

А.Д. ЧЕПУРНОЙ, докт. техн. наук, председатель правления – директор ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь, *Т.В. ПОЛИЩУК*, зам. генерального директора

ОАО „Азовобщемаш”, г. Мариуполь,

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, зав. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА НАКЛОНА ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

У статті представлені загальні теоретичні основи для розв’язання задачі оптимального проектування механізму нахилу плавильної печі. Задача передбачає розгляд комплексу критеріїв та обмежень, аналіз процесів та станів, визначення значущих факторів, формування простору узагальнених параметрів. Запропоновано узагальнений багаторічковий алгоритм визначення раціональних конструктивних схем, структури силових елементів та їхніх параметрів.

In the article general theoretical bases are presented for the solution of optimum design task of mechanism of smelter’s tilting gear. The task foresees consideration of complex of criteria and limitations, analysis of processes and states of determination of meaningful factors of forming of space of the generalized parameters. The generalized multistage algorithm of determination of rational structural charts, structure of power elements and their parameters are offered.

Введение. При проектировании механизма наклона плавильной печи (МНПП) [1-4] возникает многокритериальная задача обоснования структуры самого механизма, его основных параметров, а также конструктивных схем и параметров силовых элементов конструкций. Проектируемая электроплавильная печь предназначена для функционирования в составе линии непрерывного литья и проката заготовок в ЗАО „АзовЭлектроСталь”. Сам характер работы линии формирует особые требования как к техническим характеристикам печи, так и к надежности ее работы, к долговечности и ресурсу наиболее нагруженных и ответственных элементов конструкции. Условия многофункционального сопряжения печи с другими элементами линии формируют определенные требования в виде выполнения некоторых равенств, сформированных относительно характеристик состояния (в основном – кинематические характеристики, определяющие углы слива шлака и металла, а также ход силового цилиндра механизма наклона плавильной печи, длина катания опор печи и т.д.). Требования по производительности печи порождают условия относительно предельных силовых факторов в сопряжениях элементов печи (усилия в шарнирах от совместного воздействия веса металлоконструкции печи, теплозащиты и расплавленного металла, по-разному распределенные в определенный моменты циклограммы работы печи). Механические характеристики материалов создают множество ограничений на величины напряжений в металлоконструкции МНПП и контактных давлений в сопряжениях цилиндрических составляющих коромысел с опорными поверхностями. Соответственно, естественное требование минимальной металлоемкости и стоимости печи формулируется в задачу минимизации массы или стоимости

руется в задачу минимизации массы или стоимости изготовления механизма наклона плавильной печи.

Все описанные критерии и ограничения записываются совместно с операторным представлением физико-механических процессов и состояний. При этом учитывается то или иное число факторов, определяющее, в основном, подходы к решению получаемых задач. Отмеченные особенности возникающей задачи оптимального проектирования механизма наклона плавильной печи формируют достаточно сложную проблему формализации всех критериев, ограничений, моделей, методов и алгоритмов, которые в совокупности составляют теоретическую основу решения актуальной и важной задачи обоснования проектных параметров и конструктивных схем МНПП. Разработка общих подходов к решению этой задачи и является целью данной статьи.

Постановка задачи. При решении такой сложной задачи, как оптимальный синтез механизма наклона плавильной печи с учетом большого комплекса критериев, ограничений, факторов и процессов необходимо привлекать общие системные подходы [5]. В то же время эти подходы в данном случае недостаточно применить только к анализу и синтезу самой конструкции. Предлагается в расширение традиционного системного подхода рассмотреть с этих позиций все компоненты решаемой задачи: пространство кинематических схем механизма K ; систему нагрузок в сопряжениях элементов механизма наклона плавильной печи Q ; пространство конструктивных схем S и обобщенных параметров P ; множество перемещений элементов МНПП как твердого тела W и упругих перемещений элементов конструкции U ; массив внешних нагрузок f ; множество технических характеристик T и характеристик состояния H ; множество критериев I и ограничений G ; совокупность операторов L , описывающих физико-механические процессы, протекающие в процессе эксплуатации плавильной печи.

Ставится задача определения таких оптимальных K^*, S^*, P^* , которые удовлетворяют следующим соотношениям:

$$I(K^*, S^*, P^*) \rightarrow \min; \quad (1) \quad G(H) \geq 0; \quad (2)$$

$$T \geq \tilde{T}; \quad (3) \quad L(U, W, S, P, f, t) = 0, \quad (4)$$

где \tilde{T} – заданные техническим заданием нижние уровни технических характеристик; t – время.

