

УДК 621.365.5:614.8.084

А. Н. Иванов

## Методы расчета электродинамических усилий в устройствах индукционного нагрева

*Рассмотрены различные методики расчета аксиальных и радиальных электродинамических усилий (ЭДУ) в устройствах индукционного нагрева цилиндрического типа. Приведено описание методики, позволяющей с приемлемой точностью оценить средние значения радиальных и аксиальных составляющих ЭДУ, действующих в индуктирующей системе. Приведена схема алгоритма и результаты расчета, полученные при использовании программы электротеплового анализа ELTA<sup>20</sup>.*

### Индукционный нагрев, электродинамические усилия, моделирование индукционных установок

Решение задач, касающихся электромагнитно-механической совместимости<sup>1</sup> (ЭММС) индукционных нагревательных установок при их проектировании, которые приходится решать в первую очередь самим конструкторам или с привлечением известных ученых-исследователей, является непростым делом. Сложность задачи обусловлена тем, что возможных независимых параметров, от которых зависят электродинамические усилия (ЭДУ), являющиеся объектом внимания ЭММС, может быть достаточно много. К ним относятся характеристики источника питания (частота тока, мощность и др.), конфигурация индуктирующей системы, которая создает осевые усилия, взаимное расположение заготовок и индукторов и многое другое.

Чаще всего приходится полагаться на накопленный годами опыт и интуитивно определять требуемые параметры индуктирующих катушек, магнитопроводов, приводных механизмов загрузки и выгрузки заготовок. Детальный анализ возможных проблем технологической надежности и безопасности индукционного нагревательного процесса чаще всего не проводится даже при разработке нового оборудования с неизвестным его поведением в предсказуемых или заранее предвидимых нештатных или аварийных режимах. Тем

не менее, вопросы о том, как оценить электродинамические усилия, действующие на индуктирующую катушку или заготовку, возникают у разработчиков даже в настоящее время. И это несмотря на то, что теория определения ЭДУ известна и разработана достаточно хорошо. Кроме того, существуют различные программы расчета электромагнитных и тепловых параметров индукционных нагревателей, которые при некоторых модификациях могли бы быть адаптированы для расчета ЭДУ.

Для исключения этого пробела предложен алгоритм и реализуемая в программе ELTA<sup>20</sup> отдельная часть программного обеспечения, позволяющая разработчикам цилиндрических индукционных нагревателей достаточно просто решить некоторые проблемные задачи, которые могут встретиться в процессе эксплуатации, на этапе проектирования или испытаний. Исследуя шаг за шагом поведение индукционной системы при известных условиях, можно выбрать рациональный вариант конструкции отдельных элементов и предложить необходимые решения, тем самым устранить или сократить риск, сделав изначально безопасной конструкцию и собранные части установки, и принять все необходимые меры защиты от негативных воздействий, которые не могут быть устранены.

С точки зрения ЭММС наибольший интерес представляет задача нахождения сил, действующих либо на отдельные слитки, либо на весь столб заготовок, а также на индуктирующую катушку и магнитопровод при его наличии.

<sup>1</sup> Электромагнитно-механическая совместимость – это способность индукционных установок удовлетворительно функционировать, не создавая недопустимых электродинамических воздействий на конструктивные элементы самой установки и нагреваемые изделия, а также недопустимых проблем для обслуживающего персонала и других систем, находящихся в непосредственном их окружении [1].

Подробный анализ расчетных формул для нахождения электродинамических усилий и их применения для индукционных нагревательных установок в известных литературных источниках [1]–[5] показал, что для решения данных задач может быть с успехом использована одна из трех возможных моделей, приведенных в [2, с. 32–34]. Для этого достаточно взять производную от электромагнитной энергии по координате при изменении геометрического параметра исследуемой системы.

