

Автоматизированный комплекс электротехнического оборудования нагрева и транспортирования заготовок в пресс

ГРИГОРЬЕВ Е.А., ДЕМИДОВИЧ В.Б., ПРОКОФЬЕВ Г.И., РАСТВОРОВА И.И.

Для обеспечения высокого качества заготовок, предназначенных для обработки давлением, посредством требуемого распределения температурного поля по объему заготовки, универсальности процесса нагрева и повышения производительности используется комплекс комбинированного нагрева, в котором дополнительно к индукционному нагреву применяется выдержка заготовки в печи сопротивления. Автоматизации комплекса индукционного оборудования и средств подачи заготовок к индукторам, печам сопротивления и прессу предшествует организация процесса прессования и его информационного сопровождения, рассматриваемая в статье на примере процесса нагрева заготовок из титановых сплавов в условиях действия различных возмущений.

Ключевые слова: индукционный нагреватель, комбинированный нагрев, печь сопротивления, автоматизированное проектирование, транспортировка заготовки

Индукционные установки широко применяются для нагрева заготовок и слэбов перед прокаткой, прессованием, ковкой, выпрямлением и другими видами пластической деформации. Это объясняется такими известными преимуществами индукционного нагрева, как хорошие энергетические характеристики, высокая скорость нагрева, простота управления, возможность полной автоматизации, небольшие габаритные размеры установки и легкость в обслуживании (в том числе в случае нагрева заготовок различного размера) [1, 2].

При всех известных преимуществах технологии индукционного нагрева необходимо отметить невозможность достижения абсолютной равномерности температурного поля в заготовке из-за существующей разности температур окружающей среды в индукторе и конечной температурой заготовки. Однако для заготовок из некоторых металлов, таких как титан, цирконий, ниобий, тантал и др., обеспечение требуемых физико-механических свойств перед дальнейшей обработкой возможно только при соблюдении определенных требований. К их числу относится необходимость распределения температурного поля строго определенной конфигурации по всему объему заготовки. Температура любого объема слитка не должна превышать максимально допустимую в течение всего процесса нагрева.

In order to obtain high quality of billets intended for being subjected to plastic working by organizing the required distribution of temperature field over the billet volume, to achieve a universal nature of the heating process and higher output, a combined heating system is used, in which induction heating is supplemented with holding the billet in an electric resistance furnace. The fitting of the complex comprising induction heating equipment and means for delivering billets to the inductors, resistance furnaces, and press with an automated control system is preceded by work aimed at setting up the pressing process and organizing its information support. These matters are considered in the article taking as an example the heating of titanium alloy billets under the effect of various disturbances.

Key words: induction heater, combined heating, resistance furnace, computer-aided designing, billet transportation

Кроме того, в промышленных условиях часто приходится подвергать пластической обработке заготовки различной длины и диаметра, что вызывает определенные трудности при проектировании установок для термообработки таких изделий. Жёсткие требования, предъявляемые при этом к качеству нагрева заготовок вне зависимости от их геометрических размеров, обуславливают задачу построения таких универсальных систем [3].

При этом немаловажным в тенденции энергосбережения является обеспечение максимальной энергоэффективности работы устройств. Кроме того, при современном уровне и темпах развития экономики наряду с высокими требованиями по качеству изделий возникает задача увеличения производительности работы производств, в которых используется термообработка изделий из таких металлов и их сплавов. В данной ситуации применение традиционных способов термообработки часто бывает неприемлемым, и требуется разработка новых технологий и оборудования для обеспечения прецизионного нагрева.

Решением задачи получения требуемого распределения температурного поля при условии обеспечения высокого качества заготовок, универсальности процесса нагрева и повышения производительности работы является комплекс комбинированно-

го нагрева, в котором дополнительно к индукционному нагреву применяется выдержка заготовки в печи сопротивления [4]. Процесс нагрева осуществляется в два этапа. На первом этапе заготовка помещается в индукционный нагреватель, нагрев в котором продолжается до тех пор, пока температура заготовки меньше установленной. При достижении заданной температуры заготовка выгружается из индуктора и транспортируется в печь сопротивления. В печи сопротивления проводится термостатирование, во время которого температура поверхности достигает заданной, и создается необходимое температурное распределение по всему объему заготовки. Таким образом, гарантируется требуемая точность и равномерность нагрева. Высокое качество нагреваемой заготовки и увеличение выхода годного за счет уменьшения окалинообразования и загрязнения поверхности заготовки обеспечивается благодаря применению высокоскоростного индукционного нагрева с контролем и архивацией технологического режима термической обработки металла.

