

## Силовая электроника

УДК 621.317:621.313.3

В.П. Стяжкин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н.С. Комаров<sup>2</sup>, д.-р. техн. наук, П.П. Подейко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, г. Киев-057, 03680, Украина.

<sup>2</sup>Киевский национальный университет технологий и дизайна,  
ул. Немировича-Данченко, 2, г. Киев-011, 01601, Украина.

### Повышение энергетических показателей системы тиристорный регулятор тока – трансформатор питания в электротермических установках

Определен гармонический состав входного тока системы тиристорный регулятор тока – трансформатор питания электротермической установки. Предложена схема и имитационная модель системы с активным корректором формы тока. Библ. 6, рис. 5.

**Ключевые слова:** электротермическая установка; тиристорный регулятор тока; коэффициент гармонических искажений; трансформатор; активный корректор формы тока.

#### Введение

Характерной особенностью современных систем электроснабжения электротермических установок является их насыщенность специализированными источниками питания, с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Это вызывает рост уровня высших гармоник в системе электроснабжения установок, из-за чего остро ставятся вопросы электромагнитной совместимости при работе оборудования. Поэтому важно бороться с гармоническими искажениями тока, потребляемого из сети, что повышает как надежность, так и энергоэффективность установок [1, 2, 3].

К электротермическому оборудованию с плохой электромагнитной совместимостью относятся технологические установки электрошлакового переплава, установки по производству неорганических волокон, высокотемпературные вакуумные электропечи сопротивления, установки напыления цветных металлов в вакуумных камерах и другое технологическое электрооборудование, где в качестве электромагнитных преобразователей энергии применяются специальные (печные или сварочные) трансформаторы с нормальным магнитным рассеиванием, нагруженные на явно выраженную активную нелинейную нагрузку [2, 3].

#### Система регулирования тока трансформатора

Питание первичных обмоток трансформаторов традиционно осуществляется от тиристорных регуляторов тока с фазовым управлением, работающих в режиме регулятора тока нагрузки установки (рис. 1). Это определяет несинусоидальный характер кривой тока, потребляемого из сети, отставание по фазе от кривой напряжения сети (рис. 2, а), и приводит к появлению в спектре тока питающей сети высших гармонических составляющих (рис. 2, б). При этом спектральный состав тока, потребляемого установкой (наиболее выражены 5, 7, 11, 13-я гармоники), зависит от ее режима работы [4, 5].

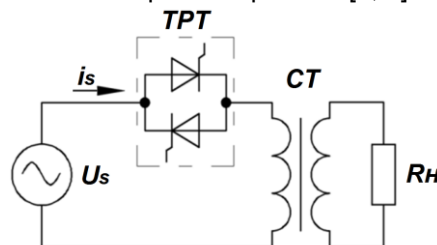
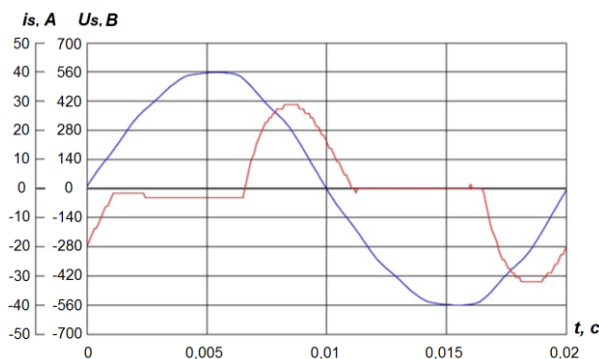
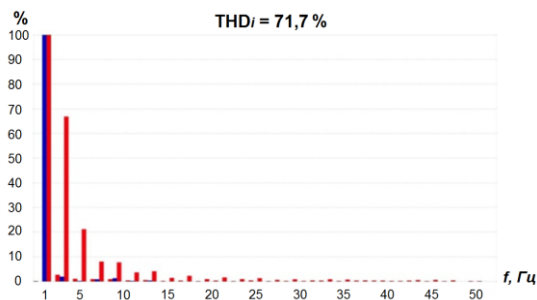


Рис. 1. Функциональная схема системы регулятор тока – трансформатор



а)



б)

Рис. 2. Кривые напряжения сети и тока системы (а) и спектральный состав тока питающей сети (б)

Гармонический состав тока питающей сети возрастает при глубоком регулировании в процессе выхода установки на тепловой режим, что приводит к значительному искажению кривой потребляемого тока, доводя значение коэффициента гармонических искажений ( $THD_i$ ) до 72% (рис. 2, б) и снижая при этом коэффициент мощности  $K_m$  на входе системы до 0,5 – 0,6 [4,5].

