

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев**

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор А. Н. Шпиганович*

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь; метод Гаусса; экономическая эффективность; электрическая дуга; электрическое поле; электрод.

**Аннотация:** Рассмотрен способ управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи. Предложен актуальный программно-аппаратный комплекс по управлению электрическим режимом электрической установки. Сделаны выводы и даны рекомендации по эффективному управлению электрическим режимом.

Металлургические предприятия современной России являются важным звеном в экономическом развитии страны, так как их продукция используется в дальнейшем ресурсо- и товарообороте. Для повышения конкурентоспособности отечественной металлосодержащей продукции и непосредственно металла необходимо максимально снизить производственные издержки. Множество металлургических предприятий унаследовало с советских времен электросталеплавильный способ получения продукции с использованием дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Данные печные агрегаты являются мощными потребителями электроэнергии, где протекают быстрые процессы, имеющие нелинейный вид, и негативно влияют на энергосистему [1], что в итоге приводит к повышению удельных затрат на единицу продукции, а также на амортизацию прилежащего оборудования и смежных компонентов [2]. На современном этапе электросталеплавильного способа получения продукции используется множество современных решений: эффективные расходуемые электроды, средства по снижению негативных воздействий в энергосистеме на основе активных

---

Зацепина Виолетта Иосифовна – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования; Зацепин Евгений Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования, e-mail: ezats@mail.ru; Шачнев Олег Ярославович – аспирант кафедры электрооборудования, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

фильтров, компьютеризованное управление процессами расплавки металла и другие вспомогательные средства [3].

Технологически нагрев и расплав металла в ДСП осуществляется за счет мощных электрических дуг, горящих между тремя концами электродов и металлом в печи. Именно они обуславливают резкопеременный характер нагрузки [1]. Электрическая дуга образуется между двумя электродами: катодом и анодом с соответствующими областями, где между ними возникает столб дуги и окружающий его факел. Электрическая дуга может загореться, если напряжение между электродами будет выше напряжения зажигания дуги, то есть  $e > U_з$ , которое в свою очередь зависит от напряжения устойчивого горения дуги  $U_д$  и паров свариваемого металла, которые обладают ионизационными потенциалами  $\phi_{и}$ .

Таким образом, необходимо быстро реагировать на эксплуатационные короткие замыкания и обрывы дуги, возникающие на стадии расплавления, затем восстановить нормальный электрический режим в кратчайшие сроки и ограничить до допустимых пределов токов эксплуатационных замыканий – то есть обеспечить гибкость управления мощностью, вводимой в печь. На данный момент существует два метода регулирования электрического регулирования режима ДСП. Первый – изменение подводимого напряжения за счет грубой регулировки режима переключением ступеней вторичного напряжения трансформатора и второй – с помощью механизма перемещения электродов. Учитывая вышесказанное и имея исходные параметры, можно в режиме реального времени смоделировать сложный технологический процесс расплавки шихты, с авторегулировкой привода автоматических регуляторов мощности (АРМ) и, при необходимости, переключением ступеней вторичного напряжения трансформатора. В результате оптимизации регулирования электрического режима печи, снижаются энергетические и временные затраты, необходимые для эффективной работы технологического объекта.

Рассмотрим программу, предназначенную для моделирования электрического режима в дуговой сталеплавильной печи и для дальнейшего получения численного решения задачи в графическом формате. Данная программа позволяет задавать параметры печи с графической интерпретацией геометрических размеров и положения электродов в печи, в зависимости от введенных или полученных данных. На рисунке 1 отобразим вступительную часть данной программы.

Основным принципом исполнения рассматриваемой программы является разбиение исходной рабочей области методом сеток. На данном этапе задается число рассчитываемых слоев (ось  $Z$ ), а также разбиваемый каждый слой на отдельные узлы (ось  $X$  и  $Y$ ). Расположение электродов задается чуть ниже согласно координатам, там же задается их радиус. После построения параметрической сетки, необходимо перейти во вкладку «Расчет» (рис. 2).

