

УДК 621.039.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР НА ПРИМЕРЕ БЛАНКЕТА ИТЭР

В.О. Розов¹, В.А. Беляков², В.П. Кухтин², Е.А. Ламзин², И.В. Мазуль², С.Е. Сычевский²

1 ITER Organization, CS 90 046, 13067 St. Paul-Lez-Durance Cedex, France

2 Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

Электромагнитные нагрузки в токамаках имеют сложные пространственно-временные распределения. Величина и характер этих нагрузок в значительной степени определяют особенности проектирования Международного термоядерного реактора ИТЭР и принимаемые конструктивные решения. Предложен подход для оперативного расчёта электромагнитных нагрузок, позволяющий выполнить оптимизацию конструкции модулей blankets на ранних этапах проектирования. Способ базируется на использовании упрощённой математической модели и обосновывается анализом особенностей конструкции blankets и режимами работы установки ИТЭР. Приведён пример численного решения задачи анализа интегральных величин электромагнитных нагрузок на все локализованные компоненты blankets токамака ИТЭР. Для сложных электрофизических установок моделирование переходных процессов и силовых нагрузок в виде совокупности задач, различающихся по уровню детализации, является эффективным средством упрощения расчётов.

Ключевые слова: токамак ИТЭР, blanket, переходный электромагнитный процесс, вихревые токи, электромагнитные нагрузки.

STRATEGY FOR SOLVING A TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROBLEM FOR LOCAL STRUCTURES OPTIMIZATION IN SUPPORT OF THE ITER BLANKET DESIGN

V.O. Rozov¹, V.A. Belyakov², V.P. Kukhtin², E.A. Lamzin², I.V. Mazul², S.E. Sychevsky²

1 ITER Organization, Route de Vinon sur Verdon, 131115 Saint Paul lez Durance, France

2 D.V. Efremov Scientific Research Institute of the Electrophysical Apparatus, 196641, St.-Petersburg, Russia

Complexity of the electromagnetic response of the tokamak structures is one of the key and design-driving issues for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Specifics of assessment of local electromagnetic (EM) loads associated with transient electromagnetics is reviewed. A strategy is proposed for the EM loads modelling and analysis that enables iterative design optimization at early R&D stages. A new method is described to simplify the mathematical model reasoning from peculiarities of the design and task under consideration. Efficiency of transient EM simulations via a set of simplified models with relevant detailization is demonstrated for complex electromagnetic facilities. Results of a predictive numerical EM analysis in terms of integral loads are exemplified for the ITER blanket components.

Key words: tokamak ITER, blanket, electromagnetic transients, eddy currents, electromagnetic load.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЁТНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЕЙ БЛАНКЕТА УСТАНОВКИ ИТЭР

Blanket крупного токамака, в частности, проектируемой в настоящее время в рамках международной кооперации установки ИТЭР [1] в процессе эксплуатации может подвергаться воздействию различных видов нагрузок. Наиболее существенными видами нагрузок являются пондеромоторные силы, возникающие в токопроводящих металлических элементах конструкции в результате взаимодействия наведённых вихревых токов с магнитным полем. Особенностью электромагнитных (ЭМ) нагрузок является сложный характер их пространственно-временного распределения. Величина и характер этих нагрузок в значительной степени определяют особенности проектирования и принимаемые конструктивные решения.

В свою очередь базовые концептуальные решения, заложенные в основу конструкции, формируют класс задач, связанных с обоснованием работоспособности различных подсистем и отдельных элементов.

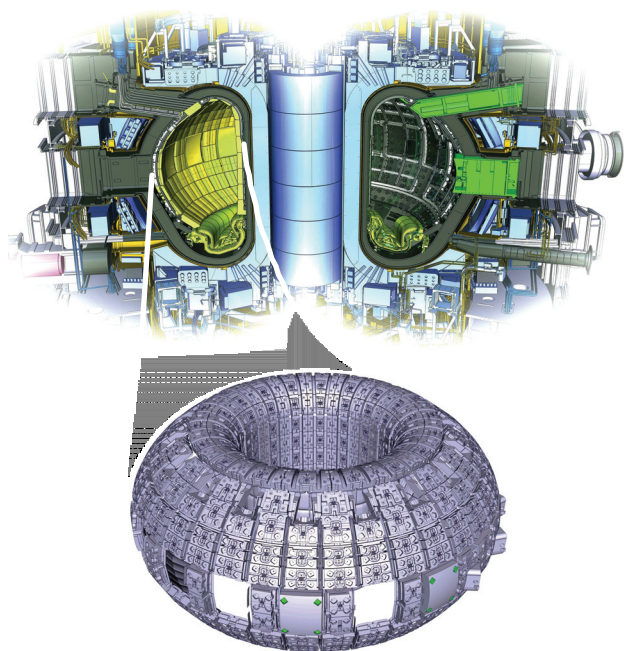


Рис. 1. Бланкет токамака ИТЭР

Например, для реактора ИТЭР принята модульная концепция бланкета (рис. 1), согласно которой функции съёмной части радиационной защиты сверхпроводящих катушек магнитного поля и физической защиты вакуумной камеры от взаимодействия с плазмой выполняют так называемые защитные модули. Полное число элементов бланкета, определяемое принятой схемой сегментации, составляет 441 модуль. Эти компактные элементы изолированы друг от друга в электрическом отношении и имеют независимое крепление к вакуумной камере. Защитные модули оборудованы съёмными протекторами — панелями первой стенки [2]. Подобная компоновка делает актуальными расчёт полных сил и моментов, действующих на отдельные модули при переходных процессах в токамаке, вызванных, в частности, неустойчивостями срыва плазмы [3], и определение возникающих усилий в узлах их крепления к вакуумной камере [4]. Осо-

бенность проблемы в этом случае обусловлена связью механической и электромагнитной задач и необходимостью параллельного (практически — итерационного) решения двух сопряжённых инженерных проблем — конструирования системы и определения нагрузок на систему, существенно зависящих от вида конструкции. Выбор инженерных решений для конструкции и расчёт нагрузок становятся двумя связанными сторонами единого процесса оптимизации.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ УПРОЩЁННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЕЙ БЛАНКЕТА

При численном моделировании переходных процессов в магнитной системе и токопроводящих компонентах электрофизических и электротехнических установок значительное распространение получили вычислительные технологии, построенные на основе применения проекционно-сеточных методов. В процессе совместного решения, как правило, находятся распределения плотности вихревых токов и электромагнитного поля, что требует учёта всех основных компонентов магнитной системы, как активных, так и пассивных, в рамках единой модели. Это обстоятельство усложняет использование данных методов для крупных электрофизических установок, отличающихся наличием разномасштабных элементов, особенностями сложной внутренней структуры и геометрической формы конструктивных элементов. В ряде случаев использование полномасштабных универсальных моделей оказывается нецелесообразным или практически невозможным. На выбор методов моделирования существенно влияют:

- тип и специфика задач, наличие и надёжность исходных данных, степень проработки конструкции, различная для разных этапов в технологическом цикле проекта;
- количество и разнообразие вариантов рассматриваемых узлов;
- имеющиеся вычислительные ресурсы.

Практически все перечисленные аспекты в значительной мере актуальны при разработке бланкета токамака ИТЭР — крупной электрофизической установки с сильным магнитным полем. В процессе расчётного обеспечения проектирования компонентов бланкета и определения электромагнитных нагрузок, ожидаемых при срывах плазмы, проблему вызывает большое количество типоразмеров защитных модулей, а также различие магнитного поля и динамики его изменения в местах их расположения. Другой особенностью разработки модулей бланкета является необходимость учёта многообразия рассматриваемых сценариев переходных процессов в магнитной системе, вызванных неустойчивостями срыва, при условии ограниченности экспериментальных результатов [5].

Анализ всех вариантов за ограниченные сроки разработки в рамках единой вычислительной модели представляет трудноразрешимую задачу. В токамаке ИТЭР используются 18 основных типоразмеров модулей в направлении полоидального обхода вакуумной камеры и анализируются 20 сценариев срыва плазмы, что порождает 360 различных задач. Существенную проблему представляют незавершённость процесса проектирования и, как следствие, отсутствие самосогласованной конструкторской документации, характерные для ранних и промежуточных этапов проектирования, практически вплоть до момента окончания разработки. Необходимость многократных перестроений вычислительных моделей и повторения расчётов в этом случае требует существенных затрат ресурсов при использовании глобальных моделей.

В 2007—2010 гг. конструкция модулей бланкета ИТЭР подверглась существенной ревизии. В процессе работы, в частности, встали вопросы, вполне характерные для начальной фазы проектирования:

- расчётной и технической поддержки планирования программы и последовательности разработки большого числа вариантов модулей и панелей первой стенки;
- выбора и оптимизации внутренней структуры модулей с точки зрения минимизации возникающих интегральных сил и моментов;
- предварительной оценки — предиктивного анализа усилий в узлах крепления (опорах) модулей;
- независимой проверки качества вычислительных моделей и результатов комплексных ЭМ расчётов, проводимых с использованием различных программных пакетов.

Совокупность перечисленных особенностей ограничивает возможности решения задач численного моделирования переходных процессов традиционными методами, которые в данном случае не позволяют в полном объёме обеспечить расчётную поддержку проектирования бланкета. Использование исключительно проекционно-сеточных методов, особенно в части многовариантной оптимизации в условиях продолжающегося внесения поправок в конструкцию и САД-модели, неоправданно, в частности, из-за чрезмерной трудоёмкости подготовки данных, вычислительной сложности и количества вариантов задач. Именно это последнее обстоятельство не может быть компенсировано одной лишь только мобилизацией ресурсов и требует качественного пересмотра методологии и стратегии проведения расчётных работ.

Необходимость практического решения задач, связанных с разработкой компонентов бланкета ИТЭР в сжатые сроки в условиях ограниченных ресурсов, заставила искать альтернативные пути и способы достижения поставленных целей. Встал вопрос о принципиальной возможности решения задачи методами, обладающими:

- относительно слабой чувствительностью к качеству и полноте исходной информации;
- технологической простотой реализации и оперативностью использования.

Естественным путём разрешения ситуации является упрощение математической модели на основе принятия дополнительных допущений с учётом особенностей рассматриваемой системы.

ВЫБОР ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ

В ходе работ по оценке, анализу и сравнению чрезвычайно большого объёма результатов моделирования переходных электромагнитных процессов в ИТЭР, полученных при выполнении многосторонней программы сопоставительных и калибровочных тестовых расчётов (Бенчмарк, Blanket EM Benchmarking analyses program) [6, 7], был применён эффективный способ упрощения задачи посредством разложения комплексной проблемы на несколько частных.

Как правило, в рассматриваемых процессах длина волны электромагнитного поля намного превышает характерные размеры рассматриваемой области, что позволяет использовать для описания переходных процессов квазистационарное приближение [8].

Рассматриваемые система и задача обладают рядом особенностей:

- вихревые индукционные токи в модулях бланкета локализованы;
- модули имеют ограниченный размер по сравнению с другими учитываемыми компонентами основных систем;
- характерное время переходных процессов в модулях существенно меньше характерного времени переходных процессов в самих системах;

— пространственная вариация внешнего магнитного поля относительно мала в пределах модулей и имеет пространственный масштаб, существенно больший по сравнению с их характерным размером. Как показывает анализ, внешнее магнитное поле в пределах каждого модуля сравнительно мало отличается от среднего значения, так, что значения этого поля и его пространственных производных можно считать постоянными;

— поток индукции магнитного поля является интегральным параметром и практически не зависит от локальной неравномерности поля в пределах каждого модуля. На это обстоятельство указывают результаты Бенчмарка и независимых расчётов;

— поле реакции вихревых токов в модулях существенно меньше поля внешних источников и практически локализовано в пределах модулей (что также подтверждается результатами Бенчмарка и дополнительными расчётами);

— топология магнитного поля, обусловленная магнитной системой ИТЭР и электромагнитными процессами, имеет выделенные направления и составляющие — тороидальную и полоидальную, которые отличаются характерными скоростями изменения и абсолютными значениями;

— тороидальное поле отличается характерной для токамака обратной зависимостью величины индукции от радиуса и наличием градиента вследствие кривизны магнитных линий;

— ферромагнитные материалы используются весьма ограниченно и локально;

— модули механически развязаны друг от друга и имеют индивидуальные системы опор;

— конфигурация каждого модуля и его системы опор практически симметрична относительно двух плоскостей, которые могут рассматриваться как координатные в системе отсчёта, связанной с модулем.

На основании перечисленного можно сделать предположение о том, что особенности распределения поля и тока внутри объёмов отдельных модулей оказываются несущественными как для основных систем, так и для конкретной прикладной задачи — определения полного вектора и полного момента пондеромоторных сил, действующих на каждый отдельный модуль. Данное предположение позволяет перейти от рассмотрения распределённых параметров задачи к определению и использованию интегральных характеристик, отражающих:

— усреднённые параметры внешнего магнитного поля в области, занятой проводником (модулем);

— эффективные свойства самого проводника;

— оценку индуктивной связи проводника с остальными элементами систем.