В настоящее время в качестве средств снижения токов высших гармоник широко используются пассивные и активные корректоры искажений. Первые настраиваются на ряд гармоник, близлежащих к основной, но их эффективность ограничена, особенно при изменении входного тока потребителя, имеется также опасность возникновения резонансных явлений [1].

Более оправдано применение активных корректоров формы входного тока [7].

Принцип действия активного корректора формы входного тока легко объяснить на основе функциональной схемы системы регулятор тока – трансформатор с корректором формы тока (рис. 3). Принцип состоит в синтезе формы тока дросселя  $i_L$ , при котором сумма тока дросселя  $i_L$  и тока нагрузки  $i_H$  формирует кривую тока сети  $i_S$  синусоидальной формы, совпадающей по фазе с кривой напряжения сети.

Входной ток при присоединении нелинейной нагрузки имеет периодический характер, не содержит четные гармоники и поэтому может быть разложен в ряд Фурье в следующем виде [6]:

$$i_H(t) = b_1 \sin \omega t + a_1 \cos \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} (b_{2k+1} \sin(2k+1)\omega t + a_{2k+1} \cos(2k+1)\omega t), \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота напряжения сети.

Первое слагаемое ряда определяет активную мощность (P), второе – реактивную мощность (Q), а третье – мощность искажений (N).

Полная мощность (S) находится через ее составляющие, как

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2}, \quad (2)$$

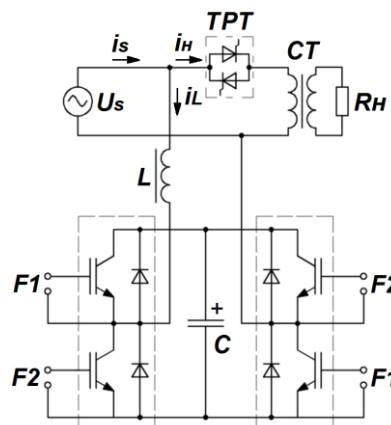


Рис. 3. Функциональная схема системы регулятор тока – трансформатор с активным корректором формы тока

Эффективность энергетических процессов в электрических цепях принято характеризовать коэффициентом мощности  $K_m = P/S$ . Очевидно, что максимальное значение коэффициента мощности  $K_m = 1$  достигается при отсутствии всех неактивных составляющих сетевого тока.

Для компенсации реактивной мощности и мощности искажений активный корректор формы тока формирует ток

$$i_K(t) = -a_1 \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} (b_{2k+1} \sin(2k+1)\omega t + a_{2k+1} \cos(2k+1)\omega t), \quad (3)$$

который при сложении с током (1) нелинейного потребителя обеспечивает формирование сетевого тока в следующем виде:

$$i_S(t) = b_1 \sin \omega t. \quad (4)$$

Электромагнитные процессы в электротермических установках нестационарные ввиду характера регулирования и нелинейности нагрузки, коэффициенты ряда (1) также изменяются во времени. Поэтому синтез параметров корректора формы тока подразумевает анализ гармонического состава тока нагрузки и соответствующие изменения формы тока  $i_K(t)$ . Кроме того, чем шире спектр высших гармоник, тем должно быть выше быстродействие корректора, которое ограничивается дросселем L в силовой цепи.

Таким образом, активный корректор тока должен представлять собой систему автоматического регулирования, которая обеспечивает минимальное отклонение мгновенных значений

тока сети от тока, определяемого выражением (4).

Известны разные способы построения систем автоматического управления корректорами, в том числе с применением микропроцессорных средств, которые проводят спектральный анализ кривой тока нагрузки в реальном времени и формируют эталонный сигнал, который определяет соответствующий ток корректора. В этом случае имеет смысл применить нечеткую логику, нейронную сеть, или средства гибридного управления.

В данной работе применена простая реализация алгоритма управления корректором с ре-

лейным регулятором тока, описанная в [6].

Для проведения исследований электромагнитных процессов в переходных и стационарных режимах работы системы с активным корректором формы тока построена имитационная модель системы.

#### Имитационная модель системы

Тиристорный регулятор тока – специальный трансформатор – активный корректор формы тока, разработанная с помощью пакета моделирования Simulink в системе MATLAB, показана на рис. 4.

