

## Моделирование и управление автоматическим регулированием напряжения на гидроэлектростанции с использованием управления на основе передовых прогнозирующих моделей

Эбунле Акупан Рене<sup>a</sup>, Вилли Стивен Тунси Фокуи<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Университет Нью-Гэмпшира, 105 Главная улица, г. Дарем, НХ 03824, Соединенные Штаты

<sup>b</sup> Teleconnect GmbH, Am Lehmberg 54, 01157 Дрезден, Германия

**Аннотация.** Колебания уровней напряжения в энергосистемах требуют использования автоматических регуляторов напряжения (AVR) для обеспечения стабильности. В данном исследовании изучались моделирование и управление AVR на гидроэлектростанциях с использованием управления на основе прогнозирующих моделей (MPC), которое использует обширную математическую модель системы регулирования напряжения для оптимизации управляющих воздействий на заданном горизонте прогнозирования. Эта функция прогнозирования позволяет MPC минимизировать отклонения напряжения с учетом эксплуатационных ограничений, тем самым повышая стабильность и производительность в динамических условиях. Полученные результаты были сопоставлены с результатами, достигнутыми с помощью оптимального пропорционально-интегрально-дифференциального (PID) регулятора, разработанного с использованием алгоритма искусственного пчелиного роя (ABC). Хотя метод ABC-PID корректирует параметры PID-регулятора на основе исторических данных, он может быть сложен для адаптации к изменениям динамики системы в реальном времени при наличии ограничений. Комплексные моделирования оценили обе системы, уделяя особое внимание таким показателям эффективности, как подавление помех, реакция на изменения нагрузки и устойчивость к неопределенностям. Результаты показывают, что оба метода, MPC и ABC-PID, эффективно обеспечивают точное регулирование напряжения. Однако, метод MPC преуспел в управлении перерегулированием и времени установления, показав значения 0,0% и 0,25 с соответственно. Это демонстрирует большую устойчивость по сравнению с традиционными методами управления, которые оптимизируют параметры PID-регулятора на основе критериев производительности, полученных из фактического поведения системы, которые показали время установления и перерегулирование, превышающие 0,41 с и 5,0% соответственно. Регуляторы были реализованы с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink, что указывает на значительный прогресс для инженеров электростанций, стремящихся к созданию современных систем автоматического регулирования напряжения.

**Ключевые слова:** Автоматическое регулирование напряжения; Искусственный пчелиный рой; Эволюционные методы; Управление на основе прогнозирующих моделей; PID-регулятор (пропорциональный, интегральный и дифференциальный регулятор); Гидроэнергетика

### 0 Введение

Поскольку вода покрывает более 70% поверхности Земли, гидроэнергетика давно используется для производства электроэнергии, где энергия вырабатывается в больших объемах и передается потребителям по линиям электропередачи большой протяженности [1]. Как показано на рис. 1, один генератор может обеспечивать электроэнергией обширные и сложные участки энергосистемы, используя соединенные между собой установки [2]. Для подачи электроэнергии близлежащим потребителям используется устройство передачи электроэнергии по соединительной линии. Синхронные генераторы являются наиболее распространенным типом гидрогенераторов. Ключевым аспектом производства электроэнергии является способность генерирующих установок поддерживать синхронизм с сетью при помехах в сети. Другими словами, напряжение и частота генераторов всегда должны поддерживаться в допустимых пределах [3]. Автоматическое регулирование напряжения необходимо в энергосистемах для эффективного

управления колебаниями напряжения (пониженным и повышенным напряжением) [4]. Возможность отслеживания стабильного опорного значения с помощью контроллеров (регуляторов) и исполнительных механизмов обеспечивает автоматическое регулирование напряжения (AVR) [5].

