

**Б. М. ЧУНАШВИЛИ, А. М. ПЕТРОСЯН, Т. Г. ГАМРЕКЕЛАШВИЛИ**

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК, СОЗДАВАЕМЫХ ТРЕХФАЗНЫМИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМИ ПЕЧАМИ**

Разработана система управления устройства ограничения гармоник высшего порядка (ГВП) напряжения, создаваемых электродуговыми печами (ЭДП). Для ограничения (подавления) ГВП в каждой фазе предусмотрено устройство, представляющее собой три комплекта фильтров, настроенных на определённую частоту режима работы ЭДП (короткое замыкание - горение дуги - пауза). Управление устройствами каждой фазы происходит посредством контроля величин проходящего в электроде тока и напряжения дугового промежутка. В процессе работы печи система управления подключает к сети необходимый на тот момент комплект фильтров устройства ограничения ГВП.

**Ключевые слова:** система управления, устройства ограничения, гармоники высшего порядка, трёхфазная сталеплавильная электродуговая печь.

**Б. М. ЧУНАШВІЛІ, А. М. ПЕТРОСЯН, Т. Г. ГАМРЕКЕЛАШВІЛІ**

### **СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ ОБМЕЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК, ЩО СТВОРЕНІ ТРИФАЗНИМИ ЕЛЕКТРОДУГОВИМИ ПЕЧАМИ**

Розроблено систему управління пристроєм обмеження гармонік вищого порядку (ГВП) напруги, створюваних электродуговыми печами (ЕДП). Для обмеження (придушення) ГВП в кожній фазі передбачено пристрій, що представляє собою три комплекти фільтрів, налаштованих на певну частоту режиму роботи ЕДП (коротке замикання-горіння дуги-пауза). Управління пристроями кожної фази відбувається по засобом контролю величин проходить в електроді струму і напруги дугового проміжку. В процесі роботи печі система управління підключає до мережі необхідний на той момент комплект фільтрів пристрої обмеження ГВП.

**Ключові слова:** система управління, пристрої обмеження, гармоніки вищого порядку, трифазна сталеплавильна электродугова піч.

**B. M. TCHUNASHVILI, A. M. PETROSYAN, T. G. GAMREKELASHVILI**

### **DEVICE CONTROL SYSTEM FOR HIGH HARMONICS CREATED BY THREE-PHASE ELECTRIC ARC FURNACES**

A control system has been developed for a device for limiting harmonics of higher order (GWP) voltage created by electric arc furnaces (EAF). To limit (suppress) the HWP in each phase, a device is provided that consists of three sets of filters tuned to a specific frequency of the EAF operation mode (short circuit-arc-pause burning). The devices of each phase are controlled by means of monitoring the values of the current passing in the electrode and the voltage of the arc gap. During the operation of the furnace, the control system connects to the network the set of filters of the hot water supply limit device necessary at that time.

**Keywords:** control system, limiting devices, higher-order harmonics, three-phase steelmaking electric arc furnace.

**Введение.** В настоящее время постоянно растут число и мощность современных электротехнологических установок и комплексов (ЭТУК), характеризующихся сложными и тяжёлыми режимами работы, создающими в сети электроснабжения (ЭС) незатухающие электромагнитные динамические процессы (ЭДП) [1]. Из общего числа ЭТУК особенно тяжёлым режимам работы отличаются трёхфазные сталеплавильные электродуговые печи (СЭДП), которые являются главным источником кондуктивных электромагнитных полей (ЭМП) большой мощности в элементах сети электроснабжения. СЭДП изготавливаются установленной мощностью до 140 МВт и они работают в эксплуатационном режиме короткого замыкания [2]. Следовательно, ток нагрузки СЭДП в нормальном режиме работы характеризуется значительным изменением формы кривой и резкими толчками, создаваемых ЭМП в сети ЭС. При этом, в общем числе ЭМП в основном доминируют провал, асимметрия и искажение синусоидальности кривой напряжения [3]. Эти ЭМП значительно ухудшают энергетические показатели и энергоэффективность как ЭТУК, так и сети электроснабжения в общем [4]. В связи с этим, ограничение ЭМП создаваемых СЭДП является гарантией энергоэффективности СЭДП и сети электроснабжения.

