

УДК 621.365.22 + 004.942

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДУГОВОЙ ПЕЧИ  
ДЛЯ АНАЛИЗА МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ДУГИ ПРИ  
НАЛИЧИИ РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ТОКА ДУГИ И ФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

*Николаев А.А., Тулунов П.Г.*

**Аннотация.** В рамках исследования обосновывается необходимость расчёта мгновенного значения напряжения дуги в сталеплавильной печи для решения задач управления электрическим режимом, а также для диагностики стадии плавки. На основании математической модели трёхфазного электрического контура печи осуществляется определение мгновенных значений напряжения электрической дуги в каждой фазе с использованием измеряемых сигналов тока дуги и фазного напряжения. В статье обозначены основные проблемы, связанные с определением суммарного активного сопротивления фазы с учётом влияния поверхностного эффекта, а также с определением коэффициентов взаимной индуктивности между фазами в зависимости от ориентации электрододержателей в пространстве. Для каждой из обозначенных проблем предложены пути решения.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, напряжение дуги, диагностика стадии плавки, гармонический состав тока и напряжения дуги

**THE APPLICATION OF ELECTRIC ARC FURNACE'S MATHEMATICAL MODEL FOR AN ANALYSIS  
OF ARC VOLTAGE'S INSTANTANEOUS VALUES WITH REAL SIGNALS OF ELECTRIC ARC  
CURRENT AND PHASE VOLTAGE**

*Nikolaev A.A., Tulupov P.G.*

**Abstract.** This study makes the case for a calculation of electric arc voltage's instantaneous value in electric arc furnaces. It's especially important for electric modes control tasks, and also for a heating stage diagnostic. The algorithm which allows to define instantaneous values of electric arc voltage in each phase with real signals of electric arc current and phase voltage was presented. This algorithm is based on furnace's three phase circuit mathematical model. Besides, main problems related to this algorithm were identified, such as problem with definition of total phase resistance considering skin effect and the problem with definition of mutual inductance between three phases depending on the electrode arms position. The solutions for each of identified problems were suggested.

**Keywords:** electric arc furnace, electric arc, arc voltage, heating stage diagnostic, harmonic composition of electric arc current and voltage

**Введение**

За последние несколько десятилетий в металлургической промышленности наблюдается устойчивая тенденция замещения мартеновского и конвертерного производства современными электросталеплавильными комплексами. Данный факт обусловлен высокой энергетической и экономической эффективностью электродуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). При этом ДСП и УКП с технической точки зрения являются достаточно сложными мехатронными комплексами, которые сочетают в себе электрические, механические и гидравлические компоненты, а также интеллектуальную систему управления электрическими режимами. Одним из важнейших структурных компонентов системы управления электрическими режимами является система управления перемещением электродов, от качества настройки которой напрямую зависят энергетические затраты в процессе плавки [1-3].

В рамках ранее проведённых исследований представлен анализ наиболее распространённых систем управления положением электродов, в ходе которого было установлено, что в качестве параметров регулирования могут использоваться: 1) импеданс фазы  $Z_{2\phi}$ ; 2) адмитанс фазы  $Y_{2\phi}$ ; 3) активное сопротивление электрической дуги  $R_d$ ; 4) напряжение электрической дуги  $U_d$  [4].

В существующих системах управления такие параметры, как  $R_d$  и  $U_d$  применяются только на поздних стадиях плавки, когда необходимо поддерживать постоянное оптимальное значение длины дуги  $L_{ARC}$  при нагреве расплава до требуемой температуры выпуска. В данном случае, основная проблема заключается в том, что сопротивление и напряжение дуги достаточно сложно измерить напрямую ввиду агрессивных условий внутри ванны печи. Для

задач управления, их значения рассчитываются косвенно на основании измеряемых параметров. В качестве примера приведём выражения для расчёта действующего значения напряжения дуги  $U_d$  в системе *ARCOS* (*Siemens VAI*, нынешний *Primetals Technologies*):

$$U_d = \frac{P_d}{I_d} = \frac{P_2 - \Delta P}{I_d} = \frac{P_2 - I^2 R_{\Sigma}}{I_d}, \quad (1)$$

где  $P_d$  – активная мощность электрической дуги;  $I_d$  – действующее значение тока электрической дуги;  $P_2$  – активная мощность фазы;  $\Delta P$  – потери активной мощности в обмотках трансформатора, реактора и на участке короткой сети;  $R_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление обмоток трансформатора, реактора и участка короткой сети.

