

УДК 621.039.616

РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА

М.Л. Дубров, Р.Р. Хайрутдинов, В.Э. Лукаш, М.М. Соколов

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Работа посвящена описанию созданного программно-вычислительного комплекса (ПВК), целью которого является синтез регуляторов для магнитного управления положением, формой и током плазмы токамака. ПВК позволяет рассчитывать параметры регуляторов для любой точки сценария разряда, включая как лимитерную, так и диверторную стадии. Он разработан на основе нелинейной плазмозфической вычислительной программы ДИНА в рамках системы МАТЛАБ-Симулинк с использованием специально разработанного для этого графического интерфейса пользователя (GUI — Graphic User Interface). Представлены примеры использования ПВК для синтеза регуляторов управления положением, формой и током плазмы токамака Т-15 в сценарии разряда.

Ключевые слова: токамак, программный комплекс, ДИНА, сценарий, плазма, равновесие, система управления.

SYNTHESIS OF REGULATORS FOR MAGNETIC CONTROL OF TOKAMAK PLASMA

M.L. Dubrov, R.R. Khayrutdinov, V.E. Lukash, M.M. Sokolov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The paper describes the software and computer complex (SCC), whose goal is to synthesize regulators for magnetic control of the position, shape and current of the tokamak plasma. The SCC allows to calculate automatically the parameters of the regulators for any operation point of the discharge scenario, including both the limiter and divertor stages. The computer-aided complex is developed on the basis of the nonlinear plasma-physical code DINA within the MATLAB-Simulink system using a GUI (Graphic User Interface) specially designed for this purpose. Examples of the use of this SCC for synthesis of position, shape and current control regulators of the T-15 tokamak plasma in the discharge scenario are presented.

Key words: tokamak, software package, DINA, scenario, plasma, equilibrium, control system.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-71-76

ВВЕДЕНИЕ

Рост времени удержания плазмы в токамаках и использование сложных конфигураций равновесия плазмы потребовали применения активных систем управления положением и формой плазмы. Действие таких систем управления плазмой (СУП) основано на корректировке токов в обмотках системы полоидального магнитного поля во время разряда с использованием данных магнитной диагностики. По магнитным измерениям вычисляются форма плазмы и другие её параметры, затем они сравниваются с заданными параметрами сценария. Отклонения этих параметров направляются в регулятор, который вычисляет напряжения для источников питания обмоток полоидального поля. В зависимости от типа источников питания может использоваться система управления этими источниками, реализующая рассчитанные регулятором напряжения (рис. 1).

