

УДК 681.5.017

Д.Б. Зарва, А.М. Ли, В.М. Павлов, Э.Г. Батырбеков, А.А. Дериглазов

## Имитационное моделирование системы импульсного электропитания токамака КТМ

Приведен краткий обзор электромагнитной системы, электротехнической части системы электропитания казахстанского материаловедческого токамака (КТМ) и структуры соответствующей системы цифрового управления. Представлена и описана имитационная модель системы импульсного электропитания и ее системы цифрового управления, разработанная в среде Simulink/Simscapе Matlab. Осуществлены синтез регуляторов и верификация алгоритмов управления источниками питания. Приведены результаты имитационного моделирования и представлены результаты сравнения модельных и экспериментально полученных данных на примере сценария, использованного при проведении физического пуска установки КТМ.

**Ключевые слова:** токамак КТМ, имитационное моделирование, система импульсного электропитания, система цифрового управления, регулятор.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-1-105-111

Проект создания комплекса казахстанского материаловедческого токамака (КТМ), реализуемый в г. Курчатов (Республика Казахстан), направлен на создание уникальной электрофизической установки (тороидальной камеры с магнитными катушками), призванной решить проблему испытания кандидатных материалов, из которых планируется изготовление ответственных узлов и комплектующих, обращённых к высокотемпературной плазме в термоядерных реакторах будущего [1–3].

Учитывая уникальность, технологическую сложность, финансовую стоимость и установленную электрическую мощность комплектующих электромагнитной системы (ЭМС) установки КТМ, а также силового электрооборудования систем внешнего и импульсного электроснабжения (СИЭП) [4, 5], представляется необходимым применение методов компьютерного имитационного моделирования на этапе разработки и внедрения систем электропитания, а также разработки и внедрения алгоритмического и информационного обеспечения их системы цифрового управления (СЦУ).

### Краткое описание моделируемых систем

ЭМС токамака КТМ представляет собой систему обмоток, опоясывающих разрядную вакуумную камеру установки в тороидальном и полоидальном направлениях. В соответствии с имеющимися данными, геометрическими размерами и положением обмоток ЭМС токамака КТМ в пространстве по методикам, изложенным в [6], рассчитаны их основные электротехнические параметры – индуктивности, взаимные индуктивности и активные сопротивления.

В процессе анализа электротехнических характеристик ЭМС токамака КТМ, параметров и ограничений питающей электросети, мирового опыта создания СИЭП установок типа токамак и их систем управления [7–13] сформулированы основные требования к системам внешнего и импульсного электропитания КТМ. С учетом вышеуказанных требований разработан проект силовой части системы внешнего и импульсного электропитания комплекса КТМ [4, 5]. Определены режимы работы преобразовательного

оборудования. Выполнен расчет элементов схемы преобразовательного комплекса. Электротехническое оборудование оптимизировано для нужд СЦУ и диагностики.

Токи в обмотках ЭМС установки КТМ формируются при помощи девяти источников импульсного электропитания (ИП) [4, 5]. Согласованная работа территориально разнесенных преобразователей в составе ИП, а также ИП в общем реализуется посредством использования блока синхронизации с питающей сетью (БСПС), детектирующего моменты перехода опорного напряжения фазы «А» питающей сети через «ноль». Сигналы БСПС передаются котроллерам СЦУ для последующего формирования диаграммы управляющих импульсов модулями управления преобразователями (МУП). Телеметрические электрические сигналы измеряются, оцифровываются и передаются в СЦУ посредством специализированного измерительного телеметрического преобразователя (ПИТ).

### Разработка имитационной компьютерной модели

При разработке имитационной компьютерной модели СИЭП токамака КТМ совместно с её СЦУ использовался пакет Simulink/Simscapе системы Matlab. При этом реализован структурный и параметрический синтез электросилового оборудования и оборудования СЦУ, заключающийся в построении схем замещения данного оборудования и перевода их основных параметров в относительные единицы системы Matlab.

Основными регулирующими органами СЦУ ИП токамака КТМ являются управляемые многофазные тиристорные преобразователи. В процессе построения имитационной модели СИЭП исследованы статические и динамические характеристики ИП ЭМС токамака КТМ. Статические свойства описываются внешней характеристикой преобразователя, представляющей собой семейство характеристик, определяющих зависимость средневыведенного напряжения от тока нагрузки при различных значениях угла управления  $U_d = f(\alpha, I_d)$ . Существует несколько

существенно различных режимов работы тиристорных преобразователей, определяющихся характером нагрузки [14–16]. Границы между режимами определяет угол коммутации  $\gamma$  [14], который зависит от значения выпрямленного тока и угла управления  $\gamma = f(\alpha, I_d)$ .