Данный подход достаточно прост в реализации, но он обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, подобный алгоритм расчёта даёт адекватный результат только в том случае, если мгновенные значения токов электрических дуг не содержат высших гармоник. Как показывает практика [5], даже на стадии жидкой ванны в сигнале тока дуги содержится определённый набор гармонических составляющих, который приводит к погрешности в результатах расчёта  $U_d$ . Наглядно продемонстрировать данное утверждение позволяет график среднего значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока  $K_I$  по трём фазам ДСП-180 (ЭСПЦ ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия), представленный на рис. 1.

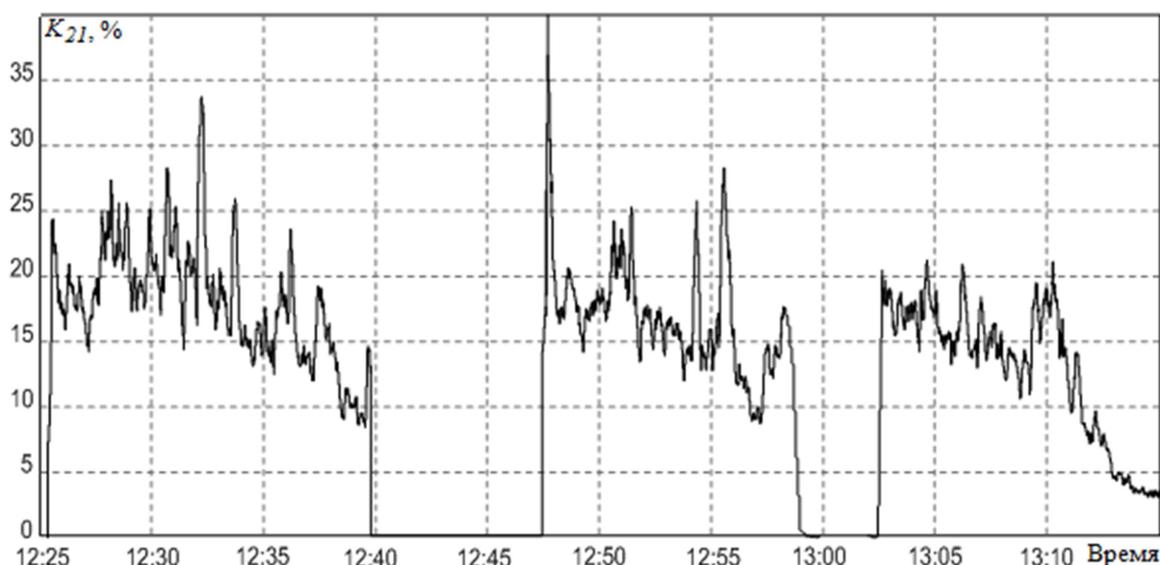


Рис. 1. График изменения среднего значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока электрической дуги по трём фазам ДСП-180 на протяжении полного цикла плавки

Во-вторых, в соответствии с выражением (1) рассчитывается только действующее значение напряжение электрической дуги. При этом, проведённые ранее исследования [6] показывают, что анализ гармонического состава сигнала мгновенного значения напряжения электрической дуги позволяет достаточно точно осуществлять диагностику стадии плавки. Отметим, что в настоящее время подавляющее большинство систем управления электрическими режимами ДСП в качестве критерия перехода с одной стадии плавки на другую используют удельный расход электроэнергии  $W_{уд}$  [кВт · ч/т], который не связан напрямую с процессами, протекающими в ванне печи.