**Постановка задачи.** Вертикальное перемещение каждого из электродов СЭДП осуществляется независимо друг от друга механизмами, которые оснащены реверсивными электроприводами постоянного тока с независимым возбуждением с подчинённой системой управления тиристорный преобразователь-двигатель. Автоматическое управление электроприводом механизма передвижения электрода (ЭПМПЭ) основано, при этом, на изменении величины тока и напряжения между расплавленным металлом и электродом – промежутком горения дуги.

Система управления ЭПМПЭ, при подключении СЭДП к сети, одновременно приводит в движения электроды каждой из фаз. Поскольку ток, протекающий через электроды, равен нулю, а напряжение дугового промежутка максимально, ЭПМПЭ перемещает электрод вертикально вниз. Смещение каждого электрода будет продолжаться до тех пор, пока электрод не коснётся шихты. При контакте электрода с шихтой происходит короткое замыкание, в результате которого напряжение дугового промежутка уменьшится до своего минимального значения (практически до нуля), а через электрод пройдёт ток короткого замыкания. После этого, ЭПМПЭ меняет направление перемещения электрода на противоположное (вверх), которое про-

© Б. М. Чунашвили, А. М. Петросян, Т. Г. Гамрекелашвили, 2020

должается до тех пор, пока между электродом и шихтой не образуется дуга, а значения её тока и напряжения дугового промежутка не станут равными установленным значениям. По мере протекания процесса плавления в печи дуговой промежутком (длина дуги) увеличивается, а её параметры меняются. Соответственно, для поддержания длины дуги, электропривод будет перемещать электрод вниз, а значит в процессе плавления электроды находятся в постоянном движении. Следовательно, во многих случаях изменение дугового промежутка имеет резкий характер, что приводит к гашению дуги, так как электропривод не в состоянии обеспечить нужный дуговой промежуток. По скольку режимы рабочего цикла каждой фазы СЭДП «Короткое замыкание – Устойчивое горение дуги – Гашение дуги» (КЗ-ГД-П) различны по длительности, в электродах СЭДП протекают три различных по величине и форме кривой тока нагрузки. В связи с тем, что процесс плавления металла под каждым из электродов протекает неоднородно, технологический цикл КЗ-ГД-П разных электродов протекает по-разному. В результате этого, в элементах сети электроснабжения в больших объемах протекают резко изменяющиеся асимметричные токи. Кривые изменяющегося действующего значения тока, протекающего через электроды электродуговой печи, представлены на рис. 1.

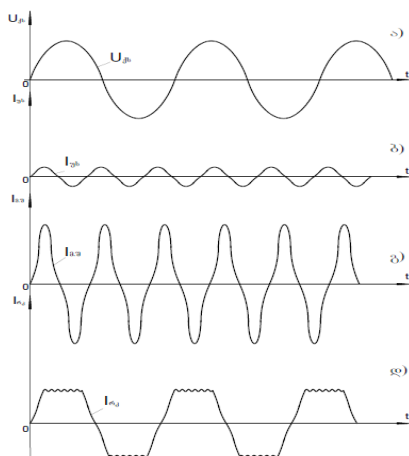


Рис. 1. Кривые тока и напряжения при разных режимах работы СЭДП:

- а- напряжения; б- тока в режиме холостого хода; в - тока в режиме возгорания дуги (режим короткого замыкания); г- тока в режиме устойчивого горения дуги