В ряде случаев именно использование интегральных характеристик позволяет разделить модели по степени детализации и назначению. При этом решение каждой частной задачи требует принципиально меньших трудозатрат и качественно более простых моделей. Применительно к рассматриваемой задаче проблема численного моделирования переходных электромагнитных процессов и силовых нагрузок на отдельные компоненты может быть редуцирована к решению совокупности отдельных локальных и глобальных задач. Переход к использованию интегральных характеристик является основным моментом при упрощении математической модели.

ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА

Возможность использования такой модели для расчёта нагрузок на бланкет ИТЭР обусловлена рядом следующих факторов.

Слабая неоднородность поля в пределах каждого модуля. Выражение силовых нагрузок через магнитный момент тока. Как отмечалось, внешнее магнитное поле в пределах каждого модуля вполне характеризуется его средней величиной $\bar{\mathbf{B}} = \int_V [\mathbf{B}] dv / V$ и первыми пространственными производными,

что подтверждается результатами расчётов, проведённых в рамках программы сопоставительных тестовых расчётов ИТЭР [7]. Данное допущение делает возможным определение полного вектора $\mathbf{F} = \int_V [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] dv$ и полного момента сил $\mathbf{M} = \int_V [\mathbf{r} \times (\mathbf{j} \times \mathbf{B})] dv$ через магнитный момент токов модуля

$\mathbf{P}_m = \frac{1}{2} \int_V [\mathbf{r} \times \mathbf{j}] dv$ в виде $\mathbf{M} = [\mathbf{P}_m \times \overline{\mathbf{B}}]$ и $\mathbf{F} = \text{grad}(\mathbf{P}_m \mathbf{B})$ [9]. Отметим, что магнитный момент \mathbf{P}_m является

характеристикой только замкнутой системы токов.

Учёт силы, действующей на проводник в поле при наличии градиента, в данном контексте позволяет говорить о приближении слабой нелинейности пространственного распределения поля. Применительно к рассматриваемой задаче такое приближение приводит к разделению решений для поля и токов. Разделение решений даёт возможность на первом этапе абстрагироваться от пространственного распределения поля и его величины в пределах модуля и изучать распределение плотности тока, определяемое только динамикой задающего внешнего поля. Это означает, что изучение особенностей конфигурации токов в модуле может быть с достаточной точностью осуществлено в рамках локальной расчётной модели. Кроме того, это делает возможным уход от частных сценариев нагружения и переход к рассмотрению свойств распределённой системы токов и характеристик проводника для общего случая (для типовых диаграмм нагружения, при единичном/калиброванном возбуждении и др.).

Для решения локальной задачи о распределении тока в модуле могут быть использованы конечно-элементные модели.

Другой особенностью и следствием формулировки с использованием момента тока является выделение поля возбуждения и поля силового взаимодействия, что даёт возможность представления решения задачи в виде линейной комбинации решений, отвечающих одноосным переменным полям и возбуждаемым вихревым токам в соответствующих контурах. Более того, такая редукция вполне оправдана, поскольку модули и системы опор как геометрические объекты имеют выраженные направления и плоскости симметрии.

Исключение поля реакции при расчёте суммарных нагрузок. Полное магнитное поле в модуле $\mathbf{B} = \mathbf{B}^{\text{ext}} + \mathbf{B}^r$ является суперпозицией магнитного поля \mathbf{B}^{ext} , создаваемого внешними по отношению к модулю источниками, и магнитного поля собственных вихревых токов в модуле, назовём его полем реакции \mathbf{B}^r . Замкнутость и локализация линий тока внутри модуля имеют важное следствие. Неизвестное поле реакции вихревых токов даёт нулевые величины полного вектора и полного момента сил, действующих на модуль как единое закреплённое твёрдое тело. Объём, по которому производится интегрирование, целиком находится в пределах модуля и не выходит за пределы опор. Это позволяет исключить в задаче о нагрузках на модуль поле реакции из поля силового взаимодействия и рассматривать полные контуры, а также эквивалентный им линейный ток только во внешнем поле: $\mathbf{M} = [\mathbf{P}_m \times \overline{\mathbf{B}}] = [\mathbf{P}_m \times \overline{\mathbf{B}^{\text{ext}}}]$ и $\mathbf{F} = \text{grad}(\mathbf{P}_m \mathbf{B}) = \text{grad}(\mathbf{P}_m \mathbf{B}^{\text{ext}})$, где $\overline{\mathbf{B}^{\text{ext}}} = \int_{V_{\text{mod}}} [\mathbf{B}^{\text{ext}}] dv/V$.

Разделение переменных. Задача о токе при медленном нагружении (с исключённым полем реакции). Система вихревых токов однозначно характеризуется, во-первых, конфигурацией линий тока и, во-вторых, распределением объёмной плотности тока. Рассмотрим в качестве начального приближения медленное изменение внешнего слабо неоднородного поля. В этом случае возможны отдельные формулировки задач о конфигурации линий тока и величине плотности тока. Если степень однородности внешнего поля достаточно высока и скорость его изменения достаточно мала с тем, чтобы пренебречь полем реакции вихревых токов, то появляется возможность разделить переменные в уравнении электромагнитной индукции $\text{rot} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) / \partial t = -\partial \mathbf{B}^{\text{ext}}(\mathbf{r}, t) / \partial t = (f(t) \mathbf{g}(\mathbf{r}))$. Это обстоятельство даёт возможность, как показано далее, рассматривать задачу в терминах теории цепей (автоматического управления).

Интегральные параметры в задаче о токе при медленном нагружении. Существование некоторой стационарной векторной функции $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ при медленном нагружении отвечает неизменности пространственного распределения тока в объёме проводника, которое не зависит от силы тока в нём. Для каждого проводника конфигурация линий тока векторного поля $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ практически неизменна в достаточно широком диапазоне скоростей изменения (или частот) внешнего магнитного поля, в то время как абсолютная величина плотности токов зависит от интенсивности возбуждения. Численный эксперимент показывает, в частности, линейную зависимость плотности тока от величины dB/dt . Данная пропорцио-

нальность сохраняется до тех пор, пока можно пренебречь полем реакции вихревых токов по сравнению с внешним полем, т.е. пренебречь явлением самоиндукции, проявляющимся при высоких частотах.

Неизменность конфигурации линий тока определяет целесообразность использования интегральных параметров, характеризующих систему токов как целое. Момент тока \mathbf{P}_m можно принять в качестве меры силового взаимодействия такой системы токов с внешним магнитным полем, а время релаксации τ (постоянную времени) принять в качестве меры электромагнитной инерции системы токов в проводящей структуре. Для конкретной проводящей структуры при рассматриваемых условиях величина \mathbf{P}_m определяется величиной внешнего воздействия. При неизменности $\mathbf{g}(\mathbf{r})$, а также слабой неоднородности поля момент $\mathbf{P}_m(t)$ оказывается функцией только $d\overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}(t)/dt$, где $\overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}$ — среднее по объёму значение индукции внешнего поля. Формулировка задачи в терминах магнитного момента системы токов удобна в случае проводников сложной формы и структуры, поскольку не требует использования в явном виде геометрических параметров контуров и объекта, таких, как площадь, длина обхода, индуктивность, сопротивление, сечение и т.п.

Характер связи векторов \mathbf{P}_m и $d\mathbf{V}/dt$. Показатель степени нагружения контура в переменном магнитном поле. Тензор силовой восприимчивости. При малых скоростях изменения внешнего поля (когда можно пренебречь полем реакции) векторы \mathbf{P}_m и $\dot{\mathbf{V}}^{\text{ext}} = d\mathbf{V}^{\text{ext}}(t)/dt$ связаны соотношением $\mathbf{P}_m = k\dot{\mathbf{V}}^{\text{ext}}$, где $k = \lim_{\dot{\mathbf{V}}^{\text{ext}} \rightarrow 0} (\mathbf{P}_m/\dot{\mathbf{V}}^{\text{ext}})$, а величина $\dot{\mathbf{V}}^{\text{ext}} = d\mathbf{V}^{\text{ext}}(t)/dt$ пропорциональна $\dot{f}(t)$. В общем случае для пространственной проводящей структуры величина k есть некоторый тензор, назовем его «тензором силовой восприимчивости» $\{p_m\}$. Далее используется матричная запись $\mathbf{P}_m = \{p_m\}d\mathbf{V}^{\text{ext}}(t)/dt$, где, например, $P_{mi} = p_{mi}d\dot{V}_i^{\text{ext}} + p_{mj}d\dot{V}_j^{\text{ext}} + p_{mk}d\dot{V}_k^{\text{ext}}$. Для элементарного плоского контура с нормалью n единственный ненулевой компонент тензора $p_{11} = P_m/\dot{B}_n^{\text{ext}}$ численно равен магнитному моменту тока, возбуждаемого при единичной скорости изменения индукции внешнего поля. Величина параметра p_m инвариантна к интенсивности воздействия, характеризует степень электромагнитной связи контура и определяет степень нагружения контура с током в переменном магнитном поле. Таким образом, величина p_m может служить мерой восприимчивости проводника к пондеромоторным нагрузкам (англ.: «load susceptibility»).

При наличии у трёхмерного проводника двух ортогональных плоскостей симметрии матрица $\{p_m\}$ является симметричной и поворотом осей может быть преобразована к диагональному виду. При этом главные значения $p_{11} = p_x$, $p_{22} = p_y$ и $p_{33} = p_z$ численно равны компонентам магнитного момента токов в проводнике, наводимых при единичных скоростях изменения соответствующих компонентов индукции внешнего поля. Следует заметить, что в то время, как \mathbf{P}_m является характеристикой системы токов, параметры $\{p_{11}, p_{22}, p_{33}\}$ — нормированные на единицу \dot{B}_n^{ext} компоненты магнитного момента при медленном нагружении — характеризуют проводник.

В результате при медленном нагружении полный вектор и полный момент сил выражаются через интегральные параметры, характеризующие:

- восприимчивость проводника p_m к пондеромоторным нагрузкам;
- внешнее магнитное поле $\overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}$ и $\partial\overline{V^{\text{ext}}}/\partial x$, $\partial\overline{V^{\text{ext}}}/\partial y$, $\partial\overline{V^{\text{ext}}}/\partial z$;
- скорость изменения внешнего поля $\partial\overline{V^{\text{ext}}}/\partial t$, при этом

$$\mathbf{M} = \left[(\{p_m\}d\overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}(t)/dt) \times \overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}(t) \right] \text{ и } \mathbf{F} = \text{grad} \left((\{p_m\}d\overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}(t)/dt) \overline{\mathbf{V}^{\text{ext}}}(t) \right). \quad (1)$$

Анализ величины тензора $\{p_m\}$ может быть использован на начальном этапе проектирования в процессе оптимизации конструкции, в частности, для сравнения ожидаемых нагрузок. При этом такая оптимизация может проводиться для произвольных полей в рамках локальной модели.

Диагонализация матрицы силовой восприимчивости. Анализ конструкции бланкета позволяет предположить, что тензор силовой восприимчивости модуля $\{p_m\}$ может быть приведён выбором координатных осей к диагональному виду. Оси локальной ортогональной системы координат модуля определяются выделенными направлениями и плоскостями симметрии модуля и его системы опор. Решение

для каждого модуля рассматривается в локальной системе координат, направления осей которой совпадают с главными осями, при этом матрица $\{p_m\}$ является диагональной, а задача сводится к нахождению трёх главных значений $\{p_m\}$.

Линейная комбинация решений задач с однокомпонентными полями. Диагонализация матрицы выбором системы координат делает возможным представление решения для полного вектора и полного момента сил в виде линейной комбинации решений задач с однокомпонентными полями и градиентами, что позволяет использовать локальную модель с аналитически заданными граничными условиями.

Определение матрицы проводника $\{p_m\}$ на основе локальной модели. Простейший численный эксперимент для изучения распределения вихревых токов в образце (например, в отдельном модуле) состоит в воздействии на него однородным переменным магнитным полем. Магнитное поле, внешнее по отношению к проводнику, формируется путём задания граничных условий на замкнутой поверхности расчётной области, например, значений векторного магнитного потенциала $A(t)$ (рис. 2). Локализация поля вихревых токов в окрестности модуля бланкета обуславливает принципиальную возможность решения задач моделирования этих токов в локальной постановке.