Требование жесткого контроля процессов нагрева, которое позволяет обеспечивать выполнение производственных заданий согласно применяемой технологии обработки металла, а также увеличение конкурентоспособности продукции, выпускаемой с высокой производительностью и высоким уровнем качества, приводит к необходимости автоматизации работы всего комплекса. Автоматизация комплекса индукционного оборудования и средств подачи заготовок к индукторам, печам сопротивления и прессу обеспечивает организацию, улучшение деятельности процесса прессования и его информационное сопровождение, обеспечивающее «прослеживаемость» процесса прессования заготовок и паспортизацию продукции.

Пример схемы компоновки автоматизированного комплекса приведен на рис. 1. По этой схеме

быстрый предварительный нагрев заготовок до установленной температуры выполняются параллельно работающие и независимо управляемые индукторы с очередью входа/выхода заготовок в них типа FIFO (первый вошел – первый вышел). Выравнивание температуры по объему заготовки и её догрев с заданной точностью до температуры прессования выполняют параллельно работающие и независимо управляемые печи сопротивления с очередью входа/выхода заготовок типа LIFO (последним вошел – первым вышел). Заготовки доставляются автоматизированным или автоматическим транспортом по разветвленным транспортным путям: в печи из индукторов и к прессу из печей – транспортом горячих заготовок (ТГЗ); в индукторы – транспортом холодных заготовок (ТХЗ) из накопителя холодных заготовок (НХЗ); в передел – ТГЗ. Транспортно-нагревательные комплексы могут иметь другие схемы компоновки и виды очередей входа/выхода заготовок (например с произвольным доступом).

Возникает задача организации системы управления автоматизированным или автоматическим комплексом нагрева и транспортировки заготовок, которая должна работать в условиях воздействия возмущений типа:

неисправности восстанавливаемых устройств или заминки в работе персонала;

изменения производственного задания в процессе его выполнения;

совершенствования устройств системы нагрева и их загрузки/выгрузки;

«неодинаковости» свойств параллельно работающих устройств (индукторов, печей) и работы персонала.

В условиях действия возмущений необходимо оперативно планировать работу комплекса и изменять оперативные планы так, чтобы обеспечить заданный объем выпуска продукции заданной номенклатуры и заданного качества при минималь-

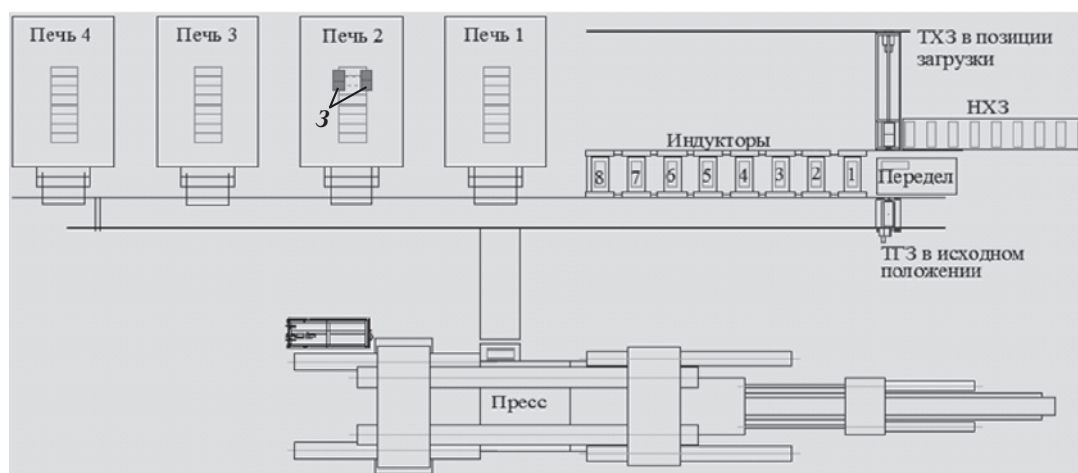


Рис. 1. Пример схемы компоновки автоматизированного комплекса индукционного оборудования (3 – заготовка)

ных затратах (труда, энергии, времени и других ресурсов).