Дальнейшим действием программы является вычисление значений напряжения в полученной на первом этапе (см. рис. 1) сетке [4, 5]. Для этого добавляем параметры во вкладке «Расчет», а именно – шаг оси  $Z$ , толщину рассматриваемого первого слоя, удельную проводимость среды, магнитную

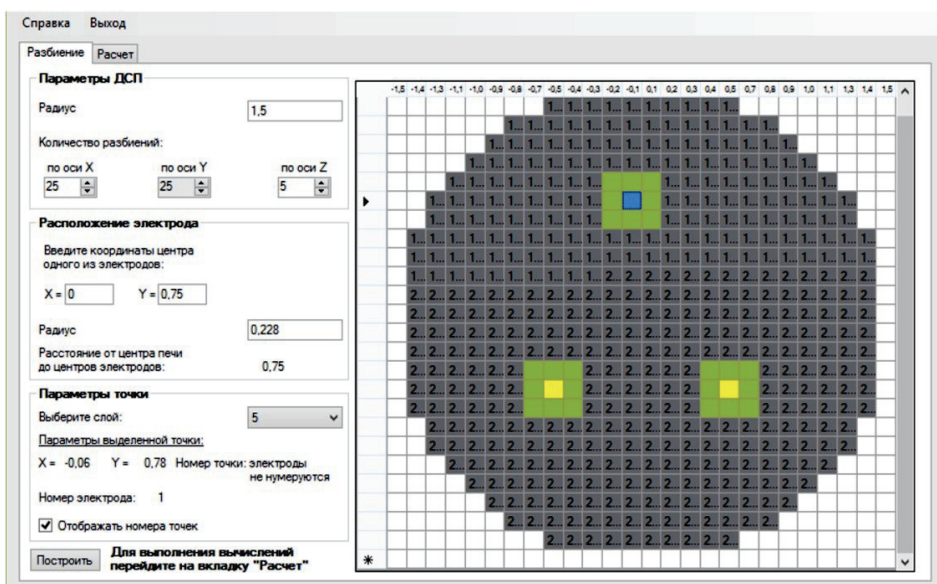


Рис. 1. Основная рабочая область программы

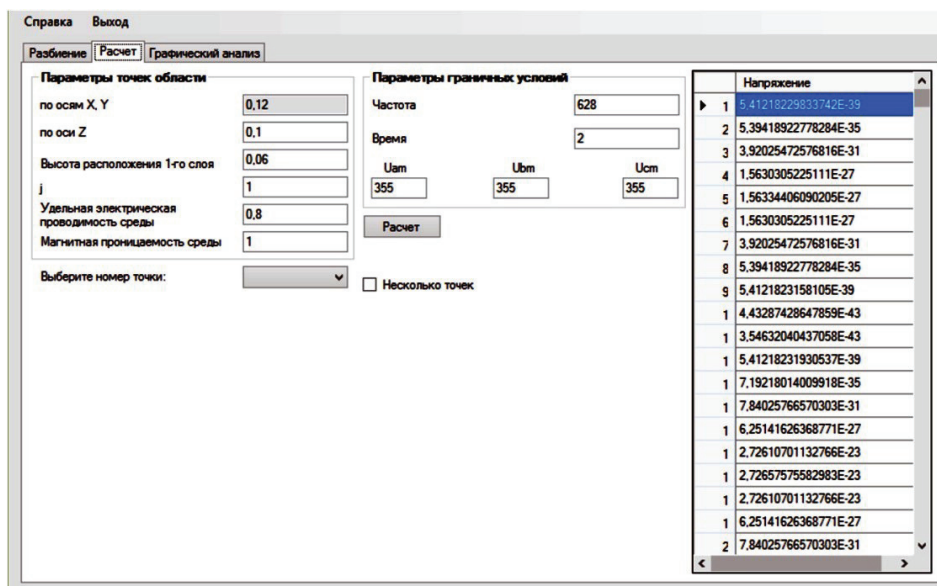
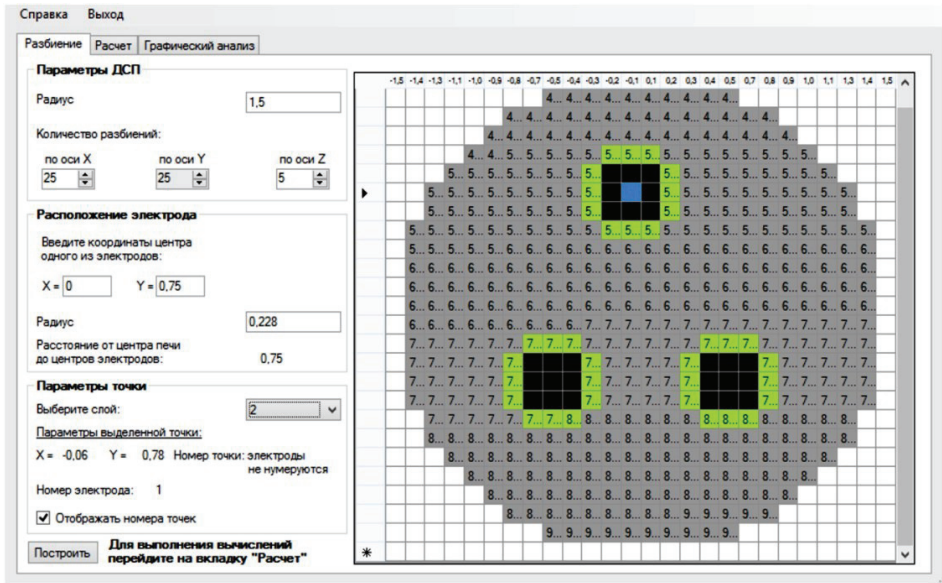


Рис. 2. Окно расчета отображаемых узлов каждого слоя