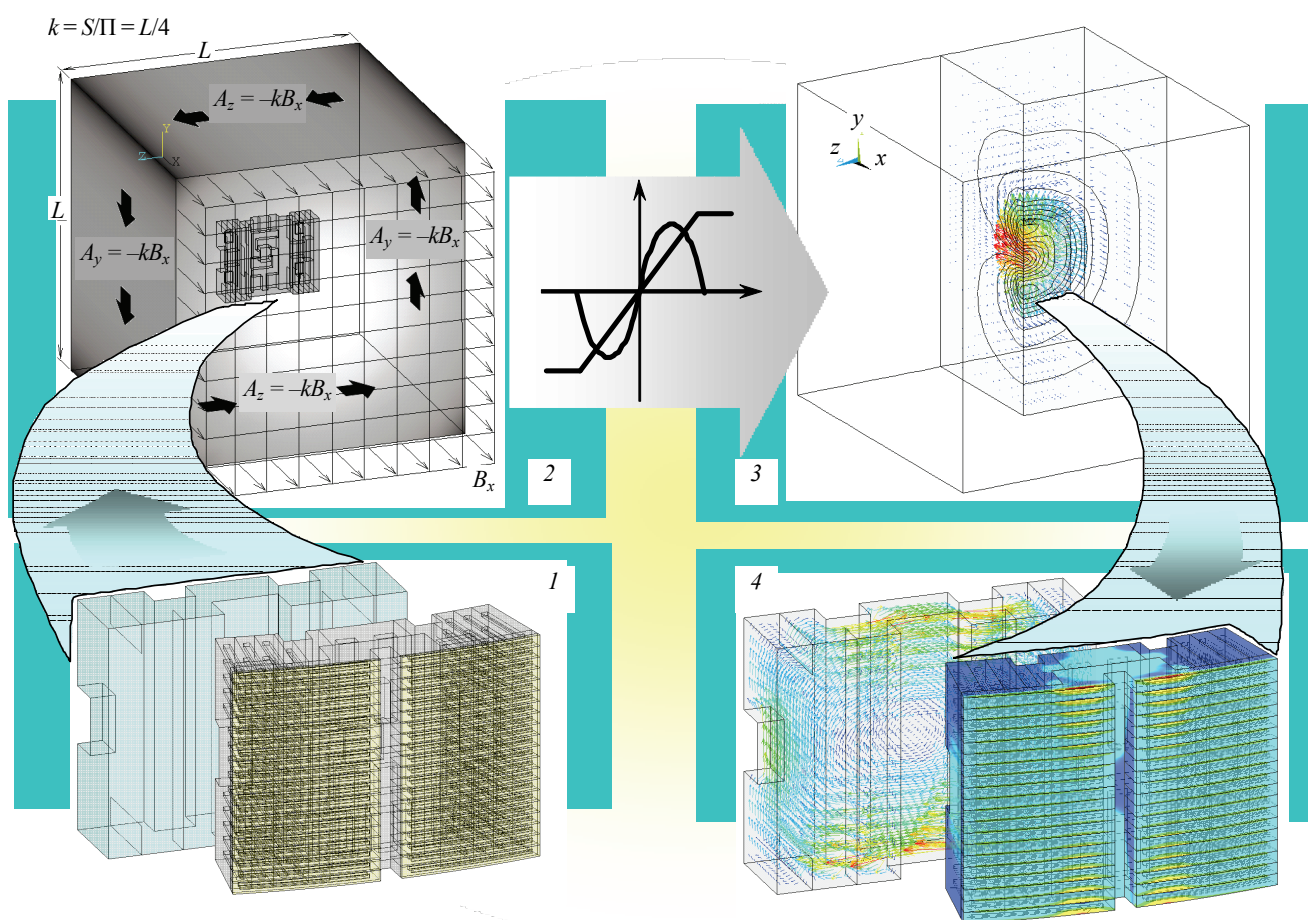


Рис. 2. Локальная модель для исследования распределения токов в компактном проводнике: 1 — образцы проводников; 2 — задание внешнего возмущающего поля (градации серого — интенсивность A); 3 — поле реакции вихревых токов, 1/4 модели; 4 — примеры распределения вихревых токов в образцах

Вместе с тем, когда поле реакции априори неизвестно, встает вопрос о корректности задания граничных условий для локальной задачи, определяемых только внешним приложенным полем. Величина погрешности зависит от величины вклада поля вихревых токов (поля реакции), наводимых в объёме проводника. В качестве оценки максимально достижимой величины этого вклада можно принять поле реакции токов высокой частоты в длинном проводящем стальном цилиндре с диаметром, определяемым характерным размером модуля бланкета. Верхняя оценка вклада соответствует случаю явно выраженного поверхностного эффекта, когда величина поля реакции внутри цилиндра практически равна величине внешнего приложенного поля. Расчёты показывают, что поле вихревых токов на оси цилиндра диамет-

ром 1 м на расстоянии 1 м от его торца не превышает значения 0,061 от величины внешнего приложенного синусоидального поля, а на расстоянии 2,5 м — значения 0,008. Данные соотношения могут быть использованы для определения пределов расчётной области при решении локальной задачи.

Входным воздействием для определения матрицы $\{p_m\}$ является первая производная по времени от индукции однородного внешнего магнитного поля. Проводник внутри объёма ориентирован таким образом, чтобы одна из главных осей совпадала с направлением вектора внешнего поля, при этом момент тока направлен практически вдоль поля. Таким образом, задача решается последовательно для определения каждого из трёх главных значений $\{p_{11}; p_{22}; p_{33}\}$.

Подобный эксперимент может быть реализован при использовании двух подходов: как на основе решения динамической задачи (это допускает, в частности, использование реальных сценариев), так и методами гармонического анализа.

Расчёт токов осуществляется при заданной величине воздействия $|\dot{B}_{\text{ext}}| = \text{const}$ или при синусоидальном изменении поля с фиксированным значением его амплитуды $\dot{B}_{\text{ext}} = \omega B_{\text{ext}0} = \text{const}$. Использование единичных значений воздействия избавляет от необходимости последующей нормировки полученных сил и моментов для получения главных значений $\{p_{11}; p_{22}; p_{33}\}$.

Гармонический анализ. Одношаговое решение для $\{p_m\}$. Консервативная оценка силовых факторов. Для задачи о силовых нагрузках при малой скорости нагружения, решаемой в терминах магнитного момента, определяющими параметрами являются компоненты тензора $\{p_m\}$, характеризующие степень нагружения образца. Использование синусоидального воздействия позволяет провести численный эксперимент в частотной области изменения параметров. При этом компоненты $\{p_m\}$ могут быть найдены при одной частоте, т.е. за один шаг решения. Гармоническое решение при частоте, стремящейся к нулю, соответствует стационарному решению во временной области (в данной задаче — при постоянной во времени величине производной $d\mathbf{B}_e^{\text{ext}}(t)/dt = \text{const}$, т.е. линейном изменении $\mathbf{B}_e^{\text{ext}}(t)$).

При скоростях изменения поля, для которых вклад поля реакции вихревых токов становится заметным, измеренные параметры $k_i = P_{mi}/\dot{B}_e^{\text{ext}}$ зависят от частоты. При частотах меньше некоторого порога $\omega < \omega_1$ параметры k_i практически совпадают с максимальными асимптотическими значениями при $\omega \rightarrow 0$ и равны рассмотренным $\{p_{11}; p_{22}; p_{33}\}$. Независимость от формы входного воздействия в достаточно широком диапазоне скоростей изменения, соответствующем так называемому «медленному» нагружению, делает эту тройку параметров характеристикой данного образца.

Использование значений $\{p_{11}; p_{22}; p_{33}\}$, полученных при $\omega \rightarrow 0$, даёт оценку максимально возможных механических сил и моментов, испытываемых проводником во внешнем переменном поле, независимо от формы воздействия. Таким образом, расчёт главных значений тензора $\{p_m\}$ с использованием локальной модели делает возможным проведение консервативной оценки механических нагрузок для любых сценариев нагружения, вызванных переходными электромагнитными процессами, по формулам (1).

Учёт поля вихревых токов при быстром нагружении путём замены сложной системы токов динамическим звеном. Для «медленных» процессов полем реакции вихревых токов при определении магнитного момента можно пренебречь и на основании неизменности конфигурации токовых линий считать момент пропорциональным скорости изменения индукции внешнего поля $\mathbf{P}_m = \{p_m\}\dot{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}}$. В общем случае для определения вихревых токов требуется учёт поля реакции. В этом случае аппроксимация сложного трёхмерного проводника динамической системой или звеном общего вида с использованием методов теории автоматического управления [10], входным воздействием для которого является только внешнее поле, позволяет учесть влияние поля реакции на величину и распределение токов. Интегральные параметры, определяемые полем реакции, в отличие от параметров, определяемых внешним полем, являются зависимыми параметрами задачи. Они могут быть учтены в рамках модели исследуемого объекта, поскольку определяются свойствами самого объекта. Замена сложной модели объекта простым аналогом с известным типом реакции на внешнее воздействие (динамическими характеристиками) и найденными параметрами позволяет оценивать интегральные величины, определяющие состояние системы, при любом входном воздействии, не прибегая к динамическим расчётам.

Необходимо отметить, что в случае синусоидальной нагрузки переход к учёту явления самоиндукции и поля реакции можно было бы осуществить повторением численного эксперимента с образцом в соответствующем спектре частот. Результатом подобной серии численных испытаний изучаемого образца с помощью локальной модели является экспериментальная кривая, показывающая зависимость амплитудного значения момента тока и сдвига фаз от частоты и имеющая характерный вид (пример логарифмических амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) и фазово-частотной характеристики (ЛФЧХ) на рис. 3). Как показано далее, использование эквивалентного динамического звена для воспроизведения отклика объекта позволяет перейти к решению задачи в терминах теории цепей при произвольной форме внешнего воздействия, а не только синусоидального. Экономия вычислительных средств достигается за счёт значительного уменьшения числа степеней свободы в задаче. Аналог может состоять даже из одного звена — необходимая точность воспроизведения отклика определяется практическими потребностями.

Определение типа и параметров динамической системы по виду частотных характеристик. Изучение системы токов при синусоидальной нагрузке методами гармонического анализа позволяет абстрагироваться от какого-либо частного вида диаграммы нагружения.

Построение и анализ амплитудной и фазовой частотных характеристик (ЧХ) отклика (магнитного момента системы токов) проводника на синусоидальное магнитное поле позволяет установить как динамические свойства и тип исследуемой системы, так и её параметры. При этом проведение мультичастотного гармонического анализа требуется только при первоначальном исследовании системы в целях идентификации типа эквивалентного звена по виду частотных характеристик.

На рис. 3 приведены кривые ЧХ, полученные при единичной амплитуде $\dot{B}_{\text{ext}0} = \omega B_{\text{ext}0} = 1,0$ Тл/с синусоидального воздействия для объекта и апериодического звена 1-го порядка с эквивалентными параметрами. Для удобства отображения результатов мультичастотного численного расчёта (ANSYS) используется линейная частота $f = \omega/2\pi$. Анализ и сравнение кривых подтверждают предположение о возможности приближения в широком диапазоне частот рассматриваемого объекта эквивалентным контуром с током или простейшей RL -цепью. Закон изменения тока описывается дифференциальным уравнением $L\dot{I} + RI = -\dot{\Phi}_{\text{ext}0}$, где L — эффективная индуктивность; Φ_{ext} — поток внешнего магнитного поля через контур; R — эффективное сопротивление контура. RL -цепь представляет собой апериодическое звено первого порядка, описываемое уравнением общего вида $Ty' + y = ku$ с соответствующей передаточной функцией $W(p)$ (см. рис. 3), где T является постоянной времени звена, k — его коэффициентом передачи. Данная форма частотной характеристики наблюдается для всех проводников достаточно сложной формы и внутренней структуры, в том числе имитирующих модули бланкета. Кривые ЧХ апериодического звена определяются двумя параметрами: амплитудой, равной k , при стремящейся к нулю частоте и сопрягающей частотой $\omega_1 = 1/T = R/L$, при которой ЛАЧХ имеет перегиб [10]. Следует отметить, что оба параметра могут быть определены при наличии решения для одной частоты. В частности, приведённая на рис. 3 характеристика апериодического звена для всего диапазона частот построена на основе результатов расчёта для частоты $f = 0,002$ Гц. Первоначальное определение вида частотной характеристики объекта с использованием серии гармонических расчётов необходимо для определения вида эквивалентного ему динамического звена.

