

СИММЕТРИЧНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОСОВМЕСТИМАЯ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

У статті розглядається система електропостачання залізниць змінного струму частотою 50 Гц і номінальною напругою 25 кВ із спеціальним трансформатором і силовим активним фільтром.

В статті розглядається система електропостачання залізничних доріг переменного тока частотой 50 Гц и номинальным напряжением 25 кВ со специальным трансформатором и силовым активным фильтром.

ВВЕДЕНИЕ

Электроснабжение железных дорог в странах СНГ осуществляется по системе постоянного тока с номинальным напряжением 3 кВ и системе переменного тока частотой 50 Гц с номинальным напряжением 25 кВ. Система электроснабжения железных дорог состоит из тяговой подстанции, контактной сети и соединяющих их линий [1].

Электроснабжение переменным током частотой 50 Гц с номинальным напряжением 25 кВ осуществляется обычно от трехфазной промышленной сети 110 кВ через понижающий трехфазный трансформатор, устанавливаемый на тяговой подстанции. Три первичных обмотки трансформатора, соединенные в звезду с нулевым выводом, подключены к сети 110 кВ, а три вторичных обмотки соединены в "открытый треугольник". При этом вторичная обмотка фазы С питающего трансформатора (ПТ) соединяется с контуром заземления подстанции и с рельсами пути, а фазы А и В подключаются к контактным проводам. Для выравнивания нагрузки фаз в контактной сети чередуются участки, подключенные к фазам А и В, между ними устанавливают нейтральные вставки. В системах электроснабжения применяют также различные системы фильтрации высших гармоник и компенсации реактивной мощности [2]. Однако все эти меры до конца не устраняют основного недостатка данной системы электроснабжения железных дорог, а именно – значительную асимметрию сетевых токов и большие по величине реактивные токи в сети 110 кВ, обуславливающие дополнительные потери электроэнергии. Кроме того в сеть 110 кВ могут генерироваться, вызванные нелинейными нагрузками в электровазе, высшие гармоники тока, приводящие к искажению напряжения сети.

В настоящей работе рассматривается система со специальным трехфазным трансформатором и силовым активным фильтром (САФ), которая электромагнитно совместима с питающей сетью 110 кВ. В такой системе для сети 110 кВ эквивалентная нагрузка симметрична и в каждой из фаз представляет собой чисто активное сопротивление, вследствие чего фазные токи сети синусоидальны и совпадают по фазе с фазными напряжениями.

ТРАДИЦИОННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Традиционная система электроснабжения железной дороги, как было отмечено выше, включает промышленную сеть 110 кВ и, устанавливаемый на тяговой подстанции, трехфазный понижающий трансформатор,

первичные обмотки которого подключены к сети 110 кВ, а вторичные обмотки трансформатора – к контактному проводу и рельсам пути. Эквивалентная схема традиционной системы электроснабжения приведена на рис. 1.

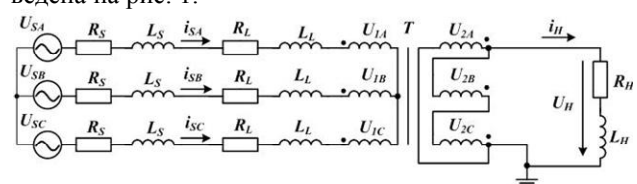


Рис. 1. Эквивалентная схема традиционной системы электроснабжения

Сеть 110 кВ представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений. Параметры сети учтены в каждой фазе активным сопротивлением R_S и индуктивностью L_S . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 110/25 кВ с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением R_L и индуктивностью L_L . Три первичных обмотки трансформатора соединены в звезду, а три вторичных – в "открытый треугольник". Эквивалентная нагрузка, представленная активно-индуктивным сопротивлением, подключена к фазам А и С, при этом вывод фазы В не используется.

На рис. 2 приведена *MatLab* – модель традиционной системы электроснабжения со стандартным трансформатором ТДТНЭ-25000/110-67.

