ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.365.22+681.515.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТОКОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. **Постановка задачи (актуальность работы)**. В настоящее время в большинстве систем управления электрическими режимами дуговых сталеплавильных печей и установок «ковш-печь» не предусмотрена возможность использования устройств измерения токовых сигналов альтернативных тем, что поставляются комплектно с основным технологическим оборудованием. Вследствие этого особую актуальность приобретает задача разработки универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов в составе усовершенствованной системы управления электрическим режимом. **Используемые методы**. Работа выполнена с использованием теоретического анализа наиболее распространённых методик измерения токов электрических дуг, а также с использованием методов математического моделирования. **Новизна**. Как правило, в современных системах управления электрическим режимом отсутствует возможность выбора источника измерения токового сигнала. Кроме того, в научно-технической литературе по данной тематике варианты решения поставленной задачи практически не рассматривались. **Результат**. Разработан новый алгоритм универсальной обработки токовых сигналов, который позволяет использовать в системе управления электрическим режимом сигналы с трансформаторов тока на первичной стороне печного трансформатора, трансформаторов тока, встроенных в обмотку печного трансформатора, а также поясов Роговского при различных вариантах подключения обмоток печного трансформатора. **Практическая значимость**. Новый алгоритм универсальной обработки токовых сигналов открывает широкий спектр возможностей для применения альтернативных источников измерения токовых сигналов вне зависимости от способа соединения обмоток печного трансформатора и без необходимости использования дополнительных схемных решений на аппаратном уровне. Вследствие этого система управления, в составе которой будет применяться данный алгоритм, будет обладать большим потенциалом к внедрению по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, печной трансформатор, трансформатор тока, пояс Роговского, алгоритм обработки токовых сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FZRU-2020-0011).

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С., 2021

Для цитирования

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для усовершенствованной системы управления электродуговой печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 112–121. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DESIGN OF UNIVERSAL ALGORITHMS FOR PROCESSING OF MULTI-SOURCE CURRENT SIGNALS FOR AN IMPROVED CONTROL SYSTEM OF AN ELECTRIC ARC FURNACE

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivekeev V.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. **Problem Statement (Relevance)**. Nowadays, the vast majority of electric mode control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces are not provided with the possibility of using devices for measuring current signals alternative to those supplied in a package of the main technological equipment. As a result, it is of particular relevance to deal with the task of developing universal algorithms for processing current signals as part of an improved electric mode control system. **Methods Applied**. The research was carried out using a theoretical analysis of the most common methods for measuring electric arc currents, as well as using methods of mathematical modeling. **Originality**. As a rule, modern electric mode control systems are not provided with the possibility of choosing a source for measuring a current signal. In addition, scientific and technical literature on this topic devoted almost no attention to options for solving the problem. **Results**. The authors developed a new algorithm for processing of multi-source current signals, which allows the use of signals from current transformers on the primary side of the furnace transformer, current transformers built into the winding of the furnace transformer, as well as Rogowski coils in the electric mode control system with various options for connecting the windings of the furnace transformer. **Practical Relevance**. The new algorithm for processing of multi-source current signals opens up a wide range of possibilities for the use of alternative sources for measuring current signals, regardless of the method of connecting the windings of the furnace transformer and without the need for additional circuit solutions at the equipment level. As a result, the control system, applying this algorithm, will have a greater potential for implementation in comparison with the existing similar ones.

Keywords: electric arc furnace, furnace transformer, current transformer, Rogowski coil, current signal processing algorithm.

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZRU-2020-0011).

For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivekeev V.S. Design of Universal Algorithms for Processing of Multi-Source Current Signals for an Improved Control System of an Electric Arc Furnace. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 112–121. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121

Введение

В настоящее время электрометаллургия является одной из наиболее активно развивающихся отраслей современной промышленности. При этом в подавляющем большинстве случаев при проектировании электросталеплавильных цехов предпочтение отдаётся технологии производства жидкой стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) с последующей внепечной обработкой расплава в установках ковш-печь (УКП). Очевидно, что ДСП и УКП являются технически сложными и энергоёмкими агрегатами, вследствие чего открываются широкие перспективы для исследований, направленных на снижение производственных издержек.

Одним из направлений в исследованиях данного рода является разработка усовершенствованных алгоритмов управления ДСП и УКП с последующей их интеграцией в новую систему управления электрическим режимом, обладающую рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогичными системами. Очевидно, что одним из критериев, которым должна обладать новая система управления, является универсальность применения. В том числе это касается алгоритмов обработки измеряемых сигналов токов дуг и фазных напряжений, обеспечивающих формирование сигналов обратных связей по регулируемым параметрам электрического контура.

В исследовании [1] отмечалось, что подавляющее большинство существующих систем управления электрическим режимом [2, 3] не обладают универсальностью в данном отношении. Обязательным условием корректной работы данных систем является формирование на входе сигналов, пропорциональных фактическим значениям токов дуг и фазных напряжений. На практике при измерении фазного напряжения данное условие достигается без существенных затруднений. Иная ситуация наблюдается при

работе с измерительными сигналами тока дуги. Здесь в ряде случаев необходимо применять определённые схемные решения на аппаратном уровне вследствие различных способов измерения токов дуг и групп соединения обмоток печного трансформатора (ПТ), что обусловливает дополнительные затраты. В связи с этим особую актуальность приобретает задача разработки универсальных алгоритмов обработки сигналов.