При гармоническом возбуждении контура магнитным полем $B_{\text{ext}} = B_{\text{ext}0} \sin(\omega t)$ и начальном условии $I(t = 0) = 0$ решение [11] имеет следующий вид:

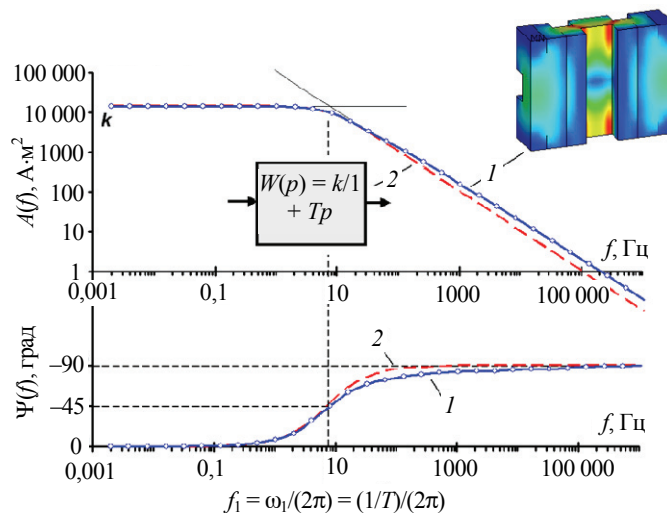


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ трёхмерного локализованного проводящего объекта (1) и характеристика апериодического звена первого порядка (2). Амплитуда $A(f)$ и фаза $\Psi(f)$ — параметры передаточной функции звена; для рассматриваемого объекта эти параметры соответствуют амплитуде магнитного момента P вихревых токов при $\dot{B} = 1,0$ Тл/с и углу запаздывания момента от внешнего синусоидального воздействия

$$I(t) = \frac{\varepsilon_{\text{ext}0}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\cos(\omega t - \delta) - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \cos \delta \right], \quad \text{tg} \delta = \frac{\omega L}{R}.$$

Переходя от линейного контура площадью S к системе токов и её магнитному моменту, можно записать $LP'_m + RP_m = -B'_{\text{ext}} S^2$ и решать задачу для интегральной характеристики системы токов — магнитного момента. Амплитуда решения пропорциональна $p_{m0} = \frac{P_{m0}}{\omega B_{\text{ext}0}} = \frac{S^2}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ и зависит от величин L , R и S . Однако важно подчеркнуть, что вместо оценки этих параметров по отдельности производится оценка комплекса $S^2/\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ на основе численного моделирования путём непосредственного расчёта трёх компонентов p_{m0} .

Определение параметров динамической системы (звена). Для задачи о силовых нагрузках при произвольной скорости нагружения, решаемой в терминах магнитного момента, определяющими параметрами являются компоненты тензора $\{p_m\}$ и параметр запаздывания $\tau = L/R$. Как отмечено, при аппроксимации проводника простейшим апериодическим звеном 1-го порядка величины этих параметров могут быть найдены за один шаг решения (при одной частоте).

Параметр τ — аналог постоянной времени может быть непосредственно получен из гармонического решения, записанного в комплексном виде:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{\tan(\delta)}{\omega} = \frac{[\text{Im}]/[\text{Re}]}{2\pi f}, \quad \omega \rightarrow 0. \quad (2)$$

Данный параметр позволяет также оценить верхнюю границу области частот, в которой решение практически совпадает со стационарным, что соответствует решению задачи о токе при «медленном» нагружении. Сопрягающая частота для такого звена равна [10] $\omega_1 = 1/T = R/L$. Считается, что при $\omega > \omega_1$ такое звено может рассматриваться как интегрирующее, а при $\omega < \omega_1$ — как безынерционное. Два участка ЧХ, соответствующие двум диапазонам частот входного воздействия, позволяют качественно оценить характер нагружения — так называемый «медленный», при котором запаздывание отклика практически отсутствует или не ощущается, или «быстрый», для которого запаздывание существенно.

Таким образом, гармонический анализ является наиболее естественным способом определения основных параметров проводника — тензора $\{p_m\}$ и постоянной времени τ .

Фазовый сдвиг $\pi/2$ между B и \dot{B} при синусоидальном воздействии позволяет выделить решения для внешнего поля и для поля реакции вихревых токов. Использование синусоидального воздействия определяет также удобный способ нахождения параметра τ путём обработки для каждого шага двух наборов данных, содержащих соответственно вещественную и мнимую части решения.

Точность аппроксимации проводника звеном. Эффективные значения параметров. Синтез сложных цепей. О точности аппроксимации проводника динамическим звеном можно судить по степени совпадения их частотных характеристик, например, кривой $p_m(\omega)$ реального объекта, построенной по результатам численного эксперимента с использованием его локальной модели МКЭ, и ЧХ $p'_m(\omega)$ принятого аналога (замещающей схемы) — рассматриваемого динамического звена. Количественно ошибка может быть оценена как интеграл рассогласования характеристик при данном спектре сигнала:

$$\text{err} = \int_{\omega=0}^{\infty} (p_m(\omega) - p'_m(\omega)) \bar{S}(\omega) d\omega \bigg/ \int_{\omega=0}^{\infty} p_m(\omega) \bar{S}(\omega) d\omega,$$

где $\bar{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt$ — непрерывная спектральная функция для непериодической функции времени $f(t)$. Точность аппроксимации зависит от сложности подобранной системы, в первую очередь от её состава — числа используемых простейших звеньев, и может регулироваться в зависимости от потребностей задачи.

Обнаруживаемая близость ЧХ исследованных трёхмерных проводников, построенных расчётным путём с использованием локальных моделей, и ЧХ некоторого типового звена позволяет ввести в рас-

смотрение его эффективные параметры, характеризующие поведение динамической системы — передаточный коэффициент, постоянную времени, а также (при необходимости) переходную характеристику (зависимость изменения выходной величины от времени при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия при нулевых начальных условиях). Эти параметры определяются на основе численных расчётов с использованием локальной модели. Поскольку в численном эксперименте исследуется сам объект с реальной сложной внутренней структурой, вся совокупность вторичных эффектов автоматически учитывается выбором параметров эквивалентной системы, обеспечивающих наиболее точное воспроизведение отклика реального объекта.

Анализ и сравнение формы кривых ЧХ модулей с кривыми ЧХ типовых звеньев (см. пример на рис. 3) позволяют с точностью, достаточной для практических целей, ограничиться простейшей системой, состоящей из одного апериодического звена (RL -цепочки).

В случае необходимости точность аппроксимации может быть увеличена путем синтеза более сложной цепи, которая обеспечивает лучшее совпадение с ЧХ и состоит из нескольких звеньев (например, нескольких апериодических звеньев с различными p_{m0} и ω_1). Экономия вычислительных средств достигается путём замены всей совокупности вариантов пространственно-временного распределения токов в проводнике комбинацией конечного числа фиксированных токовых конфигураций с интегральными параметрами, зависящими от частоты возбуждения. Относительно низкая частота соответствует медленному нагружению проводника с практически линейным профилем распределения плотности тока от центра сечения. Высокая частота соответствует быстрому нагружению проводника с концентрацией тока у его поверхности. В общем случае решение задачи должно рассматриваться как суперпозиция решений для отдельных звеньев. Для элементарной системы, состоящей из одного апериодического звена, параметры могут быть найдены по результатам гармонического анализа для одной частоты, для системы с большим числом звеньев требуется решение при нескольких частотах. Кроме того, необходимость учёта высокочастотных осцилляций нагрузки зависит от особенностей схемы механического крепления и конструкции опор. Следует отметить быстрое снижение вклада высших гармоник в полный вектор и полный момент с ростом частоты (см. рис. 3).

Применимость широко известных методов [10, 12] не ограничивается проблемой оценки полных пондеромоторных нагрузок. Использование методов теории автоматического управления (ТАУ), как альтернативного способа исследования динамических систем в общем виде, допускает теоретическое исследование процессов и свойств системы, в частности, при воздействиях произвольной формы, в том числе с применением аналитических расчётов. В рассматриваемом случае задачи о вихревых токах методы ТАУ тесно смыкаются с методами теории электрических цепей и общих теоретических основ электротехники [13].

Форма решения при внешних и внутренних индуктивных связях и возможность их учета коррекцией звена. Сохранение вида уравнений и решения происходит и в случае индуктивной связи гальванически разделённых элементов. Это делает возможным учёт действия внешних индуктивных связей (например, соседних модулей, оболочек и портов) и взаимной индукции коррекцией эффективных параметров рассматриваемого звена. В частности, элементы с наиболее сильным влиянием могут быть включены в локальную модель, используемую для определения эффективных параметров.

Целесообразность усложнения эквивалентной системы корректирующими звеньями (последовательным включением, коррекцией по задающему воздействию, с использованием неединичной обратной связи или компенсацией возмущающего воздействия) и использования методов синтеза [12] зависит от требуемой точности решения.

Отклик системы при воздействии произвольного вида. Использование интеграла Дюамеля. Целесообразность выбора метода для практического решения задачи о нагрузках на компоненты электрофизической установки зависит от характера предполагаемого возмущения. Так, для задачи о нагрузках на бланкет токамака одним из основных источников входного воздействия является вариация во времени полоидального магнитного поля, вызываемая быстрыми изменениями пространственного распределения тока плазмы в результате развития глобальных неустойчивостей (срывов). При этом форма входного сигнала является весьма сложной, существенно варьируется от сценария к сценарию и не поддаётся какой-либо систематизации. В подобных случаях одним из наиболее оптимальных методов аналитического определения отклика системы на внешнее воздействие является использование интеграла Дюамеля [14].

В основе метода лежит принцип суперпозиции, справедливый для линейных систем и применимый в данном случае в силу принятых предположений. Зная реакцию объекта на единичное ступенчатое возмущающее воздействие — переходную функцию $h(t)$ [15], можно найти реакцию объекта на воздействие произвольной формы $u(t)$ из следующего выражения [16]: $i(t) = u(0)h(t) + \int_0^t u'(\xi)h(t - \xi) d\xi$. Соответствующая формула является прямым следствием теоремы о свёртке. Переходная функция $h(t)$ находится численным путём с использованием локальной модели.

Для контура с током интеграл

$$T_j(t) = \int_0^t \frac{1}{(L/R)_j} \dot{B}_{ej}^{\text{ext}}(\xi) \exp\left(-\frac{1}{(L/R)_j}(t - \xi)\right) d\xi \quad (3)$$

позволяет найти компоненты полных механических силы и момента в виде $F_i(t) = p_{m0j}T_j(t)\text{grad}B_k(t)$ и $M_i(t) = p_{m0j}T_j(t)B_k(t)$. Учитывая, что для медленных процессов справедливо $M_i(t) = p_{m0j}\dot{B}_{\text{ext}j}(t)B_k(t)$, функцию $T_j(t)$ можно характеризовать как аналог $\dot{B}_{\text{ext}j}(t)$, обобщённый для случаев быстрых переходных процессов, в которых существенно запаздывание отклика по сравнению с входным воздействием. Использование интеграла Дюамеля может рассматриваться как «помехоустойчивый» численный метод обработки функции dB/dt , соответствующий физической основе реального процесса и приводящий к схожему результату — сглаживанию (фильтрации) высокочастотных флуктуаций dB/dt , что актуально, например, при использовании данных, полученных численными методами (рис. 4). Таким образом, вместо выражений (1) при произвольном изменении внешнего поля следует использовать выражения

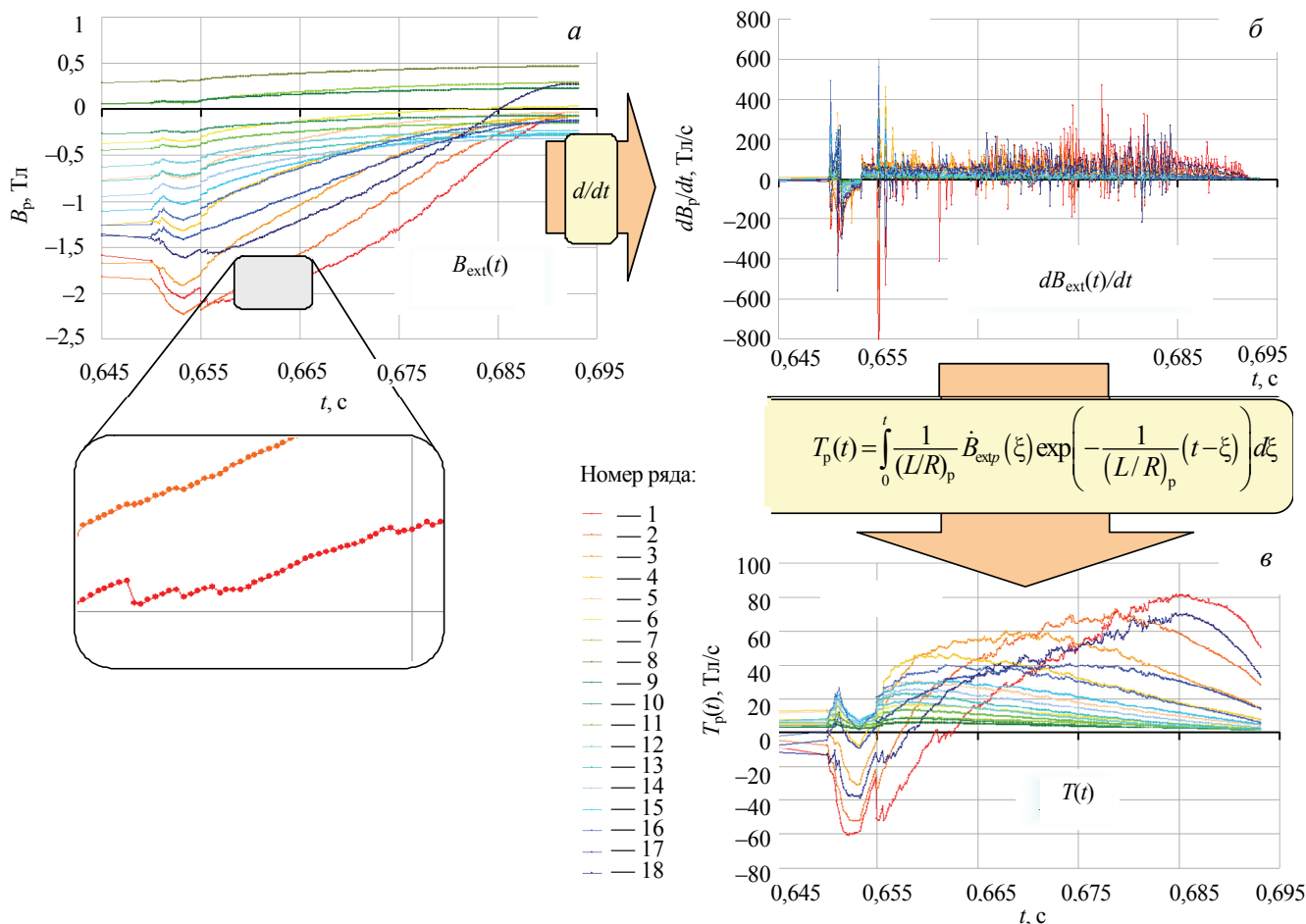


Рис. 4. Сглаживание высокочастотных шумов с использованием интеграла Дюамеля: а — внешнее поле в бланкете (средние значения составляющей полоидального поля B_p в направлении касательной к первой стенке модулей, код ANSYS по данным модели DINA, все 18 модулей); б — dB_p/dt , все 18 модулей; в — интеграл $T_p(t)$ (см. уравнение (3)) — обобщённый аналог dB_p/dt ; Бенчмарк, сценарий Fast DW VDE 36ms LCQ (DINA-2007)