Параметры модели соответствуют номинальной активной мощности нагрузки 10 МВт. На рис. 3 приведены осциллограммы фазных токов и напряжений сети при $\varphi_n = 0, \pi / 12, \pi / 6$.

Из осциллограмм видно, что ток фазы А сети по амплитуде в два раза больше токов фаз В и С и находится с ними в противофазе. Осциллограммы свидетельствуют о плохой электромагнитной совместимости традиционной системы электроснабжения железной дороги с питающей сетью 110 кВ, так как фазные сетевые токи не совпадают по фазе с фазными напряжениями сети.

Установленная мощность ПТ:

$$P_T = \frac{\sum_{n=1}^6 U_n \cdot I_n}{2}, \quad (1)$$

где U_n – действующее напряжение n -й обмотки трансформатора; I_n – действующий ток n -й обмотки трансформатора.

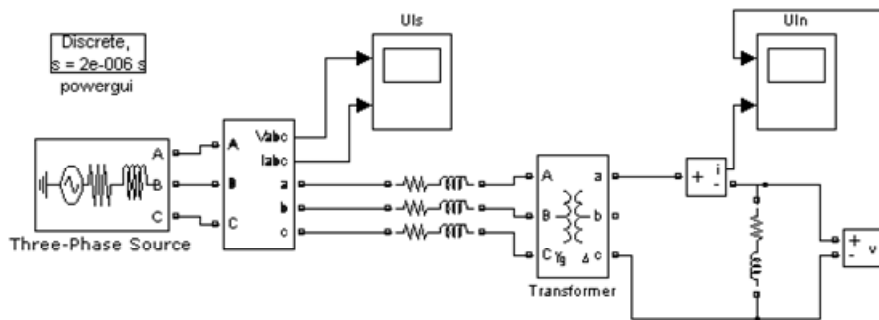


Рис. 2. MatLab – модель традиционной системы электроснабжения

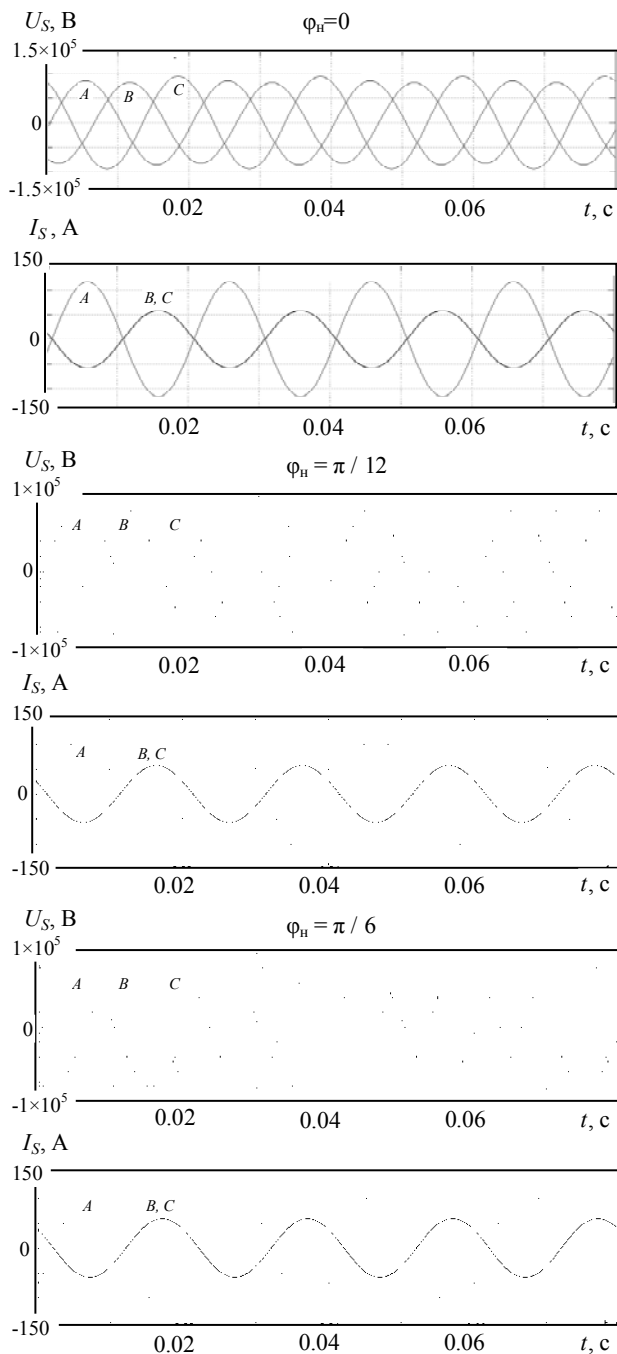


Рис. 3. Осциллограммы сетевых токов и напряжений традиционной системы электроснабжения

В результате получаем, что при $\varphi_n = 0$, то есть при чисто активной нагрузке $P_T = 1,33 \cdot P_n$ (P_n – номинальная мощность нагрузки).

При отличных от нуля углах φ_n установленная мощность рассчитывается по формуле

$$P_T(\varphi_n) = \frac{P_T(0)}{\cos \varphi_n} \quad (2)$$

При $\varphi_n = \pi / 12$: $P_T = 1,38 \cdot P_n$, а при $\varphi_n = \pi / 6$: $P_T = 1,54 \cdot P_n$.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БЕЗ САФ

Вместо традиционной системы возможно применение системы электроснабжения с другой конструкцией трансформатора. Предлагаемая система электроснабжения представлена на рис. 4.