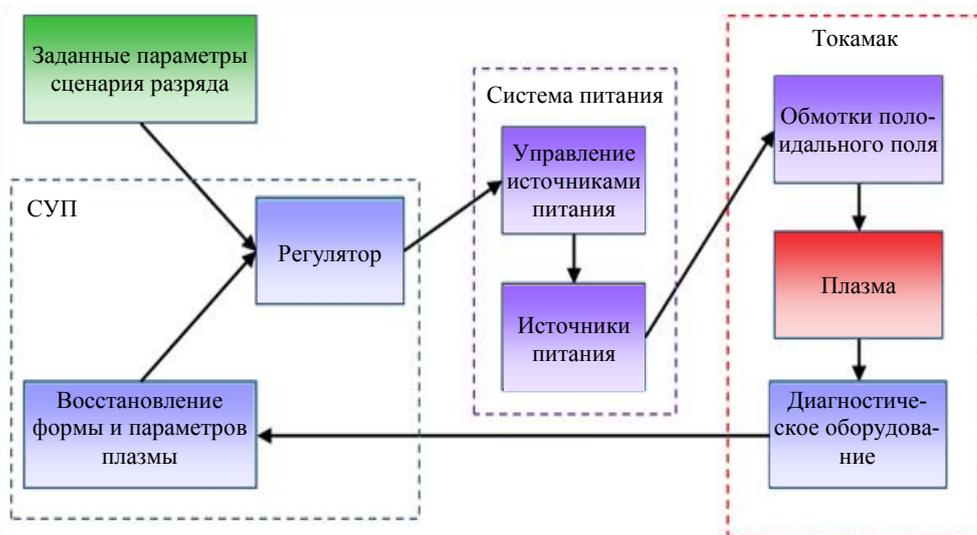


Рис. 1. Функциональная схема магнитного управления плазмой

Данная статья посвящена разработке ПВК для синтеза регуляторов СУП. В отличие от остальных элементов схемы такие регуляторы существенно зависят от динамических характеристик плазмы, поэтому их построение является задачей, связанной с исследованием свойств самой плазмы. Для этого в составе ПВК используется нелинейный плазмофизический код ДИНА [1], с помощью которого вычисляются динамические характеристики плазмы токамака.

ЭТАПЫ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА

Построение регуляторов осуществляется на основе теории линейно-квадратичного (LQ) управления [2]. Этот подход, как и большинство других, предполагает представление объекта управления в виде системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где \mathbf{u} — вектор управляющих сигналов; \mathbf{y} — вектор измеряемых величин; \mathbf{x} — вектор состояния объекта; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} — матрицы, полностью задающие поведение объекта управления, если известно его состояние \mathbf{x}_0 в начальный момент времени.

Тогда управляющие сигналы \mathbf{u} вычисляются по закону

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x},\tag{2}$$

где матрица \mathbf{K} получается из решения задачи минимизации линейно-квадратичного функционала качества

$$I = \int_0^{+\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R}\mathbf{u} + \mathbf{x}^T \mathbf{N}\mathbf{u}) dt,\tag{3}$$

в котором \mathbf{Q} , \mathbf{R} , \mathbf{N} — весовые матрицы, с помощью которых делается настройка регулятора. Вместе с матрицами \mathbf{A} , \mathbf{B} объекта управления (1) они задают единственную матрицу \mathbf{K} для (2).

В нашем случае регулятор работает с объектом управления, в котором \mathbf{u} — вектор напряжений на обмотках полоидального магнитного поля, \mathbf{y} — вектор, состоящий из параметров формы и положения и тока плазмы. Электромагнитная система токамака может быть описана системой (1), однако плазма в проводящей камере подчиняется нелинейным законам эволюции. В связи с этим представление объекта управления в виде (1) возможно только, если конфигурация равновесия плазмы меняется слабо. Существенные изменения размера и формы плазмы в процессе сценария разряда требуют пересчёта матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} . В ПВК предусмотрено вычисление этих матриц для нескольких операционных моментов сценария разряда.

Вычисление матриц производится с помощью метода идентификации объекта управления [3], в роли которого выступает нелинейная плазмофизическая модель токамака, реализованная в коде ДИНА. Суть предлагаемого подхода заключается в том, что в коде ДИНА задаётся начальное состояние плазмы и электромагнитной системы, соответствующее выбранной операционной точке сценария разряда. Затем на управляющий вход \mathbf{u} подаются сигналы с заданной зависимостью от времени. Полученные при этом выходные величины \mathbf{y} дают информацию о динамических свойствах объекта управления и позволяют вычислить передаточную матрицу объекта \mathbf{H} :

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{u}(s),\tag{4}$$

где s — комплексная переменная; $\mathbf{y}(s) = \int_0^{+\infty} \mathbf{y}(t)\exp(-st)dt$, $\mathbf{u}(s) = \int_0^{+\infty} \mathbf{u}(t)\exp(-st)dt$ — одностороннее преобразование Лапласа (так как начальные условия нулевые) для входных и выходных сигналов. Передаточная матрица связана с матрицами объекта соотношением

$$\mathbf{H}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{l} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D},\tag{5}$$

где \mathbf{l} — единичная матрица; s — комплексная переменная. С её помощью находятся искомые матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , соответствующие линейной модели объекта в выбранном состоянии.