$$\mathbf{M}(t) = \left[\left\{ p_m \right\} \left\{ \int_0^t \frac{1}{(L/R)} \dot{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}}(\xi) \exp\left(-\frac{1}{(L/R)}(t-\xi)\right) d\xi \right\} \times \overline{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}}(t) \right] \text{ и} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}(t) = \text{grad} \left(\left\{ p_m \right\} \left\{ \int_0^t \frac{1}{(L/R)} \dot{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}} \exp\left(-\frac{1}{(L/R)}(t-\xi)\right) d\xi \right\} \mathbf{B}_e^{\text{ext}}(t) \right).$$

Как и ранее, проблема сводится к задаче с тремя степенями свободы. По мере развития проекта уточняются значения величин $\overline{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}}(t)$, $\dot{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}}(t)$ и $\{p_m\}$, из которых может быть произведена окончательная аналитическая «сборка» решения $\mathbf{M}(t)$ и $\mathbf{F}(t)$.

Расчёт внешнего поля с использованием упрощённых моделей. Типичное распределение поля реакции вихревых токов модуля можно наблюдать на рис. 5. Поле реакции в значительной степени локализовано в пределах модулей (рис. 6) и не превышает значений 10—20% от величины внешнего поля, что подтверждается также результатами расчётов, проведённых по программе сопоставительных тестовых расчётов (Бенчмарка) [17]. Влияние модулей бланкета на распределение токов в глобальной модели ИТЭР достаточно мало и может быть заменено системой элементарных диполей.

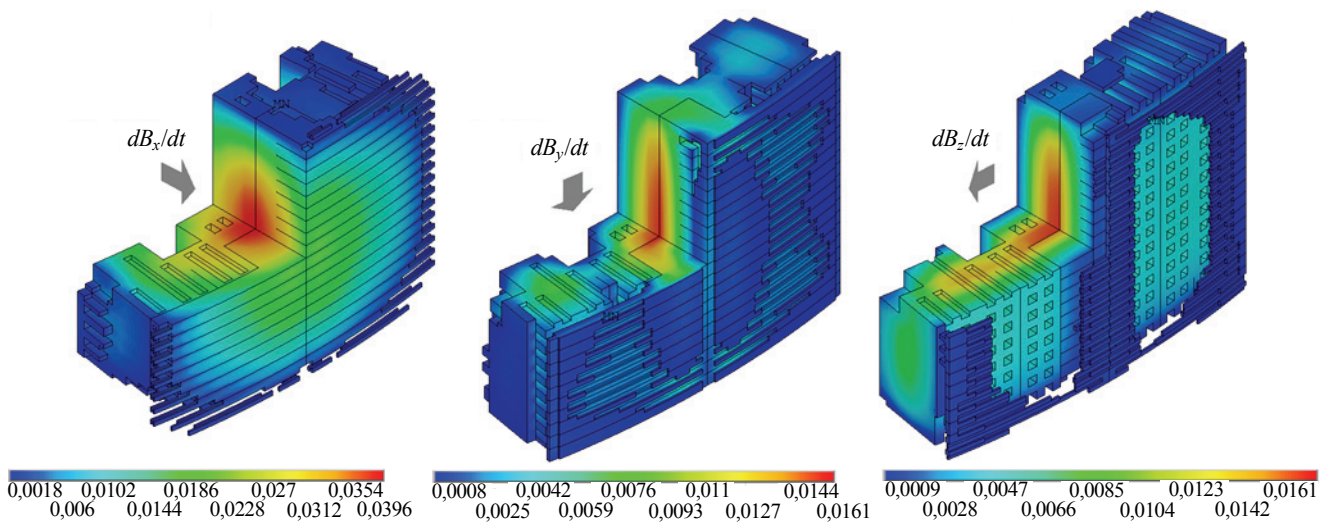


Рис. 5. Поле вихревых токов в модуле бланкета (синусоидальное возбуждение, $f = 0,002$ Гц, $|dB/dt| = 1$ Тл/с, для наглядности не показаны конечные элементы с $B < 0,05B_{\text{max}}$ и удалена 1/4 часть модуля)

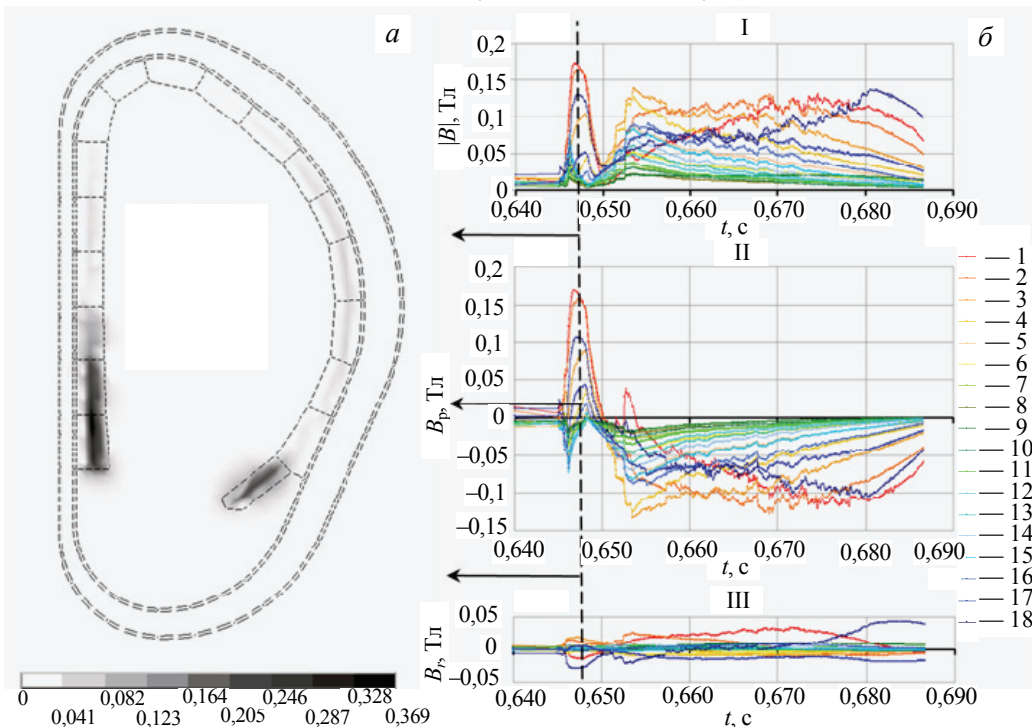


Рис. 6. Поле вихревых токов в модулях бланкета (код ANSYS по данным модели DINA): *a* — распределение вектора индукции \mathbf{B} при максимальных токах в модулях (момент теплового срыва $t = 0,648$ с); *б* — средние значения поля: I — полное поле и компоненты поперечного поля, II — B_r , III — B_p в направлении касательной и нормали к первой стенке модулей; цифры справа — номера рядов модулей, сценарий Fast DW VDE 36 ms LCQ (DINA-2010)

Применительно к задаче моделирования электромагнитных переходных процессов в проводящих структурах токамака появляется возможность упрощения глобальной модели путём использования в ней вместо локальных компонентов их простейших аналогов с эквивалентными параметрами, а также решения глобальной задачи в двумерном приближении.

Источники поля в токамаке. В качестве исходных данных для расчётов переходных процессов при срывах плазмы в ИТЭР используются результаты численного моделирования равновесия плазмы и токов в магнитной системе, полученные с помощью кода DINA [18]. Полученные в осесимметричном приближении пространственные и временные распределения токов в плазме [19] в дальнейшем используются для проведения детальных инженерных расчётов переходных процессов в элементах проводящих структур с применением пространственных моделей.

Обеспечение равновесных конфигураций плазмы в МГД-приближении требует учёта всех проводящих элементов основных систем. Таким образом, МГД-расчёт (например, с использованием пакета DINA [20, 21]) может с точностью до вычислительной модели служить источником информации о пространственно-временном распределении токов как в плазме, так и в элементах проводящих структур.

Представление решения в форме, описывающей каждый источник переменного магнитного поля отдельно, позволяет использовать результаты численного моделирования с помощью комплекса DINA в качестве готовых исходных данных для решения локальной задачи расчёта интегральных характеристик малоразмерных компонентов токамака. Следует подчеркнуть, что для учёта внешнего (по отношению к анализируемым модулям) поля в систему источников должны быть включены распределения вихревых токов во всех значимых проводящих структурах. Это относится, в первую очередь, к вакуумной камере, величина постоянной времени которой значительно превышает величины постоянных времени модулей blankets. Для случая более детальных расчётов в качестве входных данных могут быть использованы результаты численного моделирования вихревых токов, полученные на базе пространственных моделей.

Анализ данных, полученных в результате решения динамической задачи с использованием трёхмерных моделей в процессе выполнения программы тестовых расчётов (Бенчмарка), и осесимметричных моделей (кода DINA) показывает, что при оценке среднего по объёму модуля внешнего поля влиянием вихревых токов в соседних модулях и диверторе можно пренебречь. Последнее обстоятельство не исключает возможности учёта этих элементов при построении более детальной модели.

Таким образом, перечисленные ранее особенности рассматриваемой задачи и принятые допущения определяют наличие следующих характерных для упрощённой методики вычислительных приёмов:

- разделение общей задачи на несколько частных и использование проблемно-ориентированных моделей различного уровня детализации;
- использование интегральных характеристик;
- анализ характеристик проводника в терминах тензора силовой восприимчивости;
- рассмотрение задачи в пространстве частот;
- переход к методам теории цепей (систем управления).

Главные значения тензора $\{p_m\} = \lim_{\mathbf{B}_e^{\text{ext}} \rightarrow 0} (\mathbf{P}_m / \mathbf{B}_e^{\text{ext}})$ и параметр τ (2) при $\omega \rightarrow 0$ вполне характеризуют проводник. Они показывают относительную степень нагружения твёрдотельного проводника в переменном магнитном поле и его электромагнитную инерцию.

Эти интегральные параметры:

- могут служить критериями для оптимизации конструкции с точки зрения минимизации возникающих в переменном магнитном поле сил и моментов;
- определяют эффективные параметры упрощённых аналогов, эквивалентных реальным модулям, для использования в глобальных моделях;
- позволяют оперативно получить аналитически электромагнитные нагрузки на исследуемый объект для большого числа расчётных случаев при различных сценариях;
- могут использоваться для исследования отдельных факторов, определяющих нагрузки, и для экстраполяции результатов;
- определяют параметры эквивалентной динамической системы с минимальным числом степеней свободы, позволяющей оценить отклик системы при произвольной форме нагрузки методами теории цепей;

— позволяют получить консервативные оценки полных сил и моментов, действующих на проводник во внешнем поле независимо от формы воздействия, на основе априорной оценки скорости изменения внешнего поля.

Нахождение интегральных параметров не требует знания конкретных сценариев нагружения и использования глобальных моделей. Эти особенности делают такой подход эффективным, в частности, на начальной стадии проектирования, в условиях неполных данных.

Предложенная декомпозиция сложной проблемы на ряд более простых частных задач допускает использование вместо единой универсальной модели нескольких моделей, каждая из которых требует для решения меньших вычислительных ресурсов и затрат времени на создание и отладку. При этом специализированные задачи, которые могут быть решены с помощью таких упрощённых моделей, позволяют найти ряд параметров, характеризующих отдельные аспекты проблемы.