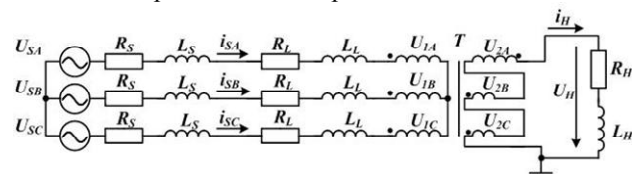


Рис. 4. Эквивалентная схема предлагаемой системы электроснабжения

Отличие конструкции предлагаемого трансформатора от традиционного заключается в схеме соединения обмоток. Три первичных обмотки ПТ соединены в звезду аналогично традиционной схеме, а три вторичных обмотки соединены последовательно, как показано на рис. 3. При этом получаем трехфазную систему на первичной стороне трансформатора и однофазную на вторичной стороне.

Для того чтобы обеспечить магнитную уравновешенность трансформатора, необходимо выдержать следующие условия:

- число витков первичных фазных обмоток одинаково:

$$W_{1A} = W_{1B} = W_{1C}; \quad (3)$$

- число витков вторичных обмоток фаз B и C в два раза меньше, чем вторичной обмотки фазы A:

$$W_{2B} = W_{2C} = 0,5W_{2A}. \quad (4)$$

Если мгновенный ток нагрузки равен i_n , то в любой момент времени

$$i_{2A} = -i_{2B} = -i_{2C} = i_n. \quad (5)$$

Коэффициент трансформации фазы A равен

$$K_{TPA} = \frac{W_{1A}}{W_{2A}} = K_{TP}. \quad (6)$$

С учетом (3) и (4)

$$K_{TPB} = \frac{W_{1B}}{W_{2B}} = 2K_{TP}, \quad (7)$$

$$K_{\text{TPC}} = \frac{W_{1C}}{W_{2C}} = 2K_{\text{TP}}. \quad (8)$$

Учитывая (3) – (8), несложно показать, что в любой момент времени выдерживается соотношения:

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0, \quad (9)$$

$$i_{1B} = i_{1C} = -0,5 \cdot i_{2A}, \quad (10)$$

то есть, трехфазная система магнитно уравновешена.

На рис. 5 приведены векторные диаграммы для случая $\varphi_n = 0$ и $\varphi_n = \pi/6$, построенные с учетом масштаба токов.