Для нахождения средней во времени силы  $F_z$ , действующей в направлении оси  $Z$ , использовалась формула [2]

$$F_z = \left| \frac{\partial W}{\partial Z} \right| = \frac{\partial(LI^2)}{2\partial Z} = \frac{\partial(\omega LI^2)}{2\omega\partial Z} = \frac{\partial Q}{2\omega\partial Z},$$

где  $W$  – электромагнитная энергия системы;  $L$  – индуктивность системы;  $I$  – ток индуктора,  $\omega$  – круговая частота;  $Q$  – реактивная мощность системы «индуктор–заготовка».

Таким образом, зная зависимость реактивной мощности от координаты, можно определить и соответствующие ЭДУ.

Такой достаточно простой подход к решению задач показал свои преимущества и был успешно

Средняя во времени сила  $F_R$ , действующая на всю индуктирующую катушку или магнитопровод в направлении оси  $R$ , имеет вид

$$F_R = \frac{\partial Q}{2\omega\partial R}.$$

Особенностью индукционного технологического процесса является то, что заготовки нагреваются, а их электротепловые параметры изменяются, причем достаточно сильно. Двумерная электротепловая модель и программа ELTA<sup>20</sup> позволяет учитывать изменение температуры загрузки и определять реактивную мощность достаточно точно, чтобы исключить погрешности, связанные с недостаточно корректными заданиями электрических параметров отдельных частей загрузки в процессе расчета.

Для пояснения разработанного алгоритма рассмотрим расчетную схему определения ЭДУ, действующих на загрузку, в процессе выгрузки цилиндрических заготовок из проходного нагревателя полунепрерывного типа в рис. 1.

Технологический процесс реализуется следующим образом. Заготовки поступают в индуктор и с заданным темпом перемещаются слева направо по направляющим, на которых они нахо-

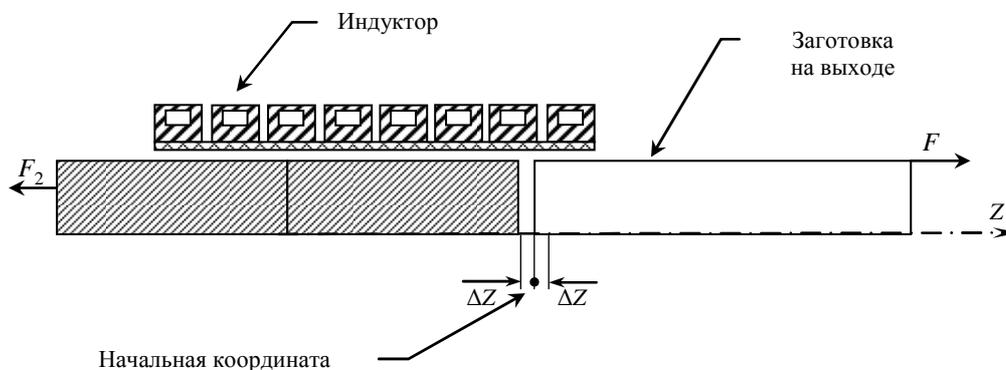


Рис. 1

применен для нахождения усилий, действующих на отдельные заготовки, в ряде работ [2]–[4], [6]. Сравнение с экспериментальными данными выявило хорошую точность расчета осевых усилий, что позволяет считать предложенную методику достоверной и проводить дальнейшие исследования. Однако, в связи с тем что в общем случае ставилась только научная задача изучения характера электродинамических усилий и в основном только постановочная, расчеты проводились вручную, со многими допущениями, чаще всего не соответствующими реальным условиям.

дятся. От момента входа до момента выхода из индуктора они нагреваются. При перемещении последняя заготовка, нагретая до требуемой температуры, должна покинуть индуктор. Вариантов выгрузки и, следовательно, отрыва ее от всего столба заготовок может быть достаточно много. Нас интересует только то, что в определенный момент (во времени и в пространстве) зазор между этой заготовкой и остальными заготовками начнет увеличиваться.

Момент начала перемещения может быть известен или определен. К примеру, при устано-

вившемся процессе нагрева в полунепрерывном нагревателе это – наступление момента выгрузки. Тогда температура заготовок достигнет заданного значения и при расчете усилий можно считать, что она не будет существенно изменяться в дальнейшем.