Существующие конфигурации систем измерения токов дуг, применяемые для ДСП и УКП

Опыт эксплуатации систем управления электрическим режимом ДСП и УКП различного класса и мощности [4] показал, что на практике, как правило, используются три основные конфигурации системы измерения токов электрических дуг, предусматривающие использование: 1) измерительных трансформаторов, включенных на первичной стороне ПТ для измерения линейных токов; 2) поясов Роговского на вторичной стороне ПТ; 3) трансформаторов тока, включенных непосредственно в трёхфазную первичную обмотку ПТ. Также могут применяться комбинации из двух разлиных конфигураций. При этом используются следующие группы соединения обмоток ПТ: Y/Δ-11 и Δ/Δ-0. Для наглядности все возможные варианты сочетания соединения обмоток и конфигураций систем измерения токов дуг приведены на **рис. 1**. Более подробные схемы, в свою очередь, приведены на **рис. 2**.

Как уже отмечалось ранее, использование сигналов с системы измерения токов дуг напрямую без дополнительной обработки не во всех обозначенных случаях представляется возможным. Для удобства анализа, особенности каждого случая приведены в **таблице**.

Трансформатор тока на первичной стороне ПТ при соединении обмоток по схеме Δ/Δ-0

Данный случай является наиболее простым, поскольку приведение величины тока на вторичную сторону ПТ производится в соответствии с формулой

$$i_{Д}(t) = i_{TA}(t) \cdot K_{TA} \cdot K_{T}, \qquad (1)$$

где $i_{Д}(t)$ – мгновенное значение тока дуги одной из фаза, А; $i_{TA}(t)$ – мгновенное значение тока в измерительной обмотке трансформатора тока, А; K_{TA} – коэффициент трансформации измерительного устройства, о.е.; K_T – коэффициент трансформации печного трансформатора для выбранной ступени напряжения, о.е.

В большинстве случаев преобразование в соответствии с формулой (1) может быть реализовано с использованием инструментальной базы, доступной в большинстве современных систем управления электрическим режимом. Тем не менее в устаревших системах [1] иногда отсутствует возможность учёта изменения величины K_T в зависимости от ступени печного трансформатора $N_{ТР}$. Вследствие этого на аппаратном уровне приходится прибегать к использованию дополнительных трансформаторов тока, коэффициент трансформации которых изменяется при переключении РПН печного трансформатора, благодаря чему достигается незименная величина коэффициента трансформации $K_{TA1} \cdot K_{TA2} \cdot K_T$=const.

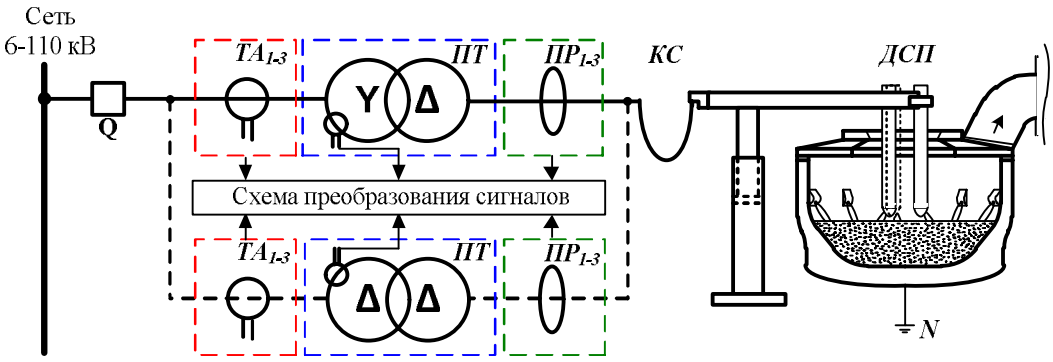

Рис. 1. Возможные типы систем измерения токов электрических дуг и соединения обмоток печного трансформатора: $ТА_{1-3}$ – измерительные трансформаторы тока в фазах «1», «2» и «3»; ПТ – печной трансформатор со встроенными в обмотку трансформаторами тока; $ПР_{1-3}$ – пояса Роговского в фазах «1», «2» и «3»; КС – короткая сеть; Q – оперативный вакуумный выключатель

Fig. 1. Possible types of systems for measuring electric arcs currents and connecting the windings of the furnace transformer TA_{1-3} are measuring current transformers in phases "1", "2" and "3"; ПТ is a furnace transformer with current transformers built into the winding; $ПР_{1-3}$ are Rogowski coils in phases "1", "2" and "3"; KC is a low voltage circuit, Q is a vacuum switch