В ходе исследований, приведенных в [4], также установлено, что напряжение дуги  $U_d$  является наиболее предпочтительным в качестве параметра регулирования, поскольку его применение обеспечивает наименьшую величину межфазного взаимовлияния, что благотворно сказывается на качестве регулирования. Как уже отмечалось ранее, формула (1) позволяет дать близкую к реальной оценку  $U_d$  лишь на поздней стадии плавки, когда сигнал тока дуги близок к синусоидальному.

Исходя из вышеперечисленного следует, что существует необходимость разработки алгоритмов, которые позволяли бы вычислять сигнал мгновенного значения напряжения электрической дуги с целью анализа его гармонического состава для диагностики стадии плавки,

а также для решения задач управления. Решение данной задачи возможно при использовании специализированной математической модели электрического контура ДСП, позволяющей проводить расчёт мгновенных значений напряжения дуги на основании измеряемых мгновенных значений токов дуги и фазных напряжений.

**Математическая модель электрического контура ДСП для анализа мгновенных значений напряжения дуг на основании измеряемых сигналов фазных напряжений и токов**

Рассмотрим схему замещения электрического контура ДСП с учётом взаимной индукции между тремя фазами (рис. 2).

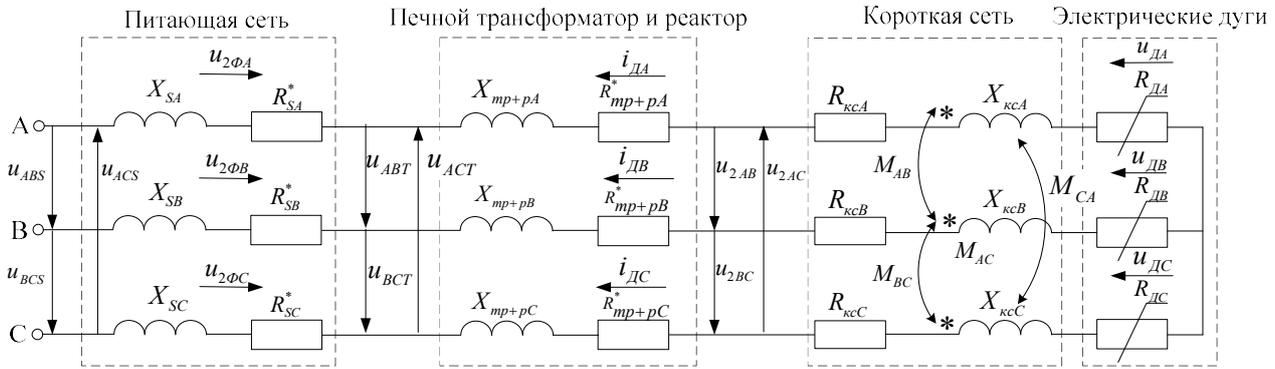


Рис. 2. Схема замещения электрического контура ДСП с учётом взаимной индукции между фазами

На основании схемы замещения и с учётом известных значений  $i_{дА,В,С}$  и  $u_{2фА,В,С}$ , запишем в операторной форме систему уравнений для фазного напряжения в каждой из трёх фаз в соответствии со 2-м законом Кирхгофа:

$$\begin{cases} u_{2фА}(p) = R_A i_{дА}(p) + L_A i_{дА}(p)p + M_{AB} i_{дВ}(p)p + M_{CA} i_{дС}(p)p + u_{дА}(p), \\ u_{2фВ}(p) = R_B i_{дВ}(p) + L_B i_{дВ}(p)p + M_{AB} i_{дА}(p)p + M_{BC} i_{дС}(p)p + u_{дВ}(p), \\ u_{2фС}(p) = R_C i_{дС}(p) + L_C i_{дС}(p)p + M_{CA} i_{дА}(p)p + M_{BC} i_{дВ}(p)p + u_{дС}(p), \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} R_A &= R'_{SA} + R'_{mp+pA} + R_{КСА}; L_A = L'_{SA} + L'_{mp+pA} + L_{КСА}; \\ R_B &= R'_{SB} + R'_{mp+pB} + R_{КСВ}; L_B = L'_{SB} + L'_{mp+pB} + L_{КСВ}; \\ R_C &= R'_{SC} + R'_{mp+pC} + R_{КСС}; L_C = L'_{SC} + L'_{mp+pC} + L_{КСС}; \end{aligned}$$

