

ВЕНТИЛЬНО-ЕМКОСТНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ УСТАНОВКИ

В данной статье рассмотрено трехфазное емкостное стабилизирующее выходной ток устройство, которое предназначено для питания через нерегулируемый выпрямитель электродуговой установки. Произведено математическое описание электрической системы и осуществлено построение векторных диаграмм стабилизатора, характеризующих изменение положения векторов выходных фазных напряжений. Приведены выражения, позволяющие рассчитать выходное напряжение и выходной ток при изменении сопротивления нагрузки.

Ключевые слова: стабилизация тока, векторная диаграмма, емкостное устройство, выпрямитель, вольт-амперная характеристика, электродуговая установка.

ВВЕДЕНИЕ

В электродуговых установках необходимо обеспечивать стабильное горение электрической дуги между электродами, питающимися от источника постоянного напряжения, что достигается за счет стабилизации тока дуги. Электродуговая установка может входить в состав электроплазменной установки [1-7]. В такой установке требования к стабильному горению дуги при внешних возмущающих воздействиях возрастают [8-10].

Для получения стабилизированного выходного тока выпрямителя, питающегося от трехфазной промышленной сети, можно использовать регулируемые выпрямители с замкнутой системой управления выходным током, но наиболее простым решением является использование параметрического резонансного индуктивно-емкостного стабилизатора тока (рис. 1, а), который может быть включен между питающей сетью и нерегулируемым выпрямителем [11]. Векторная диаграмма, поясняющая его работу, показана на рис. 1, б. Однако для этой схемы режим холостого хода является аварийным, что ограничивает ее применение. Следует отметить, что резонансный стабилизатор, имеющий фиксированное сопротивление реактивных элементов, не позволяет регулировать ток в выпрямленной цепи. Поэтому в большинстве случаев для питания электродуговых установок с обеспечением стабилизации тока дуги применяют источники питания с «падающей» вольт-амперной характеристикой [4, 5].

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ

«Падающей» вольт-амперной характеристикой, благоприятной для стабилизации тока, обладает трехфазное емкостное токоограничивающее устройство, выполненное из шести конденсаторов одинаковой емкости C , соединенных в кольцо (рис. 2, а). Три вывода, между которыми включены по два конденсатора, подключены к питающей сети, имеющей линейное напряжение U_L , а к выводам, выполненным между этими двумя конденсаторами, подключена нагрузка. Выходное напряжение определяется величиной и характером сопротивления нагрузки.

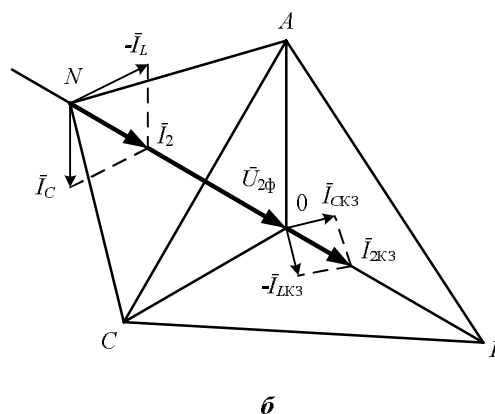
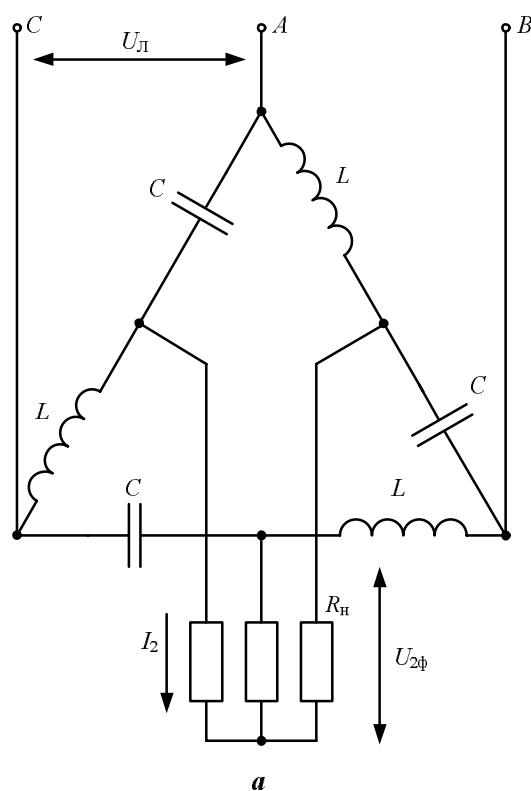