В связи с тем, что процесс плавления металла в печи протекает неравномерно, расплавленная масса находится в постоянном движении. Соответственно, постоянно меняются условия горения дуги и дуговой промежуток каждого электрода. Т.е. изменение тока СЭДП осуществляется на протяжении всего периода плавления по ранее неустановленному закону. Следовательно, в результате прохождения тока нагрузки СЭДП в элементах сети электроснабжения возникает три спектра гармоник высшего порядка напряжения (ГВП) различных параметров. При этом, значения амплитуды и частоты гармоник в каждом спектре зависят от действующих значений тока нагрузки соответ-

ствующего режима работы и степени искажения формы кривой тока. По этому, при решении вопросов ограничения ГВП необходимо применять во внимание три комплекта компенсирующих фильтров, настроенных на соответствующие частоты определённого режима цикла работы [8].

**Материалы исследования.** Режимы работы СЭДП были исследованы на физической модели нагрузок в лаборатории электромагнитной совместимости департамента Технологий электропотребления Грузинского технического университета.

На рис. 1 показаны кривые тока и напряжения одной фазы рабочего цикла КЗ-ГД-П электродуговой печи. Из рисунка видно, что в режиме холостого хода, значение амплитуды тока мало, а форма кривой слегка искажена, но близка к синусоидальной. В процессе зажигания электрической дуги (в рабочем режиме КЗ) амплитуда тока максимальна, а форма кривой искажена. Значение амплитуды тока в установившемся режиме горения дуги значительно меньше, чем при режиме КЗ, а форма кривой тока сильно искажена. Кроме того, значение амплитуды и форма кривой тока нагрузки каждой фазы зависят от режима работы.

Вместе с этим, экспериментально были получены спектры высших гармоник, возникших при всех режимах работы цикла (рис. 2, 3, 4). Из полученных результатов видно, что на протяжении всего рабочего цикла СЭДП в элементах сети электроснабжения производит и распространяет три спектра ГВП с взаимно отличающимися параметрами, обусловленных токами режимов работы КЗ-ГД-П. Кроме этого, чередование спектров в каждой фазе не одновременно.

В связи с этим, для эффективного ограничения гармоник, необходимо использовать набор фильтров для компенсации разных ГВП спектра в каждой фазе. При этом, для понижения реактивной нагрузки фильтров и исключения резонансного явления в сети электроснабжения, в каждом режиме работы цикла, необходимо к сети подключить только один комплект фильтров настроенных на частотах ГВП соответствующего режима работы фазы. Также, в связи с тем, что токи в электродах изменяются не одновременно, комплектами компенсирующих фильтров каждой фазы необходимо управлять непосредственно в функции тока и напряжения дугового промежутка собственного электрода.

**Целью работы** является выбор устройства для ограничения ГВП, создаваемых СЭДП, а также разработка системы управления устройством ограничения (УО) ГВП, реализующей независимое управление комплектов фильтрации каждой фазы в функции режимов цикла работы КЗ-ГД-П СЭДП.

**Изложение основного материала.** Для реализации поставленной цели – обоснованного выше принципа, в работе разработана система управления УО ГВП напряжения создаваемого трёхфазными СЭДП. Функциональная схема системы представлена на рисунке 5.

Принцип работы системы управления заключается в следующем.

При включении СЭДП к сети (режим холостого хода) ток на электродах равен нулю, а напряжение дугового промежутка является максимальным. При данном режиме системы управления  $MS_A$ ,  $MS_B$ ,  $MS_C$  бесконтактными выключателями (БВ) подключают к сети секции фильтров ГВП для режима холостого хода (паузы)  $F_{A3}$ ,  $F_{B3}$ ,  $F_{C3}$  по средством БВ  $CA_3$ ,  $CB_3$ ,  $CC_3$ .

То есть, к сети будут подключены только секции фильтров, предусмотренных для ГВП, преобладающих при режиме холостого хода. В результате этого зашунтируются соответствующие ГВП и значение амплитуды распространённые в элементы сети электропитания будут ограничены.