Построение частотных характеристик отклика локальной модели на гармоническое возбуждение в терминах магнитного момента тока позволяет установить и предложить простейший эквивалент системы токов в модуле. Оценка отклика на нормализованное воздействие с помощью гармонического анализа отдельного модуля с использованием локальной модели (сколь угодно детальной) определяет все необходимые параметры для решения задач. К ним относятся как задача об относительной степени механического нагружения, так и задача об абсолютной величине нагрузок и характере их изменения во времени при произвольном воздействии. В контексте рассматриваемой проблемы оба приложения можно условно характеризовать как задачи анализа и синтеза.

Следует отметить вычислительную простоту получения решения при использовании упрощённого подхода. Источниками снижения вычислительной сложности задач являются два обстоятельства, связанные с особенностями используемых методов:

- ограниченное число значимых гармоник входного воздействия;
- ограниченное число значимых звеньев в эквивалентной динамической системе.

Математический аппарат решения задач в пространстве частот (гармонического анализа) представлен во многих программных комплексах и требует значительно меньших вычислительных ресурсов по сравнению с полным динамическим расчётом.

ОБОБЩЁННЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Алгоритм решения совместной задачи оптимизации конструкции и оценки интегральных и распределённых силовых нагрузок на бланкет ИТЭР предполагает решение следующей совокупности задач:

1. Определение интегральных характеристик — главных значений тензора $\{p_m\} = \lim (\mathbf{P}_m / \dot{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}}), \dot{\mathbf{B}}_e^{\text{ext}} \rightarrow 0$ и постоянных времени модулей с использованием локальных моделей методами гармонического анализа.
2. Определение характера и степени влияния соседних проводящих элементов.
3. Определение распределения вихревых токов и поля с использованием упрощённой трёхмерной (или двумерной) глобальной модели и эффективных параметров для описания её элементов, в том числе модулей blankets, и токов источников.
4. Выделение внешнего поля и нахождение его интегральных характеристик в местах расположения модулей.
5. Определение магнитного момента вихревых токов отдельных модулей для заданных сценариев изменения воздействия с использованием интеграла Дюамеля.
6. Вычисление мгновенных значений компонентов полного вектора и полного момента сил, действующих на модули.
7. Вычисление пространственно-временных распределений параметров задачи для уточнённых сценариев на локальных моделях.

Практически первая и вторая задачи решались с использованием пакета программ ANSYS [22] для различных вариантов конструкции модулей.

В качестве выходных данных третьей задачи, связанных с моделированием МГД-равновесия плазмы в токамаках, использовались результаты расчётов, полученные с помощью кода DINA с учётом проводящих структур и ЭМ-системы ИТЭР (модели DINA-2007 и DINA-2010) [23].

Четвёртая задача сводилась к магнитоэлектростатическим расчётам поля совокупности кольцевых токовых нитей модели DINA с использованием комплекса ANSYS.

Процедуры, обеспечивающие решение пятой и шестой задач, основаны на аналитических выражениях и допускают решение в приращениях с помощью табличного редактора (EXCEL).

Задачи, решаемые на седьмом этапе, выходят за рамки данной работы и здесь не рассматриваются [24].

Важно подчеркнуть, что перечисленные частные задачи могут решаться на различных этапах проектирования по мере уточнения данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ДРУГИХ РАСЧЁТОВ

С целью проверки работоспособности предложенного подхода применительно к установке ИТЭР проводилось сравнение результатов расчёта магнитного поля. В частности, для сравнения использовались результаты численного моделирования переходных процессов, полученные с использованием трёхмерных моделей комплекса программ TORNADO [17, 24].

Пространственная конечно-элементная модель описывала один 20-градусный сектор установки, учитывала условия симметрии и была разработана в рамках многосторонней программы сопоставительных расчётов (Blanket EM Benchmarking analyses program) ИТЭР [7]. Данные динамического расчёта с использованием детальной модели TORNADO сравнивались с результатами расчёта поля от системы кольцевых токов, полученными с помощью комплекса программ ANSYS. В обоих случаях в качестве входных данных использовались результаты численного моделирования и спецификации тороидальных токов пакета DINA. Модель TORNADO обеспечивала решение динамической задачи расчёта распределений вихревых токов и сил, в то время как с помощью пакета ANSYS решался набор магнитостатических задач расчёта поля по заданным источникам, включая распределения вихревых токов в вакуумной камере, рассчитанные с использованием кода DINA. Исходя из специфики проблемы, основное внимание было уделено анализу средних по объёму модулей бланкета значений компонентов полоидального поля и динамики его изменения. Вопросы величины поля реакции модулей и вариации значений полного поля по объёму модулей рассматривались отдельно.

Цели:

- проверка и взаимное сравнение результатов, полученных различными методами и кодами, с использованием выходных данных кода DINA (DINA-2007 и DINA-2010);
 - оценка вкладов, вносимых токами в различных элементах магнитной системы (включая модули бланкета), в суммарную величину поля;
 - оценка вариаций и максимальных значений поля в местах расположения различных модулей бланкета.
- Рис. 7 иллюстрирует связи между сравниваемыми наборами данных.

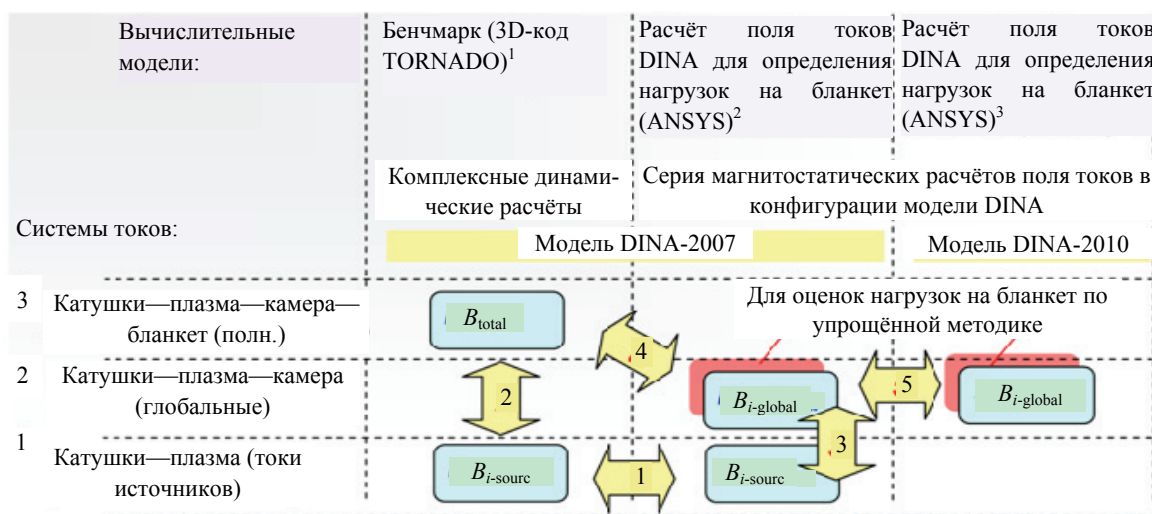


Рис. 7. Сравнимые наборы данных (источники: ¹ <https://user.iter.org/?uid=33BDEU>; ² <https://user.iter.org/?uid=2PMDR6 v.1.0>; ³ <https://user.iter.org/?uid=2PMDR6 v.1.1>)

Сравнение проводилось в отношении средних для модулей blankets значений поля, полученных с помощью разных вычислительных моделей (поз. 1 на рис. 7). Сравнение показало практически полное совпадение данных, что свидетельствует о корректности соответствующих базовых процедур моделирования поля.

Проведение динамического расчёта с помощью глобальной модели TORNADO позволяет оценить также полное поле с учётом вклада вихревых токов, наведённых во всех проводящих структурах конструкции. Разность полного поля и поля источников (поз. 2 на рис. 7) определяется вкладом поля вихревых токов (поля реакции).

Поле, вычисленное с помощью пакета ANSYS, включающее поле вихревых токов вакуумной камеры без учёта вихревых токов в модулях blankets, оказалось весьма близким к полному полю (рис. 8). Это свидетельствует о весьма незначительном вкладе поля токов в модулях blankets (поз. 4 на рис. 7) и существенном вкладе поля токов в вакуумной камере (поз. 3 на рис. 7) в полное поле.

Значения поля вычислены в локальных системах координат модулей blankets. По оси абсцисс отложены номера N рядов модулей вдоль полоидального обхода. Для групп I, II, III приведены три пары кривых: 1a и 1b — в начале сценария (совпадающие и одинаковые для всех сценариев); 2a и 2b — в конце сценария; 3a и 3b — максимальные и минимальные значения, найденные за сценарий. Круглые маркеры соответствуют данным кода TORNADO.

Расчёт магнитного поля проводился с применением кода ANSYS на основе выходных данных пространственно-временных распределений токов модели DINA-2007. Использование этих данных для последующего расчёта интегральных нагрузок на модули blankets в рассматриваемой упрощённой постановке позволяет вместо динамического расчёта ограничиться серией статических вычислений, что обеспечивает значительный выигрыш во времени.

Аналогичные расчёты поля и нагрузок были выполнены также с использованием выходных данных модели DINA-2010 (пример на рис. 9 для одного из сценариев).

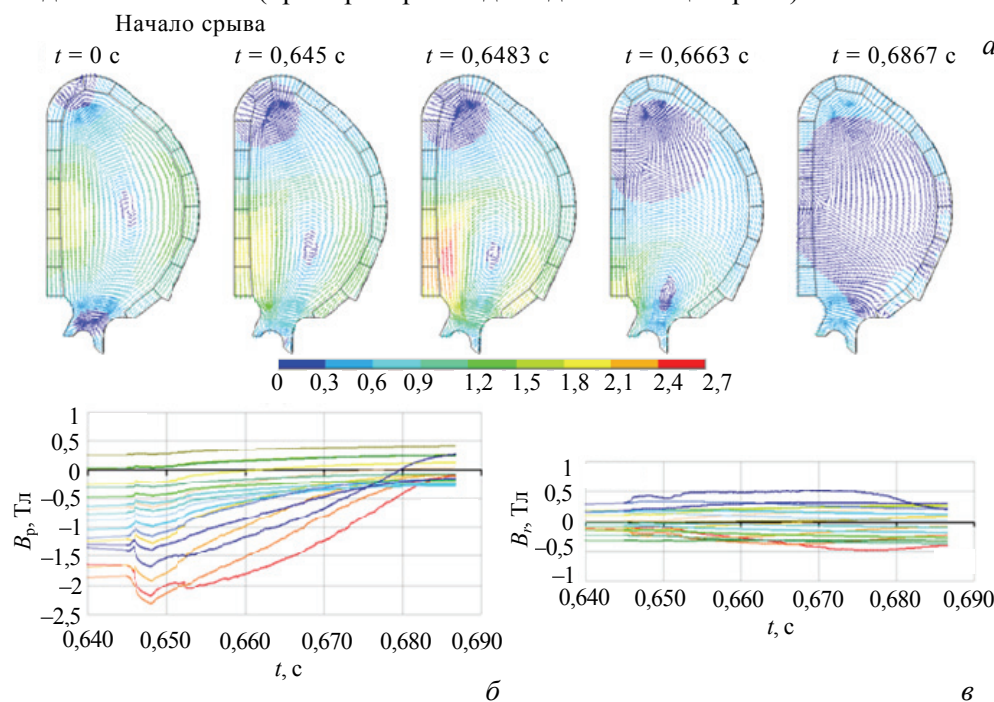


Рис. 9. Эволюция внешнего полоидального магнитного поля: а — векторная диаграмма поля внутри камеры; б, в — средние в модулях blankets значения компонентов полоидального поля B_p и B_r , вычисленных в локальных системах координат модулей; 9 сценарий Fast DW; 10 VDE 36 мс LCQ (DINA-2010), начало срыва соответствует моменту времени 0,645 с

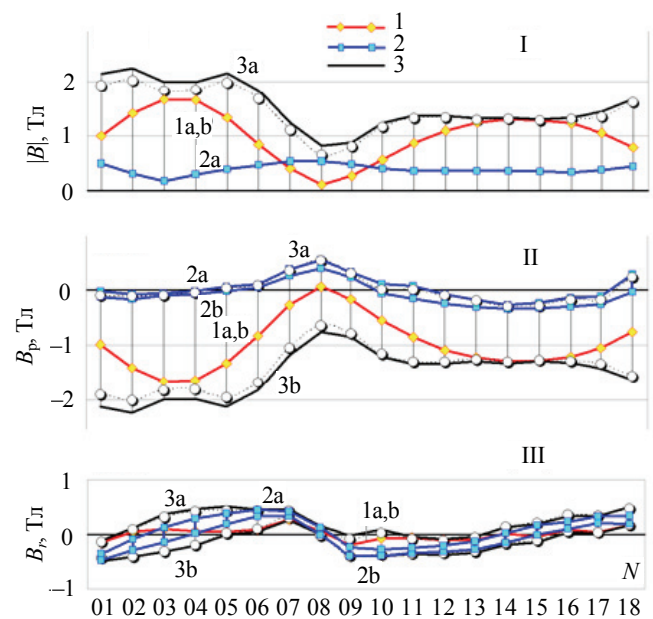


Рис. 8. Полный диапазон изменения средних значений поля системы токов (катушки + плазма + камера) по объёмам всех 18 модулей blankets, выбранный по шести сценариям срыва тока плазмы (DINA-2007): I — огибающие для полного поля и компонентов полоидального поля; II — B_p ; III — B_r в направлении касательной и нормали к первой стенке модулей

Различие средних значений поля по модулям бланкета, вычисленных для одних и тех же сценариев, но различных моделей DINA (DINA-2007 и DINA-2010) оказалось несущественным (поз. 5 на рис. 7).