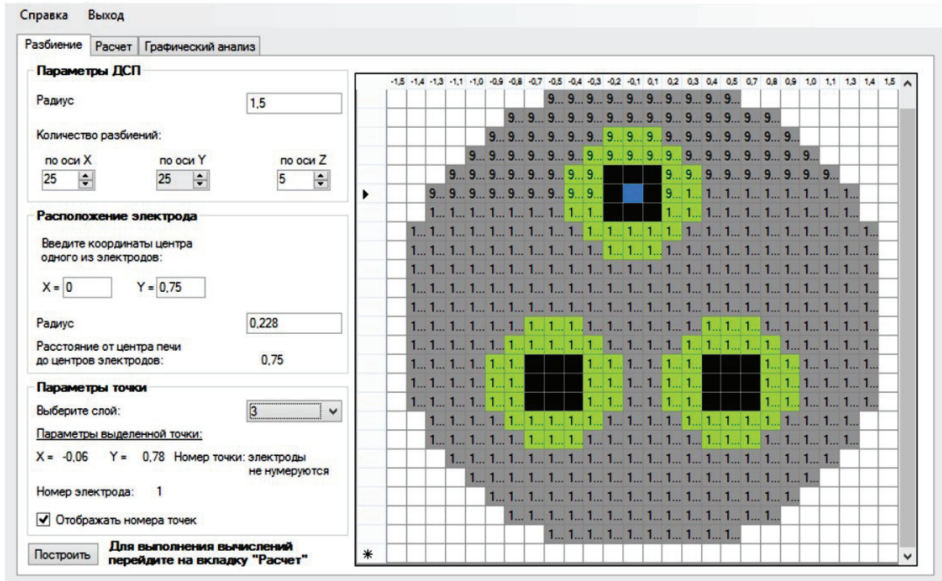
проницаемость, частоту тока, время плавки, а также напряжения симметричных электродов. После этого проводится расчет. Отметим, что при математическом моделировании можно заранее рассчитать оптимальный режим работы. При непосредственной работе технологической установки можно задать автоматические параметры регулирования аппаратами контроля режима работы и механизмами перемещения электродов. На данном этапе рассчитывается матричная система алгебраических дифференциальных уравнений методом Гаусса.