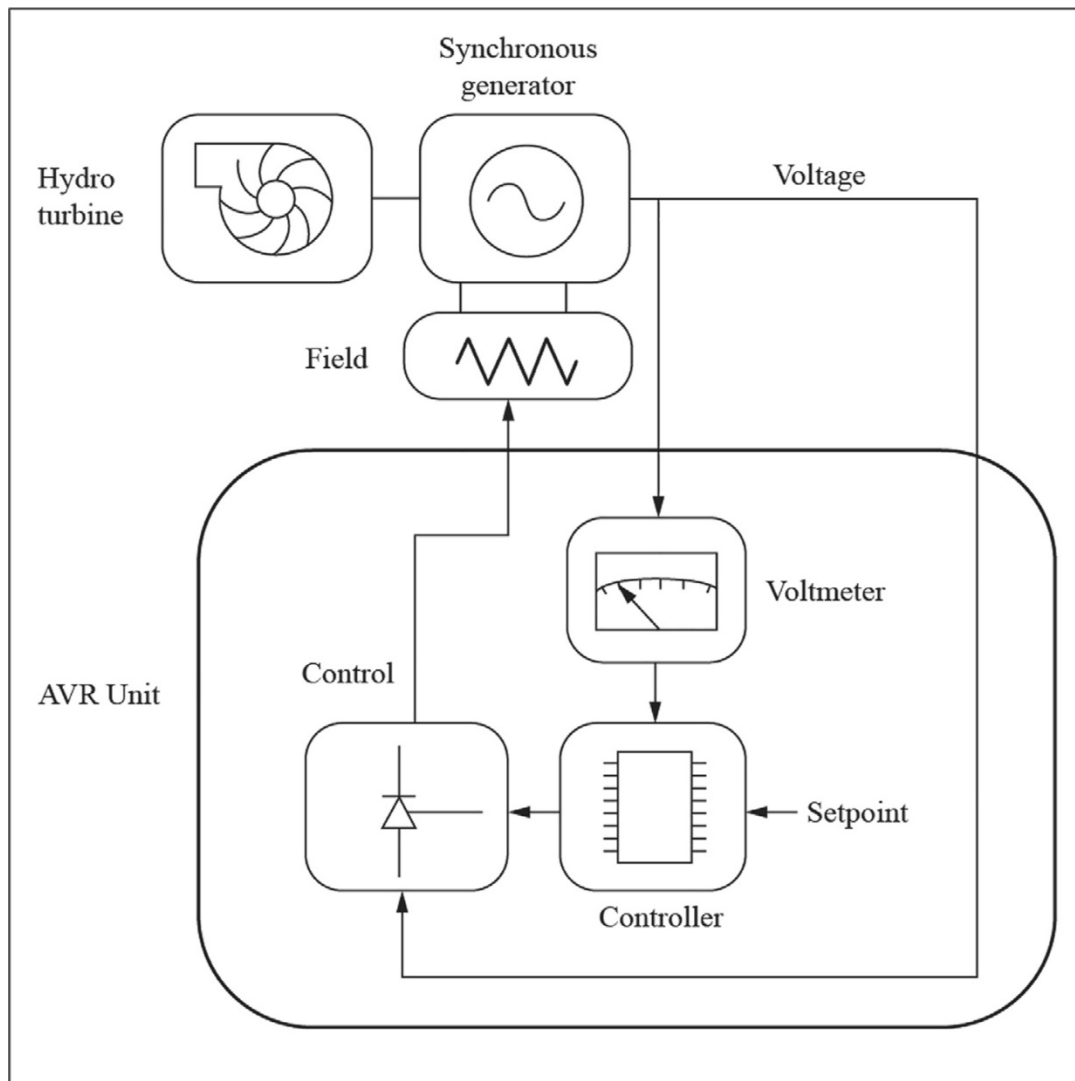


Рис. 1. Упрощенная установка с автоматическим регулированием напряжения (AVR).

Автоматический регулятор напряжения (AVR) играет решающую роль в системе возбуждения генератора, поскольку он стабилизирует напряжение генератора и контролирует поток реактивной мощности. AVR обеспечивает поддержание величины напряжения на клеммах синхронного генератора на заданном уровне. Как правило, в более старых системах возбуждения генераторов использовались генераторы постоянного тока, установленные на том же валу, что и ротор синхронных машин. Возбуждение обеспечивалось с помощью контактных колец и щеток. Однако в современных системах возбуждения используется бесщеточное возбуждение, которое использует генераторы переменного тока с вращающимися выпрямителями. Изменение активной потребляемой мощности в первую очередь влияет на частоту системы [3]; однако изменение реактивной мощности в первую очередь влияет на величину напряжения. Взаимодействие между регулированием напряжения и частоты, как правило, достаточно слабое, чтобы анализировать их по отдельности. Источниками реактивной мощности в энергосистемах являются генераторы, конденсаторы и реакторы. Реактивную мощность генераторов можно регулировать путем изменения возбуждения поля. Другие методы улучшения профиля напряжения в системах электропередачи включают в себя устройства регулирования отводов трансформаторов,

ступенчатые регуляторы напряжения, коммутируемые конденсаторы и статическое оборудование для регулирования реактивной мощности. Однако основным средством регулирования реактивной мощности генераторов является автоматический регулятор напряжения (AVR).

В литературе предложено несколько контроллеров для адекватного AVR, включая пропорционально-интегрально-дифференциальные (PID) регуляторы, PID дробного порядка (FOPID) и нелинейные PID (NPID) [6]. В [7] авторы использовали FOPID-контроллер, имеющий пять коэффициентов настройки, в отличие от обычного PID-регулятора, имеющего три коэффициента настройки для AVR синхронного генератора. Для настройки FOPID использовался алгоритм морского хищника (MPA). Несмотря на эффективность MPA в настройке FOPID, он обладает недостаточными возможностями поиска, преждевременной сходимостью и застоем в локальном оптимуме [8].

Для достижения стабильных и эффективных AVR авторы [9] интегрировали механизм полета Леви в алгоритм оптимизации Рунге-Кутты для настройки PID-регулятора и производной второго порядка (PIDD<sup>2</sup>) с использованием интеграла функции квадрата ошибки. Это был подход «ведущий-ведомый», где в качестве ведущей системы использовалась идеальная эталонная модель Боде, а силовая установка была вынуждена следовать эталонной системе. Для повышения эффективности и надежности AVR С. Экинчи и др. в [10] использовали алгоритм оптимизации на основе градиента с квадратичным волновым преобразованием (QWGBO), сопряженный с действительным PID-регулятором с производной второго порядка (RPIDD<sup>2</sup>) и PID-регулятором дробного порядка (FOPI). Этот метод продемонстрировал повышенную точность, стабильность и быструю реакцию. В [11] был предложен модифицированный алгоритм оптимизации искусственного кролика (ARO) на основе PID-контроллера дробного порядка с двойной производной (m-ARO-FOPIDD<sup>2</sup>) для AVR, который продемонстрировал свое превосходство над традиционными методами с точки зрения стабильности, устойчивости, времени реагирования и эффективности.

В [12] для настройки сигмоидного PID-регулятора для AVR использовался нелинейный синусно-косинусный алгоритм. Однако синусно-косинусный алгоритм известен низкой точностью своего решения, а также недостаточной способностью к глобальному поиску [13]. М. Дж. Лавал и др. в [14] повысили производительность AVR с помощью нечеткой адаптивной нейронной сети с умозаключением по алгоритму Цукамото (ANFIS), которая была разработана путем обучения нечеткой системы логического вывода (FIS) с использованием гибридной схемы обучения оптимизации. В [15] исследователи предложили новый оптимизированный PID-регулятор с дробным коэффициентом обратной связи на основе модели, за которым последовали подробные математические модели для AVR. Результаты показали, что предложенный регулятор способен бесперебойно отслеживать входной сигнал без наблюдаемого перерегулирования и может также мгновенно реагировать на изменения сигнала опорного напряжения. В [16] для обеспечения устойчивости AVR к неопределенностям использовалась парадигма управления с прогнозированием модели, основанная на алгоритмах оптимизации. Для настройки управления на основе прогнозирующих моделей (MPC) использовался алгоритм арифметической оптимизации (AOA). Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенного метода в управлении колебаниями напряжения и неопределенностями параметров с минимальными усилиями. В [17] авторы предложили самонастройку PID-регуляторов в режиме реального времени, называемую косвенным подходом к проектированию-2 (IDA-2), для поддержания надежности в AVR. PID-регулятор настраивался косвенно путем сдвига частотной характеристики. Все параметры PID-регулятора корректировались одновременно путем изменения константы сдвига частоты. Несмотря на превосходство предложенного метода над другими методами, используемыми в AVR, он подходит только для определенных констант сдвига частоты. Используя алгоритм оптимизации равновесия, М. Мицев и др. [18] не только разработали, но и проанализировали систему AVR. Целью разработки было получение оптимальных значений для PID-регулятора AVR. Результаты

моделирования продемонстрировали высокую скорость регулятора и его способность обеспечивать более оперативную реакцию, чем другие PID- регуляторы.