Процессы планирования, управления и информационного сопровождения запускаются при включении системы управления в работу, а коррекция текущего плана проводится при наступлении события, приводящего к необходимости его изменения. Это приводит к тому, что система управления использует информацию о производственном задании и текущем состоянии процесса.

Рассматриваемая производственная система создается с целью выполнения установленных производственных заданий по выпуску продукции. При этом *главным ограничением* является *технологическое ограничение* — обеспечение с достижимой точностью заданной и равномерно распределенной по объему температуры прессования доставленной в пресс заготовки. Достижение производственной системой установленной цели и требуемого качества в значительной степени обеспечивается использованием соответствующего технологического оборудования. Не менее значимой является организация деятельности и управления установленным технологическим оборудованием. Организовать процесс выпуска продукции прессования заданного качества можно по-разному. Очевидно, что в конечном счете продукция и процесс ее выпуска должны быть конкурентоспособными. Поэтому в критерии качества организации выпуска продукции должны входить характеристики затрат и гибкости производственной системы на ее жизненном цикле.

Технологическое оборудование комплекса является дорогостоящим и энергоемким. Дорогостоящее и автоматизированное оборудование эффективно в том случае, если оно максимально используется. В то же время каждое оборудование комплекса имеет характеристики режимов его использования. Оптимальным является номинальный режим, для которого обычно приводятся эксплуатационные характеристики. Рассматриваемая производственная система (совокупность технологического и управляющего оборудования) также характеризуется ее свойствами в заданном режиме работы. Для производственной системы, как и для ее подсистем, существует номинальный режим работы. Очевидно, что лучшие характеристики номинального режима производственной системы в целом достигаются при работе в номинальных режимах каждого её устройства и подсистемы, т.е. при согласовании использования оборудования системы в процессах проектирования. Номинальный режим работы производственной системы (номинальная производительность) характеризуется её наилучшими эксплуатационными свойствами.

Главным элементом системы, влияющим на её номинальный режим, является тот её элемент (если таковой существует), для которого эксплуатационные затраты его номинального режима значительно выше, чем для других элементов системы, работающих в их номинальных режимах. В любом случае номинальный режим системы определяется при минимизации затрат всей производственной системы. Для различных выпускаемых рассматриваемой системой изделий прессования (соответствующих им типов заготовок) и совокупности оборудования система может иметь различные *номинальные режимы*, которые можно и *нужно установить и использовать как приоритетные режимы при организации работы производственной системы*. Номинальные режимы для каждого типа заготовок, в конечном счете, можно задать соответствующими им циклограммами работы пресса. Тогда организация работы системы сведётся к обеспечению этих циклограмм.

Очевидно, что номинальный режим работы системы — это установившийся периодический режим, к которому нужно стремиться максимально быстро при запуске системы и отработке возмущений. Выход на номинальный режим происходит посредством переходных режимов работы системы. Циклограммы номинальных установившихся режимов для разных типов заготовок известны или их можно определить, руководствуясь проектной документацией комплекса. Длительность периода циклограмм определяет требуемую производительность транспортно-нагревательной системы в установившемся режиме. Длительность выполнения производственного задания — это длительности переходных и установившихся режимов, зная которые, можно планировать выпуск продукции как выполнение совокупности производственных заданий. При наличии возмущений в системе трудно заранее определить длительность переходных режимов и их количество. Она зависит от организации системы управления процессом прессования заготовок. Очевидно, что нужно стремиться минимизировать время переходных режимов.