Первоначальное пространственное расположение загрузки в момент отрыва может быть задано любым в зависимости от того, что должно быть исследовано. Обычно определяется значение оптимального заглубления последней заготовки внутрь индуктора, при котором достигается заданный перепад температуры. Это служит отправной пространственной точкой для расчета ЭДУ при выгрузке нагретой заготовки из индуктора. Последующая заготовка после перемещения должна занять позицию, на которой находилась ранее нагретая заготовка. Это означает, что после перемещения всего столба загрузки левый торец выгружаемой заготовки находится в индукторе на расстоянии, равном величине заглубления в индуктор, а правый торец находится за пределами индуктора на расстоянии, зависящем от длины заготовки. Именно эта начальная координата отрыва заготовки, к примеру с помощью механизма выгрузки, определяет пространственную координату начала расчета.

В ряде случаев, что представляет интерес с точки зрения проверки индукционного нагревателя на соответствие заданной степени жесткости испытаний на ЭММС, пространственное расположение может быть другим. Нагретая заготовка может начать перемещаться гораздо раньше, чем последующая заготовка достигнет своего исходного положения перед выгрузкой. Это определяет разработчик, если варианты возможны. В первую очередь они должны быть рассмотрены с позиций надежности технологического процесса и его безопасности, поскольку усилие в данном случае будет значительно большее, чем обычно.

Таким образом время и пространственное расположение исследуемого варианта определены. Будем считать, что температура заготовок не изменится, поэтому можно провести только расчет внешней электромагнитной задачи и последовательно определить изменение реактивной мощности при изменении координаты. Для того чтобы определить усилие, действующее на заготовку в точке  $i$ , достаточно реализовать смещение загрузки на малое перемещение  $\Delta Z$  в направлении оси  $Z$  и такое же перемещение в противоположном

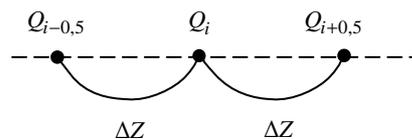


Рис. 2

направлении. Фрагмент расчетной одномерной сетки представлен на рис. 2.

Приращение реактивной мощности  $\Delta Q_i$  в соответствующем узле пространственной сетки можно определить по формуле

$$\Delta Q_i = \frac{Q_{i-0,5} - Q_{i+0,5}}{2}.$$

Тогда аксиальная составляющая ЭДУ, действующей на одиночный слиток, будет равна

$$F_Z = \frac{Q_{i-0,5} - Q_{i+0,5}}{4\omega\Delta Z}.$$

При нахождении усилий таким методом имеются некоторые расчетные проблемы. Так, основным режимом при расчете интегральных электрических параметров индуктора в программе ELTA<sup>20</sup> является задание постоянного напряжения на индукторе, которое может меняться от стадии к стадии в условиях задачи. Обычно в устройствах индукционного нагрева напряжение на индукторе остается постоянным или мало изменяется при перемещении заготовки. Однако если в расчете ЭДУ брать реактивные мощности при постоянном напряжении на индукторе, то результат может оказаться неверным, вплоть до того, что направление силы будет другим, не говоря о модуле. В связи с этим при расчете параметров индуктора при смещении заготовки приходится подбирать ток, который должен быть равен току индуктора при исходном расположении заготовки в индукторе, то есть в точке  $i$ .

В случае немагнитной загрузки эта проблема устраняется достаточно просто, надо только пересчитать реактивную мощность индуктора, приведя его к исходному току, взяв отношение квадратов тока при смещении и без него.

При расчете индуктора с ферромагнитной загрузкой ситуация несколько сложнее. Если требуется рассчитать аксиальную составляющую силы, действующей на загрузку в заданной точке  $i$ , необходимо рассчитать усилия слева и справа от заданной точки на расстоянии  $\Delta Z$ . При этом расчеты должны быть проведены при одном и том

же токе индуктора, то есть в точке  $i$ . В связи с этим для режима напряжения приходится реализовать несколько итераций расчета внешней и внутренней электротепловых задач в каждой точке посредством изменения величины питающего напряжения.