Таким образом, алгоритм работы ПВК состоит из следующих этапов. Рассматриваются данные рассчитанного заранее сценария разряда. В нём выбираются несколько последовательных моментов времени, в которых равновесные плазменные конфигурации существенно отличаются. Для каждого из моментов также задаются параметры плазмы, которыми должен управлять регулятор. Параметры сценария и эти моменты времени являются входными данными для ПВК. Для каждого момента времени ПВК запускает код ДИНА, настроенный на соответствующую конфигурацию плазмы. Количество запусков кода равно количеству входных напряжений (активных обмоток полоидального магнитного поля), при этом в каждом запуске анализируются отклики выходных величин (параметров плазмы) на входное напряжение заданной величины. Формируется передаточная матрица, и вычисляются матрицы A , B , C , D . Для них выбираются шаблоны весовых матриц Q , R , N с использованием специально разработанных методик и синтезируется линейно-квадратичный регулятор. Таким образом, для каждого из выбранных моментов сценария получается свой регулятор СУП. Далее реализуется запуск сценария на коде ДИНА с последовательным переключением полученных регуляторов.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПВК НА ПЛАТФОРМЕ МАТЛАБ

Для работы ПВК используются Matlab-версия кода ДИНА [4], System Identification Toolbox и Control System Toolbox. Расчёты с использованием кода ДИНА проводятся в среде Simulink. Программа оформлена в виде набора Matlab-скриптов и функций. Для главного скрипта пользователь инициализирует начальные данные, после чего программа выполняет идентификацию с использованием кода ДИНА для указанных моментов времени сценария, строит линейные модели и синтезирует регуляторы для них. ПВК использует разработанную библиотеку с регуляторами различных типов и модели плазмы для запуска расчётов сценариев на коде ДИНА с последовательным переключением полученных регуляторов.

Предусмотрена возможность синтеза регуляторов двух типов. В первом типе регуляторов используются два контура управления: в первом контуре регулятор вычисляет коррекции для токов в обмотках полоидального магнитного поля, во втором контуре другой регулятор вычисляет необходимые для этого напряжения на обмотках. Регулятор второго контура при этом дополнительно использует заданные значения токов обмоток из сценария и не позволяет сильно отклоняться от них. Во втором типе регулятор по отклонениям параметров плазмы от программируемых значений вычисляет напряжения для обмоток полоидального магнитного поля.

Для контроля процесса идентификации и анализа свойств нелинейной модели также разработано приложение с интерфейсом пользователя (рис. 2). Данное приложение позволяет просматривать проме-