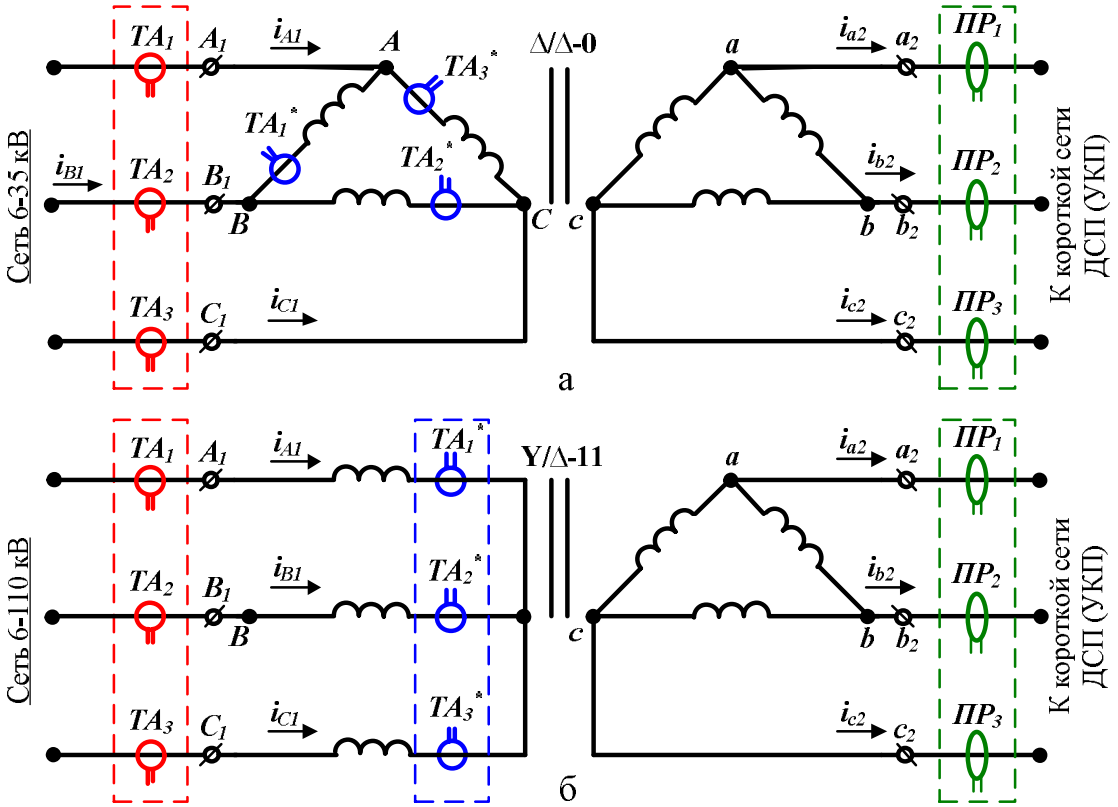

Рис. 2. Варианты включения устройств измерения тока дуги в схему электрического контура ДСП при соединении обмоток печного трансформатора по схеме: а – Δ/Δ-0; б – Y/Δ-11; i_{A1}, i_{B1}, i_{C1} – токи на первичной стороне печного трансформатора; i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} – токи на вторичной стороне печного трансформатора; TA_1, TA_2, TA_3 – внешние измерительные трансформаторы тока на первичной стороне ПТ; TA_1*, TA_2*, TA_3* – встроенные в ПТ измерительные трансформаторы тока

Fig. 2. Options for including arc current measuring devices into the electrical circuit of the EAF, when connecting the windings of the furnace transformer according to the scheme: a is Δ/Δ-0; б is Y/Δ-11; i_{A1}, i_{B1}, $i_{C1}$are currents on the primary side of the furnace transformer; i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} are currents on the secondary side of the furnace transformer; TA_1, TA_2, TA_3 are external measuring current transformers on the primary side of the furnace transformer; TA_1*, TA_2*, TA_3* are measuring current transformers built into the primary winding of the furnace transformer

Таблица. Особенности использования различных устройств измерения величины тока дуги в составе системы управления электрическим режимом ДСП (УКП)

T a b l e . Features of the use of various devices for measuring the value of the arc current as part of the EAF (LF) electric mode control system

Конфигурация измерительной системы токов	Соединение Δ/Δ-0	Соединение Y/Δ-0
Трансформаторы тока, установленные на первичной стороне ПТ	Требуется приведение к току вторичной стороны через КТ для текущей ступени ПТ	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму
Трансформаторы тока, включенные в обмотку на первичной стороне ПТ	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму
Пояса Роговского, установленные на вторичной стороне ПТ	Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осциллограмм токов дуг	Требуется интегрирование сигнала для для восстановления реальных осциллограмм токов дуг

Использование поясов Роговского на вторичной стороне печного трансформатора при соединении обмоток по схеме Δ/Δ-0 и Y/Δ-11

При использовании поясов Роговского выходной сигнал с катушки $U_{ПР}$ пропорционален производной тока $i_Д$. По этой причине в системе измерения тока используются интегрирующие цепи, восстанавливающие осциллограмму тока за счёт операции интегрирования:

$$u_{ПР}(t) = L_{ПР}\frac{di_Д(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$i_Д(t) = K_{ПР}\cdot\int u_{ПР}(t), \quad (3)$$

где $K_{ПР}$ – величина коэффициента пропорциональности пояса Роговского, равная индуктивности катушки $L_{ПР}$, Гн; $u_{ПР}(t)$ – напряжение на выходе пояса Роговского, В.