и  $R'_S, R'_{mp+p}, R_{КС}$  – активное сопротивление питающей сети, обмоток трансформатора и реактора, а также участка короткой сети соответственно;  $L'_S, L'_{mp+p}, L_{КС}$  – индуктивное сопротивление питающей сети, обмоток трансформатора и реактора, а также участка короткой сети соответственно;  $M_{AB}, M_{BC}, M_{CA}$  – коэффициенты взаимной индукции между фазами;  $i_{д}$  – ток электрической дуги;  $u_{д}$  – напряжение электрической дуги;  $p$  – оператор Лапласа.

Исходя из системы (2), в каждом из уравнений которой осталось по одному неизвестному параметру. Выразим напряжение дуги для каждой фазы:

$$\begin{cases} u_{дА}(p) = u_{2фА}(p) - R_A i_{дА}(p) - L_A i_{дА}(p)p - M_{AB} i_{дВ}(p)p - M_{CA} i_{дС}(p)p, \\ u_{дВ}(p) = u_{2фВ}(p) - R_B i_{дВ}(p) - L_B i_{дВ}(p)p - M_{AB} i_{дА}(p)p - M_{BC} i_{дС}(p)p, \\ u_{дС}(p) = u_{2фС}(p) - R_C i_{дС}(p) - L_C i_{дС}(p)p - M_{CA} i_{дА}(p)p - M_{BC} i_{дВ}(p)p. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, алгоритм расчёта мгновенных значений напряжения электрической дуги и длины дуги может быть представлен в виде функциональной схемы, приведённой на рис. 3. В виде структурной схемы, данный алгоритм будет иметь вид, представленный на рис. 4.

Тем не менее, при использовании данного алгоритма необходимо учитывать ряд особенностей. Во-первых, изменение гармонического состава тока электрической дуги приводит к изменению суммарного активного сопротивления за счёт влияния эффекта вытеснения тока, что должно учитываться с помощью специального блока расчёта параметров электрического контура.

Во-вторых, на начальной стадии плавки, когда дуга горит нестабильно и системе управления приходится обрабатывать существенные возмущающие воздействия [9], взаимное положение рукавов электродов в пространстве может значительно изменяться, что приводит к изменению коэффициента взаимной индукции. По этой причине, в системе должен быть использован блок расчета коэффициента взаимной индукции в зависимости от положения консоли.