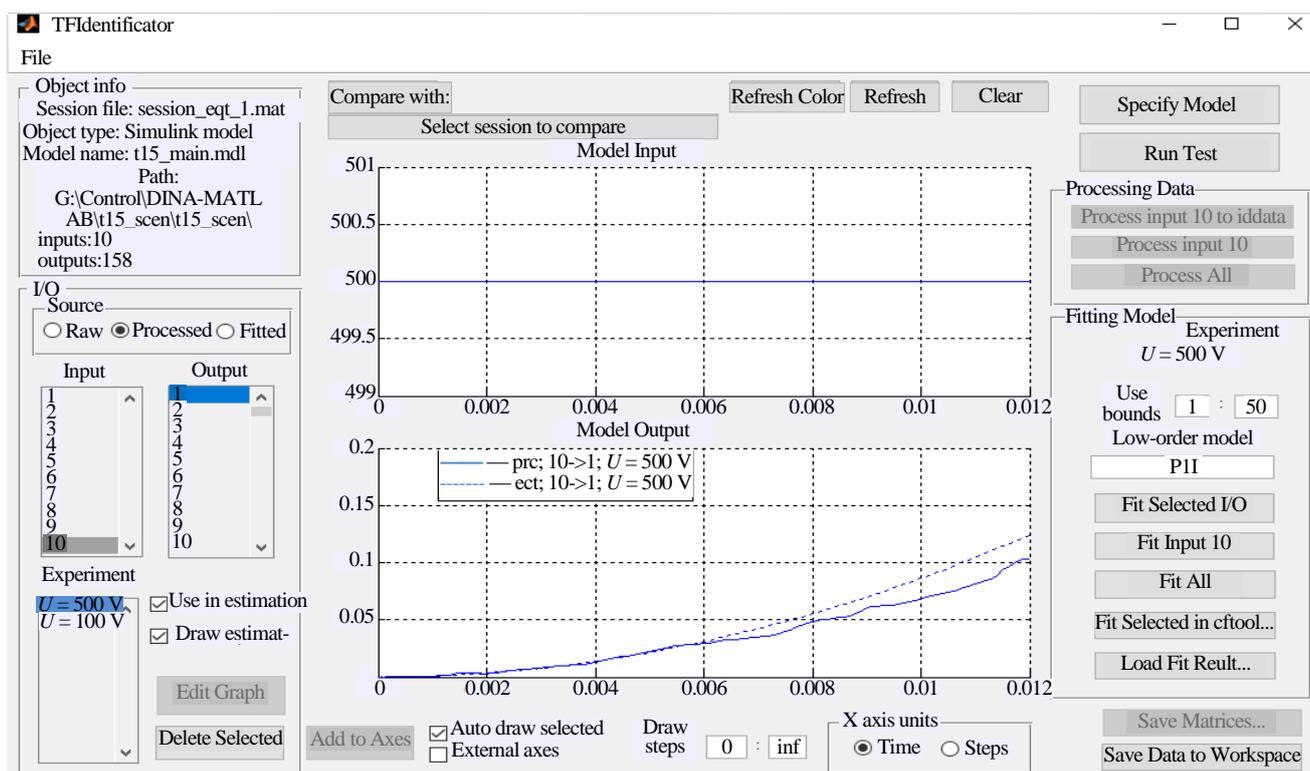


Рис. 2. Интерфейс Matlab-приложения для работы с результатами идентификации

жуточные данные каждого этапа идентификации, а также предоставляет доступ к большинству функций ПВК, относящихся к процессу идентификации, чтобы вносить коррективы в случае необходимости. Например, интерфейс позволяет задавать тестовые сигналы, запускать с ними нелинейную модель, производить необходимые операции с полученными откликами, задавать вид аппроксимирующих отклики передаточных функций, получать передаточные функции и матрицы A , B , C , D представления объекта в пространстве состояний.

Для начала работы нужно нажать кнопку Specify Model и в открывшемся окне выбрать подготовленную Simulink-модель, содержащую идентифицируемый объект. На панели Object Info отобразится описание выбранной модели. Затем с помощью кнопки Run Test открывается окно, где задаются тестовый сигнал и входы объекта, на каждый из которых будет подан тестовый сигнал. После этого модель запускается на счёт соответствующее количество раз, включая запуск с нулевыми тестовыми сигналами. После окончания счёта на панели I/O (Input/Output) будут показаны полученные результаты расчётов. Сначала создаются данные непосредственно с Simulink-модели при выборе опции Raw. Чтобы отобразить сигналы в центральном окне, нужно в списках панели I/O выбрать Input — тестируемый вход, Output — отклик выбранного выхода, Experiment — описание тестового сигнала. На верхних осях отобразится входной тестовый сигнал, на нижних — отклик выбранного выхода объекта. В поле Draw steps можно выбрать отображаемый интервал времени, в поле X axis units — единицы измерения временной переменной (число дискретных шагов либо время). Следующим шагом является вычитание результатов запуска модели без тестовых напряжений из результатов остальных запусков, чтобы получить отклик только на тестовое напряжение, исключив динамику, связанную с начальным внутренним состоянием объекта идентификации. Для этого на панели Processing Data нужно нажать кнопку Process All. После этого при выбранном флаге Processed на панели I/O также появится возможность выбора графиков для просмотра. Далее нужно аппроксимировать отклики передаточными функциями, для этого на панели Fitting Model указывается принятый в Model Identification Toolbox акроним, описывающий вид передаточной функции. Нажав кнопку Fit All, получаем аппроксимирующие передаточные функции для всех имеющихся входов и выходов. Чтобы получить передаточные функции только для выбранного входа, нужно нажать Fit Input, а для получения передаточной функции только для выбранных входов и выходов — соответственно Fit Selected I/O. Графики полученных аппроксимаций можно просмотреть при выбранном флаге Fitted панели I/O. Также можно включить отображение аппроксимаций и при выбранном флаге Processed, для этого предусмотрена опция Draw estimated (рис. 2 соответствует этому варианту). При выбранном флаге Fitted доступна кнопка Save Matrices, с помощью которой можно сохранить в рабочем пространстве Matlab матрицы A , B , C , D объекта, соответствующие текущей аппроксимации его откликов. Чтобы иметь возможность вернуться к полученным результатам, просматривать и изменять их, в меню File можно сохранить текущую сессию или загрузить сохранённую ранее.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПВК ДЛЯ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ Т-15