Рис. 1. Трехфазная индуктивно-емкостная стабилизация тока нагрузки: а – принципиальная схема стабилизатора; б – векторная диаграмма работы стабилизатора

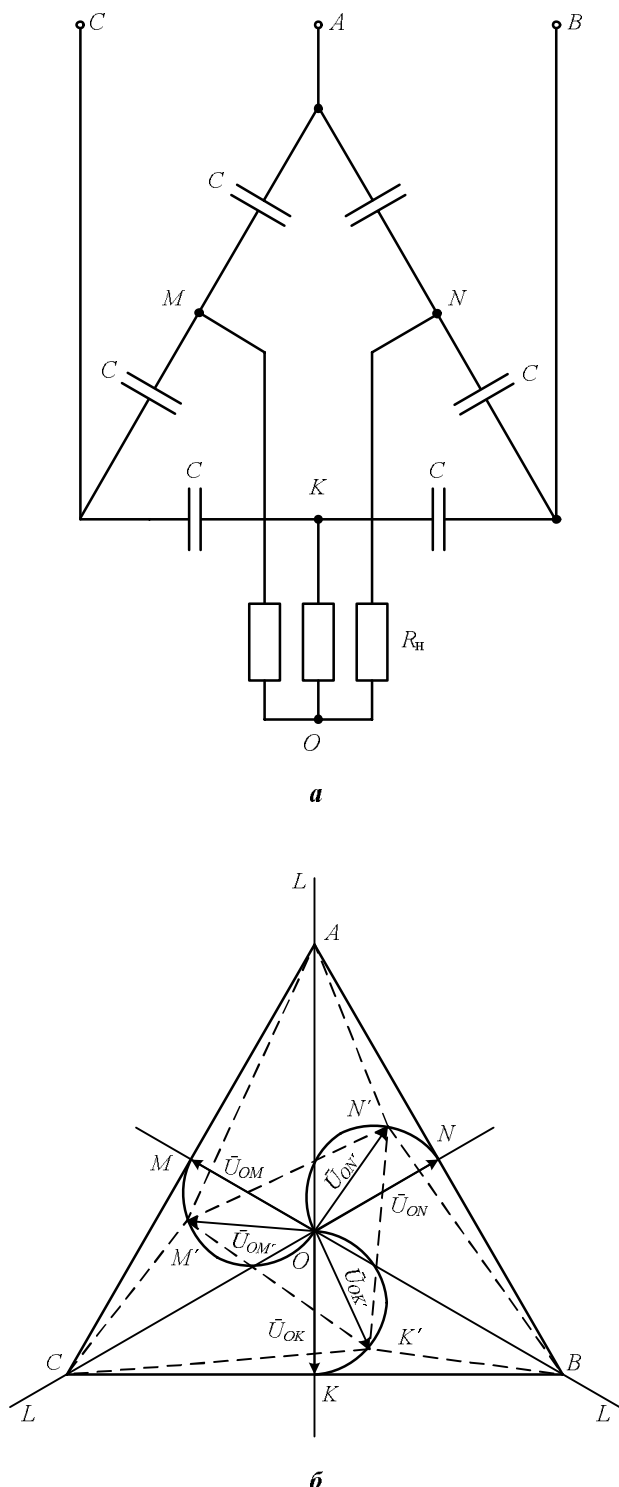


Рис. 2. Трехфазное емкостное токоограничивающее устройство: а – принципиальная схема с активной нагрузкой; б – векторная диаграмма при различном характере нагрузки

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Векторные диаграммы системы при симметричной активной и емкостной нагрузке показаны на рис. 2, б.

Выходные фазные напряжения определяются по формулам:

$$\bar{U}_{ON} = \bar{U}_{OA} + \bar{U}_{AN}; \quad (1)$$

$$\bar{U}_{ON} = \bar{U}_{OB} + \bar{U}_{BN}; \quad (2)$$

$$\bar{U}_{OK} = \bar{U}_{OB} + \bar{U}_{BK}; \quad (3)$$

$$\bar{U}_{OK} = \bar{U}_{OC} + \bar{U}_{CK}; \quad (4)$$

$$\bar{U}_{OM} = \bar{U}_{OA} + \bar{U}_{AM}; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{OM} = \bar{U}_{OC} + \bar{U}_{CM}. \quad (6)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа запишем:

$$\bar{I}_{AN} + \bar{I}_{BN} + \bar{I}_{ON} = 0; \quad (7)$$

$$\bar{I}_{BK} + \bar{I}_{CK} + \bar{I}_{OK} = 0; \quad (8)$$

$$\bar{I}_{CM} + \bar{I}_{AM} + \bar{I}_{OM} = 0. \quad (9)$$

Преобразовав выражения (7) – (9), учитывая, что проводимость конденсаторов $Y_C = j\omega C$, получим:

$$\bar{U}_{ON}Y_H = -\bar{U}_{AN}Y_C - \bar{U}_{BN}Y_C; \quad (10)$$

$$\bar{U}_{OK}Y_H = -\bar{U}_{BK}Y_C - \bar{U}_{CK}Y_C; \quad (11)$$

$$\bar{U}_{OM}Y_H = -\bar{U}_{CM}Y_C - \bar{U}_{BM}Y_C. \quad (12)$$

После совместного решения уравнений (1)–(6) и (10)–(12) получим:

$$\bar{U}_{ON} = \frac{(\bar{U}_{OA} + \bar{U}_{OB})}{(2 + Y_N/Y_C)} = -\bar{U}_{OC} \left(2 + \frac{Y_N}{Y_C} \right); \quad (13)$$

$$\bar{U}_{OK} = \frac{(\bar{U}_{OB} + \bar{U}_{OC})}{(2 + Y_N/Y_C)} = -\bar{U}_{OA} \left(2 + \frac{Y_N}{Y_C} \right); \quad (14)$$

$$\bar{U}_{OM} = \frac{(\bar{U}_{OC} + \bar{U}_{OA})}{(2 + Y_N/Y_C)} = -\bar{U}_{OB} \left(2 + \frac{Y_N}{Y_C} \right). \quad (15)$$

Будем считать нагрузку активной с проводимостью $Y_H = 1/Z_H = 1/R_H$.

Представим комплексные выражения (13)–(15) в показательной форме:

$$\bar{U}_{ON} = \frac{-\bar{U}_{OC} R_H \omega C e^{j \arctg \left(\frac{1}{2} R_H \omega C \right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C)^2 + 1}}; \quad (16)$$

$$\bar{U}_{OK} = \frac{-\bar{U}_{OA} R_H \omega C e^{j \arctg \left(\frac{1}{2} R_H \omega C \right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C)^2 + 1}}; \quad (17)$$

$$\bar{U}_{OM} = \frac{-\bar{U}_{OB} R_H \omega C e^{j \arctg \left(\frac{1}{2} R_H \omega C \right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C)^2 + 1}}. \quad (18)$$

Соотношение между модулями фазных напряжений на нагрузке и фазных напряжений питающей сети будет

$$U_H = \frac{U_\Phi R_H \omega C e^{j \arctg \left(\frac{1}{2} R_H \omega C \right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C)^2 + 1}}. \quad (19)$$

Анализ выражений (16) – (18) и векторной диаграммы (рис. 2, б) показывает следующие особенности данной системы.

При изменении активного сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности сопровождается изменением модуля фазного напряжения на выходе емкостного устройства от нуля до половины фазного напряжения сети. Место положения окончания вектора фазного напряжения, подведенного к активному сопротивлению нагрузки при ее изменении в диапазоне $0 \leq R_H \leq \infty$ на фазовой плоскости представляет собой полуокружность.

В случае емкостного характера нагрузки $Y_H = j\omega C_H$ модули векторов фазных напряжений нагрузки можно рассчитать, используя выражения (13) – (15). На векторной диаграмме точки N , K и M находятся на прямых линиях, построенных от точки O перпендикулярно к векторам трех линейных напряжений. Векторы фазных напряжений нагрузки направлены: вектор \vec{U}_{ON} – противоположно вектору \vec{U}_{OC} , вектор \vec{U}_{OK} – противоположно вектору \vec{U}_{OA} , вектор \vec{U}_{OM} – противоположно вектору \vec{U}_{OB} . При изменении проводимости емкостной нагрузки от нуля до бесконечности модуль фазного напряжения нагрузки изменится от нуля до половины фазного напряжения сети.

При индуктивном характере нагрузки $Y_H = 1/j\omega L_H$ в схеме возможны резонансные явления. На частоте питающей сети резонанс возникает при значении проводимости нагрузки $Y_{HP} = 1/j\omega L_{HP}$.