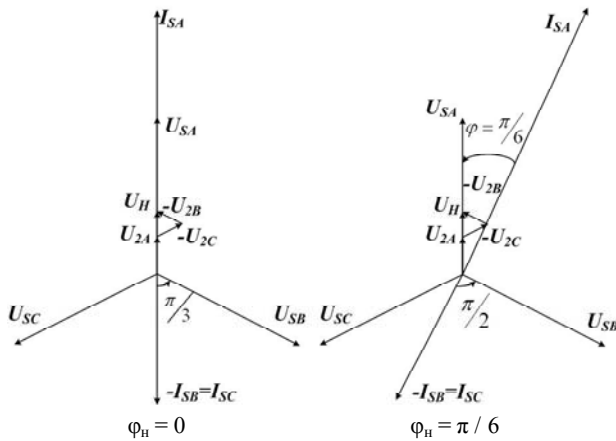


Рис. 5. Векторные диаграммы напряжений и токов

Схема электроснабжения, приведенная на рис. 4, промоделирована в пакете *MatLab* при номинальной активной мощности нагрузки 10 МВт. Работа схемы иллюстрируется осциллограммами, представленными на рис. 3. Токи и напряжения сети в предлагаемой схеме электроснабжения и традиционной одинаковы. С увеличением угла φ нагрузки происходит просадка напряжения на нагрузке, причиной чего является снижение напряжения сети за счет индуктивного сопротивления сети и соединительных кабелей. Установленная мощность предложенного ПТ такая же, как у трансформатора традиционной схемы.

Предлагаемая и традиционная система электроснабжения обладают одинаковыми недостатками: плохая электромагнитная совместимость с питающей сетью 110 кВ и асимметрия токов, однако конструкция трансформатора в предлагаемой схеме может быть предпочтительней.

Асимметрию токов можно устранить путем применения силового активного фильтра (САФ).

ТРАДИЦИОННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С САФ

Включение силового активного фильтра параллельно клеммам первичной обмотки трансформатора позволяет скомпенсировать реактивную мощность и пульсации активной мощности путем симметрирования токов сети. Однако применение САФ рационально лишь в том случае, если это позволяет уменьшить потери и, соответственно, повысить коэффициент полезного действия системы электроснабжения [3, 4].

На рис. 6 приведена схема подключения САФ в традиционной системе электроснабжения железной дороги. Силовой активный фильтр устанавливается на

тяговой подстанции. Он подключается параллельно клеммам первичной обмотки трансформатора, при этом необходим нулевой вывод первичной обмотки ПТ, который соединяется с нулевой точкой на выходе САФ. При напряжении сети 110 кВ схема САФ, представленная на рис. 6, вероятно может быть практически реализована с использованием следующего поколения высоковольтных транзисторов на основе карбида кремния (SiC) либо других полупроводниковых материалов [5].

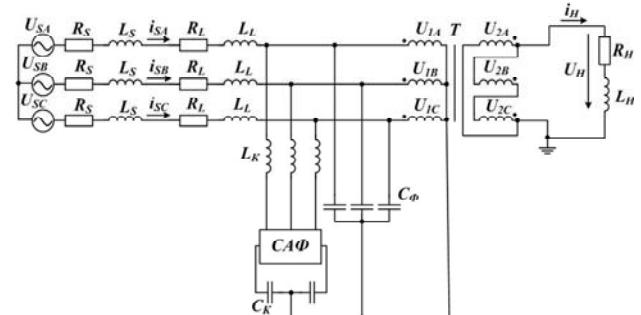


Рис. 6. Традиционная система электроснабжения с САФ

Подключение САФ можно осуществить через понижающий трансформатор, при этом напряжение короткого замыкания e_k трансформатора должно соответствовать заданной величине индуктивности, которая рассчитывается исходя из условий работы САФ. В этом случае нулевой провод первичной обмотки питающего трансформатора соединяется с нулевым проводом первичной обмотки трансформатора САФ, а нулевой провод вторичной обмотки трансформатора САФ подключается к нулевой точке на выходе САФ как показано на рис. 7. Система управления САФ выполняется на основе *p-q-r* теории мощности [6].

На рис. 8 представлены осциллограммы сетевых напряжений и токов традиционной системы электроснабжения с САФ. На рис. 9 приведены осциллограммы КПД и активных мощностей сети и нагрузки. Из осциллограмм (рис. 8-9) видно, что при подключении САФ фазные токи сети становятся одинаковыми по амплитуде и совпадающими по фазе с соответствующими фазными напряжениями сети, что в свою очередь приводит к повышению КПД на 0,5-2 %.