Приведём пример работы ПВК для одного из сценариев разряда в Т-15 [5] с омическим нагревом. В данном сценарии выбрано шесть моментов времени (рис. 3), для каждого из которых с помощью ПВК

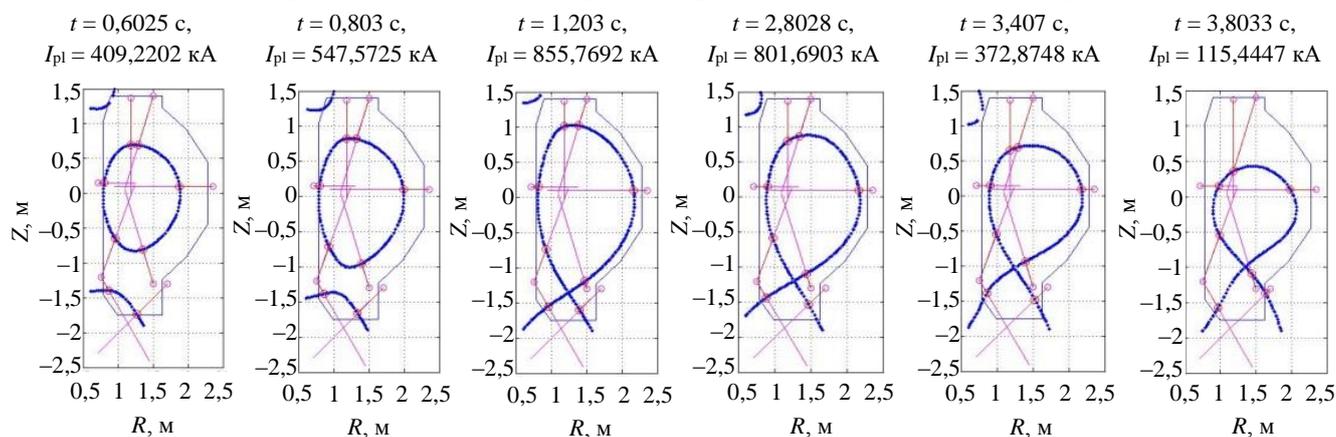


Рис. 3. Равновесие плазмы в точках сценария, для которых синтезированы регуляторы

построены регуляторы. Затем с помощью полученных регуляторов смоделирована работа системы управления на коде ДИНА (рис. 4). Использована двухконтурная схема управления, в которой все регуляторы контролируют ток плазмы. Также регуляторы для моментов 1 и 6 управляют вертикальным и горизонтальным положениями плазмы, а регуляторы 2—5 управляют зазорами (Gap) между сепаратрисой и лимитером в заданных точках. На графике отклонений зазоров видны скачки, связанные с переключением регуляторов, следящих за разными зазорами. На графике токов обмоток пунктиром показаны заданные (Ref) в сценарии значения, сплошные линии показывают полученные (Val) в результате управления значения. Использование второго контура позволяет добиться не только малых отклонений параметров плазмы, но и поддерживает сценарные токи в обмотках. Это позволяет оставаться в рамках опорных равновесий, для которых получены используемые регуляторы.