Методы и подходы к решению задачи. Формально соотношения (1)-(4) представляют собой задачу нелинейного программирования [6, 7], для решения которой в общем виде произвольной структуры I, H, L не существует универсальных методов решения. Однако в данном конкретном случае, применяя расширенный системный подход, задачу можно декомпозировать на локальные подзадачи и подсистемы, связанные общим подходом к решению глобальной задачи для всей системы. Предлагается несколько срезков, в которых можно рассматривать задачу (1)-(4).

Срез 1. Разделение процессов и состояний. Рассматриваемый объект с точки зрения описания физико-механических процессов допускает разделение на следующие процессы и состояния:

$$L_1(W, S, K, P, t) = 0; \quad (5) \quad L_2(Q, W, S, K, P, f) = 0; \quad (6)$$

$$L_3(U, W, Q, S, P, f) = 0. \quad (7)$$

В результате вместо единого оператора L можно рассматривать совокупность операторов: L_1 описывает кинематику механизма при заданной его структуре S и обобщенных параметрах P [8]; оператор силового анализа L_2 описывает уравнения статического равновесия системы в различные моменты, соответствующие различным W [9], и оператор напряженно-деформированного состояния L_3 описывает распределение упругих перемещений U и напряжений $\sigma(U)$ в элементах металлоконструкций [10]. Здесь в уравнениях (5)-(7) S, P, f считаются заданными. В (5) W является искомым, а в (6), (7) – параметром. В (6) искомым является распределение усилий Q , а в (7) они служат параметром. Также в (7) искомыми выступают распределения упругих перемещений элементов исследуемой конструкции.

Важно отметить два существенных обстоятельства.

1. Естественно, что в общем случае во всех операторах L_1, L_2, L_3 необходимо рассматривать U, W, Q в качестве наборов переменных состояний:

$$\tilde{L}_i(W, U, Q, S, P, t) = 0, i = 1, 2, 3; \quad (8)$$

однако в силу слабого влияния отдельных переменных представляется возможным редуцировать операторы (8) к виду (5)-(7).

2. Несмотря на использование отмеченной выше операции редуцирования, система уравнений (5)-(7) оказывается связанной и по параметрам, и по переменным состояниям (хотя по последним – только в направлении

$$L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3). \quad (9)$$

Таким образом, рассматривая срез процессов и состояний, удалось решить задачи анализа, представив задачу (4) в виде линейной последовательности задач (9). Прямым обобщением такого подхода является организация итерационного процесса уточнения переменных состояний в ходе заикливания $L_3 \rightarrow L_1$ и установления критерия окончания итераций, однако, учитывая, что упругие перемещения вследствие деформации конструкции механизма наклона плавильной печи намного меньше его перемещений как твердого тела, в первом приближении представляется достаточно обоснованным ограничиться однократной цепочкой (9).

Срез 2. Срез критериев и ограничений. Любая оптимизационная задача

содержит в том или ином виде один или несколько критериев (1) для поиска оптимального или рационального варианта конструкции. Соответственно множество допустимых S, K, P , в пространстве которых осуществляется поиск, задается ограничениями (2), (3). При задании нескольких критериев один из путей сведения задачи к классической является формирование путем свертки в сумму с соответствующими весовыми коэффициентами α_i комплексного функционала качества I проектируемой конструкции. В данном случае, когда речь идет о проектировании механизма наклона плавильной печи,

$$I = \sum \alpha_i I_i \quad (10)$$

может содержать слагаемые I_i , соответствующие массе МНПП, стоимости, техническим характеристикам и т.д.

В качестве ограничений выступают: требования соответствия кинематики процесса наклона плавильной печи ограничениям, заданным техническим заданием; ограничения на величины усилий Q в сопряжениях МНПП между собой и с другими элементами печи; прочностные и жесткостные ограничения и т.д. В общем случае I, G, T в (1)-(3) являются зависимыми от $H(U, W), S, K, P$. В результате и ограничения, и критерии могут иметь достаточно сложную зависимость от параметров и характеристик. В целях их упрощения предполагается рассматривать только критериальные и ограничительные зависимости следующих типов:

$$I(S, K, P); G(H(U, W, Q)); T(U, W). \quad (11)$$

В зависимостях (11) аргументы являются различными, и, что видно, на текущем этапе решения элементы внутри каждого комплекта аргументов предполагаются независимыми. В связи с этим удается разделить процессы построения I, G, T , что существенно упрощает процедуру решения, а, кроме того, независимость аргументов в (11) дает возможность использовать их в качестве текущего псевдобазиса при организации процедур варьирования аргументов.