Нормальным режимом работы 12-пульсного ИП является первый режим, в котором угол коммутации  $\gamma < 30^\circ$ , поэтому внешнюю характеристику обычно строят для данного режима работы преобразователя. Работа ИП во втором и третьем ( $\gamma = 30^\circ$  и  $30^\circ < \gamma < 60^\circ$ ) режимах является нежелательной, так как это ведет к увеличению потерь из-за коммутационных процессов в тиристорах, при этом значение средневыхпряленного напряжения будет быстрее «заваливаться» с ростом выпрямленного тока, а соответствующие согласующие трансформаторы ИП начнут перегружаться. Режимы работы, при которых  $\gamma \geq 60^\circ$ , характеризуются значительной перегрузкой ИП.

В общем виде при идеально сглаженном токе внешнюю характеристику тиристорного преобразователя можно представить в виде

$$U_d = U_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d) - \Delta U_R(\gamma, I_d) - \Delta U_B, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол управления,  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ;  $U_{d0}$  – напряжение холостого хода (ХХ) преобразователя при  $\alpha = 0^\circ$ ;  $\Delta U_X$  – индуктивное падение напряжения в цепи;  $\Delta U_R$  – активное падение напряжения;  $\Delta U_B$  – падение напряжения на ключах преобразователя.

Динамические свойства тиристорных преобразователей определяются свойствами дискретности и неполной управляемости [17–19]. Дискретность преобразователя выражается в том, что угол управления  $\alpha$  на входе системы импульсно-фазового управления (СИФУ) воздействует на формирование выходного напряжения ИП лишь в конкретные дискретные моменты времени. Характерный масштаб времени ра-

боты преобразователя определяется пульсностью  $m = 12$  и называется периодом дискретности преобразователя

$$T_{\text{ИП}} = \frac{1}{mf_0}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – частота питающей сети. Для всех тиристорных ИП обмоток ЭМС КТМ  $T_{\text{ИП}} = 1,666(6)$  мс.

Неполная управляемость преобразователем проявляется в неодинаковом характере переходных процессов изменения выходного напряжения ИП при изменении угла управления  $\alpha$  с определенной скоростью.

Статические и динамические характеристики тиристорных ИП являются существенно нелинейными. Статические характеристики накладывают определенные ограничения на доступный диапазон управления, что необходимо учитывать при синтезе замкнутых систем управления напряжением или током ИП с целью обеспечения устойчивости системы во всех режимах своей работы.

#### Синтез регуляторов и алгоритмов управления

Номинальным режимом работы СЦУ ИП обмоток ЭМС токамака КТМ (без режима регулирования тока системой управления плазмой) является режим регулирования напряжения с обратной связью в соответствии с заданной диаграммой напряжения  $U_{\text{ref}}(t)$ . Изменение напряжения на выходе ИП в таком режиме должно обеспечить желаемую эволюцию тока в обмотке  $I(t)$  в течение эксперимента. Объектом управления является тиристорный ИП, регулируемая величина – средневыхпряленное напряжение  $U_d(t)$  на выходе ИП. Функциональная схема системы управления напряжением ИП обмотки ЭМС показана на рис. 1.