Как правило, в современных системах управления электрическим режимом предусмотрено наличие аппаратных цепей интегрирования для восстановления реальной осциллограммы тока дуги. При этом выходной сигнал цепей интегрирования нормируется до значения 20–40 мА или 1–5 А в зависимости от параметров входных датчиков тока, используемых в СУ ДСП (УКП). В этом случае в выражениях (2), (3) учитываются дополнительные коэффициенты трансформации интегрирующих цепей $K_{ИЦ}$.

Использование трансформаторов тока, встроенных в трёхфазную первичную обмотку печного трансформатора при группах соединения Δ/Δ-0 и Y/Δ-11

Необходимо отметить, что при подключении обмоток по схеме Y/Δ-11 сигналы с трансформаторов тока, встроенных в обмотку, и внешних трансформаторов тока, установленных перед трансформатором, по очевидным причинам дают эквивалентные результаты. Вследствие этого дальнейшее рассмотрение для соединения Y/Δ-11 будет проведено только для встроенных трансформаторов тока.

Отметим, что данный вариант является наиболее сложным в применении вследствие того, что характер изменения тока в измерительных обмотках трансформаторов при их соединении в схему «полная звезда» не совпадает с характером изменения тока на вторичной стороне ПТ из-за неодинакового соединения обмоток ПТ. Для исследования взаимосвязи между токами на первичной и вторичной сторонах ПТ была разработана математическая модель электрического контура ДСП [5–7], функциональная схема которой представлена на **рис. 3**.

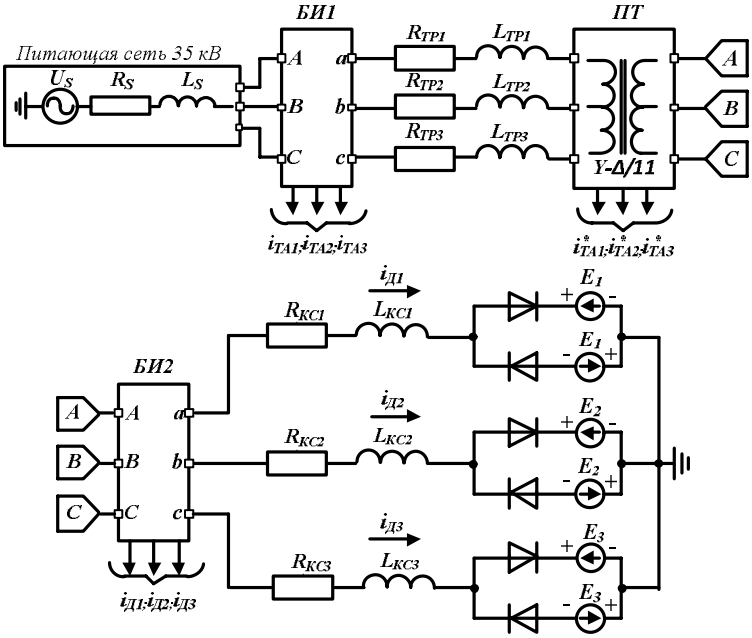

Рис. 3. Функциональная схема математической модели электрического контура ДСП с различными вариантами измерения сигнала тока дуги: БИ1 – блок измерения №1, моделирует внешние трансформаторы тока на первичной стороне; БИ2 – блок измерения №2 для определения фактического значения тока дуги; E1, E2, E3 – противоЭДС электрической дуги

Fig. 3. Functional diagram of the mathematical model of the EAF electrical circuit with various options for measuring the arc current signal: БИ1 is measurement unit No. 1, it simulates external current transformers on the primary side; БИ2 is measurement unit No. 2 to determine actual arc current; E1, E2, E3 are counter EMF of an electric arc

В качестве параметров для работы модели, зададимся следующими значениями: ступень печного трансформатора $N_{ТР} = 8$, линейное напряжение на первичной стороне $U_{1Л} = 35$ кВ; линейное напряжение на вторичной стороне $U_{2Л} = 847$ В; коэффициент трансформации ПТ $K_Т = 41{,}322$; активное сопротивление питающей сети, приведённое к первичной стороне $R_S = 0{,}135$ Ом; индуктивность питающей сети, приведённая к первичной стороне $L_S = 4{,}302$ мГн; активное сопротивление обмотки ПТ, приведённое к первичной стороне $R_{ТР1\text{-}3} = 0{,}0994$ Ом; индуктивность обмотки ПТ, приведённая к первичной стороне $L_{ТР1\text{-}3} = 7{,}534$ мГн; активное сопротивление участка короткой сети $R_{КС1} = 0{,}303$ мОм; $R_{КС2} = 0{,}240$ мОм; $R_{КС3} = 0{,}286$ мОм; индуктивное сопротивление участка короткой сети $L_{КС1} = 8{,}929 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{КС2} = 8{,}766 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{КС3} = 8{,}703 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Изначально рассмотрим осциллограммы, полученные с помощью математической модели при различных режимах работы печи (симметричный режим, однофазный обрыв дуги, однофазное КЗ дуги) для случая соединения обмоток ПТ по схеме Y/Δ-11 (**рис. 4, а-г**). На **рис. 4, а** и **4, б** показаны сигналы i_{TA} и i^*_{TA}, соответствующие сигналам с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока. Как уже отмечалось ранее, для случая Y/Δ-11 полученные сигналы идентичны. Отметим, что здесь и далее для удобства анализа принимается в качестве допущения, что коэффициент трансформации всех измерительных устройств равен 1.