После окончания расчета необходимо обратиться ко вкладке «Разбиение» для наглядного отображения дискретизованной области каждого слоя. Изобразим промежуточные три слоя для восприятия процесса (исключая граничные слои) на рис. 3.

Цветовой формат показывает распределение напряжений на разных слоях ДСП. Ячейки желтых оттенков имеют самое высокое значение напряжения, сине-голубых – самое низкое, зеленых имеют промежуточное значение напряжения. Серым цветом отображаются ячейки, значения в которых близки к нулю, черным – сами электроды.



а)



б)

Рис. 3. Распределение напряжения в областях 2 (а) и 3 (б) (начало)

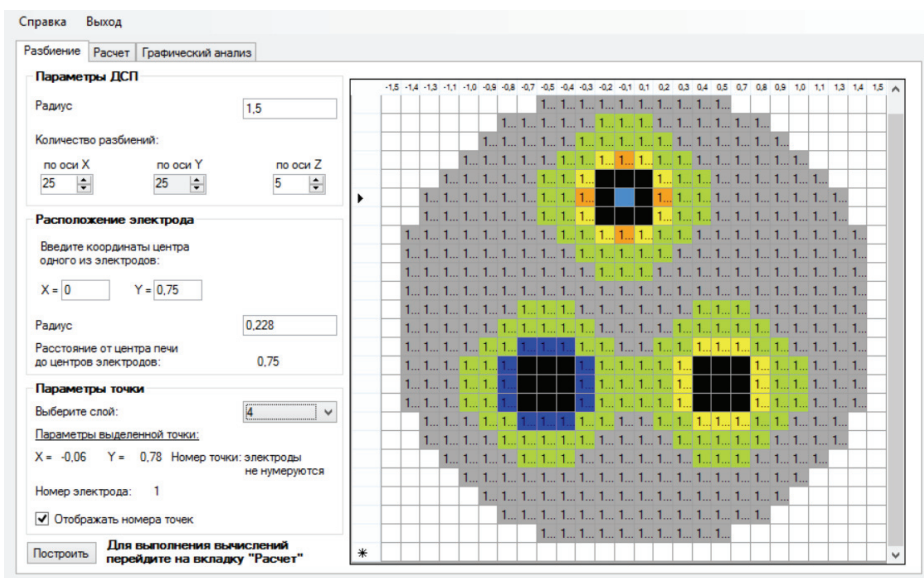


Рис. 3. Распределение напряжения в области 4 (в) (окончание)

Рассмотрим вкладку «Графический анализ». Она позволяет визуально оценить два вида зависимостей: напряжение от высоты (рис. 4) и напряжения от удаленности от ближайшего электрода для каждого из слоев разбиения (рис. 5).

Проанализировав рисунок 4, отметим, что значения напряжений для произвольно выбранных точек 21 и 27 не изменяются вплоть до третьего слоя, затем при переходе на четвертый происходит скачок напряжения, и до конца держится на одном уровне [4, 5]. Из рисунка 5 видно, что наибольшие значения напряжения для некоторых узлов наблюдаются в точках, находящихся ближе к электродам.