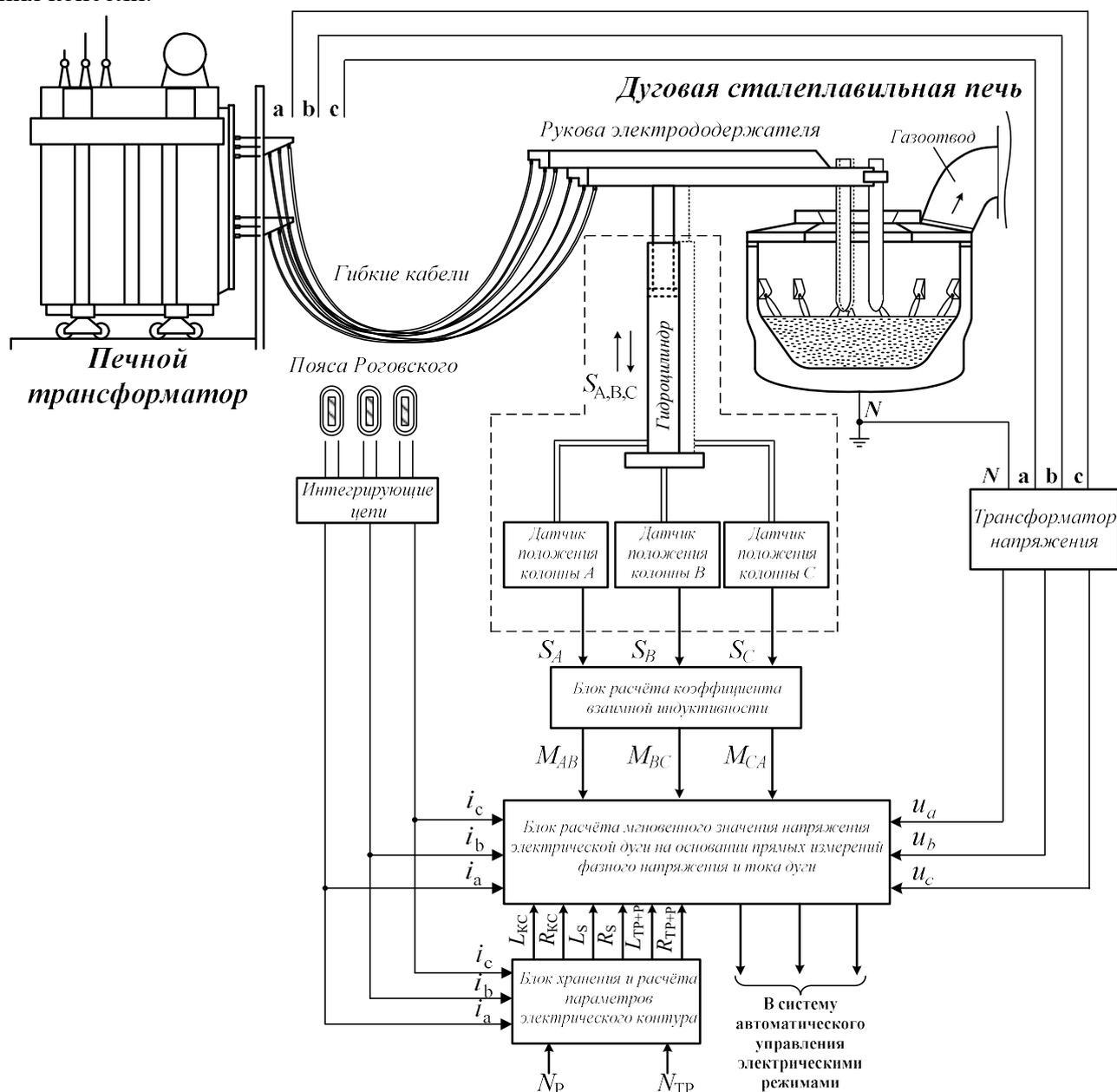


Рис. 3. Функциональная схема алгоритма расчёта мгновенного значения напряжения электрической дуги

### Диагностика стадии плавки на основании анализа гармонического состава сигналов мгновенного значения напряжения электрической дуги

В ранее проведённых исследованиях предлагалось применять в качестве критерия перехода с одной стадии плавки на другую среднее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока по трём фазам печи. С практической точки зрения, подобный метод достаточно прост в реализации, поскольку архитектура практически любой современной системы управления положением электродов позволяет получить доступ к сигналам мгновенных значений тока электрической дуги [5].