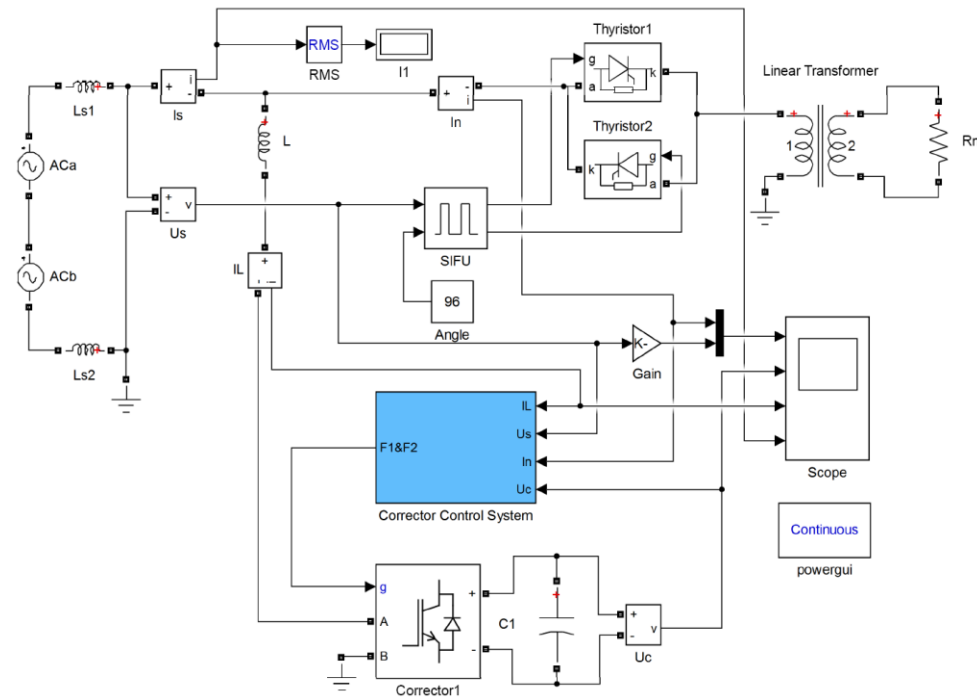


Рис. 4. Имитационная модель системы

Основные результаты моделирования показаны на рис. 5 в виде соответствующих кривых напряжений и токов.

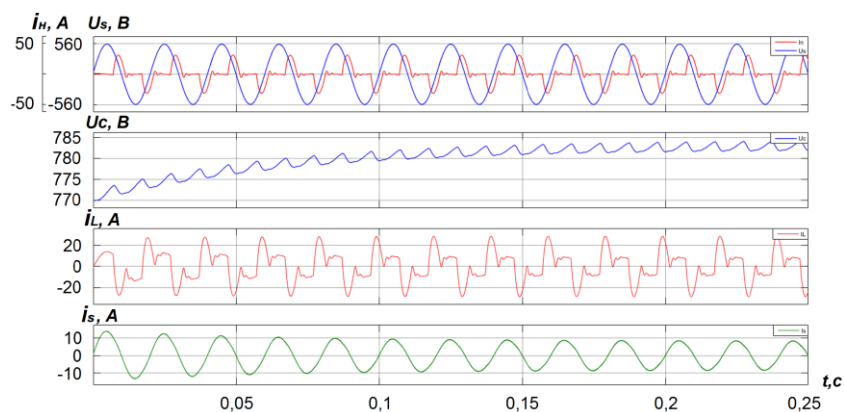


Рис. 5. Расчетные кривые токов и напряжений системы

Расчетные кривые (рис. 5) показывают, что входной ток, потребляемый из сети, имеет синусоидальный характер и совпадает по фазе с напряжением сети  $u_s$ , предложенная система коррекции тока с достаточно высокой точностью формирует ток в дросселе  $i_L$ , уменьшая при этом амплитудное значение тока до 8 А, в то время как амплитудное значение тока  $i_n$  составляет 15,7 А. Коэффициент гармоник по току  $i_s$  не достигает 4 %. Высокочастотные пульсации с частотой 20 кГц, которые присутствуют в токе дросселя корректора, значительно ослабляются фильтром радиопомех.