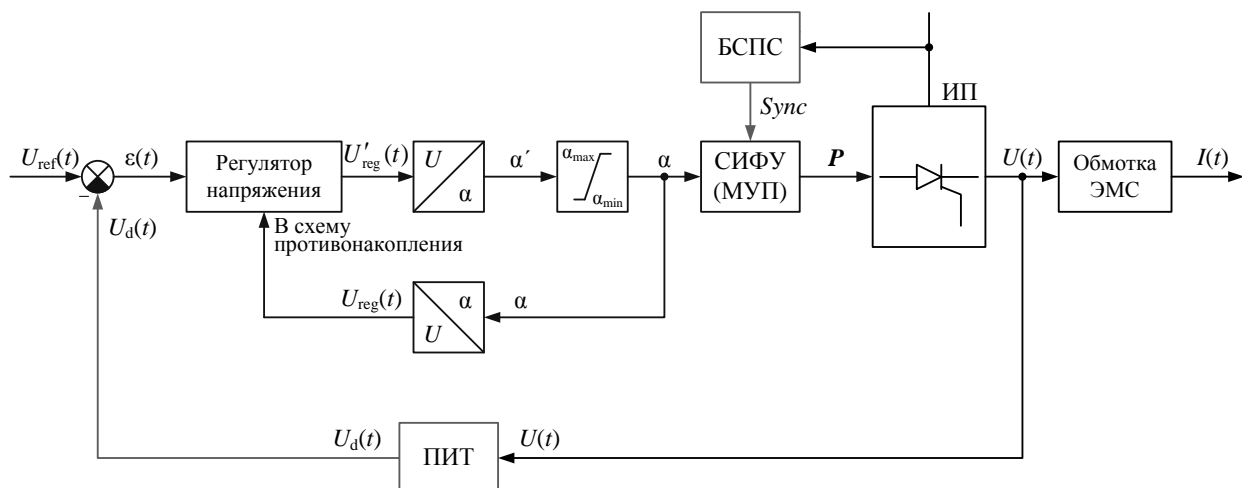


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления напряжением ИП обмотки ЭМС КТМ

Функцию измерения средневыхпряленного напряжения осуществляет модуль ПИТ. Измеренное напряжение  $U_d(t)$  сравнивается с уставкой  $U_{\text{ref}}(t)$ , результат сравнения – сигнал рассогласования подается на регулятор, выходное напряжение которого  $U'_{\text{reg}}(t)$  преобразуется в угол управления  $\alpha$  и передается в мо-

дули МУП, которые осуществляют управление тиристорным преобразователем согласно алгоритма СИФУ.

Рассматриваемая система является дискретной как по уровню, так и по времени. Дискретность по времени определяется свойствами самого преобразо-

вателя ( $T_{ИП}$  для 12-пульсного преобразователя равен 1,666(6) мс). Дискретность по уровню определяется, в основном, модулем МУП, реализующим СИФУ. Аппаратная платформа МУП реализована на базе 8-битного микроконтроллера, которая позволяет осуществить управление ИП только при целочисленных значениях угла управления  $\alpha$  – с точностью в 1 эл. град ( $1^\circ$ ).

Средневыпрямленное напряжение объекта управления можно представить в виде

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2л} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d), \quad (3)$$

при этом видно, что зависимость напряжения  $U_d$  от угла управления  $\alpha$  – нелинейная, кроме того,  $U_d$  зависит от величины выпрямленного тока преобразователя  $I_d$ , что выражается в индуктивном падении напряжения  $\Delta U_X$  вследствие процессов коммутации тока в полупроводниковых ключах тиристорного преобразователя. При известном значении  $I_d$  падение напряжения  $\Delta U_X$  можно компенсировать, используя, например, комбинированную систему управления с компенсацией по возмущению. Так как в СЦУ недоступны прямые измерения выпрямленного тока  $I_d$ , будем считать падение напряжения  $\Delta U_X$  возмущением, а в качестве внешней характеристики невозмущенного объекта использовать средневыпрямленное напряжение холостого хода ИП, которую используем для линеаризации объекта управления, вычисляя угол управления  $\alpha'$  как

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{\pi U'_{reg}}{3\sqrt{2}U_{2л}}\right), \quad (4)$$

нетрудно убедиться, что в этом случае  $U_{d,xx} = U'_{reg}$ . Для предотвращения аварий выпрямителя (опроки-

дывание и прорыв инвертора) угол управления  $\alpha$  должен удовлетворять условию

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{min}, & \alpha' < \alpha_{min}, \\ \alpha', & \alpha_{min} \leq \alpha' \leq \alpha_{max}, \\ \alpha_{max}, & \alpha' > \alpha_{max}, \end{cases} \quad (5)$$

тем самым ограничивая выходную координату регулятора напряжения  $U_{reg}$ . Максимальный угол управления  $\alpha_{max}$  должен удовлетворять условию  $\alpha_{max} + \gamma + \delta \leq 180^\circ$ , где запас  $\delta$  необходимо взять равным  $\sim 5-10^\circ$ , минимальный угол управления  $\alpha_{min} \geq 2^\circ$  определяется точностью модуля МУП, реализующего СИФУ, и блока БСПС, осуществляющего синхронизацию с питающей сетью.

Передаточная функция цифрового ПИ-регулятора с интегрированием по методу трапеций имеет вид

$$W_{ПИ}(z) = k \left( 1 + \frac{1}{T_i} \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} \right), \quad (6)$$

где  $T_s$  – цикл управления,  $k$  – коэффициент передачи регулятора,  $T_i$  – время интегрирования. Структурная схема системы автоматического управления средневыпрямленным напряжением ИП показана на рис. 2.

