

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

**Фарзалиев Мазахир Гамза оглы** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование отрасли», Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, г. Баку, Азербайджан, AZ1001.

**Фарзалиєв Мазахир Гамза огли** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологічні машини і обладнання галузі», Азербайджанський державний економічний університет, вул. Істіглаліят, 6, м Баку, Азербайджан, AZ1001.

**Farzaliyev Mazahir Gamza** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technological machinery and equipment industry", Azerbaijan State Economic University, ul. Istiglaliyyat, 6, Baku, Azerbaijan, AZ1001.

**Садирли Садраддин Мовлам оглы** – диссертант, Кафедра «Технологические машины и оборудование отрасли», Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, г. Баку, Азербайджан, AZ1001.

**Садірлі Садраддін Мовлам огли** – диссертант, Кафедра «Технологічні машини і обладнання галузі», Азербайджанський державний економічний університет, вул. Істіглаліят, 6, м Баку, Азербайджан, AZ1001.

**Sadirli Sadraddin Movlam** – candidate for a degree, Department "Technological machinery and equipment industry", Azerbaijan State Economic University, ul. Istiglaliyyat, 6, Baku, Azerbaijan, AZ1001.

УДК 669.041

С. А. ЛЕВЧЕНКО

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ И ТЕПЛОВОЕ ПОЛЯ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Предложена методика проведения теоретических исследований с помощью конформных отображений для определения физических полей в руднотермической плавильной печи. Рассмотрены наиболее распространенные функции комплексного переменного, выполняющие необходимые конформные отображения. Показано применение конформного отображения электрического поля одноэлектродной ванны для теоретического определения распределения электрической мощности и температуры в её объёме. Рассмотрена возможность разработки универсальных численных алгоритмов расчёта электрических и тепловых полей печи на ЭВМ.

**Ключевые слова:** руднотермическая плавильная печь, электрическое поле, электрическая мощность, тепловое поле, функции комплексного переменного, конформные отображения.

Запропонована методика проведення теоретичних досліджень за допомогою конформних відображень щодо визначення фізичних полів в руднотермічній плавильній печі. Розглянуто найбільш уживані функції комплексного змінного, що виконують необхідні конформні відображення. Показано застосування конформного відображення електричного поля одноелектродної ванни для теоретичного визначення розподілу електричної потужності та температури в її об'ємі. Розглянута можливість розробки універсальних чисельних алгоритмів розрахунку електричних та теплових полів печі на ЕОМ.

**Ключові слова:** руднотермічна плавильна піч, електричне поле, електрична потужність, теплове поле, функції комплексного змінного, конформні відображення.

This article considers the problem concerning the improvement of orethermal furnace's working regime, the distribution of thermal energy all over its contents volume, to be exact. For analytical determination of temperature distribution the conformal maps' theory is offered. This theory is widely used for solving actual tasks in aerodynamics, hydrodynamics, electrostatics, strength of materials, electrotechnics, thermotechnics, optics and others. The employment of conformal maps makes it possible to create the mathematical models of the temperature field distribution in time.

The methodic of theoretical researches carried out using the conformal maps to define physical fields in orethermal furnace is offered. The most widespread complex variable quantity functions carrying out essential conformal maps are considered. The employment of one electrode furnace's electric field conform map to determine the distribution of electric power and the temperature in its volume is shown. The working outs of universal numerical algorithms to calculate electrical and thermal furnace's fields with computer possibility is considered.

**Keywords:** orethermal furnace, electric field, electric power, thermal field, complex variable quantity functions, conformal maps.

**Введение.** Почти все руднотермические печи относятся к печам прямого нагрева. Тепловая энергия выделяется непосредственно в ванне печи в результате ее активного сопротивления электрическому току. Важнейшим параметром печи является электрическое сопротивление ванны. Пронизываемая током большой силы ванна находится в электромагнитном поле с высокой магнитной напряженностью, оказывающим влияние на распределение в ней мощности.