Для организации работы комплекса желательно использовать сценарий, который обеспечивал бы переходные и установившиеся режимы. В основе такого сценария могут быть действия подсистем в цепочке «потребитель—поставщик». В ней потребитель генерирует запросы на поставку заготовок с соответствующими параметрами, а поставщик поставляет заготовки и генерирует запросы другим поставщикам, являясь, в свою очередь, потребителем. При этом запросы обращены к базе данных заготовок системы с *фактическими* значениями характеристик заготовок, полученных ими в процессе

нагрева и транспортирования, определенными в моменты событий (в реальном времени), — загрузка оборудования заготовками, выгрузка. Результатом запроса может быть нуль или некоторое число соответствующих заготовок. При наличии в комплексе нескольких заготовок с соответствующими характеристиками их нужно последовательно поставить потребителю, а при отсутствии заготовок их нужно подготовить — придать им соответствующие характеристики. В любом случае их транспортирование возможно по альтернативным путям, так как в комплексе присутствует несколько параллельно работающих индукторов и печей, связанных разветвленной транспортной сетью. Поэтому система управления комплексом должна вырабатывать текущие задания его подсистемам с учетом значений характеристик заготовок, находящихся в комплексе, а также характеристик альтернативных путей их транспортировки от поставщиков к потребителям.

В организации работы комплекса целесообразно использовать следующие этапы.

Формирование производственного задания, под которым следует понимать непрерывно выполняемое задание, характеризующееся заданным числом и одним типом прессуемых заготовок, конфигурацией используемого оборудования комплекса, номинальным режимом работы, сроком выполнения задания. «Одновременное» прессование заготовок разных типов связано с переналадкой оборудования и увеличением доли переходных режимов. Поэтому включать заготовки разных типов в одно производственное задание нецелесообразно.

Анализ степени выполнения производственного задания. Очевидно, что если для выполнения производственного задания в систему введено недостаточное число заготовок, то нужно вводить в систему заготовки и загружать ими выбранные для выполнения задания индукторы и печи. В противном случае ввод в комплекс заготовок с определенным в выполняемом задании типом нужно прекратить. Число введенных в комплекс заготовок может быть больше числа заготовок, определенного в производственном задании в том случае, если часть введенных в комплекс заготовок выведено в передел.

Формирование очереди транспортировки заготовок (планирование процесса прессования). Для производственного задания и автоматически работающей транспортной системы с известными значениями всех характеристик процессов нагрева и транспортирования заготовок, а также требованиями к качеству их нагрева можно рассчитать (смоделировать) очередь и характеристики процесса прессования заготовок [5]. В начале этой очереди будут находиться наиболее подготовленные к прессованию

заготовки, а в конце — менее подготовленные. По результатам моделирования формируются таблицы, в которых приводятся фрагменты данных, сопровождающих работу модели системы при её запуске и выходе на установившийся режим. Данные таблицы характеризуют все находящиеся в комплексе заготовки в текущий момент времени, что позволяет документировать процесс нагрева и транспортирования заготовок и обеспечить прослеживаемость событий. Для систем, подверженных возмущениям, значения атрибутов базы данных будут соответствовать реальным событиям.

Расчитанный процесс прессования (план, очередь заготовок) является оптимальным. Он полезен для определения расчетных показателей выполнения конкретного задания (длительности переходного режима, общего времени выполнения производственного задания, расчетных моментов времени включения оборудования, моментов времени готовности печей и индукторов для загрузки и др.), долгосрочного планирования работ. Фактическая очередность прессования заготовок (текущий план) для конкретного задания и фактическая база данных выполнения производственного задания строятся в реальном времени в процессе прессования.

Формирование текущего плана прессования. Прессование заготовок выполняется в соответствии с текущим планом выполнения задания. Часть текущего плана прессования заготовок может быть полностью выполнена (заготовки отпрессованы), часть — выполняться (заготовки введены в комплекс), а часть — подлежит выполнению (заготовки не введены в комплекс, но их ввод запланирован). Текущий план строится по некоторому алгоритму, реализующему разработанный сценарий работы комплекса. В результате текущего планирования формируется текущая очередь заготовок, проходящих из НХЗ к прессу посредством транспортно-нагревательной системы, а также управление (задания) подсистемами комплекса, реализующее эту очередь.