Мицев и др. [19] предложили новый PI- регулятор с двумя степенями свободы (2DOF), а также защиту от насыщения, для автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов. Целевая функция для определения оптимальных параметров регулятора была определена с учетом характеристик помех, переходных процессов и особенностей измерения подавления шума в исследуемой системе AVR. Для проектирования параметров регулятора использовался алгоритм оптимизации «африканский хищник» (AVOA). Стоит отметить, что, хотя AVOA является высокоэффективным алгоритмом оптимизации, он известен своими недостаточными возможностями исследования в многомодальных задачах и ограниченной плотностью популяции [20]. В [21] был предложен алгоритм оптимизации китов (WOA) с настроенным 2DOF дробным PI-регулятором для AVR. Результаты исследования продемонстрировали, что предложенный метод показал лучшие результаты по подавлению средних помех на 26 % и на 20 % выше в среднем, когда параметры системы были изменены относительно их номинальных значений, основываясь на его надёжности. Подобно многим алгоритмам оптимизации, WOA имеет медленную сходимость, склонность к локальной сходимости и низкую точность [22]. Используя нейро-нечеткий контроллер, Т. Вельдчеркос и др. [2] смоделировали и разработали автоматическую систему управления выработкой электроэнергии на гидроэлектростанции. Используя гибридный алгоритм оптимизации, сочетающий имитацию отжига и поиск ската-манты, М. Мицев и др. [23] оптимизировали четыре типа PID-регуляторов для AVR: идеальный PID, PID дробного порядка, действительный PID и PID со вторыми производными. Результаты исследования продемонстрировали эффективность гибридного алгоритма оптимизации при настройке четырех типов PID.

Данное исследование посвящено моделированию и управлению AVR на гидроэлектростанциях. В нем исследовались усовершенствованный MPC и PID-регулятор на основе ABC для достижения оптимального регулирования напряжения. Вклад данного исследования в научную литературу заключается в следующем:

- В данном исследовании представлена комплексная математическая модель AVR гидроэлектростанции, которая описывает ее динамическое поведение в различных условиях. Интегрируя присущую динамику, модель улучшает понимание работы AVR в гидроэнергетических установках, тем самым внося вклад в литературу по методам моделирования энергетических систем.
- Данное исследование впервые применило метод MPC для регулирования напряжения на гидроэлектростанциях. Путем оптимизации управляющих воздействий на конечном горизонте с учетом эксплуатационных ограничений, это исследование продемонстрировало потенциал MPC для превосходного регулирования и стабильности напряжения, показав его устойчивость при сложных вариантах управления.
- Был проведен сравнительный анализ MPC и ABC-PID-регуляторов (еще одной широко используемой архитектуры управления). Оценивая такие показатели эффективности, как точность регулирования напряжения, подавление помех и устойчивость к неопределенностям, данное исследование предоставляет новые ценные сведения о сильных и слабых сторонах каждого метода, помогая специалистам выбирать подходящие стратегии управления для своих задач.

В целом, данное исследование вносит вклад в область знаний по управлению гидроэлектростанциями, представляя всестороннее исследование моделирования и управления AVR. В нем представлен контроллер AVR с MPC, проведено сравнение с ABC-PID-регулятором, а также рассмотрены их индивидуальные преимущества и сравнительные характеристики. Результаты этого исследования расширяют наше понимание и предлагают практические

рекомендации по проектированию эффективных и надежных систем управления AVR для гидроэнергетики, в конечном итоге способствуя развитию устойчивого производства электроэнергии.

В следующем разделе описывается методология, использованная в данном исследовании, затем приводятся и обсуждаются результаты, а после этого представлено заключение.

## 1 Методология

### 1.1 Математическая модель автоматического регулирования напряжения

Система AVR состоит из различных элементов; упрощенная принципиальная схема AVR показана на рис. 2. Система включает в себя силовой трансформатор, который определяет величину напряжения на клеммах генератора. Этот сигнал напряжения выпрямляется и сравнивается с заданным сигналом точки постоянного тока. Полученный сигнал ошибки усиливается и используется для управления полем возбuditеля, тем самым увеличивая напряжение на клеммах возбuditеля. В результате увеличивается ток поля генератора, что приводит к увеличению генерируемой электродвижущей силы (EMF). Затем генерация реактивной мощности корректируется до нового равновесного уровня путем увеличения напряжения на клеммах до желаемого уровня.

Модели, используемые для представления элементов системы AVR, могут различаться по сложности. Однако в данной статье рассматриваются упрощенные модели. Эти модели могут облегчить понимание и анализ поведения и элементов систем AVR.

#### 1.1.1 Моделирование усилителя

Усилители системы возбуждения играют решающую роль в регулировании тока возбуждения синхронных генераторов, что, в свою очередь, влияет на напряжение на клеммах и выходную реактивную мощность генераторов. Эти усилители могут быть реализованы с использованием различных технологий, включая магнитные, вращательные и современные электронные усилители. Характеристики и параметры усилителей могут варьироваться в зависимости от области их реализации.

Усилитель обычно представлен двумя параметрами: коэффициентом усиления ( $k_a$ ) и постоянной времени ( $\lambda_a$ ). Коэффициент усиления  $k_a$  представляет собой коэффициент усиления системы возбуждения и определяет соотношение между входным сигналом (обычно это ошибка между желаемым и фактическим напряжением на клеммах) и результирующим изменением тока возбуждения. Типичные значения варьируются от 10 до 400 в зависимости от конкретных требований системы и проектных соображений [24].

Постоянная времени ( $\lambda_a$ ) усилителя представляет собой скорость, с которой усилитель реагирует на изменения входного сигнала. Она количественно определяет время, необходимое для того, чтобы выходной сигнал усилителя достиг определенного процента (обычно 63,2 %) от своего конечного значения после ступенчатого изменения входного сигнала. В контексте систем возбуждения постоянная времени усилителя, как правило, мала, обычно в диапазоне 0,02–0,1 с [13]. В некоторых случаях постоянная времени может считаться пренебрежимо малой по сравнению с другими значимыми постоянными времени в системе и, следовательно, может быть проигнорирована в упрощенных моделях или анализах.

Передаточная функция усилителей системы возбуждения обозначается как  $G_a(s)$ , которая представляет собой соотношение между преобразованием Лапласа входного сигнала (обычно сигнала ошибки) и выходного сигнала (изменения тока поля) [25].

$$G_a(s) = \frac{V_r(s)}{V_e(s)} = \frac{k_a}{1 + \lambda_a s} \quad (1)$$

Передаточная функция описывает динамику и частотную характеристику усилителей. Стоит отметить, что конкретная реализация и характеристики усилителей могут различаться в зависимости от используемой технологии. Магнитные и вращательные усилители исторически использовались в системах возбуждения, тогда как современные электронные усилители, такие как операционные усилители и силовые электронные устройства, широко применяются в нынешних системах благодаря улучшенным характеристикам, надежности и гибкости.

