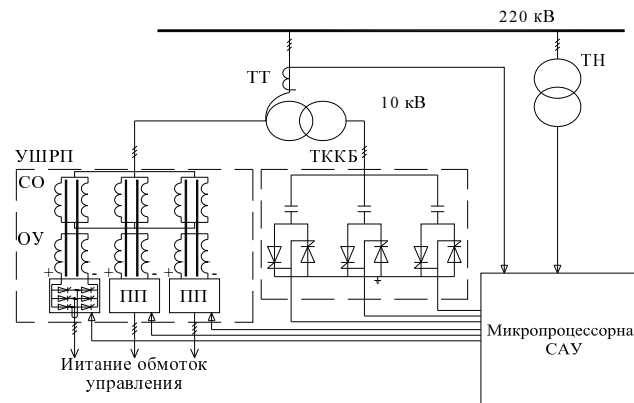


Рис. 10. Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием и тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи

Характер управления СУ в этом случае (рис. 11) определяется выражением

$$B_{CY}(i_y^*) = \begin{cases} B_L(i_y^*) & \text{при } B_C = 0, \\ B_{C\max} + B_L(i_y^*) & \text{при } B_C = B_{C\max}. \end{cases} \quad (14)$$

При работе СУ в индуктивном режиме конденсаторная батарея находится в отключенном состоянии.

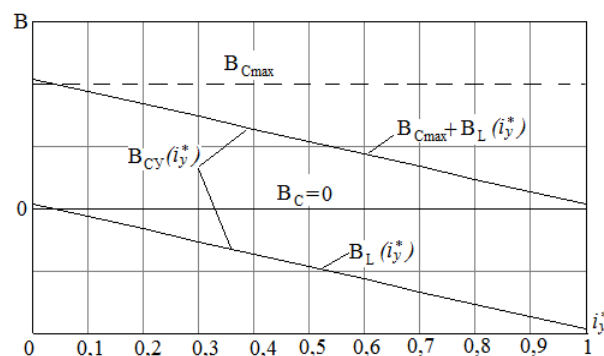


Рис. 11. Зависимость проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от тока в обмотке управления (вариант с тиристорно коммутируемой конденсаторной батареей)



При подключении КБ тиристорами симметрирующее устройство работает в емкостном режиме, и при этом управление емкостной проводимостью осуществляется путем изменения индуктивной проводимости УШРП за счет регулирования тока в обмотке управления путем воздействия на угол отпираания тиристорных вентилей полупроводниковых преобразователей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для управления работой СУ достаточно измерять комплексные величины фазных напряжений в месте его установки и далее по заданному алгоритму вычислять необходимые параметры этого устройства. При этом в процессе управления следует контролировать величину входного сопротивления сети по обратной последовательности относительно места установки СУ. Контроль этот может осуществляться единожды на межпоездном интервале, т. е. для БАМ не чаще, чем один раз за час. Даны рекомендации по автоматическому управлению симметрирующими устройствами, применительно к схемам СУ на базе тиристорно-реакторной группы, а также управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Анохин Б.А. Анализ уровней несимметрии и отклонений напряжения в протяженной сети при питании тяговой нагрузки / Б.А. Анохин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 2012.
- [2] Красильникова Т.Г. Определение параметров симметрирующего устройства для устранения несимметрии напряжений в протяженной сети питающей несимметричную нагрузку / Т.Г. Красильникова, Б.А. Анохин // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 145–152.
- [3] Красильникова Т.Г. Матричные модели протяженных сетей для расчета несимметричных режимов / Т.Г. Красильникова, Б.А. Анохин // Международная молодежная научно-техническая конференция «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах» НГТУ. – Новосибирск, 2011.

### REFERENCES

- [1] B.A. Anohin Analiz urovnej nesimmetrii i otklonenij naprjazhenija v protjazhennoj seti pri pitanii tjugovoj nagruzki // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Novosibirsk, 2012.
- [2] T.G. Krasil'nikova, B.A. Anohin Opredelenie parametrov simmetrirovushhego ustrojstva dlja ustraneniya nesimmetrii naprjazhenij v protjazhennoj seti pitajushhej nesimmetrichnuju nagruzku // Sb. nauch. tr. NGTU. – Novosibirsk, 2012. – Vyp. 4. – S. 145–152.
- [3] T.G. Krasil'nikova, B.A. Anohin Matrichnye modeli protjazhennyh setej dlja rascheta nesimmetrichnyh rezhimov // Mezhdunarodnaja molodezhnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Upravlenie, informacija i optimizacija v jelektrojenergeticheskikh sistemah» NGTU – Novosibirsk, 2011.

*Анохин Борис Анатольевич*, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научной деятельности – дальние электропередачи, транспорт электроэнергии (несимметричные режимы работы сетей). Имеет 6 публикаций. E-mail: anohinba@yandex.ru

*Красильникова Татьяна Германовна*, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научной деятельности – дальние электропередачи, транспорт электроэнергии (несимметричные режимы работы сетей). Имеет 39 публикаций. E-mail: Tatka552005@yandex.ru

### T.G. Krasilnikova, B.A. Anokhin

#### *The control circuits for balancing devices in external power supply network of railways*

The general principles of the automatic control system of a balancing devices (BU), the characteristic modes and operating conditions of the SU in networks with rapidly changing unbalanced load (for example, a network external power supply 220 kV BAM) are proposed. The block diagram of microprocessor automatic control system in relation to the schemes of controlled BU based on the thyristor-reactor group, and also based on the field-controlled shunt reactor. The paper presents a control law for a balancing devices, developed on the basis of the expressions derived in the development of methods for determining the parameters of balancing devices using matrix modeling network in the phase coordinates. The control law of balancing devices designed with the features of the operating modes of external power supply networks of railways. This device allows to reduce the voltage unbalance at the connection point to zero. In addition to this device may be given the function of the reactive power compensation network.

**Key words:** balancing device, voltage unbalance, unbalanced load, automatic control system, the quality of electric power, thyristor-reactor group, field-controlled shunt reactor, phase coordinates.