При изменении проводимости нагрузки от нуля до резонансного значения модуль фазного напряжения нагрузки изменится от половины фазного напряжения сети до бесконечности. Векторы фазных напряжений нагрузки направлены: вектор \vec{U}_{ON} – встречно вектору \vec{U}_{OC} , вектор \vec{U}_{OK} – встречно вектору \vec{U}_{OA} , вектор \vec{U}_{OM} – встречно вектору \vec{U}_{OB} . При изменении проводимости нагрузки от резонансного значения до бесконечности модуль фазного напряжения нагрузки изменится от бесконечности до нуля. Векторы фазных напряжений направлены: \vec{U}_{ON} – согласно вектору \vec{U}_{OC} , вектор \vec{U}_{OK} – согласно вектору \vec{U}_{OA} , вектор \vec{U}_{OM} – согласно вектору \vec{U}_{OB} .

Полученные зависимости показывают, что изменение выходного активного сопротивления R_H сопровождается стабилизацией тока в нагрузке, что справедливо также при емкостном характере нагрузки. При индуктивном характере нагрузки возможно наступление резонанса при условии $Y_H = 2Y_C$.

К выходу трехфазного емкостного токоограничивающего устройства может быть подключен трехфазный мостовой диодный выпрямитель (рис. 3, а), к выходу которого через сглаживающий дроссель подключена активная нагрузка, в качестве которой могут быть нагревательные элементы или электрическая дуга. Сопротивление дуги может меняться в процессе горения с разным темпом, что будет сопровождаться изменением выпрямленного тока. В этом случае в обмотке сглаживающего дросселя будет наводиться ЭДС самоиндукции, величина которой зависит от темпа изменения тока.

Характер нагрузки для емкостного устройства при изменении выходного тока можно считать – активным R_H с ЭДС самоиндукции сглаживающего дросселя. Поскольку выпрямитель нерегулируемый, можно полагать, что вектор эквивалентной фазной ЭДС самоиндукции \vec{E} , приведенной к цепи переменного тока, направлен противоположно вектору фазного тока на входе нерегулируемого выпрямителя.

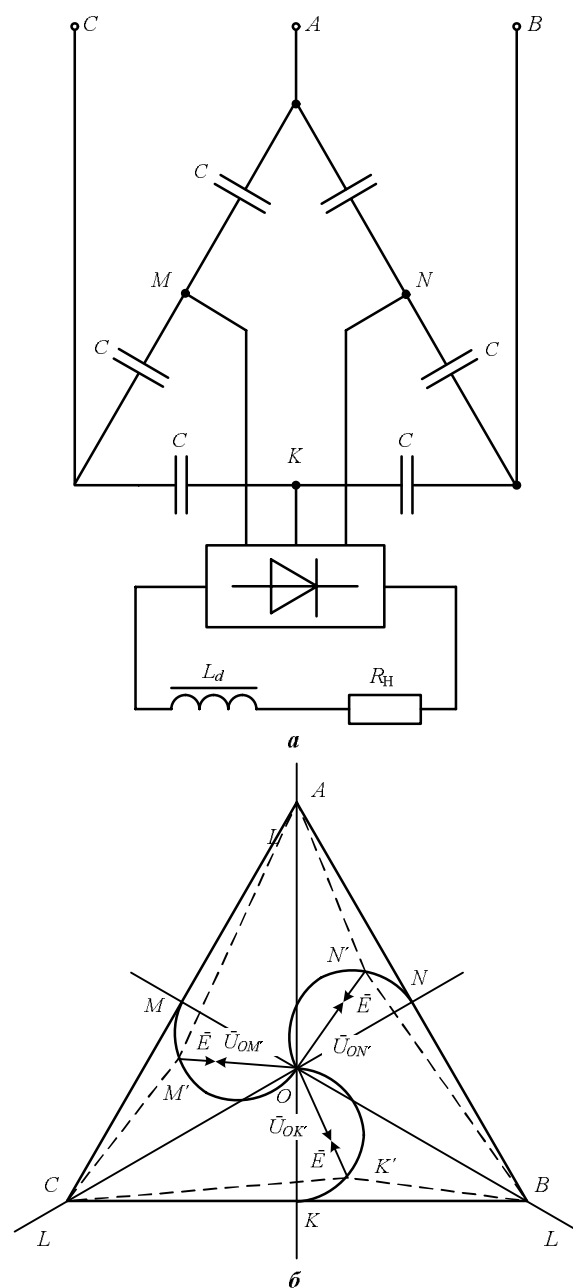


Рис. 3. Трехфазное емкостное токоограничивающее устройство с выпрямителем и реактором:
а – принципиальная схема с активной нагрузкой;
б – векторная диаграмма при работе на активную нагрузку с ЭДС самоиндукции