Следует напомнить, что расчет необходимо проводить при одних и тех же условиях, полученных на данный момент времени (тепловое поле не должно меняться).

Далее приведены стадии расчета аксиальной составляющей силы, действующей на одиночную заготовку в нагревателе полунепрерывного действия, реализованные в модуле EDF среды ELTA2D:

- Создание исходной задачи для расчета параметров нагревателя: задание необходимого числа индукторов и их геометрических характеристик, определение взаимного расположения с учетом используемых направляющих и механизмов перемещения, задание параметров режима нагрева.

- Предварительный расчет параметров выбранной системы и корректировка исходных данных для получения заданных технологических параметров.

- Выбор рациональной компоновки и параметров индукционной установки.

- Анализ компоновки модели индукционного нагревателя и выявление потенциально критических режимов. Формирование пространственной сетки, в узлах которой должен быть осуществлен расчет аксиальной составляющей ЭДУ.

- Вычисление распределения аксиальной силы  $F_{Z_i}$  вдоль оси  $Z$  до момента полной выгрузки заготовки из индуктора по заданному значению величины максимального смещения последней заготовки относительно начальной координаты отрыва или относительно другой заданной координаты, к примеру торца индуктора.

- Вычисление разности аксиальной силы и силы трения при заданном значении коэффициента трения заготовки о направляющую.

Результатом расчета является зависимость аксиальной силы  $F_{Z_i}$  и разности аксиальной силы и силы трения  $\Delta F_{Z_i}$  от смещения загрузки  $\Delta Z$  относительно начальной координаты отрыва или торца индуктора в момент выгрузки последней заготовки.

На основе анализа данного графика разработчику легко оценить степень риска разрабатываемого технологического процесса по критериям надежности и безопасности и сделать заключение о необходимости изменения параметров и конструкции индукционного нагревателя.

Аналогично аксиальной силе  $F_{Z_i}$ , среднее значение радиальной составляющей силы  $F_{R_i}$ , действующей на всю обмотку индуктора (рис. 3), может быть определено, исходя из соотношения

$$F_{R_i} = \frac{Q_{i-0,5} - Q_{i+0,5}}{4\omega\Delta R}.$$

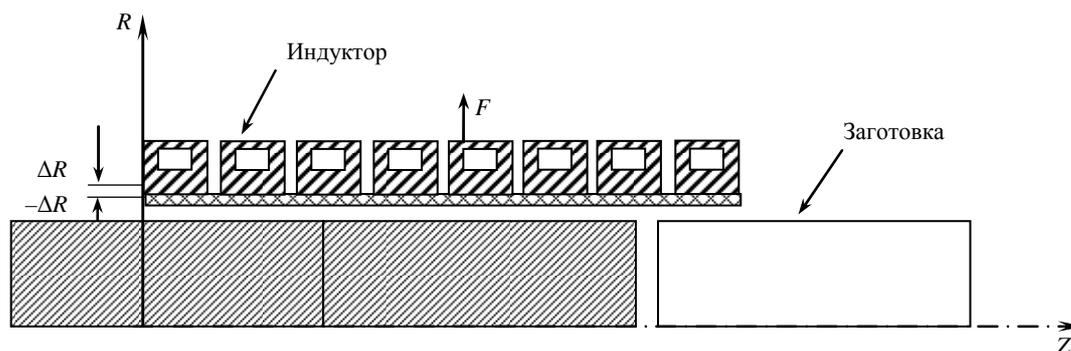


Рис. 3

- Моделирование электротеплового процесса в соответствии с заданным режимом работы.

- Определение значений реактивной мощности в точках  $i \pm 0,5$  при заданном состоянии электротеплового поля решением внутренней электротепловой задачи при сохранении температурного поля неизменным по объему загрузки и соответственно внешней электрической задачи.