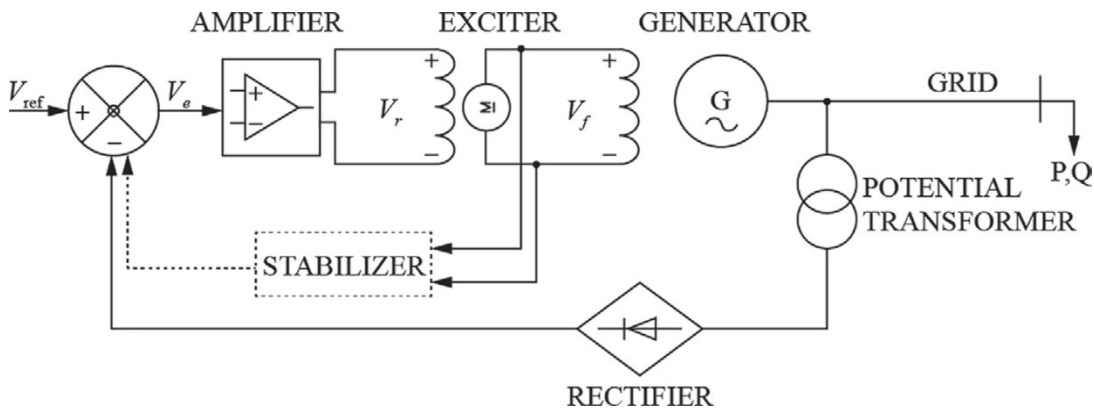


Рис. 2. Схематическое изображение AVR.

### 1.1.2 Моделирование возбудителя

В современных системах возбуждения синхронных генераторов наиболее распространенным подходом является использование источника переменного тока, выпрямленного с помощью твердотельных устройств, таких как выпрямители с кремниевым управлением (SCR). Этот тип возбудителя обеспечивает переменное напряжение, которое преобразуется в постоянное напряжение для питания обмотки возбуждения генератора. Важно отметить, что выходное напряжение возбудителя является нелинейной функцией напряжения возбуждения из-за эффектов насыщения в магнитной цепи. Это насыщение вносит нелинейность в систему возбуждения, в результате чего возникает взаимосвязь между напряжениями на выводах и напряжением возбуждения комплекса. Следовательно, установление простой зависимости между этими переменными представляет собой сложную задачу.

Для решения этой задачи были разработаны различные модели систем возбуждения с разным уровнем сложности. Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) опубликовал рекомендации, содержащие руководства и модели для систем возбуждения [24]. Во многих случаях разумным подходом является использование линеаризованной модели современного возбудителя. Эта модель учитывает основную постоянную времени, игнорируя эффекты насыщения и другие нелинейности. Упрощая поведение системы возбуждения, эта линеаризованная модель обеспечивает результативное приближенное выражение для анализа и управления.

В простейшей форме передаточная функция ( $G_e(s)$ ) современного возбудителя может быть представлена одной постоянной времени ( $\lambda_e$ ) и коэффициентом усиления ( $k_e$ ). Постоянная времени (обычно чрезвычайно малая для современных возбудителей) отражает динамическое реагирование возбудителя и представляет собой скорость, с которой выходное напряжение возбудителя реагирует на изменения напряжения поля. Коэффициент усиления определяет коэффициент усиления между напряжением поля и выходным напряжением возбудителя [24].

$$G_e(s) = \frac{V_f(s)}{V_r(s)} = \frac{k_e}{1 + \lambda_e s}. \quad (2)$$

Хотя эта линеаризованная модель обеспечивает результативное приближённое выражение, важно учитывать связанные с ней ограничения и допущения. В некоторых случаях для точного анализа и управления системой возбуждения могут потребоваться более подробные модели, учитывающие корреляцию между простым фактором и переменной и другие нелинейности.

### 1.1.3 Моделирование генератора

В линеаризованной модели синхронной машины связь между напряжением на клеммах генератора ( $v_t$ ) и напряжением обмотки возбуждения ( $v_f$ ) представляется передаточной функцией ( $G_g(s)$ ), которая выражается следующим образом:

$$G_g(s) = \frac{V_t(s)}{V_f(s)} = \frac{k_g}{1 + \lambda_g s}, \quad (3)$$

где  $\lambda_g$  — постоянная времени, а  $k_g$  — коэффициент усиления, представляющий собой коэффициент усиления между напряжением возбуждения и напряжением на клеммах генератора. Он количественно определяет изменение напряжения на клеммах при единичном изменении напряжения возбуждения. Эти константы ( $k_g$  и  $\lambda_g$ ) зависят от нагрузки, что означает, что их значения изменяются в зависимости от условий работы генератора.

В контексте линеаризованной модели значение  $k_g$  обычно варьируется от 0,7 до 1, отражая зависимое от нагрузки поведение синхронных машин. Значение  $\lambda_g$  обычно составляет от 1,0 до 2,0 с в зависимости от условий нагрузки.

### 1.1.4 Моделирование датчиков

На блок-диаграмме AVR, показанной на рис. 2, измерение напряжения осуществляется с помощью трансформатора напряжения, который понижает напряжение на клеммах генератора до уровня, подходящего для измерения. Измеренное напряжение, обозначенное как  $V_s(s)$ , впоследствии выпрямляется с помощью мостового выпрямителя. Датчик напряжения, включая трансформатор напряжения и выпрямитель, может быть смоделирован как простая передаточная функция первого порядка,  $G_s(s)$ . Передаточная функция представляет собой динамическое реагирование датчика на изменения напряжения на клеммах. Передаточная функция выражается следующим образом [26]

$$G_s(s) = \frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{k_s}{1 + \lambda_s s}. \quad (4)$$

В этой передаточной функции  $\lambda_s$  представляет собой постоянную времени датчика, а  $k_s$  — коэффициент усиления выпрямителя.  $\lambda_s$  обычно невелика и находится в диапазоне от 0,01 до 0,06 с. Конкретное значение  $\lambda_s$  зависит от характеристик датчика и времени его реагирования. Выходной сигнал датчика напряжения  $V_s(s)$  затем подключается к блок-диаграмме AVR, которая обычно включает такие элементы, как усилители, контроллеры и контуры обратной связи, для регулирования возбуждения генераторной системы и поддержания желаемого напряжения на клеммах.