На схеме рис. 2 структура цифрового регулятора показана в рекуррентной форме, которая позволяет вычислить выходную координату регулятора на  $i$ -м цикле управления:

$$U'_{reg,i} = U_{reg,i-1} + q_0 \varepsilon_i + q_1 \varepsilon_{i-1}, \quad (7)$$

где коэффициенты  $q_0$  и  $q_1$  определяются параметрами настройки регулятора и циклом управления:

$$q_0 = k \left( 1 + \frac{T_s}{2T_i} \right), \quad q_1 = k \left( \frac{T_s}{2T_i} - 1 \right). \quad (8)$$

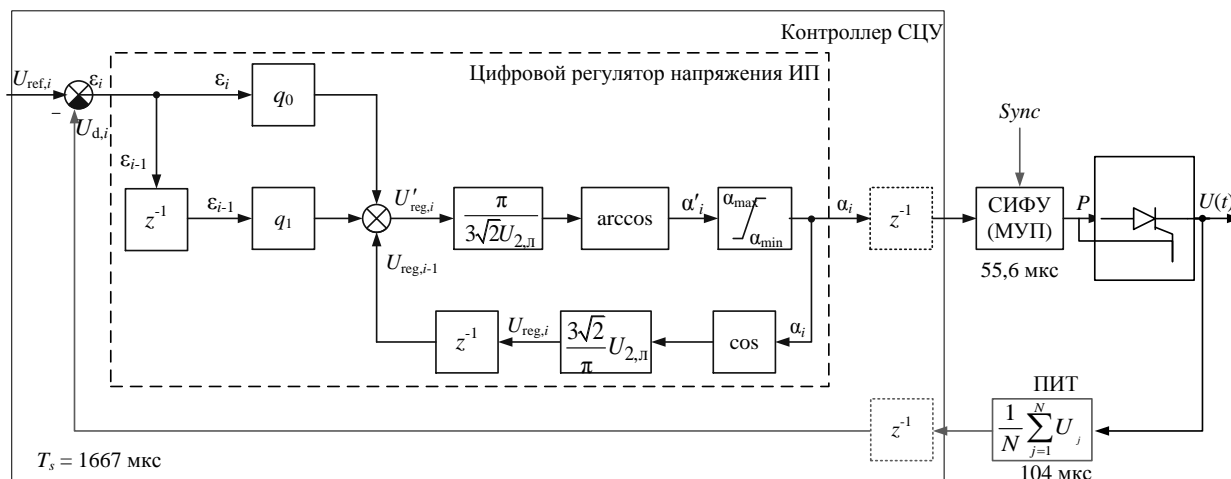


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления средневыпрямленным напряжением ИП ЭМС КТМ

Важно отметить, что в рекуррентном соотношении (7) уже реализована схема противонакопления, так как значение выходной координаты регулятора на предыдущем цикле управления  $U_{reg,i-1}$  уже переопределено с учетом ограничений на угол управления (5).

Очевидно, что на выходе замкнутой системы с ПИ-регулятором напряжения в общем случае будут наблюдаться автоколебания. Поэтому при выборе ко-

эффициентов усиления необходимо прежде всего ограничить эти колебания таким образом, чтобы при постоянной уставке напряжения амплитуда установившихся колебаний угла управления не превышала  $1^\circ$ , в противном случае колебания напряжения на выходе ИП могут быть существенными, следовательно, для обмоток с малыми сопротивлениями и постоянными времени может быть существенно искажена

форма тока в нагрузке. Кроме того, работа мощных импульсных ИП сопровождается большим уровнем шума в каналах измерения напряжения, что может привести к увеличению амплитуды колебаний вплоть до перехода замкнутой системы в автоколебательный режим на одной из субгармонических частот [17].

Для первоначальной грубой оценки параметров настройки регулятора в качестве передаточной функции ИП можно выбрать [20, 21]  $W_{\text{ИП}}(s) = \frac{e^{-T_{\text{ИП}}s}}{T_{\text{ИП}}s+1}$ , где  $T_{\text{ИП}} = 1,666(6)$  мс. Далее, используя известные методы расчета параметров регуляторов для линейных систем автоматического управления, можно рассчитать их коэффициенты усиления. В работе использован метод расчета параметров регулятора, основанный на критерии оптимального модуля [22]. В результате были получены первоначальные значения параметров настройки регулятора:  $k_0 = 0,57143$ ,  $T_{\text{и},0} = 1,7707$  мс. С целью уточнения параметров регулятора, используя физические модели ИП, в среде Simulink/Simscapе проводилась серия модельных экспериментов при различных входных воздействиях. Параметры настройки изменялись таким образом,

чтобы выходное напряжение соответствовало желаемому сценарию изменения токов в обмотке, а амплитуда установившихся колебаний угла управления не превышала  $1^\circ$ , обеспечивая тем самым устойчивость замкнутой системы. В результате были получены следующие значения параметров настройки регулятора:  $k \approx 0,3$ ,  $T_{\text{и}} \approx T_{\text{ИП}} = 1,667$  мс. Найденные значения параметров настройки регулятора напряжения ИП обмоток ЭМС были использованы при комплексной наладке СЦУ каждого ИП в реальных разрядах на токамаке КТМ.