Сопоставительный анализ данных показал, что экстремальные значения полного поля близки к экстремальным значениям поля выделенной системы токов (катушки + плазма + камера), но не превышают их. В связи с этим можно заключить, что поле такой системы токов в области расположения модулей бланкета может служить консервативной оценкой величины поля и использоваться для инженерных расчётов и формулировки технических требований.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ НАГРУЗОК И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ДРУГИХ РАСЧЁТОВ

Первоначально задача независимой оценки и сравнения отдельных интегральных параметров с помощью относительно простых альтернативных моделей имела целью проверку и сравнение результатов динамических электромагнитных расчётов, полученных с помощью различных комплексных моделей и кодов в рамках многосторонней программы сертификационных расчётов — «Blanket Electromagnetic Benchmarking Analyses program» [6]. Эта программа была инициирована Международной организацией ИТЭР в 2008 г. для обеспечения качества и достоверности результатов расчётов, выполняемых странами-участницами проекта ИТЭР. Программа предполагала:

- обоснование и отладку технологии проведения электромагнитных расчётов;
- выработку рекомендаций относительно параметров конструкции модулей на основе предварительных расчётов нагрузок;
- переход к расчётам с использованием детальных уточнённых моделей.

В процессе работ в полной мере проявились основные трудности, связанные с проведением такого рода расчётов с использованием глобальных конечно-элементных моделей установки ИТЭР, отличающейся наличием разномасштабных элементов. Критерием качества используемых сложных моделей и расчётных результатов могут служить оценки интегральных величин и физических параметров задачи [25, 26].

Предложенный подход использовался в ходе расчётов нагрузок на модули бланкета ИТЭР для различных приложений:

- тестовые задачи (сплошной блок, сценарии DINA-2007);
- Бенчмарк (упрощенный модуль-2008, сценарии DINA-2007);
- защита эскизного проекта (модуль-2009, сценарии DINA-2007) — Blanket Conceptual Design Review (CDR);
- подготовка к PDR и FDR — предварительной и окончательной защите технического проекта (новая базовая конфигурация-2009, сценарии DINA-2010).

Для тестовых задач результаты расчёта нагрузок по упрощённой методике сравнивались с результатами, полученными на основе глобальных динамических моделей. В процессе верификации методики были оценены нагрузки на упрощённые модули бланкета, использованные в рамках программы сопоставительных расчётов (для 18 различных модулей при шести сценариях DINA-2007).

Рис. 10 приведён в качестве иллюстрации сопоставления нагрузок, полученных с помощью тестируемой методики и кода TORNADO. Как видно, отклонение максимальных нагрузок не превышает 20%, при этом результаты по упрощённой методике являются консервативной оценкой нагрузок в соответствии с анализом, проведённым в предыдущем разделе.

Также рассчитаны величины и диаграммы изменения нагрузок на модули бланкета конструкции образца 2009 г. Результаты моделирования сравнивались для нескольких расчётных случаев с данными, полученными двумя другими коллективами разработчиков в рамках подготовки к защите эскизного проекта бланкета (Blanket CDR — Conceptual Design Review) [27]. Показана приемлемая точность совпадения как качественного характера изменения во времени интегральных параметров, так и их абсолютных величин.

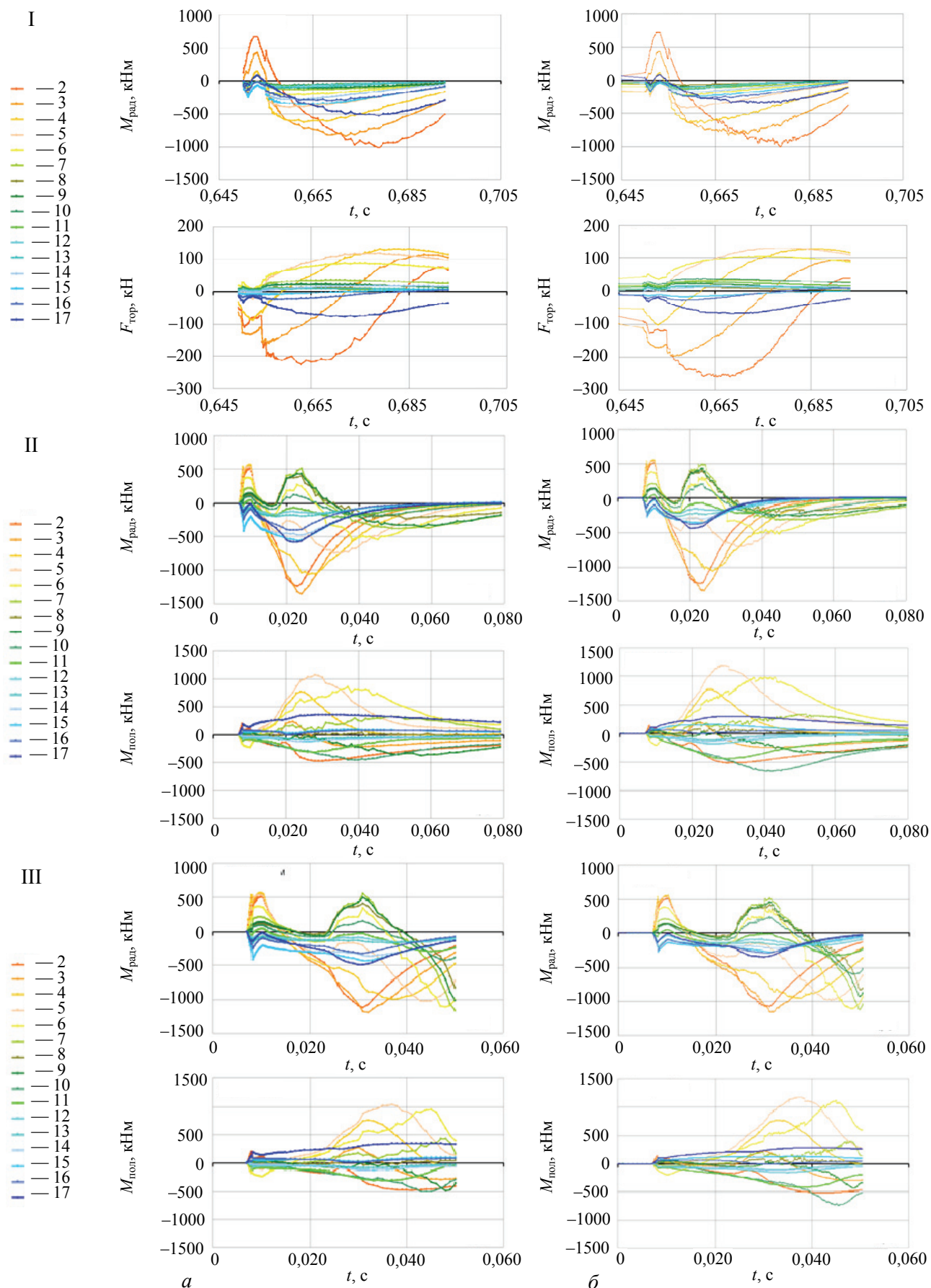


Рис. 10. Сопоставление нагрузок, полученных на основе глобальной модели кода TORNADO (динамический расчёт) (а) и упрощённой методики (б). Приведены значения радиального $M_{\text{рад}}$ и полоидального $M_{\text{пол}}$ моментов и тороидальной силы $F_{\text{тор}}$, действующих на защитные части модулей (без первой стенки) в рядах с 2 по 17: I — сценарий Fast DW VDE 36 ms LCQ (DINA-2007); II — MD Up 16 ms ECQ (DINA-2007); III — MD Up 36 ms LCQ (DINA-2007)

Рис. 11 иллюстрирует сопоставление результатов, полученных с помощью глобальных динамических моделей и по упрощённой методике. Нагрузки по упрощённой методике получены для всей совокупности модулей и сценариев. Нагрузки с использованием глобальных моделей получены только для ограниченного числа модулей и сценариев. Приемлемая (в пределах 20%) точность совпадения результатов даёт основание сделать заключение о достоверности всех данных, полученных по упрощённой методике.

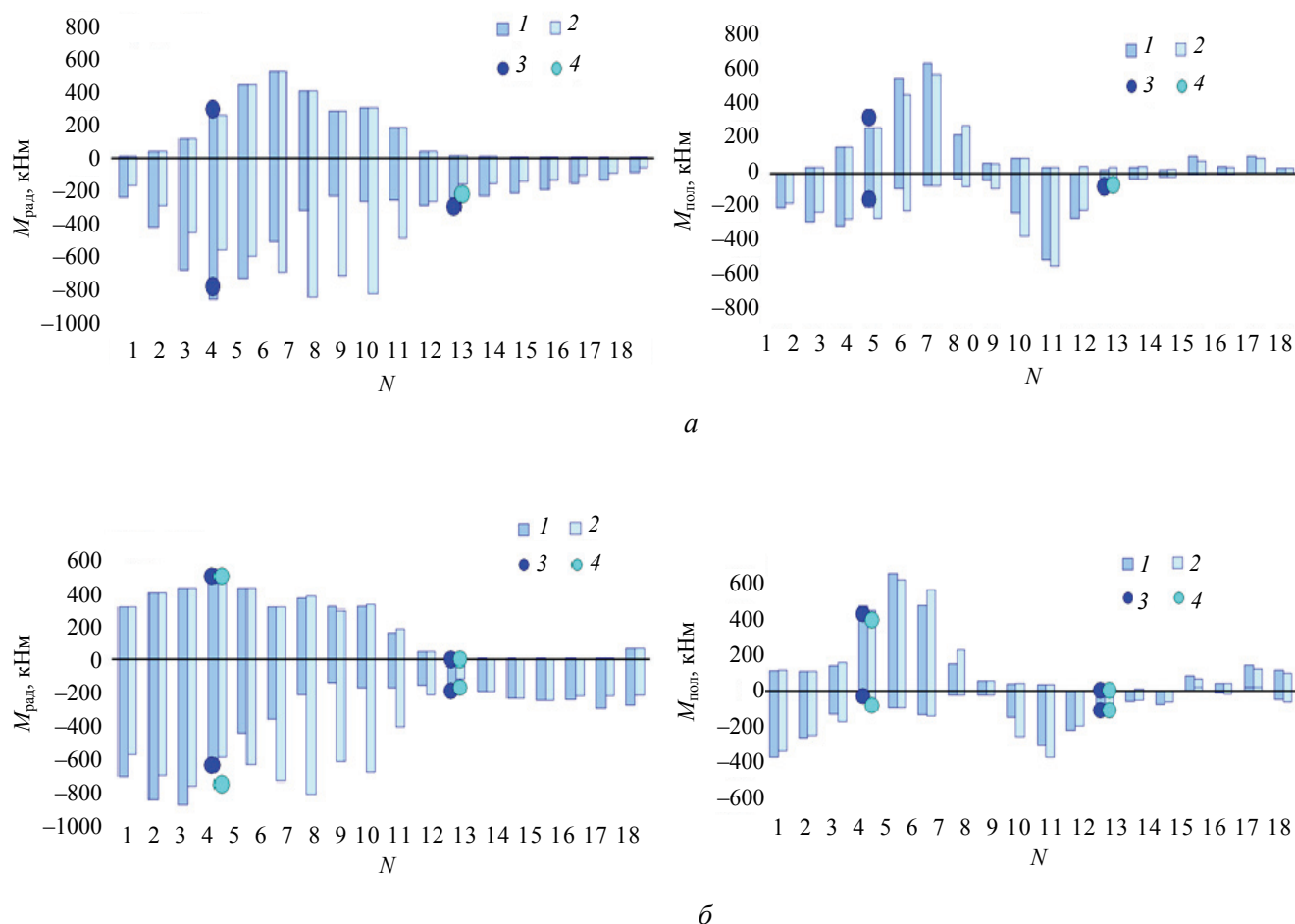


Рис. 11. Нагрузки на модули бланкета конструкции образца 2009 г.: *а* — сценарии типа Fast VDE Up; *б* — сценарии типа MD Up. Моменты $M_{пол}$ и $M_{рад}$ вычислены в локальных системах координат модулей; 1, 2 — результаты, полученные по упрощённой методике; 3, 4 — результаты, полученные с помощью глобальной модели кода TORNADO (CDR-2010); 1, 3 — сценарии с экспоненциальным спадом тока плазмы; 2, 4 — сценарии с линейным спадом тока плазмы

Необходимо отметить, что в упрощённой методике использовались весьма простые локальные модели модулей бланкета. В частности, рассматривались конструкция и внутренняя структура типового концептуального модуля. Этот модуль описывался с помощью параметрической «деформируемой» модели матричного типа (см. пример на рис. 5). Проецирование этой параметрической модели в различные позиции модулей с учётом их габаритных размеров обеспечило описание всех модулей бланкета токамака ИТЭР.