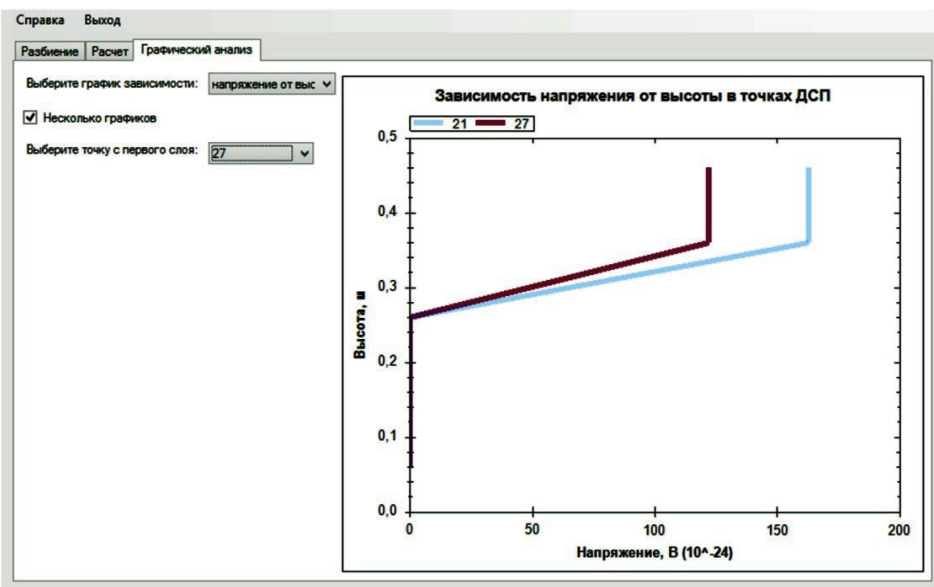


Рис. 4. График зависимости напряжения точек от высоты

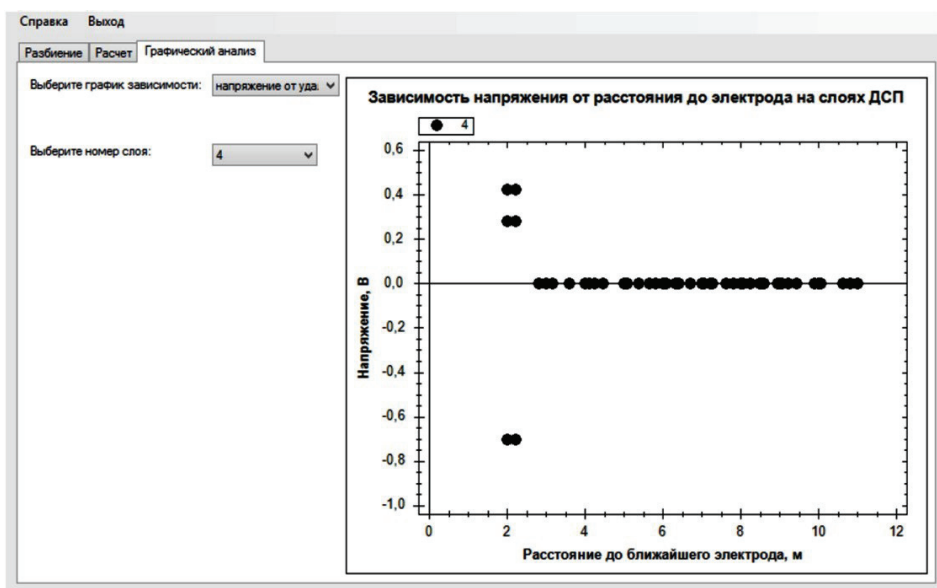


Рис. 5. График зависимости напряжения от расстояния до электрода области 4

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что напряжение очень велико на верхних слоях, затем, по мере погружения электрода в шлак, напряжение начинает уменьшаться в связи с низкой проводимостью шлака, и к третьему слою становится предельно малым. Интерпретируя графические составляющие данных программы, отметим, что для данного случая целесообразно увеличить диаметр электродов либо увеличить значение напряжения на симметрично расположенные электроды, либо уменьшить диаметр ванны ДСП для эффективного потока электрического поля рассматриваемой сетки. При включении функционала данной программы в реальные технологические объекты можно добиться не только наилучших показателей электрических режимов, но и снизить влияние на электрическую сеть, а также на общие показатели надежности системы в целом и общую надежность заменяемых электродов.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках договора № 7430ГУ/2015.*