Срез 3. Срез кинематических K и конструктивных схем S и обобщенных параметров P . Описание кинематической схемы механизма K является основным из первичных исходных данных, определяющих последующие этапы решения общей задачи проектирования механизма наклона плавильной печи. Естественно, что для выполнения функционального назначения проектируемого механизма можно предположить несколько вариантов кинематической схемы. Попадая первоначально в уравнение (5), она влияет на решение всех последующих задач анализа и синтеза, даже если не фигурирует в них явно, поскольку определяет „скелет” конструкции. Конструктивное решение S , в свою очередь, является определяющим с точки зрения геометрии отдельных конструктивных элементов проектируемого объекта, а пара-

метры P конкретизируют все их размеры и сопряжения.

Срез 4. Срез технических характеристик и характеристик состояния. Решение задачи анализа (4) (или совокупности задач (5)-(7)) дает возможность напрямую или опосредованно определить технические характеристики и характеристики состояния H . При этом в качестве аргументов при их вычислении фигурируют и переменные состояния, и кинематические схемы, и структуры, и обобщенные параметры. Далее в зависимости от типа характеристики требуется либо ее минимизация (максимизация), и тогда данная характеристика с соответствующим весовым коэффициентом записывается в комплексный функционал качества (10), либо требуется выполнение некоторого ограничительного условия – и тогда эта характеристика переносится в множество ограничений (2) или (3). Соответственно, можно выделить характеристики, которые зависят напрямую только от переменных состояния или только от параметров, структур, схем механизма и т.д. Например, одной из характеристик состояния для проектируемого механизма наклона плавильной печи являются максимальные эквивалентные напряжения в металлоконструкции, которые напрямую зависят от упругих перемещений точек МНПП: $\sigma_z = \sigma(U)$. С другой стороны, объем рабочего пространства печи напрямую зависит от варианта конструктивного решения, геометрической формы и ее размеров: $V = V(S, P)$. Следует отметить, что опосредованно при этом в общем случае сохраняется зависимость этих характеристик от множества аргументов, однако на отдельном текущем этапе итерационного процесса уточнения проекта можно полагать эту зависимость упрощенной – от одного аргумента.

Срез 5. Срез моделей разного уровня сложности. При моделировании физико-механических процессов в сложных объектах возникает дополнительная проблема обоснования баланса точности и сложности их численных моделей. Кроме того, что требуется моделирование различных физико-механических процессов, его к тому же необходимо проводить на множестве взаимосвязанных моделей различного уровня сложности и точности. Например, анализ кинематического процесса и силовой расчет можно проводить на упрощенных аналитических моделях или на моделях, создаваемых в системах типа CosmosMotion, MSC.ADAMS. Напряженно-деформированное состояние металлоконструкции можно исследовать на основе полуаналитических стержневых моделей или при помощи конечно-элементных моделей, созданных в программных комплексах ANSYS, NASTRAN. Контактные давления в сопряжении механизма наклона плавильной печи с опорными площадками есть возможность рассчитывать в первом приближении по соотношениям Герца на основе полуаналитического метода, основанного на решении задачи воздействия точечно приложенной силы к полупространству, а также с помощью полных 3D конечно-элементных моделей в среде компьютерных систем типа Cosmos/M, ANSYS.

Описанное выше разделение моделей по уровню сложности при исследовании сложных объектов само собой разумеется. Однако обычно при этом те-

руется информационная связь этих моделей, причем как „по горизонтали” (между моделями различных физико-механических процессов), так и „по вертикали” (между моделями различного уровня сложности). Единственная однопользовательская связь обычно присутствует только на уровне сравнения результатов расчетов.

Для устранения отмеченного недостатка предлагается использование подхода на основе теории обобщенного параметрического описания сложных механических систем [11, 12], который представляет инструмент единого моделирования разнородных моделей исследуемых объектов разного уровня сложности. При этом формализация описания объекта выносится за рамки отдельных модулей, соответствующих различным моделям, в отдельный блок моделирования, а уже в этом блоке организуется непротиворечивое, бесконфликтное вариативное изменение обобщенных параметров. При этом организуется серия „обратных связей” между модулями через отдельный блок обобщенного моделирования посредством представления их в виде „вход – выход”, показанных на рисунке.