**Анализ публикаций и постановка проблемы.** Электрическое поле в руднотермической ванне является давно предметом изучения. Этому вопросу посвящены многие теоретические и экспериментальные исследования, в которых изучалось распределение тока в однофазной и трехфазной ваннах на электроли-

тических моделях, а также исследовалось поле однофазной ванны на моделях, в которых проводящей средой служил мелкий коксик или криптол [1–5]. Проводились имитации бесшлаковой ванны при помощи разных полупроводящих сред, выполненных в форме цилиндров и колец с разным электрическим сопротивлением. Проводилось математическое моделирование электрических полей трёхфазных руднотермических печей [6]. Также, большое значение придавалось изучению распределения тока непосредственно в действующих печах.

Качественно электрическое поле печи освещено достаточно широко, однако имеющиеся сведения недостаточны для точного расчета электрической мощности и температуры в каждой точке объема ванны.

© С. А. Левченко. 2016

**Применение конформных отображений для исследования электрического поля печи.** В каждом элементарном объёме ванны  $V$  активная электрическая мощность  $P$  рассчитывается по известной напряжённости электрического поля  $E$  и удельной электрической проводимости материала  $\gamma$  (удельному электрическому сопротивлению  $\rho$ ) по формуле:

$$P = \gamma E^2 V. \quad (1)$$

Активная мощность всей ванны

$$P_{\Sigma} = \sum P. \quad (2)$$

Удельная электропроводность  $\gamma$  является физической константой, не зависящей от геометрических размеров, но обусловленной физическим состоянием проводника. Ванну руднотермической печи только в единичных случаях можно рассматривать как среду с однородными физическими свойствами. В большинстве же случаев она представляет конгломерат веществ с разными физическими свойствами и разной электропроводностью. Несмотря на то что руднотермические печи применяют на протяжении многих десятилетий, нет достаточных сведений об электропроводности применяемых шихт, полученных шлаков и сплавов. Их электропроводность очень сильно зависит от температуры, состава, размеров гранул.

Простейшую картину электрического поля можно наблюдать на однофазной печи с проводящим подом и электродом круглого сечения. Поле такой цепи симметрично по отношению к вертикальной оси, совпадающей с осью электрода. Симметрию поля не нарушают ни гетерогенность загрузки, ни наличие на пути тока слоев шлака и металла с резко различной электропроводностью.

На рис. 1 изображено поле одноэлектродной однофазной ванны, полученное экспериментальным путем на модели, в которой проводящей средой служил просеянный коксик крупностью 0,5 мм [1]. Пунктиром показаны эквипотенциальные линии, сплошными – ток. Как указывалось выше, для определения электрической мощности в элементарном объеме необходимо знать напряженность электрического поля в данной точке. Известно, что напряженность электрического поля определяется из выражения  $E=U/l$ , где  $l$  – длина силовой линии.

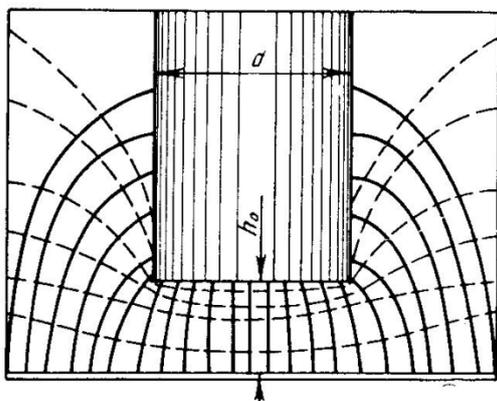


Рис. 1 – Электрическое поле однофазной ванны:  
d=200 мм; h=90 мм.

Из рис. 1 видно, что электрическое поле неравномерное. Наибольшая напряженность поля и плотность тока сосредоточены под электродом. Следовательно в этой зоне будет наибольшее тепловыделение. Вследствие неравномерности электрического поля определение напряженности представляет определенную трудность.

Поэтому предлагается использовать конформные отображения, позволяющие отобразить одну неравномерную заданную область на другую, равномерную, решение которой не вызывает трудностей. Использование конформных отображений позволяет успешно решать достаточно сложные задачи гидро-, аэро- и электродинамики, которые имеют большой интерес для теории теплового, электростатического, магнитного полей и многих других.