Коррекция текущей очереди вызвана действующими возмущениями. При этом выполненная часть текущего плана не может быть скорректирована. Место коррекции в очереди прессования заготовок определяется видом и местом приложения возмущения в транспортно-нагревательной системе комплекса. Возмущения типа изменения рабочего задания приводят к остановке или увеличению длительности работы комплекса. Возмущения типа неисправности оборудования и изменения его технологических параметров приводят к изменению (снижению) производительности комплекса, перформированию очереди прессования введенных в комплекс заготовок или к выводу заготовок в пере-

дел или в брак. При этом часть введенных в комплекс заготовок удаляется из очереди прессования, формируются очереди удаления заготовок из комплекса в передел.

Укрупненный сценарий работы комплекса. Периодически, например в начале цикла прессования, делается запрос базе данных процесса прессования: есть ли заготовки, готовые к прессованию? К таким относятся заготовки, нагретые до температуры прессования и находящиеся в устройствах нагрева (печах) не больше заданного времени после достижения температуры прессования. Заготовки, находящиеся в устройствах нагрева сверх установленного времени, прессованию не подлежат и выгружаются из них в передел.

Если готовые к прессованию заготовки есть и их достаточно для выполнения (завершения) производственного задания, то из них формируется очередь транспортировки заготовок в пресс.

Если готовые к прессованию заготовки есть, но их недостаточно для выполнения (завершения) производственного задания или их нет, то анализируется состояние печей: готовность к работе, степень загруженности, температура, длительность нахождения в них заготовок. Если включенные в работу печи загружены, то ожидается готовность к прессованию находящихся в них заготовок. Если включенные в работу печи не загружены или загружены неполностью, а число введенных в систему заготовок недостаточно для завершения выполнения производственного задания, то выдается задание на загрузку печей заготовками.

При наличии задания на загрузку печей анализируется состояние включенных в работу индукторов. Если индукторы загружены и нагревают заготовки, то ожидается готовность нагретых заготовок для их транспортировки в печь. Если индукторы не загружены или загружены не все, а имеющегося числа заготовок в индукторах недостаточно для завершения выполнения производственного задания, то выдается задание на загрузку свободных индукторов.

При наличии задания на загрузку индукторов анализируется состояние накопителя холодных заготовок. Если накопитель полностью загружен идентифицированными заготовками, то ожидается наличие «вакантных» мест в накопителе вследствие выгрузки из него заготовок в индукторы. Если накопитель неполностью загружен идентифицированными заготовками, а число идентифицированных заготовок в накопителе недостаточно для завершения выполнения производственного задания, то выдается задание на загрузку накопителя заготовками и их идентификацию.

Формируется (рассчитывается) очередь транспортировки заготовок в пресс по транспортным путям, обеспечивающим время доставки (соответствующее зоне доступности заготовок), удовлетворяющее времени начала загрузки следующего цикла работы пресса. Такая очередь формируется на всю глубину производственного задания и для всех подсистем комплекса, а готовые к прессованию заготовки вставляются в начало очереди.

Задачу формирования зоны доступности заготовок можно свести к задаче поиска путей на топологии. Если путей, удовлетворяющих времени начала загрузки следующего цикла работы пресса, несколько, то для выбора пути очередной транспортировки заготовки следует использовать дополнительные ограничения, содержащиеся в базе данных событий процесса прессования (например степень разгруженности печи заготовками).

Для рассмотренного выше комплекса транспортную сеть можно представить в виде сетевой топологии рис. 2. Псевдоузлы — места выполнения над заготовками технологических и ориентирующих заготовки операций (нет разветвления) и узлы — места разветвления транспортной сети. Для печей со свободным доступом к заготовкам сетевая топология будет содержать меньшее число псевдоузлов и большее число узлов, что позволяет организовать более гибкую загрузку/выгрузку печей.

В топологии каждый узел и каждая связь по умолчанию имеют абстрактные характеристики, которым можно придать смысл и значения, соответствующие решаемой задаче.