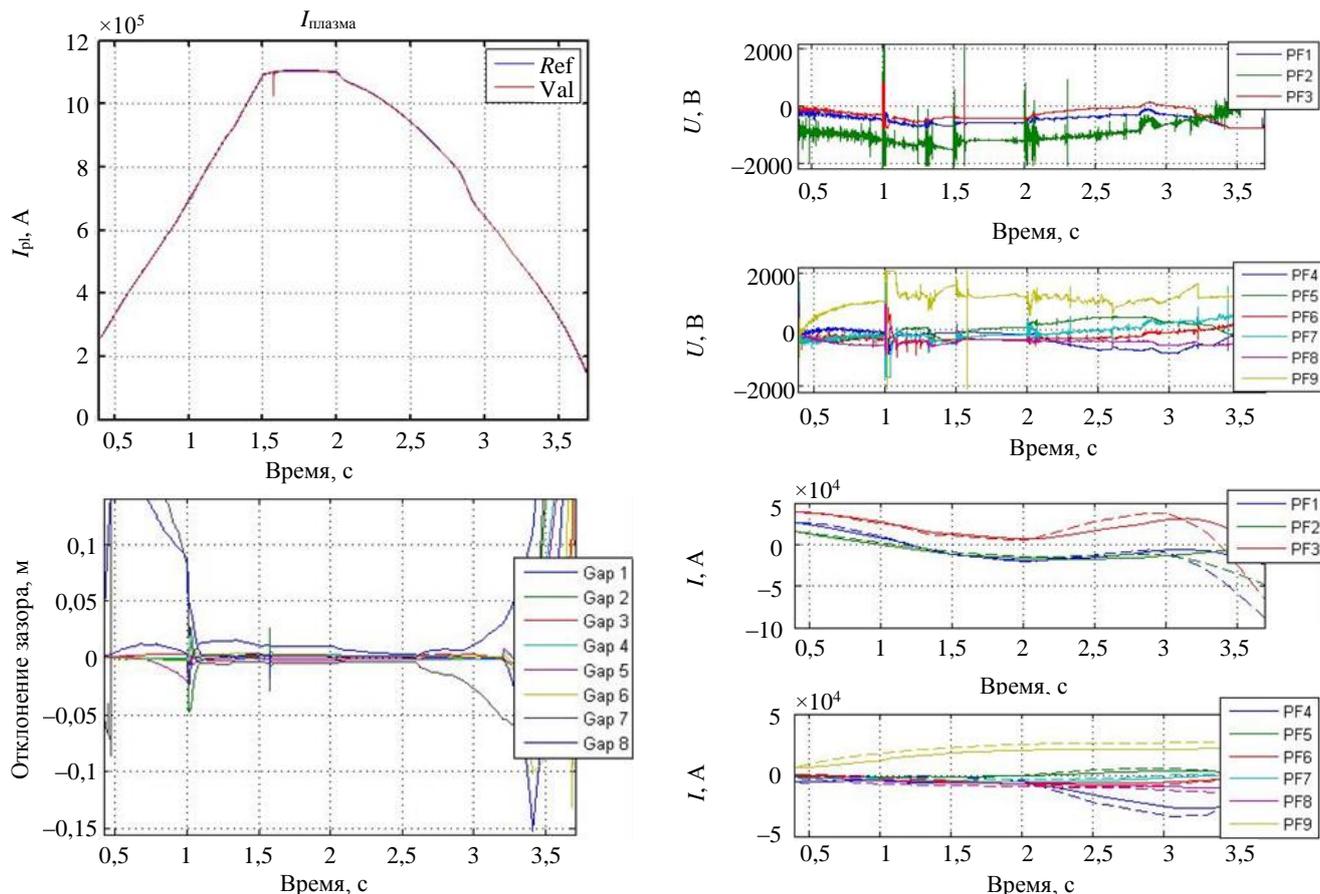


Рис. 4. Результаты расчёта сценария с полученными регуляторами

Важнейшей характеристикой системы управления является потребляемая при работе мощность. Мощность $P_i(t)$, потребляемая в моделированном сценарии i -й обмоткой, вычислялась по формуле

$$P_i(t) = |U_i(t)I_i(t)|, \quad (6)$$

где i — номер обмотки; $U_i(t)$, $I_i(t)$ — напряжение и ток i -й обмотки соответственно. На рис. 5 показаны графики зависимости потребляемой мощности от времени для каждой обмотки, а также суммарная потребляемая мощность $\sum_{i=1}^9 P_i(t)$. Для данного сценария стационарная потребляемая мощность составляет 65 МВт, пиковая — до 120 МВт.