## 1.2 Управление AVR

При моделировании AVR энергосистемы необходимо соответствующим образом разработать и сформулировать интегрированную структуру усилителя, возбудителя, генератора и датчика. Объединение уравнений (1)-(4) в блок-диаграмме приводит к полному схематическому

представлению упрощенной AVR, как показано на рис. 3. Значения параметров системы приведены в таблице 1.

### 1.2.1 Модель передаточной функции

Передаточная функция разомкнутого контура  $L(s)$ , показанная на рис. 3, описывается уравнением (5), а передаточная функция замкнутого контура  $W(s)$ , устанавливающая связь между напряжением на клеммах генератора  $V_t(s)$  и опорным напряжением  $V_{ref}(s)$ , выражается уравнением (6) [27].

$$L(s) = G_a(s) \cdot G_e(s) \cdot G_g(s). \quad (5)$$

$$W(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G_a(s) \cdot G_e(s) \cdot G_g(s)}{1 + G_a(s) \cdot G_e(s) \cdot G_g(s) \cdot G_s(s)}. \quad (6)$$

Подставляя уравнения (1), (2), (3) и (4) в уравнения (5) и (6), получаем следующие передаточные функции системы в разомкнутом и замкнутом контуре:

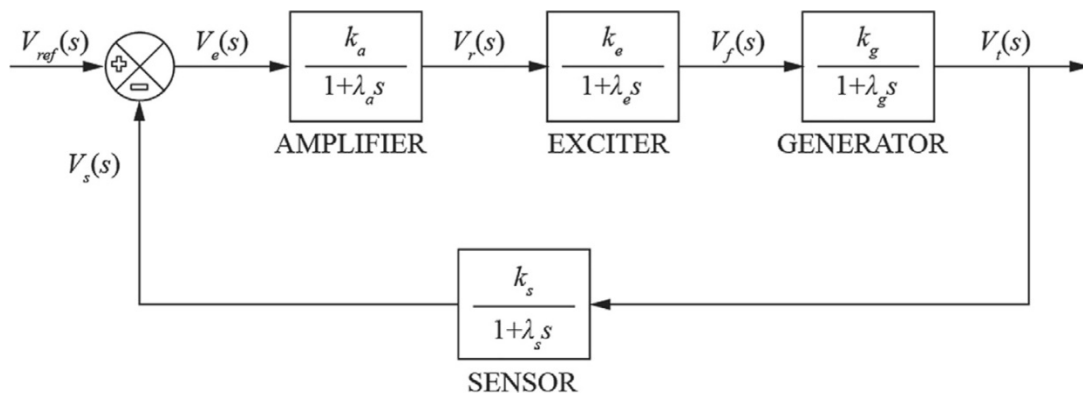


Рис. 3. Упрощенное представление AVR энергосистемы.

Таблица 1

Значения параметров системы.

Parameter	Gain		Time Constant	
Amplifier	$k_a$	10	$\lambda_a$	0.1 s
Exciter	$k_e$	1	$\lambda_e$	0.4 s
Generator	$k_g$	1	$\lambda_g$	1.0 s
Sensor	$k_s$	1	$\lambda_s$	0.05 s

$$L(s) = \frac{k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot k_s}{(1 + \lambda_a s) \cdot (1 + \lambda_e s) \cdot (1 + \lambda_g s) \cdot (1 + \lambda_s s)} \quad (7)$$

$$W(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot (1 + \lambda_s s)}{k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot k_s + (1 + \lambda_a s) \cdot (1 + \lambda_e s) \cdot (1 + \lambda_g s) \cdot (1 + \lambda_s s)} \quad (8)$$

### 1.2.2 Статический анализ

Для единичного ступенчатого изменения  $V_{ref}(s)$  соответствующее преобразование Лапласа выражается следующим образом:

$$V_{ref}(s) = \frac{1}{s}. \quad (9)$$

Теперь частотная характеристика напряжения на клеммах принимает следующий вид:

$$V_t(s) = \frac{k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot (1 + \lambda_s s)}{s [k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot k_s + (1 + \lambda_a s) \cdot (1 + \lambda_e s) \cdot (1 + \lambda_g s) \cdot (1 + \lambda_s s)]}. \quad (10)$$

При рассмотрении теоремы о конечном значении, статистическое реагирование можно вывести следующим образом:

$$V_{tss} = \lim_{s \rightarrow 0} s V_t(s). \quad (11)$$

$$V_{tss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left\{ \frac{k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot (1 + \lambda_s s)}{s [k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot k_s + (1 + \lambda_a s) \cdot (1 + \lambda_e s) \cdot (1 + \lambda_g s) \cdot (1 + \lambda_s s)]} \right\}. \quad (12)$$

$$V_{tss} = \frac{k_a \cdot k_e \cdot k_g}{1 + k_a \cdot k_e \cdot k_g \cdot k_s}. \quad (13)$$

### 1.3 Разработка системы управления AVR

Целью AVR в энергосистеме является контроль и регулирование напряжения сети, обеспечение его поддержания вблизи желаемого опорного значения. Основная задача контроллера AVR — устойчивое восстановление напряжения до номинального значения после любых помех или нарушений. Для достижения этой цели контроллер AVR обычно использует систему обратной связи. Контроллер может быть применён, используя различные методы управления, таких как PID-регулирование, управление с обратной связью по состоянию и передовые алгоритмы управления.

#### 1.3.1 Разработка PID-регулятора для AVR

PID-регуляторы являются одними из наиболее распространенных контроллеров на рынке. Системы AVR часто используют PID-регуляторы для повышения своей эффективности. PID-регуляторы улучшают динамическое реагирование и уменьшают или устраняют ошибку в установившемся режиме. Использование пропорционального регулятора позволяет уменьшить время нарастания реагирования; однако ошибки в стационарном режиме устранить невозможно [24]. Дифференциальные регуляторы улучшают переходный процесс, добавляя конечный нуль к передаточной функции разомкнутого контура, что уменьшает перерегулирование системы и, следовательно, увеличивает запас устойчивости системы [3]. Интегральные регуляторы добавляют полюс в начале координат, увеличивая тип системы на единицу и сводя к нулю ошибку ступенчатой функции в стационарном режиме; однако это может негативно повлиять на переходную характеристику. Функция в области Лапласа для PID-регулятора определяется следующим образом:

$$C(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s, \quad (14)$$

где  $k_p$ ,  $k_I$  и  $k_D$  — соответственно, пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления контроллера.