#### *Список литературы*

1. Зацепин, Е. П. Качество электрической энергии по напряжению в системах электроснабжения металлургических предприятий / Е. П. Зацепин, В. И. Зацепина // Вести высш. учеб. заведений Черноземья. – 2013. – № 1. – С. 21 – 25.
2. Зацепин, Е. П. Анализ применения FACTS-устройств в системах с резкопеременными нагрузками / Е. П. Зацепин, В. И. Зацепина, О. Я. Шачнев // Вести высш. учеб. заведений Черноземья. – 2015. – № 4. – С. 21 – 26.
3. Шилов, И. Г. Имитационная модель устройства динамической компенсации перенапряжений / И. Г. Шилов, В. И. Зацепина // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 379 – 383.
4. Zatsepin, E. P. Electromagnetic-Field Distribution in a Refined-Slag Layer in Ladle-Furnace Units / E. P. Zatsepin, A. V. Galkin // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – P. 473 – 477.

5. Зацепин, Е. П. Виртуальное моделирование распределения тока в шлаке при экранировании электрических дуг в печах / Е. П. Зацепин, А. В. Галкин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., 17–18 декабря 2014 г. / ред.: В. А. Немтинов. – Тамбов, 2015. – С. 77 – 82.

6. Шпиганович, А. Н. О восстановлении электроснабжения при кратковременных провалах напряжения / А. Н. Шпиганович, В. И. Зацепина, И. Г. Шилов // Пром. энергетика. – 2008. – № 10. – С. 15 – 17.

7. Шпиганович, А. Н. Электроснабжение металлургических предприятий / А. Н. Шпиганович, К. Д. Захаров ; Федер. агентство по образованию Рос. Федерации, Липец. гос. техн. ун-т. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2006. – 568 с.

### References

1. Zatsepin E.P., Zatssepina V.I. [Power quality of the voltage in the power supply systems of metallurgical enterprises], *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region], 2013, no. 1, pp. 21-25. (In Russ.)

2. Zatsepin E.P., Zatssepina V.I., Shachnev O.Y. [Analysis of the application of FACTS devices in systems with sharply varying loads], *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja* [News of higher educational institutions of the Chernozem region] 2015, no 4, pp. 21-26. (In Russ)

3. Shilov I.G., Zatssepina V.I. [Simulation model of the device of the dynamic compensation of over voltages], *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East], 2009, no. 1, pp. 379-383. (In Russ., Abstract in Eng.)

4. Zatsepin E.P., Galkin A.V. Electromagnetic-field distribution in a refined-slag layer in ladle-furnace units, *Steel in Translation*, 2015, vol. 45, pp. 473-477.

5. Zatsepin E.P., Galkin A.V. [Virtual modeling of current distribution in slag when shielding electric arcs in furnaces], *Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promishlennij dizain* [Virtual modeling, prototyping and industrial design], Collection of Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Tambov, December 17-18, 2014., Tambov, 2015, pp. 77-82. (In Russ)

6. Shpiganovich A.N., Zatssepina V.I., Shilov I.G. [On the restoration of power supply in the case of short-term voltage failures], *Promyshlennaja jenergetika* [Industrial power engineering], 2008, no. 10, pp. 15-17. (In Russ)

7. Shpiganovich A.N., Zaharov K.D. *Jelektrosnabzhenie metallurgicheskijh predpriyatij* [Power supply of metallurgical enterprises], Lipeck: LGTU, 2006, 568 pp. (In Russ)

---

## Improving the Efficiency of Electrical Complexes through the Analysis of Electrical Characteristics

V. I. Zatssepina, E. P. Zatsepin, O. Ya. Shachnev

*Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

**Keywords:** economic efficiency; electric arc; electric arc furnace; electric field; electrode; Gaussian elimination.

**Abstract:** The method of controlling electric mode arc furnaces is considered. The up-to-date software and hardware to control the electric mode of the electric installation are proposed. Conclusions and recommendations on effective management of electric mode are made.

---

© В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев, 2017