Если каждому комплексному числу  $z=x+jy$  из множества  $g$  (произвольная область) поставлено в соответствие одно или несколько (в случае многозначной функции) комплексных чисел  $w=u+jv$  из множества  $G$  (область, на которую производится конформное отображение), то считают, что  $w$  является функцией комплексного переменного  $z$ , которая определяется из множества  $g$ .

$$w = f(z). \quad (3)$$

Имея некоторую аналитическую функцию  $w=f(z)$ , можно произвольную область  $g$ , в которой эта функция однолистка, отобразить конформно на некоторую область  $G$ . Для практики большой интерес имеет вопрос, как по заданным областям  $g$  и  $G$  найти функцию, которая выполняет конформное отображение одной из этих областей на другую.

При решении основной задачи конформных отображений – задачи нахождения функции, выполняющей конформное отображение заданной области, приходится использовать различные специальные методы. Одним из методов есть подбор необходимых комбинаций элементарных функций при условии, что удастся найти области, которые отображаются этими функциями. Такой подход предусматривает свободное владение геометрическими свойствами элементарных функций комплексного переменного. Так как электрические поля в разных сечениях различны, то и комбинации элементарных функций разные.

Из элементарных функций наибольший интерес представляет дробно-линейная функция

$$w = \frac{az + b}{cz + d}. \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно  $z$ , получим

$$z = \frac{dw - b}{-cw + a}, \quad (5)$$

то есть обратная функция так же дробно-линейная.

Кроме дробно-линейной функции широкое распространение получили функции:

– степенная

$$w = z^a; \quad (6)$$

– показательная

$$w = e^z ; \tag{7}$$

- логарифмическая

$$w = lnz ; \tag{8}$$

- тригонометрические

$$w = \cos z , \tag{9}$$

$$w = \operatorname{tg} z . \tag{10}$$

Кроме этих функций задача конформных отображений может быть решена при помощи приближенных методов или интегралом Кристоффеля-Шварца [7–10].

Так, например, при помощи преобразования  $w=z^2$  декартова сетка плоскости  $z(x,y)$  преобразуется в параболическую сетку плоскости  $w(u,v)$  [8].

Видно, что параболическая сетка рис. 2, а соответствует картине электрического поля на рис. 1.

Чтобы получить из параболической сетки  $w(u,v)$  декартову сетку  $z(x,y)$  необходимо использовать обратное преобразование  $z = \sqrt{w}$  на положительной полуплоскости.

Напряженность равномерного электрического поля  $E$  в каждой точке пространства  $z(x,y)$  ( $G$  область) одинаковая и легко определяется. Для определения напряженности реального поля или плотности тока в какой-либо точке шихты или расплава  $w(u,v)$  ( $G$  область) необходимо предварительно найденное значение напряженности поля или плотности тока пересчитать через формулу преобразования координат  $w=f(z)$ .

Конформные отображения можно применять и к полям трехфазных трехэлектродных ванн, являющихся наиболее распространенными. Их достоинства заключаются в цилиндрической форме и симметричном расположении электродов, обеспечивающими равномерное распределение мощности по электродам и в рабочем сечении ванны. Независимо от схемы включения электродов ток в ванне протекает по нормали к

эквипотенциальным линиям. Проводящий под, или металл, образует электрический нуль печи (рис. 3).

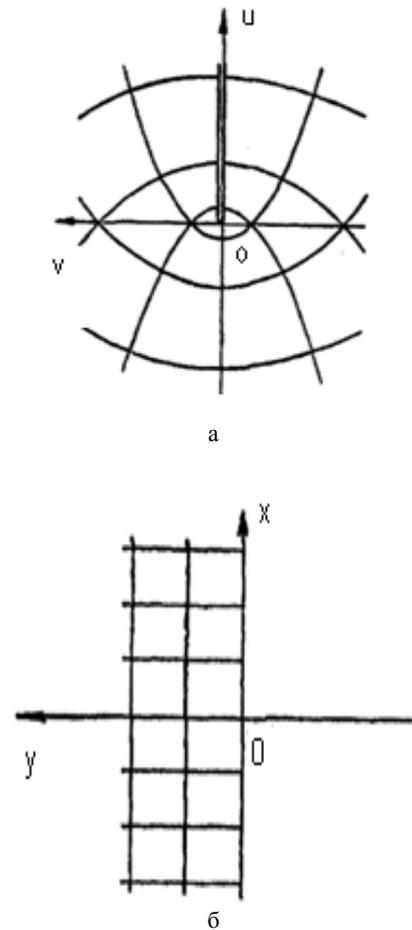


Рис. 2 – Конформное отображение  $w=z^2$ : а – параболическая сетка плоскости  $w=u+jv$ ; б – декартова сетка плоскости  $z=x+jy$ .