Характеристики связей и узлов топологии можно редактировать и придавать им значения расстояния, времени, стоимости и др., что позволяет сводить реальные задачи к типовым. Если свойствам узлов топологии придать смысл и значения параметров технологических операций нагрева и ориентации заготовок, а свойствам связей — смысл и значения характеристик транспортной системы, то, используя процедуры решения типовых задач и учитывая дополнительные ограничения, можно формировать текущую очередь транспортировки заготовок. Для формирования очереди прессования заготовок физический смысл «Сопrotивления»

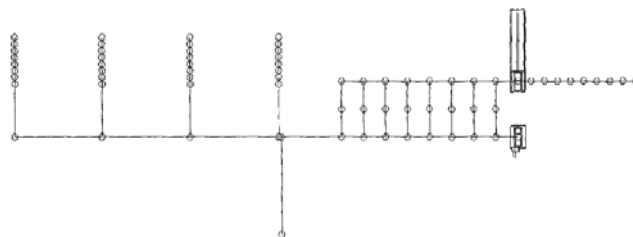


Рис. 2. Сетевая топология работы комплекса: ○ — узлы и псевдоузлы

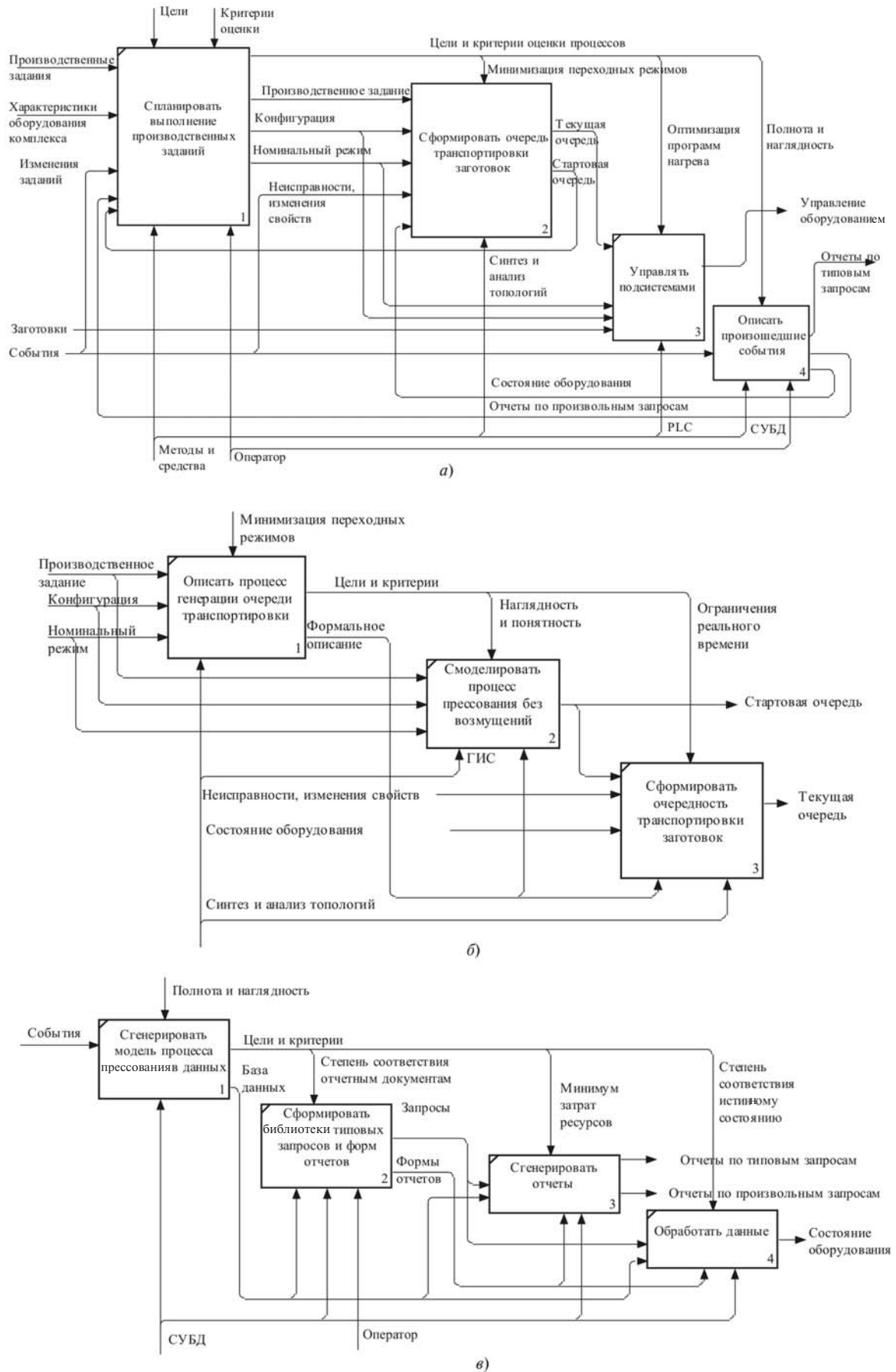


Рис. 3. Контекстная диаграмма системы управления комплексом (а) и диаграммы детализации блока 2 (б) и блока 4 (в); ССУБД – система управления базой данных; ГИС – геоинформационная система; PLC – программируемый логический контроллер