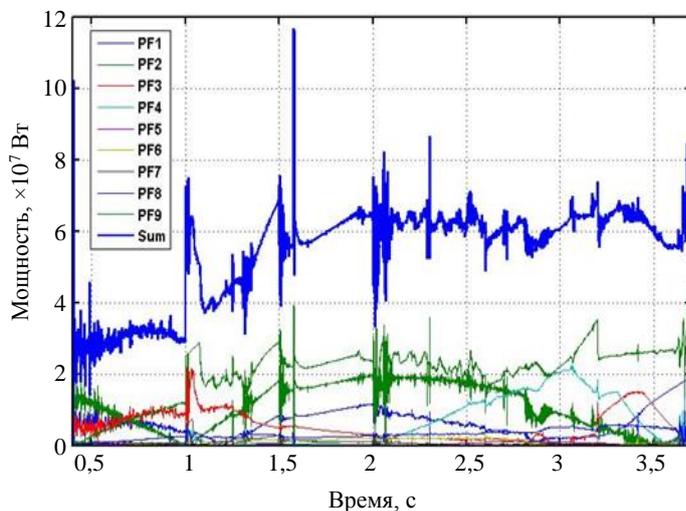


Рис. 5. Результаты расчёта сценария с полученными регуляторами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено описание программно-вычислительного комплекса, позволяющего синтезировать регуляторы параметров плазмы токамака с использованием теории идентификации и линейно-квадратичного управления. Это позволяет эффективно разрабатывать сценарии разрядов в плазме токамака с учётом особенностей системы управления, а также даёт возможность проектировщикам сценариев получать не только уставки для системы управления, но и сами регуляторы, что раньше требовало дополнительных действий. Эффективность работы программно-вычислительного комплекса продемонстрирована на примере моделирования управляемого сценария омического разряда в плазме токамака Т-15. Получена оценка мощности, потребляемой системой управления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантами РФФИ № 17-0700544 и 17-0700883.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

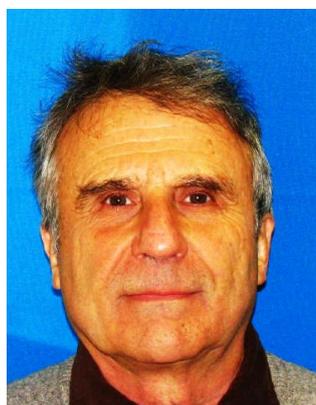
1. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — *J. of Computational Physics*, 1993, vol. 109, № 2, p. 193—201.
2. **Math Works.** Control System Toolbox: User's Guide. 2016.
3. **Дубров М.Л., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р., Докука В.Н., Соколов М.М.** Построение линейных моделей методом идентификации плазмы для синтеза регуляторов системы управления плазменным шнуром токамака Т-15. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2017, т. 40, вып. 1, с. 56—67.
4. **Лукаш В.Э., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р.** Программно-вычислительный комплекс DINA в системе MATLAB для решения задач управления плазмой токамака. — Там же, 2004, вып. 1, с. 40—49.
5. **Докука В.Н., Кавин А.А., Лукаш В.Э., Соколов М.М., Хайрутдинов Р.Р., Хайрутдинова В.А.** Численное моделирование управления плазмой в модернизированном токамаке Т-15. — Там же, 2014, т. 37, вып. 3, с. 56—70.



Максим Леонидович Дубров, аспирант; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
comgrademax@yandex.ru



Рустам Рашитович Хайрутдинов, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
khayrutd@mail.ru



Виктор Эммануилович Лукаш, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова; 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Lukash_VE@nrcki.ru



Михаил Михайлович Соколов, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 1 марта 2018 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 71—76.