На **рис. 4, в** приведены осциллограммы фактических значений токов электрических дуг $i_Д$. Очевидно, что сигналы $i_{ТА1,2,3}$ и $i^*_{ТА1,2,3}$ являются идентичными по форме и амплитуде только в симметричном режиме. В режиме однофазного обрыва и однофазного КЗ имеет место значительное расхождение как по амплитуде, так и по фазе сигнала. Для того чтобы получить расчётные корректные осциллограммы токов дуг $i_{Д_Р}$ на основании сигналов $i_{ТА1,2,3}$ и $i^*_{ТА1,2,3}$, необходимо использовать следующее преобразование:

$$\begin{cases} i_{Д1_Р} = K_Т(i^*_{ТА_1} - i^*_{ТА_2}) \\ i_{Д2_Р} = K_Т(i^*_{ТА_2} - i^*_{ТА_3}), \\ i_{Д3_Р} = K_Т(i^*_{ТА_3} - i^*_{ТА_1}) \end{cases} \quad (4)$$

где $i_{Д1_Р}$, $i_{Д2_Р}$, $i_{Д3_Р}$ – расчётные значения сигнала тока электрической дуги, А; $i^*_{ТА_1}$, $i^*_{ТА_2}$, $i^*_{ТА_3}$ – сигналы с трансформаторов тока на первичной стороне ПТ, А.

Выражения (4) получены на основании векторных диаграмм, представленных на **рис. 4**, показывающих взаимосвязь токов на первичной и вторичной стороне ПТ. Корректность преобразования (4) также подтверждается результатом моделирования, поскольку расчётный сигнал тока дуги $I_{Д_Р}$ (см. **рис. 4, г**) идентичен фактическому (см. **рис. 4, в**).

В случае осциллограмм для схемы соединения обмоток Δ/Δ-0 (**рис. 4, д-з**) в целом аналогична. Основное отличие заключается в том, что сигналы с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока не идентичны (**рис. 4, д** и **4, е**). Здесь очевидно, что сигнал с внешних трансформаторов тока пропорционален фактическому значению тока дуги и может быть рассчитан с использованием параметра $K_Т$, о чём говорилось ранее. При этом для сигналов с встроенных в обмотку трансформаторов тока, согласно векторной диаграмме на **рис. 5**, также необходимо прибегнуть к преобразованию:

$$\begin{cases} i_{Д1_Р} = \sqrt{3}K_Т(i^*_{ТА_1} - i^*_{ТА_3}) \\ i_{Д2_Р} = \sqrt{3}K_Т(i^*_{ТА_2} - i^*_{ТА_1}). \\ i_{Д3_Р} = \sqrt{3}K_Т(i^*_{ТА_3} - i^*_{ТА_2}) \end{cases} \quad (5)$$

Разработка универсального алгоритма обработки сигналов для различных конфигураций систем измерения токов

Проведённый в предыдущем разделе анализ показал, что в связи с многообразием применяемых на производстве систем измерения токов дуг особую актуальность приобретает задача разработки универсального алгоритма обработки сигналов, который позволил бы функционировать системе управления электрическим режимом, внедряемой на действующей ДСП (УКП) с любой конфигурацией измерительных цепей.

Универсальный алгоритм обработки токовых сигналов, реализуемый на базе контроллера системы автоматического управления электрическими режимами ДСП (УКП) должен обеспечивать простую интеграцию существующих систем измерения токов на базе ТТ или поясов Роговского со встроенными датчиками тока системы управления, обеспечивающими нормирование и гальваническую изоляцию сигналов.

В случаях, когда в составе электрооборудования ДСП (УКП) применяются встроенные или внешние трансформаторы тока, устанавливаемые на первичной стороне ПТ, использование данного алгоритма позволяет исключить применение дополнительных аппаратных устройств для формирования сигналов обратных связей по току с постоянным коэффициентом трансформации, например, дополнительных трансформаторов тока с изменяемым коэффициентом трансформации с функцией синхронизации с РПН ПТ. Вследствие этого предлагается на практике использовать алгоритм, функциональная схема которого представлена на **рис. 6**.