Уравнения баланса напряжений имеют вид:

$$(\bar{U}_{ON} - \bar{E})Y_H = -\bar{U}_{AN}Y_C - \bar{U}_{BN}Y_C; \quad (20)$$

$$(\bar{U}_{OK} - \bar{E})Y_H = -\bar{U}_{BK}Y_C - \bar{U}_{CK}Y_C; \quad (21)$$

$$(\bar{U}_{OM} - \bar{E})Y_H = -\bar{U}_{CM}Y_C - \bar{U}_{AM}Y_C, \quad (22)$$

где \vec{E} – вектор приведенной к цепи переменного тока противоЭДС самоиндукции сглаживающего дросселя.

Уравнения (20) – (22) можно представить в виде:

$$\bar{U}_{ON}(Y_H + 2Y_C) = \bar{E}Y_H - \bar{U}_{OC}Y_C; \quad (23)$$

$$\bar{U}_{OK}(Y_H + 2Y_C) = \bar{E}Y_H - \bar{U}_{OA}Y_C; \quad (24)$$

$$\bar{U}_{OM}(Y_H + 2Y_C) = \bar{E}Y_H - \bar{U}_{OB}Y_C. \quad (25)$$

Уравнения (23) – (25), преобразованные к показательной форме, имеют вид:

$$\bar{U}_{ON'} = \frac{-\frac{\bar{U}_{OC}}{2} + \bar{E} \frac{j}{(2R_H \omega C)}}{1 + \frac{j}{2R_H \omega C}}; \quad (26)$$

$$\bar{U}_{OK'} = \frac{-\frac{\bar{U}_{OA}}{2} + \bar{E} \frac{j}{(2R_H \omega C)}}{1 + \frac{j}{2R_H \omega C}}; \quad (27)$$

$$\bar{U}_{OM'} = \frac{-\frac{\bar{U}_{OB}}{2} + \bar{E} \frac{j}{(2R_H \omega C)}}{1 + \frac{j}{2R_H \omega C}}. \quad (28)$$

Векторная диаграмма, соответствующая уравнениям (23) – (28), показана на **рис. 3, б**. Величина модуля фазного тока определяется как

$$I = (U_H - E) / R_H.$$

На **рис. 4** построена в относительных единицах вольт-амперная характеристика емкостного устройства при работе на активную нагрузку.

$$u^* = U_H / U_{H \max};$$

$$i^* = I / U_{H \max} / R_H.$$

Выпрямленный ток связан с входным фазным током выпрямителя соотношением

$$I_d = k_I I,$$

где $k_I = \pi / \sqrt{6}$ – коэффициент, связывающий действующее значение входного тока мостового выпрямителя с током в выпрямленной цепи.