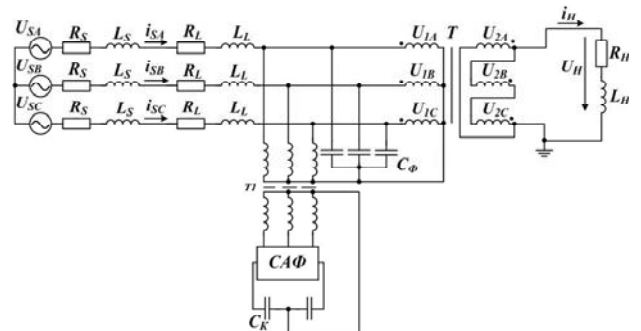


Рис. 7. Традиционная система электроснабжения с САФ, подключенным через понижающий трансформатор

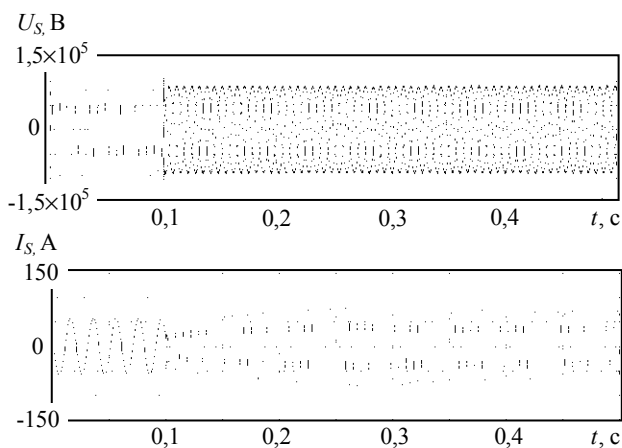


Рис. 8. Осциллограммы сетевых токов и напряжений традиционной системы электроснабжения с САФ

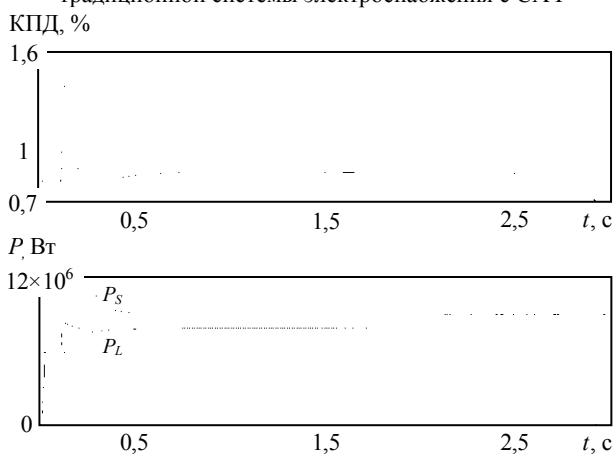


Рис. 9. Осциллограммы КПД и активных мощностей сети и нагрузки

Степень повышения КПД зависит от длины линий, соединяющих тяговую подстанцию, где установлен САФ, и подстанцию более высокого напряжения, а также от активного сопротивления обмоток понижающего трансформатора, через который подключается САФ. Длина линии принимается при расчетах равной 50-100 км. Повышение КПД на 2 % соответствует длине линии 100 км и мощности потерь в трансформаторе САФ 1 % от номинальной мощности. В момент 0,1 с происходит включения САФ, которое сопровождается переходным процессом, связанным с перезарядом конденсатора САФ. Этот процесс вызывает погрешности в расчете КПД и активных мощностей сети и нагрузки (рис. 9).

ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С САФ

На рис. 10 приведена *MatLab*-модель предлагаемой системы электроснабжения железной дороги с силовым активным фильтром.

Модель состоит из семнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 2, 5, 9, 11, 12, 15, 18;
- система управления – блок 8;
- датчики тока и напряжения – блоки 3, 4, 7, 14;
- многолучевые осциллографы – блоки 6, 10, 13, 17, 19;
- вспомогательные блоки – блоки 1, 16.