Расчет коэффициентов усиления PID-регулятора включает в себя выбор полюсов замкнутого контура, удовлетворяющих критерию производительности, путем оптимизации регулятора с использованием подхода, основанного на модели. Это было выполнено независимо от типа используемого регулятора. Использование трех различных коэффициентов усиления в конструкции PID-регулятора приводит к введению двух нулей и одного полюса в начале координат системы. Это преобразует систему в тип 1, что исключает ошибки в стационарном режиме [3]. На рис. 4 показана система AVR с PID-регулятором.

#### 1.3.2 Оптимизация искусственного пчелиного роя (ABC)

Алгоритм ABC, подобно другим метаэвристическим алгоритмам, используемым для решения задач оптимизации [28-30], представляет собой алгоритм, вдохновленный природой и управляемый поведением пчел при сборе нектара, и используется для повышения производительности PID-регуляторов [31]. Алгоритм ABC — это алгоритм оптимизации, вдохновленный природой, разработанный Карабогой в 2005 году [32]. В AVR алгоритм ABC используется в качестве механизма адаптивной настройки для PID-регуляторов. Имитируя поведение пчел при сборе нектара, алгоритм ABC исследует пространство параметров PID-регуляторов и ищет оптимальные настройки контроллера, которые приводят к улучшению характеристик регулирования напряжения. Эта возможность адаптивной настройки позволяет контроллеру приспосабливаться к изменяющимся условиям эксплуатации, динамике системы и неопределенностям, присущим гидроэлектростанциям.

Поскольку пчелы отлично умеют искать пищу, любая пчела, обнаружившая пищу, сообщает об этом другим пчелам. Таким образом, другие пчелы могут определить количество и местоположение своих источников пищи. Это помогает другим пчелам в их поисках пищи в правильном направлении. Эти пчелы привлекают множество других и продолжают искать источники пищи. Пчелиный рой в ABC состоит из трех групп искусственных пчел: рабочих пчел, наблюдателей и разведчиков [33]. Рабочие пчелы составляют первую половину роя, а наблюдатели — вторую. На каждый источник пищи приходится только одна рабочая пчела. Это означает, что количество рабочих пчел в улье равно количеству близлежащих источников пищи. Рабочая пчела, чей источник пищи был покинут, становится разведчиком. Другими словами, когда местоположение источника пищи не улучшается после определенного количества попыток, известного как «предел», рабочая пчела становится разведчиком. При этом рабочие и наблюдательные пчелы осуществляют процесс эксплуатации, в то время как разведчики ищут решения.

Подробности алгоритма ABC, описанного в [34], состоят в следующем:

#### **А. Этап инициализации**

Места расположения источников пищи ( $x_{jk}$ ) инициализируются случайным образом с использованием уравнения (15), которое представляет собой пространство поиска вектора коэффициентов PID-регулятора [ $k_p, k_i, k_d$ ].

$$x_{jk} = x_k^{\min} + rand(0, 1)(x_k^{\max} - x_k^{\min}), \quad (15)$$

where  $j = 1, \dots, NF$  and  $k = 1, \dots, D$ .  $NF$  is the number of food sources, which is typically half the number of bees in the colony,  $D$  is the problem dimension,  $x_{jk}$  is the  $j^{th}$  employed bee in the  $k^{th}$  dimension, and  $x_k^{\min}$  and  $x_k^{\max}$  are the upper and lower boundary limits of  $x_{jk}$ , respectively.

#### **Б. Этап рабочих пчёл**

Каждой пчеле выделяется источник пищи для тщательного использования. Поэтому для получения источников пищи используется уравнение (16).

$$v_{jk} = x_{jk} + \varphi(x_{jk} - x_{lk}), \quad (16)$$

где  $l$  — сосед  $j$ ,  $l \neq j$ ,  $\varphi$  — число, случайно выбранное в диапазоне от -1 до 1, чтобы получить представление о количестве соседних решений вокруг  $x_{jk}$ , а  $v_{jk}$  — новое решение  $x_{jk}$ .

Функция приспособленности нового источника пищи выражается следующим образом:

$$FIT_j = \begin{cases} \frac{1}{1+f_j}, f_j > 0 \\ 1 + |f_j|, f_j < 0 \end{cases}, \quad (17)$$

где  $f_j$  — целевая функция каждого источника пищи, а  $FIT_j$  — значение его приспособленности.

Из первичных и новых источников пищи был проведен тщательный анализ для выбора наиболее эффективного источника на основе его пригодности.

### В. Этап вероятностного отбора

Пчела-наблюдатель выбирает источник пищи, основываясь на вероятности его появления, которая определяется с помощью следующего уравнения:

$$P_j = \frac{FIT_k}{\sum_{j=0}^n FIT_k}, \quad (18)$$

где  $FIT_j$  — значение пригодности  $j$ -го решения, а  $P_j$  — вероятность выбора  $j$ -го решения.

### Г. Этап пчел-наблюдателей

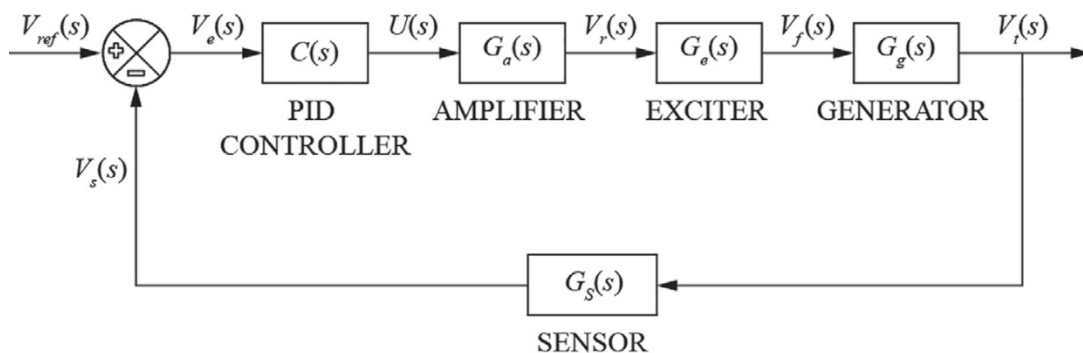


Рис. 4. AVR с PID-регулированием.