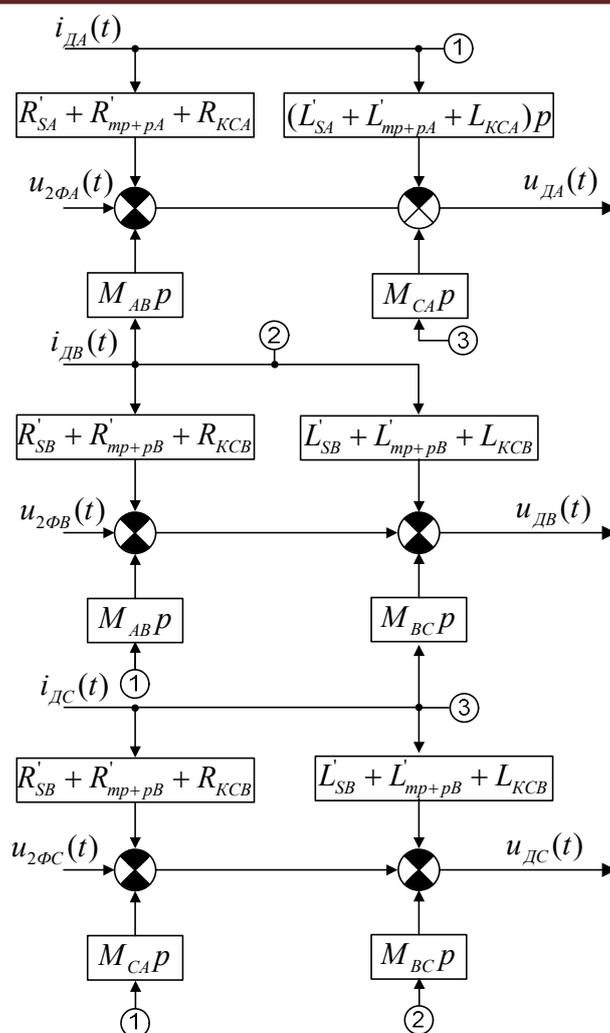


Рис. 4. Структурная схема блока расчёта мгновенного значения напряжения электрической дуги

Несмотря на удобство практической реализации, данный метод также обладает одним существенным недостатком. Рассмотрим дифференциальное уравнение мгновенной проводимости электрической дуги или уравнение Касси:

$$\Theta_D(t) \frac{dg_D(t)}{dt} = \left( \frac{u_D^2(t)}{E_D^2(t)} - 1 \right) g_D(t) dt, \quad (4)$$

где  $g_D(t)$  – мгновенное значение проводимости электрической дуги,  $\Theta_D$  – тепловая постоянная времени электрической дуги,  $E_D(t)$  – ЭДС электрической дуги.

В данном уравнении параметр  $\Theta_D$  имеет наиболее тесную связь со стадией плавки, поскольку в среднем его значение изменяется в диапазоне от 300 мкс на стадии расплавления шихты до 3500 мкс на поздней стадии плавки, когда дуги экранированы вспененным шлаком. Очевидно, что параметр, отвечающий за переключение ступеней печного трансформатора и реактора при переходе с одной стадии плавки на другую должен быть напрямую связан с  $\Theta_D$  при незначительном влиянии прочих параметров, таких как длина электрической дуги  $l_D$ , коэффициент вентильного эффекта  $K_{ВЭ}$ , а также коэффициент несимметрии  $K_{НЕС}$ . Более подробно данный вопрос рассматривается в исследованиях [5, 6].

В рамках данной статьи, проведём сравнительный анализ, в котором отразим влияние тепловой постоянной времени дуги и длины дуги на величину коэффициента несимметрии сигналов тока и напряжения дуги. Для этого на математической модели ДСП, разработанной в процессе исследований [8, 9], были получены графики поверхностей  $K_I = f(l_{ARC}, \Theta_{ARC})$  и  $K_U = f(l_{ARC}, \Theta_{ARC})$ , представленные на рис. 5.

Отметим, что применяемая математическая модель ДСП позволяет получать сигналы мгновенных значений тока и напряжения электрической дуги, гармонический состав которых включает в себя как постоянную составляющую, так и чётные гармоники (рис. 6), что достигается за счёт учёта вентильного эффекта в математической модели электрического контура ДСП.