Назначение блоков силовой схемы:

2 – блок напряжения питающей сети, моделирующий трехфазную систему синусоидальных напряжений с возможностью задания действующего значения линейного напряжения, активного и индуктивного сопротивлений питающей сети;

5 – блок активных сопротивлений и индуктивностей соединительных кабелей, который учитывает параметры линий, соединяющих тяговую подстанцию и подстанцию более высокого напряжения;

9 – блок понижающих трансформаторов, первичные и вторичные обмотки которых соединены по схеме звезды с нулевым выводом;

11 – блок САФ, представляющий собой шесть блоков IGBT – транзисторов, включенных по мостовой схеме, и два конденсатора на выходе моста;

12 – блок фильтрующих конденсаторов, которые подавляют высшие гармоники с частотой широтно-импульсной модуляции;

15 – блок питающего трансформатора, первичные обмотки которого соединены по схеме звезда с нулевым выводом, а вторичные обмотки соединены последовательно (см. рис. 4);

18 – блок нагрузки, моделирующий однофазную активно-индуктивную нагрузку.

Блок системы управления 8 приведен на рис. 11. Он осуществляет выработку управляющих импульсов транзисторов САФ. Все сигналы, циркулирующие в системе управления, представлены в относительных единицах. Для построения системы управления использовались преобразования координат вектора напряжений сети и токов нагрузки из $\alpha\beta 0$ [7]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

преобразование токов нагрузки из координат $\alpha\beta 0$ в координаты pqr :

$$\begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Lq} \\ i_{Lr} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \cdot \begin{bmatrix} u_0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -\frac{u_{\alpha\beta 0} u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta 0} u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

и преобразование токов задания из координат pqr в координаты $\alpha\beta 0$ и из $\alpha\beta 0$ в координаты abc :

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \\ i_{C0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{Cp}^* \\ i_{Cq}^* \\ i_{Cr}^* \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \\ i_{C0}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

рения фазных токов и напряжений питающей сети (блоки 3, 4), фазные токи и напряжения на входе питающего трансформатора (блок 14), фазные токи на входе САФ (блок 7). Все эти данные, а также ток компенсатора и напряжение на конденсаторах САФ выводятся на многолучевые осциллографы (блоки 6, 10, 13, 17, 19).