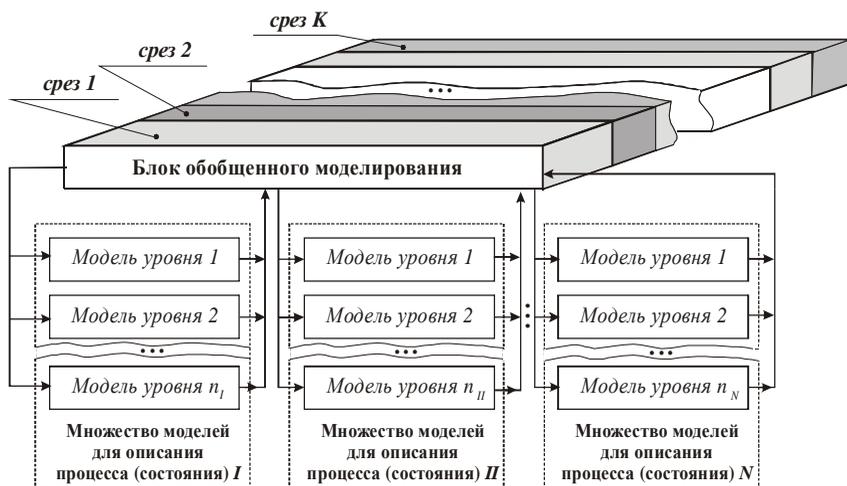


Рис. Организация обмена информацией между отдельными модулями на основе теории обобщенного параметрического описания объекта

Заключение. Приведенная на рисунке схема организация обмена информацией имеет неоспоримые преимущества:

- дает возможность организации вариативного исследования объекта с организацией системы „обратных связей”;
- обладает возможностью интеграции моделей для описания разнородных физико-механических процессов (состояний), причем в модели могут быть объединены подмодели различного уровня (например, 1–I, 3 –II, L – N);
- комплексная обобщенная модель может исследоваться как полно-

стю, так и по отдельным срезам или их наборам.

Предложенная технология, таким образом, является эффективным инструментом решения задач анализа и синтеза сложных объектов, в т.ч. механизма наклона плавильной печи. Реализация описанной технологии на примере оптимального ее проектирования МНПП является направлением дальнейших исследований.

Список литературы: 1. *Полищук Т.В., Пеклич М.М., Ткачук Н.Н.* Кинематический и силовой расчет механизма наклона плавильной печи // *Механіка та машинобудування*. – 2007. – №1. – С.100-106. 2. *Полищук Т.В., Ткачук Н.Н.* К вопросу о кинематическом и силовом анализе механизма наклона плавильной печи // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2007– № 29. – С.122-131. 3. *Полищук Т.В.* Оптимальное проектирование механизма наклона плавильной печи: модели для анализа напряженно-деформированного состояния // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Тем. вип.: „Динаміка та міцність машин”. – 2007. – № 38. – С.129-134. 4. *Полищук Т.В.* Модельная задача об изгибе коромысла механизма наклона плавильной печи // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”. – 2008. – №2. – С.125-144. 5. *Дитрих Я.* Проектирование и конструирование: Системный подход. – М.: Мир, 1981. – 456 с. 6. *Сев Ж.* Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. 7. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с. 8. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов. – М.: Наука, 1965. – 776 с. 9. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 824 с. 10. *Лурье А.И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 11. *Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.* Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения // *Механіка та машинобудування*. – 2005. – № 1. – С.184-194. 12. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.* Конечнo-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // *Механіка та машинобудування*. – 2006. – №1. – С.57-79.

Поступила в редколлегию 21.02.08

УДК 621.863

Н.М. ФІДРОВСЬКА, канд. техн. наук, Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ВІСНЕСИМЕТРИЧНИЙ СТИСК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ

У статті вирішується задача визначення прогину стінки циліндричної оболонки канатного барабана, який навантажений асиметрично, з використанням рівняння Ейлера для варіаційної задачі.

In article one should solve the problem of cylindrical casings walls sag of roped rum which is occupied with asymmetrical load using equation of Eelier for variated task.

Постановка проблеми. Оболонка канатного барабану у більшості випадків є циліндричною. Дія канату, який намотується на барабан, зумовлює зовнішній тиск. Міцність оболонки і її геометричні розміри повністю