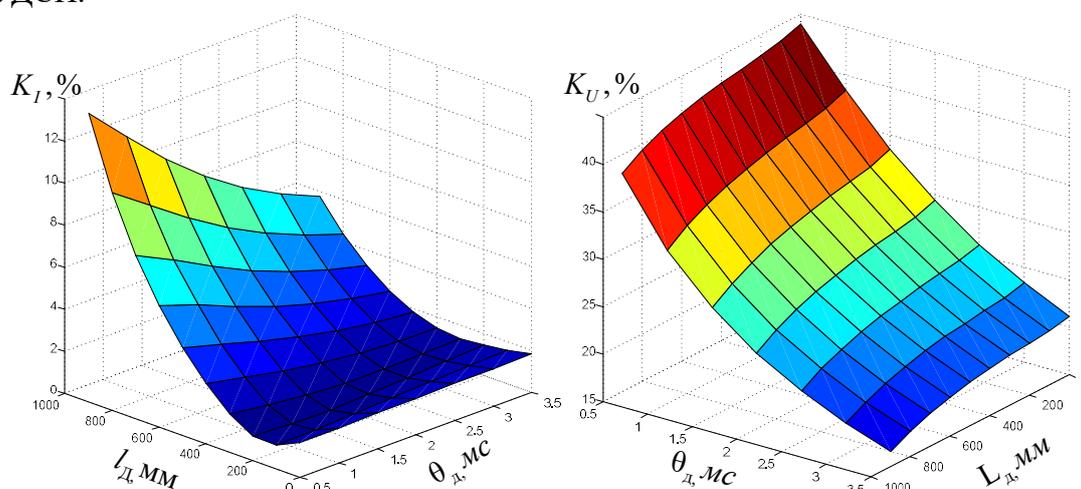


Рис. 5. Графики поверхностей  $K_I = f(l_{ARC}, \theta_{ARC})$  и  $K_U = f(l_{ARC}, \theta_{ARC})$ , полученные на математической модели электродуговой сталеплавильной печи ДСП-180 при  $l_{ДИ,С} = 200$  мм и  $K_{ВЭ} = 1,2$

Исходя из анализа поверхностей, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что суммарный коэффициент гармонических составляющих сигнала напряжения электрической дуги в существенно меньшей мере зависит от длины электрической дуги, чем суммарный коэффициент гармонических составляющих сигнала тока электрической дуги. Таким образом, для определения момента перехода с одной стадии плавки на другую предпочтительнее использовать именно сигнал напряжения электрической дуги, поскольку в данном случае существенно снижается вероятность несвоевременного переключения ступени вследствие влияния возмущающих воздействий.

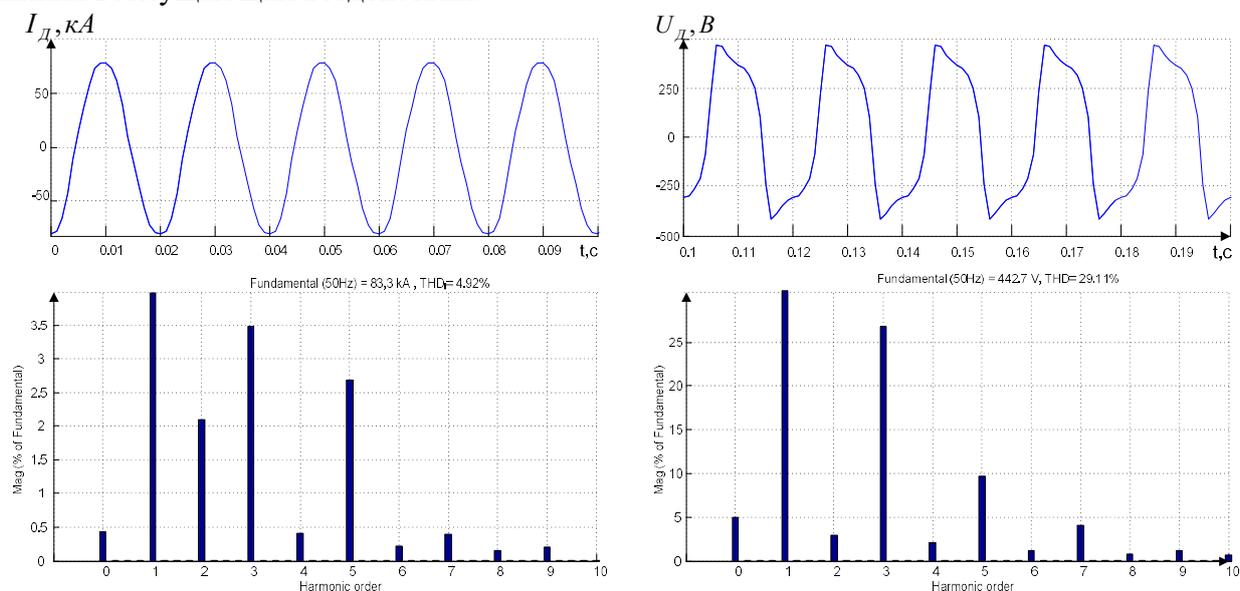


Рис. 6. Гармонический состав сигналов тока и напряжения электрической дуги, полученный на математической модели электрического контура ДСП-180