Датчики тока и напряжения осуществляют изме-

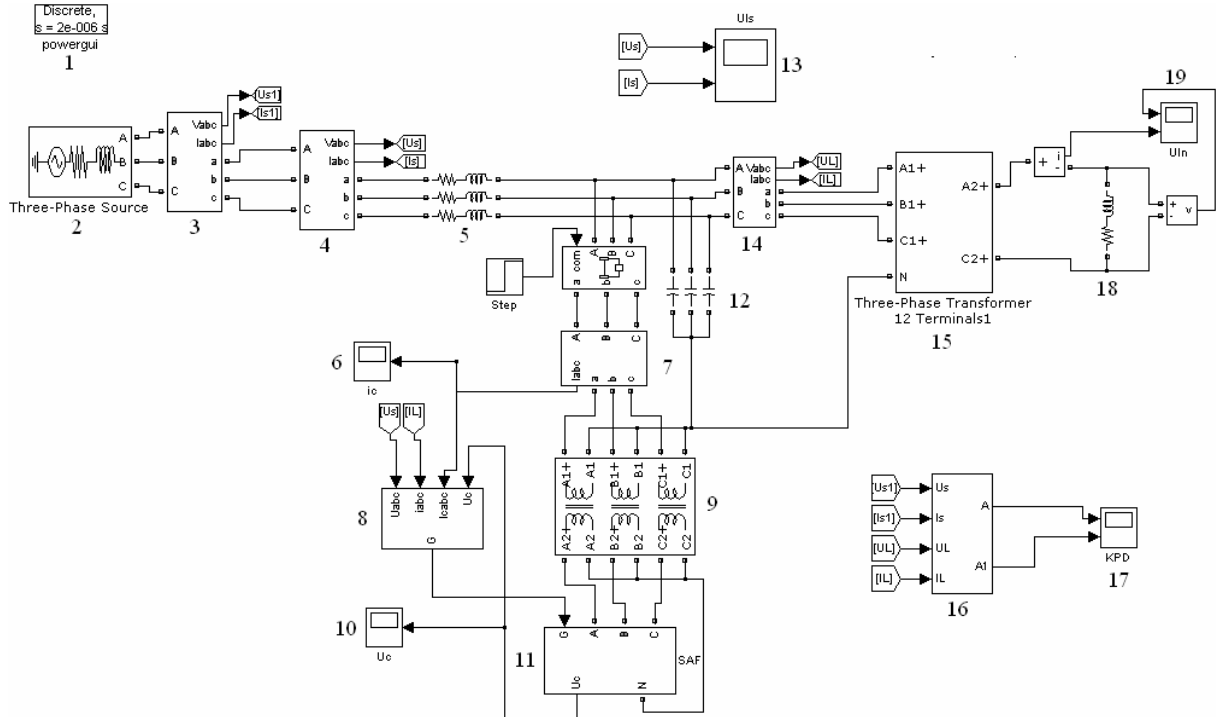


Рис. 10. MatLab-модель предлагаемой схемы электроснабжения железной дороги с силовым активным фильтром