### Выводы

В результате проведенных исследований показано, что повышение энергетических показателей системы тиристорный регулятор тока - трансформатор питания в электротермических установках возможно при использовании активной коррекции формы тока. Применение корректора обеспечивает потребление из сети тока синусоидальной формы с коэффициентом мощности близким к единице, а амплитуда тока питания системы может быть уменьшена в 2 раза.

### Список использованных источников

1. Комаров Н.С. Качество электроэнергии в низковольтных распределительных сетях и средства его повышения / Праці Інституту електродинаміки НАН України. Електроенергетика 2000, Київ, ІЕД НАН України, 2000, с. 69-86.
2. Стяжкін В.П., Подейко П.П. Повышение качества регулирования в системе регулируемый источник тока – установка электрошлакового переплава // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – Темат. випуск. – 2011. – Ч.2. – С. 287-292.
3. Стяжкін В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна // Силова електроніка та енергоефективність. Вісник НТУ «ХПІ» – 2015. – Випуск 12 (1121). – С. 124-127.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.
5. Яров В.М. Источники питания для электрических печей сопротивления. Чебоксары, Чувашский гос. ун-т. - 1982. - 120 с.
6. Комаров М.С., Головки О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П. Енергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. - 2013. - № 6. - С. 278-286.
7. Жуйков В.Я., Миколаєць Д.А. Особливості режимів роботи ФКП. Технічна електродинаміка. – 2011. – Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – с. 24-29.

Поступила в редакцію 19 июля 2016 г.

УДК 621.317:621.313.3

**В.П. Стяжкін<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **М.С. Комаров<sup>2</sup>**, д.-р. техн. наук, **П.П. Подейко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, м. Київ-057, 03680, Україна.

<sup>2</sup>Київський національний університет технологій та дизайну,

вул. Немировича - Данченка, 2, м. Київ-011, 01601, Україна.

## Підвищення енергетичних показників системи тиристорний регулятор струму – трансформатор живлення в електротермічних установках

Визначено гармонійний склад вхідного струму системи тиристорний регулятор струму – трансформатор живлення електротермічної установки. Запропоновано схему і імітаційну модель системи з активним коректором форми струму. Бібл. 6, рис. 5.

**Ключові слова:** електротермічна установка; тиристорний регулятор струму; коефіцієнт гармонійних спотворень; трансформатор; активний коректор форми струму.

UDC 621.317:621.313.3

**V. Styazhkin**<sup>1</sup>, Ph.D., **N. Komarov**<sup>2</sup>, Dr.Sc., **P. Podeyko**<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremogy ave. 56, Kiev, 03680.

<sup>2</sup>Kiev National University of Technology and Design,  
Str. Nemirovich-Danchenko, 2, Kiev-011, 01601, Ukraine.

## Improving the energy performance of the thyristor current regulator – power supply transformer system in the electrothermal installations

*Detected input current harmonic composition of thyristor current system - transformer power electrothermal installations. The scheme and the simulation model of the system with the active corrector current form was offered evidence. Byblos. 6, Fig. 5.*

**Keywords:** *Thermal-electric installation; a thyristor power controller; harmonic distortion; transformer; active current form corrector.*

### References

1. Komarov, N. S. (2000). Power quality in low voltage distribution networks and raising money. Pratsi Institutu elektrodinamiki National Academy of Sciences of Ukraine. Elektroenergetika 2000 K IED National Academy of Sciences of Ukraine, Pp. 69-86.
2. Styazhkin, V. P., Podeyko, P. P. (2011). Improving the quality of regulation in the system of regulated current source - elektroshlakovogo remelting installation. Tehnichna elektrodinamika. Silova elektronika and energoefektivnist. Temat.vipusk. Part 2. Pp. 287-292.
3. Styazhkin, V. P., Podeyko, P. P. (2015). Optimal control of electrotechnics installation for the production of basalt superthin fiber. Silova elektronika and energoefektivnist. News NTU "KhPI". No. 12 (1121). Pp. 124-127.
4. Zhezhelenko, I. V. (1994). Higher harmonics in power supply systems pre-acceptance. Energoatomisdat, P. 272.
5. Jarov, V. M. (1982). Power sources for electric furnaces. Cheboksary, Chuvash State. Univ, P. 120 p.
6. Komarov, M. S., Golovko, O. O., Bulatov, A. U., Podeyko, P. P. (2013). Energy-saving technologies in computer classes and teaching laboratories of educational institutions. News Kiivskogo natsionalnogo universitetu tehnologiy that design. No. 6. Pp. 278-286.