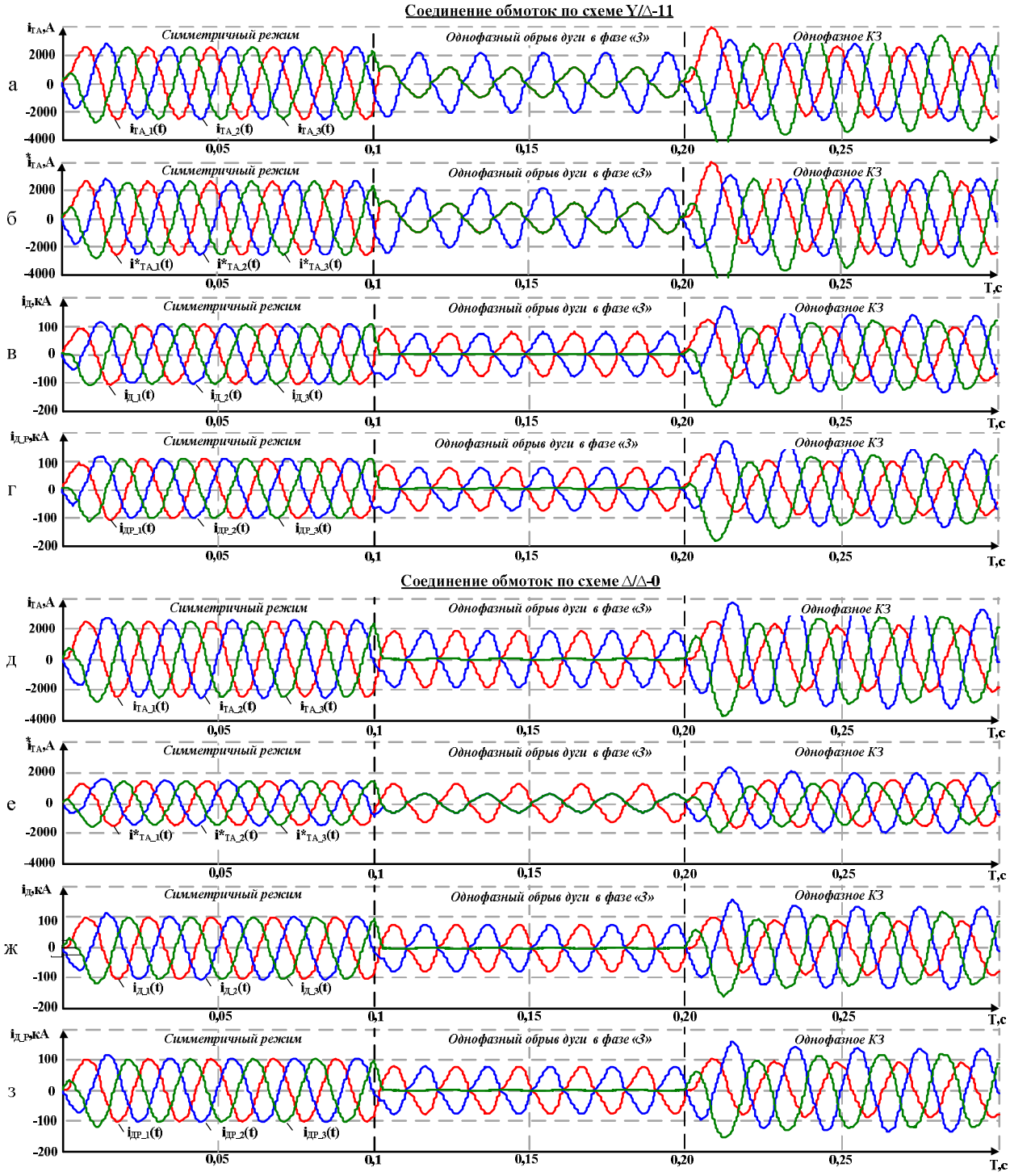

Рис. 4. Осциллограммы, демонстрирующие особенности применения встроенных в обмотку трансформаторов тока при различных способах соединения обмотки ПТ: а, д – осциллограммы сигналов с внешних трансформаторов тока; б, е – осциллограммы сигналов с внутренних трансформаторов тока; в, ж – осциллограммы фактического значения тока дуги; г, з – осциллограммы восстановленного значения тока дуги

Fig. 4. Oscillograms demonstrating the features of the use of current transformers built into the winding for various methods of connecting the furnace transformer winding: а, д are oscillograms of signals from external current transformers; б, е are oscillograms of signals from internal current transformers, в, ж are oscillograms of actual arc current; г, з are oscillograms of the restored arc current value