#### Верификация имитационной модели

Особый интерес представляет моделирование реальных плазменных разрядов на токамаке КТМ, которое позволит выполнить сравнение результатов моделирования ИП обмоток ЭМС с замкнутой системой регулирования напряжением ИП и результатов реального эксперимента.

График результата моделирования реального разряда и полученных экспериментальных данных для ИП обмотки центрального соленоида CS как наиболее критичной с точки зрения пробоя рабочего газа и подъема тока плазмы приведен на рис. 3.

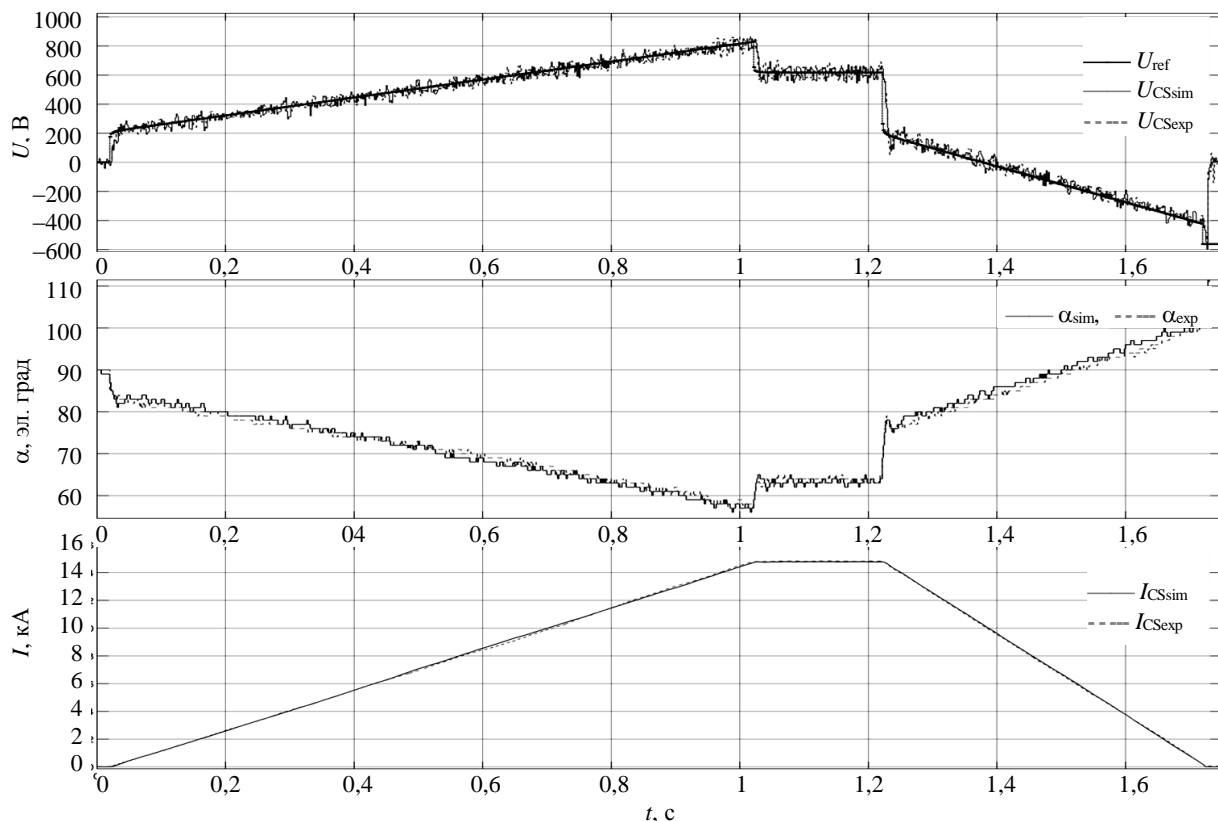


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования ИП CS ( $U_{\text{CSsim}}$ ,  $\alpha_{\text{sim}}$  и  $I_{\text{CSsim}}$ ) с экспериментальными данными, полученными в ходе плазменного разряда ( $U_{\text{CSexp}}$ ,  $\alpha_{\text{exp}}$  и  $I_{\text{CSexp}}$ )

На первом графике рис. 3 показаны уставка напряжений ( $U_{\text{ref}}$ ), смоделированное напряжение на выходе ИП ( $U_{\text{sim}}$ ) и напряжение ( $U_{\text{exp}}$ ), полученное в эксперименте. На втором графике – угол управления ( $\alpha_{\text{sim}}$  и  $\alpha_{\text{exp}}$ ), на третьем – ток в обмотке ( $I_{\text{sim}}$  и  $I_{\text{exp}}$ ).