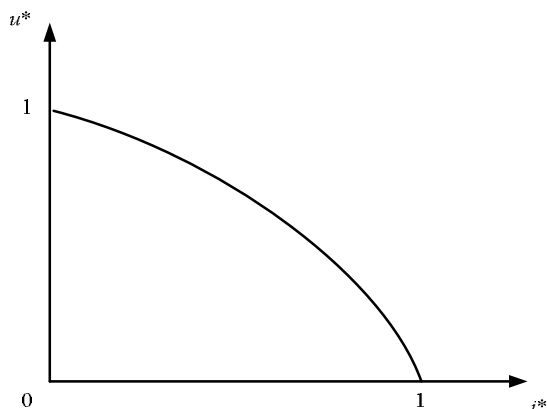


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика емкостного устройства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вольт-амперная характеристика емкостного устройства является «падающей», она благоприятна для использования в электродуговых установках. В отличие от резонансного индуктивно-емкостного устройства [11], в емкостном устройстве допустимо отключение нагрузки и работа в режиме холостого хода. Кроме того, конденсаторы являются дополнительным источником реактивной мощности для питающей сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта № 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Переработка техногенных отходов в электродуговой плазме / А.С. Анышаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев // Альтернативная энергетика и экология. 2008. №9(65). С. 131–135.
2. Плазмотермическая переработка твердых отходов / В.П. Лукашов, С.П. Ващенко и др. // Экология и промышленность России. 2005. № 11. С. 4–9.
3. Чередниченко В.С., Анышаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.
4. Anshakov A.S., Cherednichenko V.S., Urbakh E.K. et al. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma / Progress in Plasma Processing of Materials. Begell House, Inc., 1999. P. 737–743.
5. А.с. СССР № 599732. Электродуговой нагреватель газа постоянного тока / Жуков М.Ф., Лыткин А.Я., Худяков Г.Н., Анышаков А.С. Опубл. 07.09.1982. Бюл. № 33.
6. Патент на полезную модель №188618. Электродуговой плазмотрон / В.Н. Мещеряков А.М. Евсеев, В.В. Пиклов, В.Б. Чупров, В.А. Конев. Опубл. 18.04.2019. Бюл. №11.
7. Пат. 2465748 РФ. Электродуговой плазмотрон / Мchedaлов С.Г. Опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
8. Доманов В.И. Влияние случайных факторов на работу системы регулирования тока дуговой плавильной установки // Приводная техника. 2010. №6. С. 16–19.
9. Разработка и исследование систем управления током электрической дуги / В.И. Доманов, А.В. Доманов, К.Е. Карпунин и др. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2018. 242 с.
10. Петров С. Методы регулирования и стабилизации тока нагрузки сварочных инверторов // Силовая электроника. 2008. №4. С. 67–73.
11. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

Поступила в редакцию 23 мая 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CAPACITIVE-SWITCHED SYSTEM OF CURRENT STABILIZING FOR ELECTRIC ARC PLANT

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Alexei M. Evseev

Teaching Assistant, Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: alexevs94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-7383>.

Olga V. Danilova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

Denis V. Lastochkin

Postgraduate Student, Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

The article is concerned with a three-phase capacitive stabilizing output current device that is designed to be powered through an unregulated electric arc rectifier. The research group offered a mathematical description of the electrical system, constructed a vector diagram of a stabilizer characterizing the change in the position of the output phase voltage vectors and gave an expression to calculate the output voltage and output current when the load resistance changes.

Keywords: current stabilization, vector diagram, capacitive device, rectifier, current-voltage characteristic, electric arc plant.

REFERENCES

1. Anshakov A.S., Urbakh E.K., Urbakh A.E., Faleev V.A. Processing of industrial wastes in electric-arc plasma. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2008, no. 9(65), pp. 131–135. (In Russian).
2. Lukashov V.P., Vashchenko S.P. and etc. Plasma-Thermal Processing of Solid Waste Products. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2005, no. 11, pp. 4-9. (In Russian).
3. Cherednichenko V.S., Anshakov A.S., Kuzmin M.G. *Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Plasma Electro technological Plants]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, 600 p. (In Russian).
4. Anshakov A.S., Cherednichenko V.S., Urbakh E.K. et al. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma. *Progress in Plasma Processing of Materials*, Begell House, Inc., 1999, pp. 737-743.
5. Zhukov M.F., Lytkin A.Ya., Khudyakov G.N., Anshakov A.S. *Elektrodugovoy nagrevatel gaza postoyannogo toka* [DC electric arc gas heater]. Certificate of authorship USSR, no. 599732, 1982.
6. Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Pikalov V.V., Chuprov V.B., Konev V.A. *Elektrodugovoy plazmotron* [Electric arc plasmatron]. Patent RF, no. 188618, 2019.
7. Mchedalov S.G. *Elektrodugovoy plazmotron* [Electric arc plasmatron]. Patent RF, no. 2465748, 2012.
8. Domanov V.I. Influence of random factors on the operation of the current control system of an arc smelter. *Privodnaya tekhnika* [Drive technologies], 2019, no. 6, pp. 16-19. (In Russian)
9. Domanov V.I., Domanov A.V., Karpuchin K.E. and etc. *Razrabotka i issledovanie sistem upravleniya tokom ehlektricheskoy dugi* [Development and research of electric arc current control systems]. Ulyanovsk: UISTU Publ., 2018, 242 p. (In Russian)
10. Petrov S. Methods of regulation and stabilization of the load current of welding inverters. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2008, no. 18, pp. 67-73. (In Russian)
11. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2001. 704 p. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Вентильно-емкостная система стабилизации тока для электродуговой установки // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 63-67. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-63-67)

Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Danilova O.V., Lastochkin D.V. Capacitive-Switched System of Current Stabilizing for Electric Arc Plant. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 63-67. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-63-67)