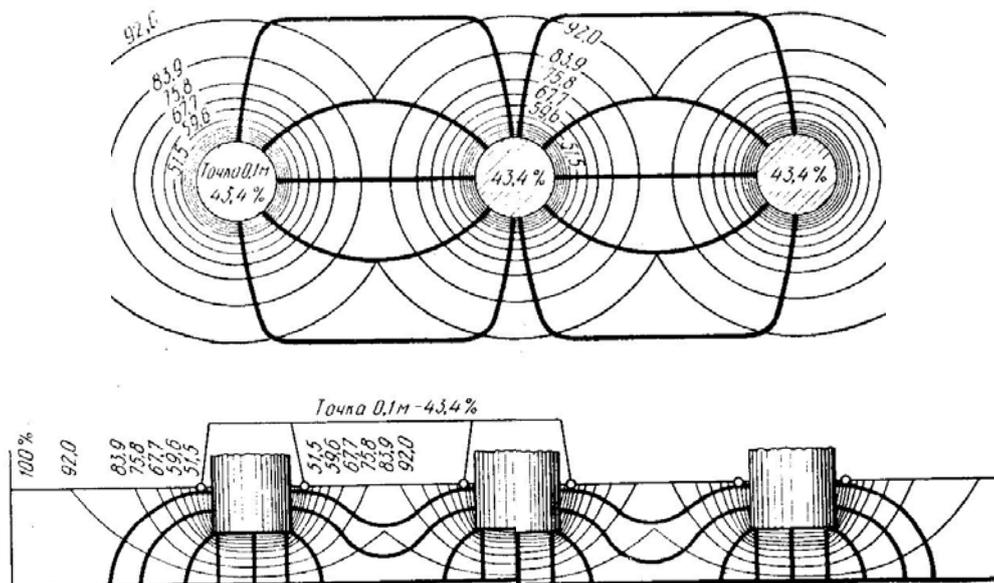


Рис. 3 – Электрическое поле ванны для медно-никелевого штейна при среднем погружении электродов

Цифры у кривых на рис. 3 – падение напряжения между электродами и данной точкой поля (% к напряжению фазы) [5].

В круглой ванне с электродами, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, электрические поля фаз симметричны, сопротивления фаз одинаковы.

Приведенная схема электрического поля трехфазной ванны условна. Она построена по эффективной величине сил тока и, следовательно, даёт представление об эффективном электрическом поле. В действительности токи в фазах сдвинуты во времени и меняются со скоростью, соответствующей удвоенной частоте тока.

Разнообразие и сложность геометрических форм и размеров современного электротехнологического оборудования, все более жесткие требования, предъявляемые к точности их расчета, с одной стороны, указывают на ограниченную область применения аналитических методов для такого расчета, а, с другой стороны, подчеркивают актуальность разработки универсальных численных алгоритмов расчета, в данном случае – электромагнитных полей, ориентированных на применение вычислительных технологий. Располагая подобными алгоритмами, позволяющими варьировать геометрическими параметрами, свойствами материалов и другими характеристиками, можно заменить длительный эксперимент быстрым расчетом на ЭВМ различных вариантов и выбором оптимального из них. При этом создаются предпосылки автоматизации режима работы ванн.

#### Выводы

1. Для определения электрической мощности в каждом элементарном объеме ванны предложено использовать конформное отображение заданной области с неравномерным электрическим полем в область с равномерным полем, что даст возможность рассчитать его напряженность.

2. Для расчета действительной напряженности электрического поля в каждой точке ванны необходимо величину напряженности равномерного поля пересчитать через формулу преобразования координат  $w=f(z)$ . Точность нахождения действительной напряженности поля зависит от того, насколько точно подобрана функция конформного отображения.

3. Использование алгебраических функций конформных отображений дает возможность разработать соответствующие компьютерные программы для расчета электромагнитных и тепловых полей в руднотермических плавильных печах.