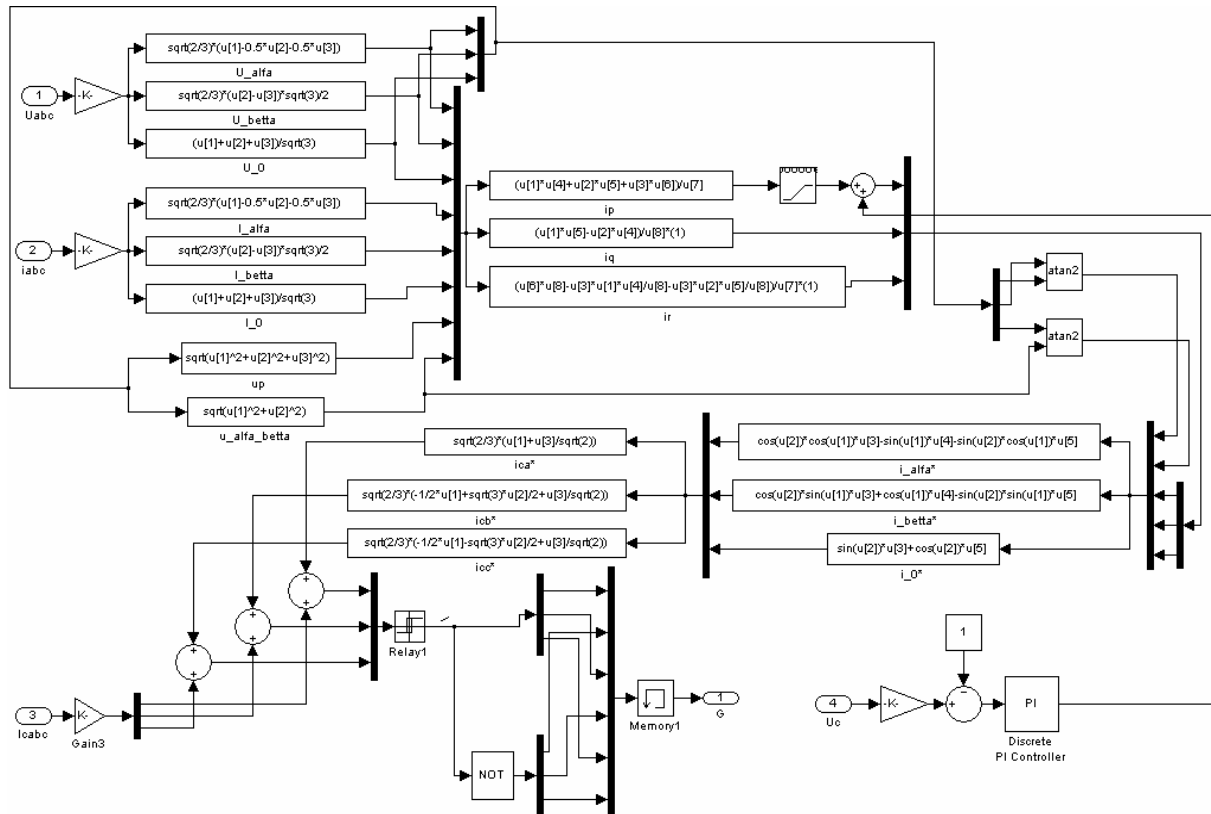


Рис. 11. Система управления САФ

В блоке 16 рассчитываются активные мощности сети и нагрузки и КПД по мгновенным значениям фазных токов и напряжений сети и токов и напряжений на входе питающего трансформатора.

САФ подключается к клеммам первичной обмотки питающего трансформатора. Подключение САФ возможно через реакторы, что сейчас трудно реализовать из-за отсутствия необходимых высоковольтных полупроводниковых ключей, или, как указано на рис. 10 – через понижающие трансформаторы.

Осциллограммы токов и напряжений сети (рис. 8) и осциллограммы КПД и активных мощностей на стороне сети и на входе питающего трансформатора (рис. 9) демонстрируют положительный эффект от подключения САФ. Токи сети становятся равными по амплитуде и совпадающими по фазе с напряжениями сети, что в свою очередь приводит к повышению КПД на 0.5-2 % с учетом потерь в САФ. Степень повышения КПД также как и в традиционной системе электроснабжения с САФ зависит от длины линии, соединяющей подстанции, и активного сопротивления понижающего трансформатора САФ.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены режимы работы традиционной системы электроснабжения железной дороги переменного тока частотой 50 Гц и номинальным напряжением 25 кВ.
2. Предложена новая схема последовательного соединения вторичных обмоток питающего трансформатора 110/25 кВ с двумя выходными клеммами, обеспечивающая равенство нулю суммы мгновенных значений фазных токов на стороне 110 кВ.
3. Показано, что установленная мощность предложенного трансформатора такая же как и трансформатора с традиционной схемой соединения вторичных обмоток в "открытый треугольник".
4. На *MatLab*-модели систем электроснабжения с традиционным и предлагаемым трансформатором продемонстрирована возможность симметрирования фазных токов сети 110 кВ и полной компенсации реактивной мощности с помощью силового активного фильтра, подключенного параллельно клеммам первичных обмоток трансформатора.
5. Подключение в схеме электроснабжения САФ обеспечивает полную электромагнитную совместимость системы электроснабжения с питающей сетью и снижение суммарных потерь на 0.5-2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 2 / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 392 с.
2. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1 / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 390 с.
3. S. Cole and R. Belmans, "Transmission of bulk power" IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 3, no. 3, pp. 19-24, Sept. 2009.
4. A. Bhattacharya, C. Chakraborty, and S. Bhattacharya, "Shunt compensation" IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 3, no. 3, pp. 38-49, Sept. 2009.
5. H. Wang, A.Q. Huang, F. Wang. Development of a scalable power semiconductor switch (SPSS). IEEE Transactions on power electronics, vol. 22, no. 2, pp. 364-373, 2007.
6. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Тугай Д.В. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения / Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" ч. 2, 2008. – с. 80-87.
7. Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю., Ильина О.В. Соотношения для преобразования координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие, НТУ "ХПИ", г. Харьков, 2009, 40 с.

Поступила 20.10.2009

Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.,
Ковальчук Ольга Игоревна
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ"
тел./факс: (057) 707-63-12
e-mail: zhemerov@online.kharkiv.net, olha.kov@mail.ru

G.G. Zhemerov, O.I. Kovalchuk

A symmetric three-phase ac voltage power-supply system electrically and magnetically compatible with the supply main for railway lines.

The paper deals with a railway-line AC 50Hz 25 kV power supply system with a special transformer and an active power filter.
Key words – ac power supply system, electrical and magnetic compatibility with the supply main, railway.