При коротком замыкании, в виду повышения тока в электродах до максимального значения и понижения напряжения до минимального, отключаются секции  $F_{A3}$ ,  $F_{B3}$ ,  $F_{C3}$  и подключаются только секции фильтров  $F_{A2}$ ,  $F_{B2}$  или  $F_{C2}$  предусмотренных для ограничения ГВП в режиме КЗ в соответствующей фазе. В результате чего будет реализована компенсация ГВП появляющийся в режиме КЗ. Вскоре после окончания режима короткого замыкания и горения дуги секции  $F_{A2}$ ,  $F_{B2}$  или  $F_{C2}$  будут отключены и вместо них к сети будут подключены только фильтры  $F_{A1}$ ,  $F_{B1}$  или  $F_{C1}$  в соответствующих фазах, которые обеспечат компенсацию ГВП в режиме установившегося горения дуги.

При прекращении, в одной из фаз, горения дуги в электроде прекратится протекание тока. В результате будет отключена секция фильтра режима горения дуги и к сети автоматически подключится секция режима холостого хода.

Так же следует отметить, что секция фильтра для каждого режима оснащена двухчастотным фильтром ГВП, соответствующая параметрам режима. Таким образом, разработанная система управления УО ГВП, создаваемых трёхфазными СЭДП, секциям фильтров управляет в функции режимов работы цикла.

**Выводы.** На основе изучения принципа и режимов работы трёхфазных СЭДП установлено, что в каждой фазе сети СЭДП вырабатывают три постоянно меняющихся спектра ГВП для режимов холостого хода, короткого замыкания и устойчивого горения дуги.

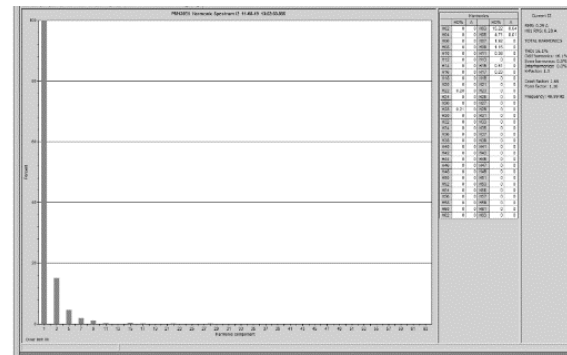


Рис. 2. Спектр высших гармоник в режиме паузы.

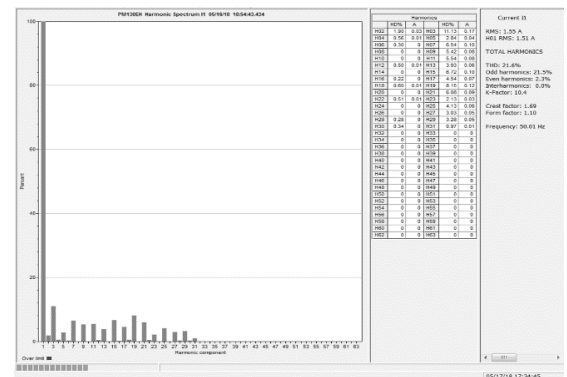


Рис. 3. Спектр высших гармоник в режиме КЗ.

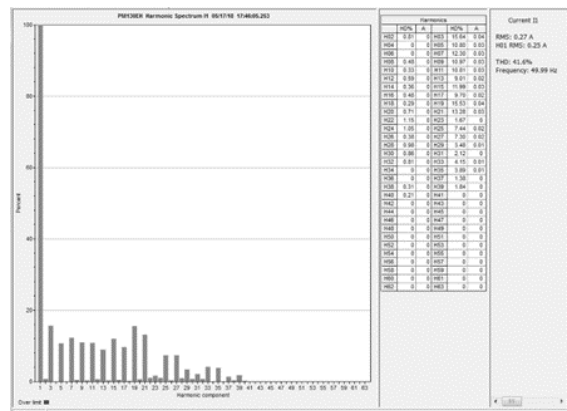


Рис. 4. Спектр высших гармоник в режиме устойчивого горения дуги.