#### Список литературы:

1. Сисоян, Г. А. Электрическая дуга в электрической печи [Текст] / Г. А. Сисоян. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 216 с.
2. Сергеев, П. В. Энергетические закономерности руднотермических электропечей, электролиза и электрической дуги [Текст] / П. В. Сергеев. – Изд. АН КазССР, 1963. – 184 с.
3. Платонов, Г. Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей [Текст] / Г. Ф. Платонов. – М.: Энергия, 1965. – 224 с.
4. Альтгаузен, А. П. Электротермическое оборудование. Справочник [Текст] / А. П. Альтгаузен. – М.: Энергия, 1967. – 216 с.
5. Струнский, Б. М. Руднотермические плавильные печи [Текст] / Б. М. Струнский. – М.: Metallurgija, 1972. – 368 с.
6. Ольдзиевский, С. А. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии [Текст] / С. А. Ольдзиевский, В. А. Кравченко, В. И. Нежурин, И. А. Борисенко. – М.: Metallurgija, 1990. – 114 с.
7. Фильчаков, П. Ф. Приближенные методы конформных отображений [Текст] / П. Ф. Фильчаков. – К.: Наукова думка, 1964. – 218 с.
8. Лаврик, В. И. Справочник по конформным отображениям [Текст] / В. И. Лаврик, В. Н. Савенков. – К.: Наукова думка, 1970. – 252 с.
9. Угодчиков, А. Г. Построение конформно отображающих функций при помощи электромоделирования и интерполяционных полиномов Лагранжа [Текст] / А. Г. Угодчиков. – К.: Наукова думка, 1966. – 238 с.
10. Пачколин, Ю. Е. Використання конформних відображень для дослідження електрофізичних параметрів течії розплаву металу в електродуговій сталеплавильній печі [Текст] / Ю. Е. Пачколин, О. О. Бондаренко, С. А. Левченко // Энергосбережение Энергетика Энергоаудит. – 2015. – No4(135). – С. 40–45.

#### Bibliography (transliterated):

1. Sisojan, G. A. (1961). Elektricheskaja duga v elektricheskoy pechi. Moscow: Metallurgizdat, 216.
2. Sergeev, P. V. (1963). Energeticheskie zakonomernosti rudnotermicheskikh elektropechej, elektroliza i elektricheskoy dugi. Akademija Nauk KazSSR, 184.
3. Platonov, G. F. (1965). Parametry i elektricheskije rezhimy metallurgicheskikh elektrodnykh pechej. Moscow: Energija, 224.
4. Altgauzen, A. P. (1967). Elektrottermicheskoe oborudovanije. Spravochnik. Moscow: Energija, 216.
5. Strunskij, B. M. (1972). Rudnotermicheskie plavilnye pechi. Moscow: Metallurgija, 368.
6. Oldzjevskij, S. A., Kravchenko, V. A., Nezhurin, V. I., Borisenko, I. A. (1990). Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh polej pechej rudnoj elektrotermii. Moscow: Metallurgija, 114.
7. Filchakov, P. F. (1964). Priblizhennye metody konformnykh otobrazhenij. Kyiv: Naukova dumka, 218.
8. Lavrik, V. I., Savenkov, V. N. (1970). Spravochnik po konformnym otobrazhenijam. Kyiv: Naukova dumka, 252.
9. Ugodchikov, A. G. (1966). Postroenie konformno otobrazhajushhikh funkcij pri pomoshhi elektromodelirovanija i interpoljacionnykh funkcij Lagranzha. Kyiv: Naukova dumka, 238.
10. Pachkolin, J. E., Bondarenko, O. O., Levchenko, S. A. (2015). Vykorystannja konformnykh vidobrazhenj dlja doslidzhennja parametriv techiji rozplavu metalu v elektrodugovij staleplavilnij pechi. Energoberezenije Energetika Energoaudit, 4(135), 40–45.

Поступила (received) 10.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Електромагнітне та теплове поля руднотермічної плавильної печі/ С. А. Левченко// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – No 17(1189). – С.76–80. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Электромагнитное и тепловое поля руднотермической плавильной печи/ С. А. Левченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.76–80. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Electromagnetic and thermal fields of orethermalfurnace/ S. Levchenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.76–80. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Левченко Сергій Андрійович** – кандидат технічних наук, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри "електротехніки та енергоефективності"; пр. Соборний 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006; тел.: +38(063) 604-56-76; e-mail: [levchenko\\_s@rambler.ru](mailto:levchenko_s@rambler.ru).