В большинстве случаев достаточно оценить усилие в виде числового значения при заданном времени расчета. Так же как и в ранее рассмотренном случае, при заданном температурном поле делается расчет внутренней и внешней электромагнитных задач с изменением радиуса индуктора (эквивалентного радиуса при расчете) в большую и меньшую сторону и определяются реактивные мощности.

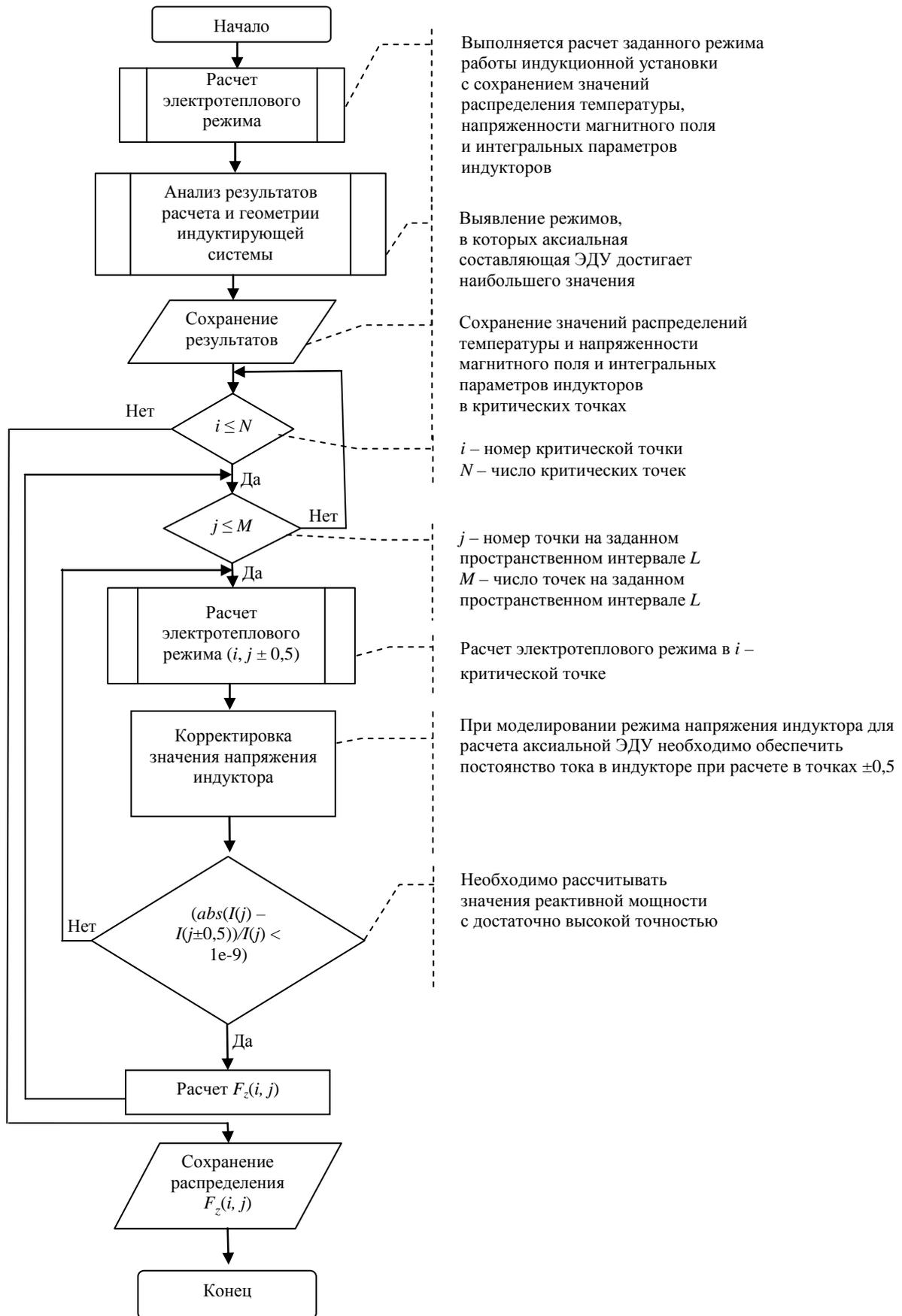


Рис. 4

Далее приведены стадии расчета радиальной составляющей силы, реализованные в модуле EDF среды ELTA<sup>20</sup>:

- Создание исходной задачи для расчета параметров нагревателя, предварительный расчет параметров выбранной системы и корректировка исходных данных для получения заданных технологических параметров, выбор рациональной компоновки и параметров индукционной установки.

- Анализ компоновки модели индукционных нагревателей и задание условий для расчета радиальных усилий. Формирование пространственной сетки, в узлах которой должен быть осуществлен расчет радиальной составляющей ЭДУ.

- Определение значений реактивной мощности в точках  $i \pm 0,5$  при заданном состоянии электротеплового поля.

- Вычисление суммарного значения радиальной силы  $F_{R_i}$ , действующей на витки рассматриваемого индуктора.

Расчеты реактивной мощности проводятся при одном и том же токе индуктора, соответствующем току в точке  $i$ , с помощью введения корректировки величины питающего напряжения в точках  $i \pm 0,5$  и использования дополнительных итераций при расчете электромагнитных задач до получения требуемой точности расчета.

На рис. 4 приведена структурная схема алгоритма расчета аксиальной и радиальной составляющих ЭДУ.

На основе анализа значения суммарного усилия, действующего на индуктор, разработчик может оценить прочность выбранного токопровода, статические и динамические напряжения на элементы катушки и сделать заключение о необходимости изменения параметров и конструкции индукционного нагревателя. Если индуктор состоит из одного витка, то рассчитанное усилие полностью приложено к нему. Если же индуктирующая катушка имеет много витков, суммарное усилие распределяется между этими витками: в центральной части оно максимальное, а к торцевым частям уменьшается за счет снижения аксиальной составляющей индукции магнитного поля. Расчет и анализ распределения аксиальной и радиальной составляющих ЭДУ, действующих на отдельные витки индуктора, должен проводиться отдельно.

Аналогично составлен алгоритм и программа расчета для магнитопровода. При использовании двумерного расчета магнитопровод представляется цилиндрическим. Если магнитопровод имеет другую форму, требуются трехмерные программы расчета.

Для одновременного режима работы алгоритм остается почти таким же. Изменения касаются только параметров смещения, которое может быть принято относительно центра индуктора или одного из его торцов. Программа сама определяет, по какому алгоритму пойдет расчет, в зависимости от типа нагревателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буканин В. А., Иванов А. Н. Электромагнитно-механическая совместимость индукционных нагревателей // Индукционный нагрев. 2012. № 19. С. 43–47.
2. Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 280 с.
3. Буканин В. А., Клещев В. В., Немков В. С. Электродинамические усилия при индукционном нагреве цилиндрических немагнитных слитков // Электротермия. 1978. Вып. 10. С. 9–10.
4. Буканин В. А. Обеспечение безопасности при проектировании и эксплуатации индукционных электротермических установок. СПб.: ОАО «Искусство России», 2011. 176 с.
5. Буканин В. А., Иванов А. Н. Некоторые вопросы безопасности индукционных электротермических установок // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 8. С. 28–32.
6. Буканин В. А., Иванов А. Н. Электродинамические усилия в индукционных системах // Индукционный нагрев. 2012. № 20. С. 9–13.

A. N. Ivanov

## CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC FORCES IN INDUCTION HEATING DEVICES

*This article focuses on the problems of calculation axial and radial electrodynamic forces (EDF) in induction heating systems. The described method allows to calculate with reasonable accuracy the average values of the radial and axial components of the EDF. A scheme of the algorithm and the results of calculations obtained using electrothermal analysis software ELTA<sup>20</sup>.*

**Induction heating, electrodynamic forces, technological reliability, safety**