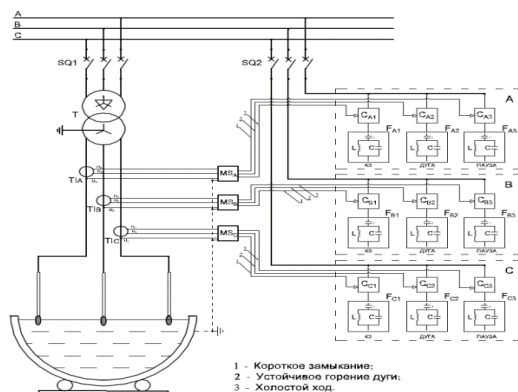


Рис. 5. Блок-схема системы управления устройства ограничения ГВП создаваемых трёхфазными СЭДП. Т-печной трансформатор;  $MS_A$ ,  $MS_B$ ,  $MS_C$  – системы управления фильтрами;  $F_{A1}$ ,  $F_{A2}$ ,  $F_{A3}$ ,  $F_{B1}$ ,  $F_{B2}$ ,  $F_{B3}$ ,  $F_{C1}$ ,  $F_{C2}$ ,  $F_{C3}$  – секции фильтров ГВП для режимов холостого хода, короткого замыкания и устойчивого горения дуги;  $CA_1$ ,  $CA_2$ ,  $CA_3$ ,  $CB_1$ ,  $CB_2$ ,  $CB_3$ ,  $CC_1$ ,  $CC_2$ ,  $CC_3$  – системы управления фильтров ГВП соответствующих фаз и режимов.

Поскольку чередование спектров в каждой фазе протекает не одновременно, в сети распространяющиеся гармоники являются асимметричными и имеют динамический характер.

Обосновано, что ограничения гармоник высокого порядка, генерируемых электродуговыми установками и распространяемых каждой их фазой в сеть, должно производиться независимо.

Вместе с этим, для каждой фазы необходимо выбрать набор компенсирующих фильтров, настроенных на три разные частоты, соответствующих режиму работы цикла. При этом, каждый фильтр входящий в комплект, должен подключаться к сети только при предусмотренном режиме работы.

Разработана система управления для устройств ограничения гармоник высшего порядка, производимых электродуговыми установками, управление компенсационных устройств каждой фазы осуществляет в функциях тока нагрузки и напряжения дугевого промежутка (т.е. в функции режимов цикла работы КЗ-ГД-П СЭДП).

Практическая реализация предоставленной в работе системы управления устройством ограничения ГВП СЭДП позволит разгрузить сети электроснабжения на 50÷60% от ГВП, что в свою очередь повысит энергетические показатели сети и её энергоэффективность в целом.

#### Список литературы

1. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий*. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
2. Вагин Г.Я., Севостьянов А.А. *Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник для вузов*. Нижний Новгород: НГТУ, 2004. 214с.
3. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. *Управление качеством электроэнергии*. Москва: МЭИ, 2006. 320 с.
4. *Руководство по устройству электроустановок: технические решения Schneider Electric*. Москва: Schneider Electric Publisher, 2007, 394 с.
5. Шеховцев В.П. *Электрическое и электромеханическое оборудование: учебник*. Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2004. 407 с.
6. Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Гамреклашвили Т.Г., Харебава Д.Н. Исследование симметричности гармоник высшего порядка, возникающих в сети при работе электропотребителей. *Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития: Сб. трудов IV Международ. научн. конф. 2015*. Кутаиси: Государственный университет Акакия Церетели, 2016. С. 5 – 8.
7. Чунашвили Б.М., Шавелашвили Г.В., Бежанишвили Дж.Г., Гамреклашвили Т.Г. Оценка влияния гармоник высшего порядка на электропотребителей. *Энергия*. Тбилиси: Грузинская академия энергетики. 2017, №3 (80). С. 22 – 27.

8. Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Гамреклашвили Т.Г., Тугуши М.А. Системы управления ограничивающих фильтров высших гармоник напряжения электротехнологических установок с управляемыми выпрямителями. *Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития: Сб. трудов VI Международ. научн. конф. 2018*. Кутаиси: Государственный университет Акакия Церетели, 2018. С. 58 – 61.

#### References (transliterated)

1. ZHezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatij* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moskva: Energoatomizdat, 2000. 331 p.
2. Vagin G.YA., Sevost'yanov A.A. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike: uchebник dlya vuzov* [Electromagnetic compatibility in the electric power industry: university textbook]. Nizhniy Novgorod: NGTU, 2004. 214 p.
3. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., SHamonov R.G. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Power quality management]. Moskva: MEI, 2006. 320 p.
4. *Rukovodstvo po ustrojstvu elektroustanovok: tekhnicheskie resheniya schneider electric* [Electrical installation guide: Schneider Electric technical solutions]. Moskva: Schneider Electric Publisher, 2007, 394 p.
5. SHekhovtsev V.P. *Elektricheskoe i elektromekhanicheskoe oborudovanie: uchebник* [Electrical and electromechanical equipment: a textbook]. Moskva: FORUM; INFRA-M, 2004. 407 p.
6. CHunashvili B.M., Petrosyan A.M., Gamrekelashvili T.G., Harebava D.N. Issledovanie simmetrichnosti garmonik vysshego poriyadka, voznikayushchih v seti pri rabote elektropotrebitel'ej [The study of the symmetry of higher order harmonics arising in the network during the operation of electrical consumers]. *Energetika: regional'nye problemy i perspektivy razvitiya: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauchn. konf. 2015 r., Kutaisi* [Energy: regional problems and development prospects: Collection of works of the IV International Scientific Conference]. Kutaisi: Gosudarstvennyy universitet Akakiya Cereteli, 2016. pp. 5 – 8.
7. CHunashvili B.M., SHavelashvili G.V., Bezhanishvili Dzh.G., Gamrekelashvili T.G. *Ocenka vliyaniya garmonik vysshego poriyadka na elektropotrebitel'ej* [Assessment of the influence of higher order harmonics on electrical consumers]. *Energiya* [Energy]. Tbilisi: Gruzinskaya akademiya energetiki. 2017, №3 (80). pp. 22 – 27.
8. CHunashvili B.M., Petrosyan A.M., Gamrekelashvili T.G., Tugushi M.A. Sistemy upravleniya ogranichivayushchih fil'trov vysshih garmonik napryazheniya elektrotekhnologicheskikh ustanovok s upravlyаемymi vypryamitel'yami [Control systems for limiting filters of higher voltage harmonics of electrotechnological installations with controlled rectifiers]. *Energetika: regional'nye problemy i perspektivy razvitiya: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauchn. konf. 2018 r., Kutaisi* [Energy: regional problems and development prospects: Collection of works of the VI International Scientific Conference]. Kutaisi: Gosudarstvennyy universitet Akakiya Cereteli, 2018. pp. 58 – 61.

Поступила 10.12.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About of the Authors

**Чунашвілі Бадур Михайлович (Чунашвили Бадур Михайлович, Badur Tchunashvili)** - доктор технічних наук, професор, Грузинський технічний університет, начальник департаменту технології електроспоживання; м. Тбілісі, Грузія; e-mail: btchunashvili@yahoo.com

**Петросян Олександр Михайлович (Петросян Олександр Михайлович, Petrosyan Alexander)** - академічний доктор, Грузинський технічний університет, асоційований професор; м. Тбілісі, Грузія; e-mail: a.petrosyan@gtu.ge

**Гамреклашвілі Теїмураз Гівієвіч (Гамреклашвили Теїмураз Гивиевич, Teimuraz Gamrekelashvili)** – академічний доктор, Грузинський технічний університет, асистент професора; м. Тбілісі, Грузія; e-mail: temo.gamrekelashvili@gmail.com