## Выводы

1. Расчёт мгновенного значения сигнала напряжения электрической дуги необходим как для решения задач управления [10, 11], так и для диагностики стадии плавки. В первом случае, применение напряжения дуги как параметра регулирования позволяет достичь неза-

висимого по фазам регулирования электрических параметров, что благотворно скажется на качестве управления процессом плавки. Во втором случае, гармонический состав напряжения электрической дуги в наибольшей мере зависит от тепловой постоянной времени дуги при незначительном влиянии прочих параметров. Это означает, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения электрической дуги позволяет достоверно судить о процессах, протекающих в ванне печи, и может использоваться как критерий перехода с одной стадии плавки на другую в качестве более эффективной альтернативы удельному расходу электроэнергии.

2. Задача расчёта мгновенного напряжения электрической дуги [12] является достаточно сложной, и требует проведения дополнительных исследований. Во-первых, необходимо учитывать изменение суммарного активного сопротивления электрического контура вследствие влияния эффекта вытеснения тока. Во-вторых, необходимо разработать алгоритм, который позволит определять значение коэффициента взаимной индукции между двумя фазами в зависимости от положения рукавов электродов [13,14] в пространстве.

### Список используемых источников

1. Николаев, А.А. Методика сравнительной оценки эффективности работы систем управления положением электродов агрегата ковш-печь : материалы XVI международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали». – Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ. – Ч1. – С. 161-169;
2. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов [и др.] // Электрометаллургия. – 2013. – №7. – С. 2-10.
3. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / А.А. Николаев [и др.] // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т.1, №1. – С. 161-169.
4. Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – №2(50). – С. 90-100.
5. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи за счёт использования системы диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов дуг / А.А. Николаев [и др.] // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XXVII междунар. науч.-практ. конф. № 10(23). – Новосибирск: СибАК, 2013.
6. Nikolaev, A.A. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages / A.A Nikolaev., P.G. Tulupov, A.V. Anufriev. // Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015). IEEE. Bochum, Germany, November 18-20, 2015. pp. 302-308. DOI: 10.1109/REM.2015.7380411
7. Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи с реализацией случайных возмущений электрических дуг / Г.П. Корнилов [и др.] // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. – 2014. – №4(4). – С. 260-271.
8. Корнилов, Г.П. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 239 с.
9. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дисс. канд. техн. наук. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2009. – 204 с.
10. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / Корнилов Г.П. [и др.] // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014, – Т.1, №1. – С. 48-58.
11. Журавлёв, Ю.П. Способы управления электрическим режимом электродуговых сталеплавильных печей / Журавлёв Ю.П. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2006. – №4. – С. 76-80.
12. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. // Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
13. Brusa, E.G.M. Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity / E.G.M. Brusa, S.Morsut // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015. Vol. 20, pp.1099-1107. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2364392.
14. Balan, R. Optimization of the Electrode Control System Using On Line Simulation and Rule Based Control / R. Balan, V. Matics, D. Stan // International conference on Mechatronics and Automation, 2007. pp. 2939-2944. DOI: 10.1109/ICMA.2007.4304027.

**Николаев Александр Аркадьевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: alexniko@inbox.ru.

**Тулупов Платон Гарриевич** – магистрант гр. АМм-15, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

---

Николаев А.А., Тулупов П.Г. Применение математической модели дуговой печи для анализа мгновенных значений напряжения дуги при наличии реальных сигналов тока дуги и фазного напряжения // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т.4. – №2. – С. 2-9.

Nikolaev, A.A. and Tulupov P.G. (2016). The application of electric arc furnace's mathematical model for an analysis of arc voltage's instantaneous values with real signals of electric arc current and phase voltage. Software of systems in the industrial and social fields, 4 (2): 2-9.

---