Информация об источниках пищи передается пчелам-наблюдателям рабочими пчелами для более тщательной обработки. Каждая пчела-наблюдатель выбирает источник пищи для использования на основе его вероятности (лучшая приспособленность и более высокая вероятность). Уравнение (16) используется для более эффективного использования выбранных источников пищи, а уравнение (17) используется для определения значений их приспособленности. Первичные и недавно найденные источники пищи подвергаются процессу детального отбора, аналогичному тому, что применялся на рабочих пчелах.

### Д. Этап пчел-разведчиков

Источник пищи покидают, и соответствующая пчела превращается в пчелу-разведчика, если он не дает лучших результатов, до определенного предела. Уравнение (15) используется для генерации нового источника пищи в зоне поиска, и процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено финальное требование.

Результатом является наилучшее решение по вопросу источника пищи. Алгоритм ABC используется для проектирования базового контроллера на основе его возможностей оптимизации, вдохновленных природой, адаптивных характеристик настройки, устойчивости к неопределенностям параметров и вычислительной эффективности [35]. Эти характеристики хорошо согласованы с целями достижения точного регулирования напряжения, стабильности и адаптивности в системах AVR гидроэлектростанций. Полный алгоритм проиллюстрирован на блок-диаграмме, показанной на рис. 5.

### 1.3.3 Разработка MPC-контроллера для AVR

Управление на основе прогнозирующих моделей (MPC) — это алгоритм компьютерного управления, относящийся к категории методов оптимального управления. Он использует математическую модель для прогнозирования будущего поведения на основе последовательности манипуляций с управляемыми переменными. Ключевая идея MPC заключается в том, чтобы заглядывать вперед и учитывать прогнозируемое реагирование процесса. Используя методы оптимизации, алгоритм управления определяет оптимальные управляющие воздействия, которые приводят к желаемому поведению выходного сигнала процесса. Задача оптимизации обычно учитывает различные ограничения и цели для определения наилучшей возможной стратегии управления. Эта стратегия «заглядывания вперед» позволяет MPC-контроллеру принимать решения на основе будущих прогнозов и соответствующим образом оптимизировать регулирующие воздействия. Она учитывает долгосрочные цели и критерии, а также общую производительность системы во времени.

В отличие от этого, классические методы управления, такие как PID-регуляторы, сосредоточены на достижении краткосрочных целей на основе текущего состояния системы. Хотя PID-регуляторы эффективны для непосредственных регулирующих воздействий, они могут не оптимизировать долгосрочную производительность системы. В этом преимущество MPC, поскольку он учитывает будущее течение процесса и оптимизирует регулирующие воздействия соответствующим образом, тем самым достигая лучших долгосрочных результатов и удовлетворяя конкретным целям [36].

Хотя классические методы управления могут эффективно решать краткосрочные задачи, они могут быть неспособны оптимизировать общую производительность системы в долгосрочной перспективе. В отличие от них, MPC использует более комплексный подход, учитывая прогнозы на будущее и оптимизируя регулирующие воздействия для достижения желаемых долгосрочных результатов [37].

Фундаментальная парадигма управления с прогнозированием включает два основных элемента: прогнозирование системы и оптимизацию управления. Используя модель уравнений состояния управляемой системы, был сформулирован критически важный компонент для прогнозирования управляемой системы, а именно энергосистемы с регулируемым напряжением генератора. На основе этой модели системы MPC прогнозирует будущее поведение системы, учитывая его в оптимизации, которая определяет оптимальную траекторию управляемой переменной  $u$ , где  $g$  и  $y$  являются соответственно опорным входом и выходом, как показано на рис. 6.

### 1.4 Формулировка модели прогнозирования

а) Модель в пространстве состояний - непрерывное время

Модель прогнозирования управляемой системы, то есть генератора и связанной с ним энергосети, по сути, представляет собой модель системы в виде уравнения состояния. Уравнение состояния состоит из ряда дифференциальных уравнений первого порядка. Применение MPC было продемонстрировано на примере упрощенной модели AVR, как показано на рис. 3.

После преобразования системы из  $s$ -области во временную область и записи уравнения состояния в матричной форме было получено следующее:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{V}_r \\ \dot{V}_f \\ \dot{V}_t \\ \dot{V}_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda_a} & 0 & 0 & -\frac{k_a}{\lambda_a} \\ \frac{k_e}{\lambda_e} & -\frac{1}{\lambda_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_g}{\lambda_g} & -\frac{1}{\lambda_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_s}{\lambda_s} & -\frac{1}{\lambda_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_f \\ V_t \\ V_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_a}{\lambda_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{ref}, \\ V_t(s) &= [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} V_r \\ V_f \\ V_t \\ V_s \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\text{For, } \left. \begin{aligned} A_t &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda_a} & 0 & 0 & -\frac{k_a}{\lambda_a} \\ \frac{k_e}{\lambda_e} & -\frac{1}{\lambda_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_g}{\lambda_g} & -\frac{1}{\lambda_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_s}{\lambda_s} & -\frac{1}{\lambda_s} \end{bmatrix}, \\ B_t &= \begin{bmatrix} \frac{k_a}{\lambda_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_t &= [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]. \end{aligned} \right\}$$

Модель в пространстве состояний во временной области выражается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= A_t \bar{x}(t) + B_t (u(t) + \delta(\bar{x}(t))) \\ \bar{y}(t) &= C_t \bar{x}(t) + D_t u(t) + d_t \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где  $\bar{x}(t)$  — вектор состояния,  $\bar{y}(t)$  — вектор выходных данных,  $u(t)$  — управляющий вход,  $A_t$  — матрица состояния,  $B_t$  — матрица входных данных,  $C_t$  — матрица выходных данных,  $\delta(\bar{x}(t))$  — помеха управляющего входного сигнала, а  $D_t$  и  $d_t$  — матрица прямой связи (равная нулю) и помеха выходного сигнала соответственно.  $d_t$  принималось равным нулю.