Графики величин, полученных в эксперименте, показаны пунктиром.

В целом можно отметить, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования, отличия в углах управления на плато

тока и напряжения составило 1–3°, что соответствует точности работы МУП (СИФУ) и БСПС.

#### Заключение

В настоящее время системы магнитного управления являются обязательным элементом комплекса технологических и информационных систем токамака. При этом от таких систем требуется достаточно высокая точность регулирования, поскольку плазма как объект управления очень чувствительна даже к небольшим погрешностям создания магнитной конфигурации.

В целях внедрения СИЭП, алгоритмического и информационного обеспечения её СЦУ разработана соответствующая имитационная компьютерная модель, учитывающая параметры и схемы замещения трансформаторов, параметры сети электроснабжения ВН 220 кВ, кабельных линий, ошиновки и уравнивающих реакторов и иного оборудования, входящего в систему, а также статические и динамические характеристики ИП обмоток ЭМС токамака КТМ и параметры СЦУ ИП.

С использованием модели проведена верификация разработанных алгоритмов управления импульсными ИП обмоток ЭМС токамака КТМ. Результаты исследований с использованием имитационной модели были использованы для настройки контуров управления напряжениями ИП обмоток ЭМС, реализованные в контроллерах СЦУ. Результаты моделирования реальных разрядов хорошо согласуются с экспериментально полученными данными.

20 ноября 2019 г. успешно реализован завершающий этап физического пуска установки КТМ, что демонстрирует работоспособность СИЭП и её СЦУ, а также правильность принятых решений при разработке алгоритмического и информационного обеспечения СЦУ.

Спектр задач, который можно решать с использованием разработанной модели ИП ЭМС токамака КТМ, очень широк, это: синтез контуров управления напряжениями ИП и токами в обмотках ЭМС, разработка алгоритмов противоаварийной защиты ИП, проектирование импульсных систем электропитания экспериментальных комплексов (токамаков, стелараторов и др.) с целью заложить в них желаемые характеристики, осуществить выбор силового оборудования, а также сформулировать требования к системе управления ИП, обучение электротехнического персонала экспериментального комплекса. Вместе с этим разработанная модель может быть сопряжена с плазмофизическими кодами (например, код DINA) для более точного моделирования сценариев плазменного разряда.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-11-2019-013 от 11 октября 2019 г., идентификатор RFMEFI58519X0007, а также в рамках бюджетной научно-технической программы Министерства энергетики РК «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахском материаловедческом токамаке КТМ».

#### Литература

1. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние // Н.А. Назарбаев, В.С. Школьник, Э.Г. Батырбеков, С.А. Березин, С.Н. Лукашенко, М.К. Скаков. – Курчатов: Изд-во РГП «Национальный ядерный центр РК», 2016. – Т. 1. – С. 35–60.
2. Казахский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза / Э.А. Азизов, И.Л. Тажибаева, Е.П. Велихов, В.С. Школьник и др. – Алматы: Изд-во «Glory K», 2006. – 236 с.
3. KTM Experimental Complex project Status / I.L. Tazhibayeva, E.A. Azizov, V.A. Krylov, V.S. Shkolnik, E.P. Velikhov et al. // Fusion Science and Technology. – 2005. – Vol. 47. – P. 746–750.
4. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов, А.М. Ли, А.А. Мезенцев, С.В. Меркулов, Ю.Н. Голобоков // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, № 2. – С. 59–70.
5. Система противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ. Алгоритмическое и информационное обеспечение / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов, А.М. Ли, А.А. Мезенцев, С.В. Меркулов, Ю.Н. Голобоков // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42, № 1. – С. 74–88.
6. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
7. Lampasi A. Survey of Electric Power Supplies Used in Nuclear Fusion Experiments / A. Lampasi, S. Minucci // Proc. of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. – Milan (Italy). – 2017. – P. 1–6.
8. Control and instrumentation of the ITER coil power supply system / J.K. Goff, I. Benfatto, J. Tao, I. Yonekawa, K.C. Hwang et al. // Proc. of the IET Conference on Control and Automation: Uniting Problems and Solutions. – Birmingham (UK). – 2013. – P. 10–16.
9. Final design of the Korean AC/DC converters for the ITER coil power supply system / J.-S. Oh, J. Choi, J.-H. Suh, J. Choi, L. Lee et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1127–1130.
10. ITER coil power supply and distribution system / J. Tao, I. Benfatto, K. Goff, A. Mankani, F. Milani, et al. // Proc. of the IEEEINPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. – Chicago (IL, USA), 2011. – P. 5–6.
11. Overview of the new Magnet Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU / L. Novello, O. Baulaigue, A. Colletti, N. Dumas, A. Ferro et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1122–1126.
12. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system / A. Lampasi, P. Zito, F. Starace, P. Costa, G. Maffia, S. Minucci et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 122. – P. 356–364.
13. Bertolini E. The JET magnet power supplies and plasma control systems / E. Bertolini, P.L. Mondino, P. Noll // Fusion Technology. – 2017. – Vol. 11. – P. 84.
14. Фишлер Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.
15. Беркович Е.И. Полупроводниковые выпрямители. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.И. Беркович, В.Н. Ковалев, Ф.И. Ковалев. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.