**Левченко Сергей Андреевич** – кандидат технических наук, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры "Электротехники и энергоэффективности"; пр. Соборный 226, г. Запорожье, Украина, 69006; тел.: +38(063) 604-56-76; e-mail: [levchenko\\_s@rambler.ru](mailto:levchenko_s@rambler.ru).

**Levchenko Sergiy** – candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhia State Engineering Academy; Sobornyj prosp. 226, Zaporizhia, Ukraine, 69006; tel.: +38(063) 604-56-76; e-mail: [levchenko\\_s@rambler.ru](mailto:levchenko_s@rambler.ru).

УДК 62-663.7 (045)

**В. И. РЫНДЯЕВ**

## НАПРАВЛЕНИЯ В СОЗДАНИИ ТРАНСМИССИЙ ПРИВОДОВ КОКСОВЫХ МАШИН

Создание трансмиссий приводов коксовых машин рациональной конструкции, обладающих повышенным уровнем работоспособности, является актуальной задачей. Проанализированы схемные и конструктивные решения приводов современных коксовых машин. Рассмотрены индивидуальный и групповой приводы машин. Обобщен опыт создания традиционных и новых систем трансмиссий приводов коксовых машин. Нахождение оптимального схемного решения связано, главным образом, с творческим уровнем конструктора. Разработаны обоснованные решения для проектирования работоспособных систем трансмиссий, на основе методов снижения действующих нагрузок.

**Ключевые слова:** коксовые машины, трансмиссия, нагрузки, привод.

Створення трансмісій приводів коксових машин раціональної конструкції, що володіють підвищеним рівнем працездатності, є актуальним завданням. Проаналізовано схемні і конструктивні рішення приводів сучасних коксових машин. Розглянуто індивідуальний і груповий приводи машин. Узагальнено досвід створення традиційних і нових систем трансмісій приводів коксових машин. Знаходження оптимального схемного рішення пов'язане, головним чином, з творчим рівнем конструктора. Розроблено обґрунтовані рішення для проектування працездатних систем трансмісій, на основі методів зниження діючих навантажень.

**Ключові слова:** коксові машини, трансмісія, навантаження, привід.

Creating transmission drives for rational designed coking machines with the high level of efficiency is an urgent task. Transmissions of drives for various coking machines have been investigated. Schematics and designs of modern drives for coking machines have been analyzed. Formation of values of operating load with accounting of the maximum load has been studied. Individual and group drives of machines have been considered. The effect of design decisions on the selection of the optimal design has been analyzed. The experience of creation of traditional and new transmission systems for drives of coking machines has been generalized. Finding the optimal circuit design associated primarily with the creative designer level. Sustainable solutions for design of efficient transmission systems based on methods of reducing operating loads have been developed.

**Keywords:** coking machines, transmission, load, drive.

**Введение.** В решении задачи успешного развития промышленного производства Украины, важное значение занимает увеличение объемов и повышение качества кокса. Поэтому конструкторским организациям необходимо уделять большое внимание созданию современных коксовых машин.

В настоящее время разрабатываются новые и реконструируются эксплуатирующиеся машины, принимаются меры для увеличения мощностей и расширения технологических возможностей заводов - изготовителей коксового оборудования.

В результате этого коксохимические заводы страны оснащены рядом современных машин, разрабатывается и изготавливается новое высокопроизводительное оборудование.

Высокая производительность коксовых машин достигается, главным образом, за счет очень точной взаимной увязки их в работе [1]. Выход из строя одной из машин вызывает остановку работы всех остальных. Устойчивостью работы коксового оборудования в значительной степени определяются экономические показатели коксового цеха.

Анализ эксплуатационных условий, в которых работает коксовое оборудование, показывает, что наиболее напряженными в работе являются трансмиссии приводов коксовых машин [1–10].

Поэтому создание трансмиссий приводов рациональной конструкции, обладающих повышенным уровнем работоспособности, является актуальной задачей.