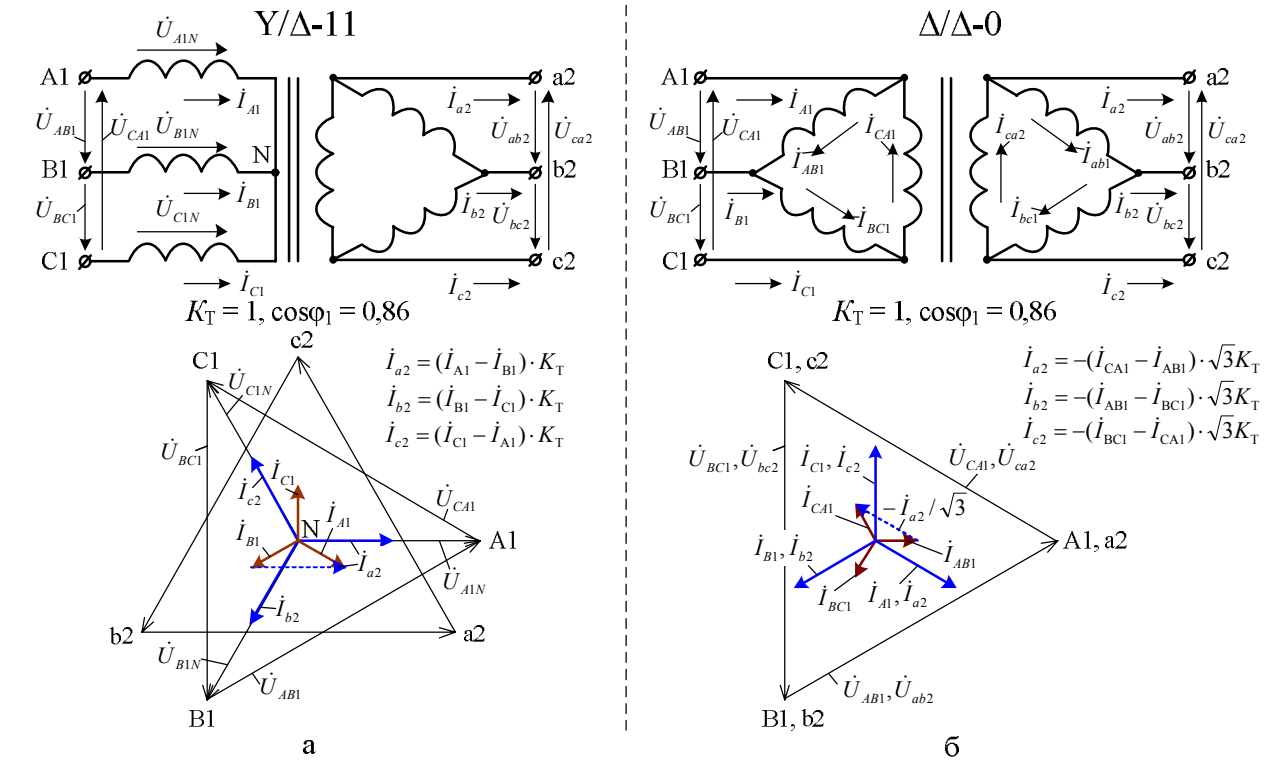

Рис. 5. Векторные диаграммы, показывающие взаимосвязь токов на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора при различных группах соединения обмоток: а – группа соединения Y/Δ-11; б – группа соединения Δ/Δ-0

Fig. 5. Vector diagrams showing the relationship between currents on the primary and secondary sides of the furnace transformer for different groups of the winding connection: a is connection group Y/Δ-11; б is connection group Δ/Δ-0

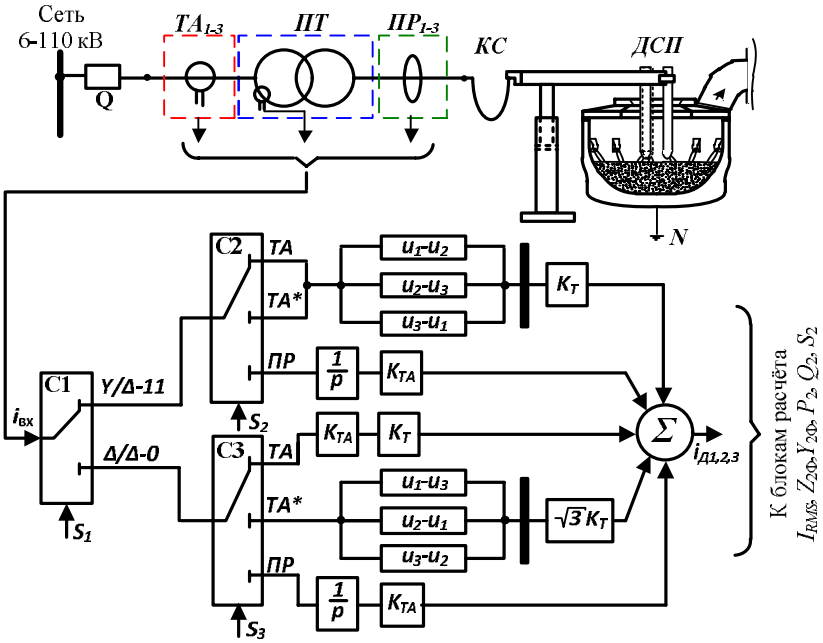

Рис. 6. Функциональная схема универсального алгоритма обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги: C1, C2, C3 – селекторы №1, 2, 3; S_1, S_2, S_3 – сигналы управления селекторами №1, 2, 3 соответственно

Fig. 6. Functional diagram of a multi-source signal processing algorithm for various methods of arc current measurement: C1, C2, C3 are selectors No.1, 2, 3; S_1, S_2, S_3 are control signals for selectors No. 1, 2, 3, respectively

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Изначально на вход селектора С1 подаётся сигнал $i_{ВХ}$ с системы измерения тока ДСП (УКП). В зависимости от величины сигнала управления S1 данный сигнал поступает либо на вход селектора С2 (случай соединения обмоток ПТ по схеме Y/Δ-11), либо на вход селектора С3 (случай соединения обмоток ПТ по схеме Δ/Δ-0). Величины управляющих сигналов S_2 и S_3 определяют, какое устройство измерения тока дуги используется на данный момент. После прохождения через селекторы входной сигнал подвергается преобразованиям, которые были подробно описаны ранее. Конечным результатом работы алгоритма является восстановленное значение сигнала тока электрической дуги на вторичной стороне ПТ, которое поступает непосредственно в систему управления электрическим режимом для дальнейшего расчёта действующего значения тока дуги I_{RMS}, полного импеданса фазы $Z_{2Ф}$ или полного адмиттанса фазы $Y_{2Ф}$, активной, реактивной и полной мощности на вторичной стороне ПТ P_2, Q_2, S_2 соответственно.