16. Каганов И.Л. Электронные и ионные преобразователи // Цепи питания и управления ионных приборов. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – Т. 3. – 528 с.
17. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
18. Донской Н.В. Динамика вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1975. – 224 с.
19. Донской Н.В. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 352 с.
20. Leonhard W. Control of Electrical Drives (3rd ed.). – Berlin.: Springer, 2001. – 473 p.
21. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука. – 1970. – 320 с.
22. Гурецких Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

### Зарва Денис Борисович

Нач. управления инвестиционных проектов РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Бейбит атом ул., зд. 2Б, г. Курчатов, Восточно-Казахстанская обл., Республика Казахстан, 071100  
Тел.: +7-777-286-28-80  
Эл. почта: zarva@nnc.kz

### Ли Алексей Михайлович

Программист Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 60-63-40  
Эл. почта: alee@tpu.ru

### Павлов Вадим Михайлович

Канд. техн. наук, доцент Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 60-63-40  
Эл. почта: pavlov@tpu.ru

### Батырбеков Эрлан Гадлетович

Д-р физ.-мат. наук, профессор, ген. директор РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Бейбит атом ул., зд. 2Б, г. Курчатов, Восточно-Казахстанская обл., Республика Казахстан, 071100  
Тел.: +7-722-513-33-33  
Эл. почта: batyrbekov@nnc.kz

### Дериглазов Алексей Алексеевич

Инженер-проектировщик Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 606-340  
Эл. почта: aad3@tpu.ru

Zarva D.B., Lee A.M., Pavlov V.M., Batyrbekov E.G., Deriglazov A.A.

### Simulation Modeling of Pulse Power Supply System of Kazakhstani Material Testing Tokamak KTM

A brief overview of electromagnetic system, electrical specification of Tokamak KTM power supply system and structure of corresponding digital control system is given. Simulation model of pulse power supply system and its digital control sys-

tem developed in Simulink/Simscapе Matlab is presented and described. The design of controllers and verification of control algorithms with power sources is carried out. The results of simulation modeling are given and the comparison results of model and experimentally obtained data are presented on the example of the scenario used during the physical commissioning of KTM facility.

**Keywords:** Tokamak KTM, Simulation Modeling, Pulse Power Supply System, Digital Control System, Controller.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-1-105-111