связей и узлов топологии представляют соответственно время доставки заготовок и время выполнения технологических операций, которые известны для комплекса. Ограничениями, используемыми для постановки в очередь на прессование находящихся в доступных узлах заготовок, являются значения их фактических характеристик нагрева и длительности пребывания в узлах нагрева, которые в реальном времени заносятся в базу данных процесса прессования.

Таким образом, при решении задачи формирования очереди транспортировки заготовок и управления подсистемами комплекса следует учитывать взаимозависимые временное и геометрическое описания процесса прессования. Решение задачи оперативного формирования очереди транспортировки заготовок в условиях возмущений можно свести к решению в реальном времени типовых задач, заменяя параметры связей и узлов топологии соответствующими значениями технологических характеристик подсистем комплекса, используя для однозначного выбора очередной транспортируемой заготовки ограничения, содержащиеся в базе данных, описывающей события процесса прессования.

При создании системы управления комплексом организацию его работы важно описать в системном (структурном) аспекте. Фрагмент такого описания в нотации IDEF0, представленный контекстной диаграммой и диаграммами детализации её блоков 2 и 4, приведен на рис. 3.

Системный аспект описания позволяет познать создаваемый объект как систему, установить ее подсистемы и связи между ними, сформировать задания на проектирование подсистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demidovitch V., Nikitin B., Olenin V. Induction Installations for Heating Long Cylindrical Billets Before Metal Forming. — Russian Metallurgy, 2007, № 8, pp. 98—102.
2. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
3. Григорьев, Е.А., Демидович В.Б., Масликов П.А. Влияние на качество нагрева в одном индукторе заготовок различной длины и диаметра. — Индукционный нагрев, 2011, № 16, с. 22—26.

4. Григорьев Е.А. Энергоэффективный комплекс комбинированного нагрева «индукционные нагреватели — печи сопротивления». — Материалы Международного молодежного форума «Энергоэффективные электротехнологии». — Санкт-Петербург, 2011, с. 31—32.

5. Прокофьев Г.И. Программный комплекс имитационного моделирования и информационного сопровождения процесса изготовления продукции посредством нагрева, транспортирования и выдавливания нагретых заготовок в прессе (ПКМИС). — Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012615170.

[02.09.13]

Авторы: Григорьев Евгений Александрович окончил факультет электротехники и автоматики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») в 2008 г. В 2011 г. в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» защитил кандидатскую диссертацию по исследованию и разработке энергосберегающих технологий прецизионного нагрева титановых сплавов. Младший научный сотрудник межотраслевой лаборатории современных электротехнологий в СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Демидович Виктор Болеславович окончил факультет электротехники и автоматики Ленинградского электротехнического института (ныне — СПбГЭТУ «ЛЭТИ») в 1973 г. В 2002 г. в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете защитил докторскую диссертацию по исследованию и разработке индукционных нагревателей для металлургической промышленности. Профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Прокофьев Геннадий Иванович окончил факультет электротехники и автоматики ЛЭТИ в 1973 г. В 1998 г. в СПбГЭТУ защитил докторскую диссертацию по автоматизированной технологии формования анизотропных конструкций из композиционных материалов. Профессор, заведующий кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем в СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Растворова Ирина Ивановна окончила факультет электротехники и автоматики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1994 г. В 1999 г. в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» защитила кандидатскую диссертацию по исследованию и оптимизации индукционных систем для нагрева металлов по критерию энергозатрат и качества формирования температурного поля заготовки. Доцент, заместитель заведующего кафедрой электронных систем Национального минерально-сырьевого университета «Горный».