В 2010 г. закончена работа по предварительному определению с помощью предложенного подхода нагрузок на все 18 типов модулей бланкета для шести сценариев DINA-2007. Расширение базового набора до 20 сценариев потребовало повторения расчётов [28] (примеры на рис. 12). Анализ, в частности, подтвердил номера рядов наиболее нагруженных модулей — 1, 6, 10 и 18 для всей совокупности рассматриваемых расчётных случаев (рис. 13) и выявил для каждого модуля наиболее опасные сценарии срывов с точки зрения возникающих силовых нагрузок.

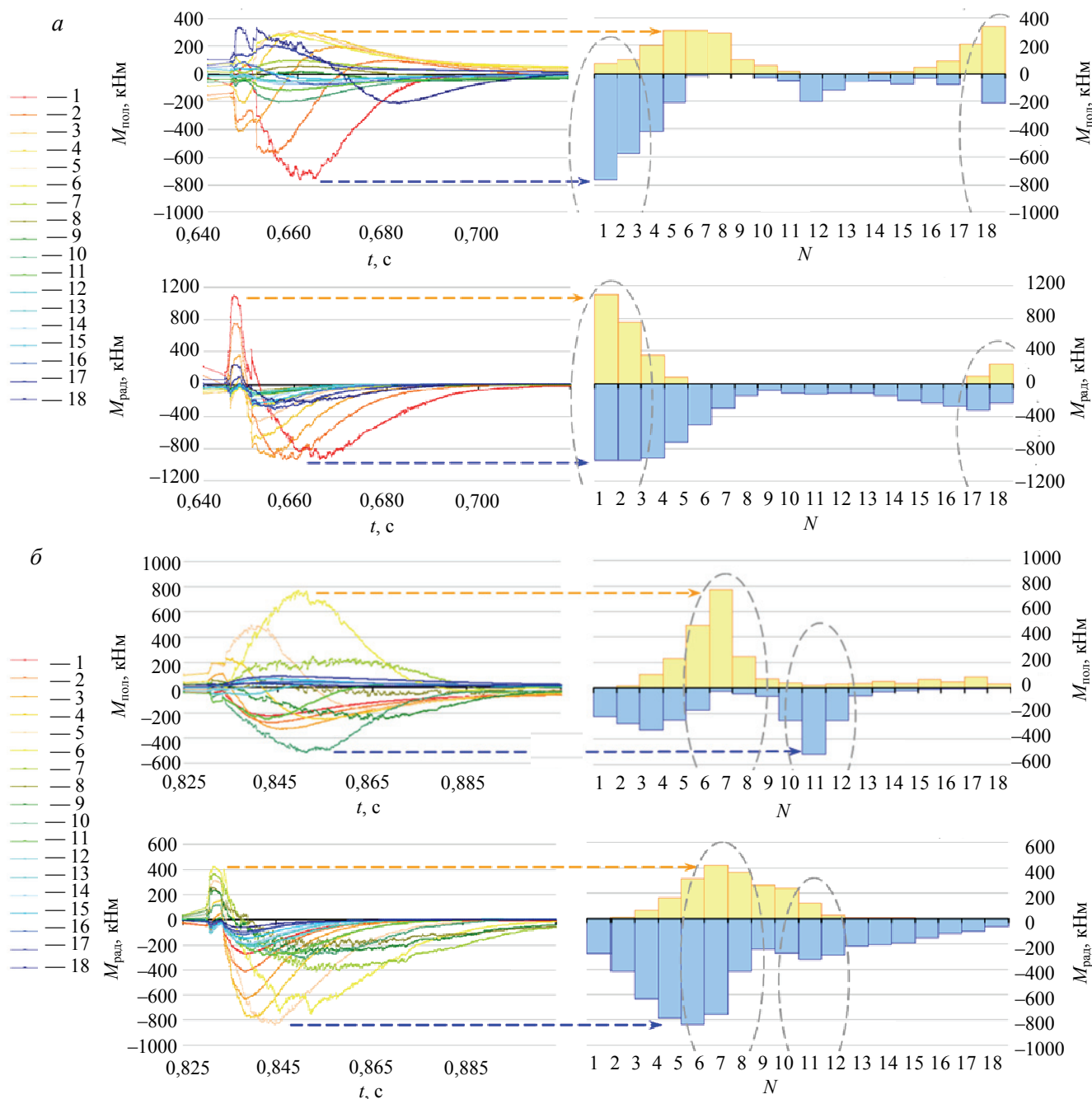


Рис. 12. Моменты $M_{пол}$ и $M_{рад}$ вычислены в локальных системах координат модулей: *а* — сценарий Fast DW VDE 16 ms ECQ (DINA-2010); *б* — сценарий Fast Up VDE 16 ms ECQ (DINA-2010)

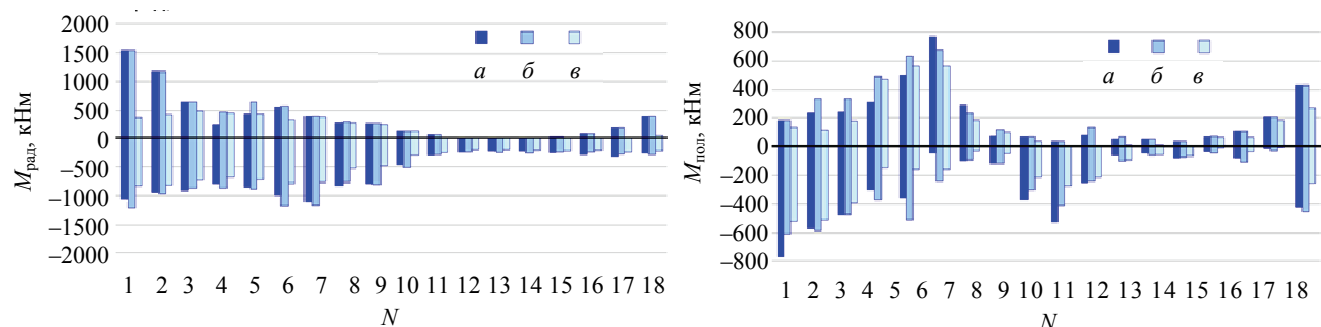


Рис. 13. Экстремальные значения нагрузок на модули blankets, выборка по всем сценариям: *а* — категория I; *б* — категория II; *в* — категория III

Использование предложенного подхода позволило достичь требуемой оперативности получения оценок силовых нагрузок и в течение ограниченного времени провести несколько расчётных кампаний.

ВЫВОДЫ

Предложенный и обоснованный применительно к расчёту модулей blankets ИТЭР подход базируется на раздельном решении локальных и глобальных задач и использовании интегральных параметров. Для сложных электрофизических установок моделирование переходных процессов и силовых нагрузок в виде совокупности задач, различающихся по уровню детализации, является эффективным средством упрощения расчётов. Он является дополнением к другим методам решения, в частности, базирующимся на использовании глобальных комплексных вычислительных моделей. Особенностью и достоинством алгоритма является разумный баланс между точностью (информативностью) и оперативностью, что в целом ряде ситуаций является важным.

На начальной стадии проектирования, а также при необходимости одновременной разработки большого количества объектов (как, например, модулей blankets) предложенный подход является, по видимому, одним из наиболее эффективных методов, который обеспечивает:

- проведение многовариантных оптимизационных расчётов;
- получение оперативных оценок нагрузок и основных характеристик;
- выполнение независимой проверки результатов расчётов, полученных с использованием различных комплексов программ, с целью расчётного обеспечения проектирования узлов крупных электрофизических установок.

Использование предложенного метода позволило:

- своевременно получить предварительные оценки силовых нагрузок для всех 18 модулей blankets ИТЭР и для всех рассматриваемых сценариев срыва тока плазмы;
- в комбинации с силовыми факторами, определяемыми гало-токами, выделить ограниченную совокупность наиболее нагруженных модулей и критических сценариев для проведения последующих ресурсоёмких динамических расчётов с использованием глобальных и локальных расчётных моделей.

Проведённый анализ полученных данных обеспечил возможность перехода к детальной разработке конструкции и узлов крепления системы blankets ИТЭР.

Взгляды и позиция авторов, высказанные в данной работе, могут не совпадать с позицией Международной организации ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.iter.org.
2. Merola M., Loesser D., Martin A., Chappuis P. et al. — Fusion Engineering and Design, 2010, vol. 85, p. 2312—2322.
3. 1999 ITER Physics Basis document, ITER Physics Basis. — Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, p. 2137.
4. Sannazzaro G. Load Specifications — ITER_D_222QGL.
5. Hender T.C., Wesley J.C., Bialek J., Bondeson A. et al. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. S128—S202.
6. Rozov V. EM Benchmarking Overview. Blanket Design Progress Meeting, Prague, 3—6 June 2008, ITER_D_2EZQ34.
7. Blanket EM Benchmarking Analyses Protocol. ITER_D_2E6P88 (2008).
8. Тамм И.Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1989. 504 с.
9. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. — N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1975, 641 p.
10. Бесекецкий В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. 768 с.
11. Иродов И.Е. Курс общей физики. Т. 2. Основные законы электромагнетизма. — М.: Высшая школа, 1991. 289 с.
12. Бабаков Н.А., Воронов А.А. и др. Теория автоматического управления. — М.: Высшая школа, 1986. 367 с.
13. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. — СПб.: Питер, 2003. 377 с.
14. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. 735 с.
15. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. — М.: Высшая школа, 1990. 400 с.
16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
17. Beliakova T., Belov A., Gaponok E., Kaparkova M., Krylova N., Kukhtin V., Lamzin E., Maksimenkova N., Shatil D., Sytchevsky S. Blanket EM Benchmarking Analyses. TA C16PP142FR Final Report, ITER_D_3473BF (2009).
18. Sugihara M., Shimada M., Fujieda H., Gribov Yu., Ioki K., Kawano Y., Khayrutdinov R., Lukash V., Ohmori J. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. 337—352.
19. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. — Comput. Phys. Commun., 1993, vol. 109(2), p. 193.

20. Лукаш В.Э. Эволюция плазмы в токамаке — моделирование и сравнение с экспериментом. Дисс. на соискание учёной степени д.ф.-м.н. РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2008. 249 с.
21. Хайрутдинов Р.Р. Создание и применение комплекса плазмофизических моделей ДИНА для установки токамак. — Дисс. на соискание учёной степени д.ф.-м.н. Троицкий инст. инновац. и термояд. иссл., Троицк, Моск. обл., 2010. 265 с.
22. ANSYS documentation series, Inc. Canonsburg, PA 15317, USA.
23. DINA-2007, DINA-2010 Files Library, ITER_D_29G89P.
24. Арсланова Д.Н., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гапионов Е.И., Крылова Н.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Максименкова Н.А., Мазуль И.В., Розов В.О., Сычевский С.Е. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 3, с. 3—26.
25. Status of Blanket EM Benchmarking Analyses and Proposed Changes. — In: Blanket IPT Meeting-3, Cadarache, 24 Mach 2009, ITER_D_2NHW92.
26. Blanket EM Benchmarking Results Justification Protocol. ITER_D_2X5D2F (2009).
27. Raffray R. et al. CDR Report on Wall-Mounted Blanket Modules. ITER_D_3DDKF2 (2010).
28. EM Analyses in Conceptual Phase of the Design. ITER_D_35PPZ5 v1.1 (2010).



Владимир Олегович Розов, ведущий специалист по системному анализу Международной организации ИТЭР; ITER Organization, Route de Vinon sur Verdon, 131115, Saint Paul lez Durance, France
Vladimir.Rozov@iter.org



Валерий Аркадьевич Беляков, заместитель генерального директора, д.ф.-м.н., профессор; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия
belyakov@sintez.niiefa.spb.su



Владимир Петрович Кухтин, с.н.с., к.ф.-м.н.; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия
sytych@sintez.niiefa.spb.su



Евгений Анатольевич Ламзин, начальник лаборатории, д.ф.-м.н.; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия
sytych@sintez.niiefa.spb.su



Игорь Всеволодович Мазуль, начальник отдела, д.техн.н.; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия
mazuliv@niiefa.spb.su



Сергей Евгеньевич Сычевский, начальник отдела, д.ф.-м.н.; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия
sytych@sintez.niiefa.spb.su

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2012 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2, с. 29—51.