Заключение

1. На практике при эксплуатации систем управления электрическим режимом используются три основные конфигурации систем измерения токов дуг, а именно: 1) системы на базе внешних трансформаторов тока на первичной стороне печного трансформатора; 2) системы на базе измерительных трансформаторов тока, встроенных в печной трансформатор трансформатора; 3) системы на базе поясов Роговского, установленных на вторичной стороне печного трансформатора. Применение той или иной конфигурации при различных группах соединения обмоток печного трансформатора (Δ/Δ-0 или Y/Δ-11) влечёт за собой необходимость выполнения определённых предварительных преобразований для получения корректных сигналов мгновенных значений токов дуг.

2. В большинстве современных систем управления электрическим режимом ДСП (УКП) отсутствует возможность использования систем измерения токов дуг различной конфигурации. Как правило, имеется возможность работы только с одним типом системы измерения. Вследствие этого данные системы не обладают необходимой универсальностью, что в процессе эксплуатации ДСП (УКП) может вызвать проблемы функционирования этих систем, например при замене ПТ на новый с отличающейся группой соединения обмоток или установке системы измерения токов дуг другого типа.

3. Для решения вышеобозначенной проблемы разработан универсальный алгоритм обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги. Данный алгоритм может быть реализован как в составе новой системы управления электрическим режимом, внедряемой в производство, так и в составе отдельного модуля. Данный алгоритм обеспечивает возможность функционирования системы управления ДСП (УКП) при различных конфигурациях системы измерения токов дуг, а также при различных группах соединения обмоток печного трансформатора (Δ/Δ-0 и *Y*/Δ-11). Благодаря применению разработанного алгоритма все преобразования сигналов выполняются на программном уровне, без использования дополнительных аппаратных устройств в составе систем измерения тока, что повышает надёжность оборудования и обеспечивает меньшие эксплуатационные издержки [8–10].

Список литературы

1. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь// Вестник Южно-уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 52–64.
2. Krüger K. Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces // Ph.D. Dissertation. Universität der Bundeswehr Hamburg, Düsseldorf, 1998.
3. Boulet B., Lalli G., and Ajersch M. Modeling and control of an electric arc furnace // American Control Conf. 2000.
4. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Николаев А.А., Руссо Ж.Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 3. С. 106–120.
5. Bowman B. and Krüger K. Arc Furnace Physics // Germany: Verlag Stahleisen GmbH. 2009.
6. Panoiu M., Panoiu C., and Ghiormez L. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace // 5th Int. Workshop on Soft Computing Applications. 2012. Pp. 261–271.
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steelmaking furnace taking into account stochastic disturbances of arcs // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 16–19 May 2017, St. Petersburg, Russia.
8. Czapla M., Karbowniczek M., Michaliszyn A. The optimization of electric energy consumption in the electric arc furnace // Archives of Metallurgy and Materials. 2008.

9. Bai Erwei. Minimizing Energy Cost in Electric Arc Furnace Steel Making by Optimal Control Designs. // Journal of Energy. 2014. 1–9.
10. Schliephake H., Timm K., Bandusch L. Computer controlled optimization of the productivity of ISPAT-Hamburger Stalhwerke's AC-UHP-EAF//5th European Electric Steel Congress. June 19–23. 1995.

References

1. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivekeev V.S. The comparative analysis of modern electric mode control systems in electric arc and ladle furnaces. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: energetika* [Bulletin of South Ural State University (Section: Power Engineering)], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.)
2. Krüger K. Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces. Ph.D. Dissertation. Universität der Bundeswehr Hamburg, Düsseldorf, 1998.
3. Boulet B., Lalli G., Ajersch M. Modeling and control of an electric arc furnace. American Control Conf. 2000.
4. Nikolaev A.A., Rousseau J. J., Szymanski V., Tulupov P.G. An experimental study of electric arc current harmonics in electric arc furnaces with different power characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 3, pp. 106–120. (In Russ.)
5. Bowman B., Krüger K. Arc furnace physics. Germany: Verlag Stahleisen GmbH. 2009.
6. Panoiu M., Panoiu C., Ghiormez L. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace. 5th Int. Workshop on Soft Computing Applications, pp. 261–271, 2012.
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steelmaking furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 16–19 May 2017, St. Petersburg, Russia.
8. M Czapla M., Karbowniczek M., Michaliszyn A. The optimization of electric energy consumption in the electric arc furnace. Archives of Metallurgy and Materials, 2008
9. Bai Erwei. Minimizing energy cost in electric arc furnace steel making by optimal control designs. Journal of Energy, 2014, pp. 1–9.
10. Schliephake H., Timm K., Bandusch L. Computer controlled optimization of the productivity of ISPAT-Hamburger Stalhwerke's AC-UHP-EAF. 5th European Electric Steel Congress. June 19–23, 1995.

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 26.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 09/03/2021; revised 26/04/2021; published 28/06/2021

Николаев Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Тулупов Платон Гарриевич – аспирант, младший научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: tulupov.pg@mail.ru

Ивекеев Владимир Сергеевич – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vivekeev@yandex.ru

Alexander A. Nikolaev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Platon G. Tulupov – post graduate student, junior researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tulupov.pg@mail.ru

Vladimir S. Ivekeev – post graduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vivekeev@yandex.ru