### References

1. Nazarbayev N.A., Shkol'nik V.S., Batyrbekov E.G., Berezin S.A., Lukashenko S.N., Skakov M.K. [Carrying Out Scientific-Technical and Engineering Works to Bring the Former Semipalatinsk Test Site to a Safe Condition]. Kurchatov, RSE «National Nuclear Center of RK» Publ., 2016, vol. I, pp. 35–60 (in Russ.).
2. Azizov E.A., Tazhibayeva I.L., Velikhov Ye.P., Shkol'nik V.S., et al. [Kazakhstan Material Testing Tokamak KTM and Thermonuclear Fusion Issues]. Almaty, «Glory» Publ., 2006. 236 p. (in Russ.).
3. Tazhibayeva I.L., Azizov E.A., Krylov V.A., Shkol'nik V.S., Velikhov Ye.P., et al. KTM Experimental Complex project Status. *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, pp. 746–750.
4. Zarva D.B., Deriglazov A.A., Batyrbekov E.G., Tazhibayeva I.L., Pavlov V.M., Lee A.M., Mezentsev A.A., Merkulov S.V., Golobkov Yu.N. [Electrotechnical Complex of Tokamak KTM Pulse Power Supply System]. *Nuclear Science and Technology Issues. Series Thermonuclear Fusion*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 59–70 (in Russ.).
5. Zarva D.B., Deriglazov A.A., Batyrbekov E.G., Tazhibayeva I.L., Pavlov V.M., Lee A.M., Mezentsev A.A., Merkulov S.V., Golobkov Yu.N. [Emergency Protection System of Electrotechnical Tokamak KTM Facility. Algorithmic and information support]. *Nuclear Science and Technology Issues. Series Thermonuclear Fusion*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 74–88 (in Russ.).
6. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. [Inductivities Calculation. Reference book]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (in Russ.).
7. Lampasi A., Minucci S. Survey of Electric Power Supplies Used in Nuclear Fusion Experiments. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017, pp. 1–6.
8. Goff J.K., Benfatto I., Tao J., Yonekawa I., Hwang K.C. et al. Control and Instrumentation of ITER Coil Power Supply System. *IET Conference on Control and Automation: Uniting Problems and Solutions*, 2013, pp. 10–16.
9. Oh J.-S., Choi J., Suh J.-H., Choi J., Lee L., et al. Final design of Korean AC/DC converters for ITER coil power supply system. *Fusion Engineering and Design*, 2015, vol. 98–99, pp. 1127–1130.
10. Tao J., Benfatto I., Goff J.K., Mankani A., Milani F., et al. ITER coil power supply and distribution system. *IEEE-INPSS 24th Symposium on Fusion Engineering*, 2011, pp. 5–6.
11. Novello L., Baulaigue O., Coletti A., Dumas N., Ferro A., et al. Overview of the new Magnet Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU. *Fusion Engineering and Design*, 2015, vol 98–99, pp. 1122–1126.
12. Lampasi A., Zito P., Starace F., Costa P., Maffia G., Minucci S., et al. DTT device: Power supplies and electrical distribution system. *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 122, pp. 356–364.
13. Bertolini E., Mondino P.L., Noll P. The JET magnet power supplies and plasma control systems. *Fusion Technology*, 2017, vol. 11, p. 84.

14. Fishler Ya.L., Urmanov R.N., Pestyayeva L.M. [Transformer Equipment for Converting Facilities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 320 p. (in Russ.).

15. Berkovich Ye.I., Kovalyov V.N., Kovalyov F.I. [Semiconductor rectifiers (2th edition, rev. and suppl.)]. M., Energiya Publ., 1978, 448 p. (in Russ.).

16. Kaganov I.L. [Electronic and Ion Transformers. Ion Devices Control and Supply Chains (vol. III)]. Leningrad, Gosenergoatomizdat Publ., 1956, 528 p. (in Russ.).

17. Shipillo V.P. [Automated electrical drive]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 400 p. (in Russ.).

18. Donskoy N.V. [Dynamics of DC electrical drive]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 224 p. (in Russ.).

19. Donskoy N.V. [Controlled Rectifier in Automatic Control System]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 352 p. (in Russ.).

20. Leonhard W. *Control of Electrical Drives (3rd ed.)*. Berlin, Springer Publ, 2001, 473 p.

21. Bulgakov A.A. [New Theory of Controlled Rectifiers]. Moscow, Science Publ., 1970, 320 p. (in Russ.).

22. Guretskikh Kh. [Analysis and Development of Delayed Control Systems]. Moscow, Machine Engineering Publ., 1974, 328 p. (in Russ.).

**Alexey M. Lee**

Software Specialist, School of Nuclear Science and Engineering  
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 60-63-40  
Email: alee@tpu.ru

**Vadim M. Pavlov**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
School of Nuclear Science and Engineering NR TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 60-63-40  
Email: pavlov@tpu.ru

**Erlan G. Batyrbekov**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,  
Director General of RSE «NNC RK»  
2B, Beibyt Atom st., Kurchatov, East Kazakhstan region,  
Republic of Kazakhstan, 071100  
Phone: +7-722-51-3-33-33  
Email: batyrbekov@nnc.kz

---

**Denis B. Zarva**

Head, Investment Projects Department RSE  
«National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan»  
(RSE «NNC RK»)  
2B, Beibyt Atom st., Kurchatov, East Kazakhstan region,  
Republic of Kazakhstan, 071100  
Phone: +7-777-286-28-80  
Email: zarva@nnc.kz

**Alexey A. Deriglazov**

Design Engineer,  
School of Nuclear Science and Engineering NR TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 60-63-40  
Email: aad3@tpu.ru