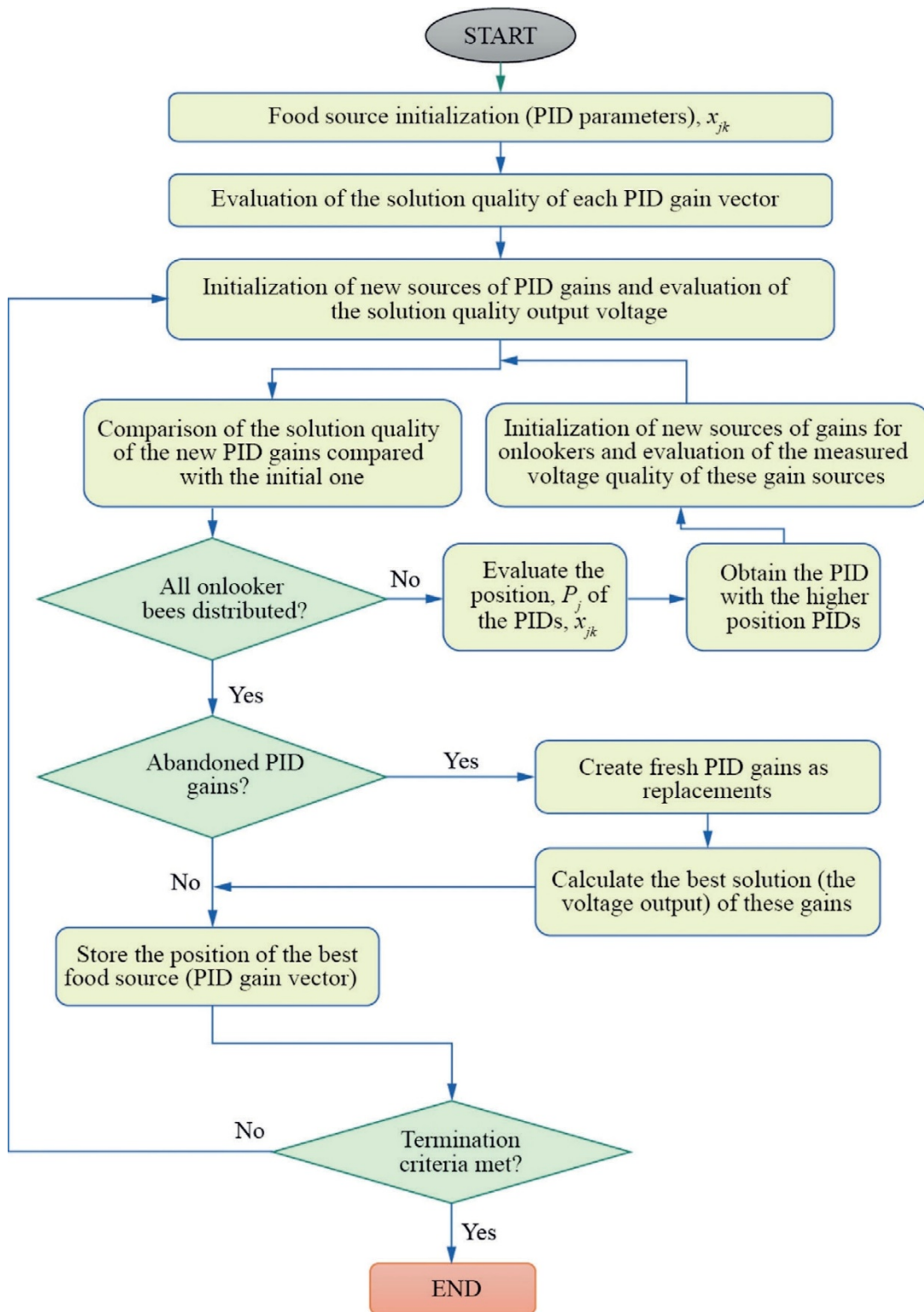


Рис. 5. Блок-диаграмма алгоритма ABC [38].

б) Модель в пространстве состояний - дискретное время

Во многих практических вариантах моделирования, где приоритет отдается простоте, надежности и вычислительной эффективности, метод фиксирующего устройства нулевого порядка (ЗОН) предпочтительнее более сложного и вычислительно-трудоемкого метода Тастина. Хотя метод Эйлера предлагает простую дискретизацию, он может быть недостаточно точным для систем с быстрой динамикой, что делает метод ЗОН более подходящим для точной дискретизации. Поэтому система была дискретизирована с использованием метода ЗОН.

Используя метод ZOH, уравнение (20) можно представить в дискретной форме следующим образом - интегрирование уравнения (21) по времени t после замены переменных и упрощения уравнения приводит к следующему уравнению:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= A_t \bar{x}(t) + B_t(u(t) + \delta(\bar{x}(t))) \\ \frac{d}{dt}(\bar{x}(t)e^{-A_t t}) &= \dot{\bar{x}}(t)e^{-A_t t} - A_t \bar{x}(t)e^{-A_t t} \\ &= e^{-A_t t} B_t(u(t) + \delta(\bar{x}(t))) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

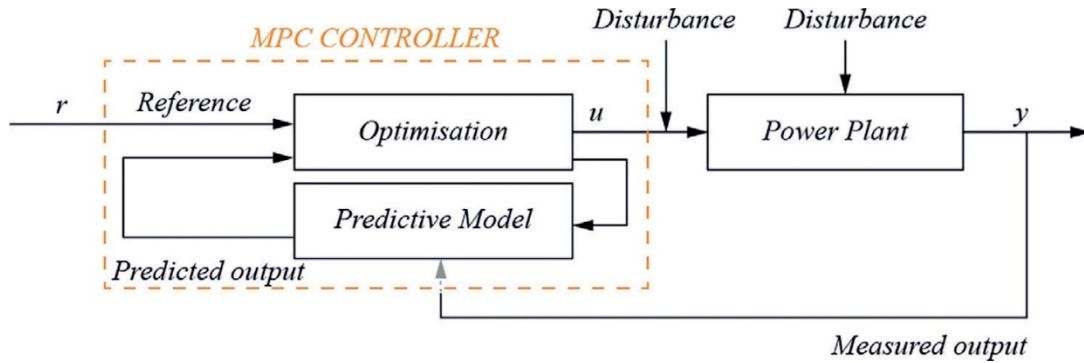


Рис. 6. Упрощенное представление модели MPC.

$$\bar{x}(t) = \bar{x}(0)e^{A_t t} + \int_0^t e^{-A_t(\tau-t)} B_t(u(\tau) + \delta(\bar{x}(\tau))) d\tau, \quad (22)$$

where  $\int_0^t e^{-A_t \tau} B_t(u(t) + \delta(\bar{x}(t))) d\tau$  is the convolution integral with nonparametric uncertainty.

Для вычисления  $\bar{x}(t)$  в дискретном времени в момент времени k определяется следующее уравнение:

$$\bar{x}[k] \equiv \bar{x}(k \cdot T_s),$$

где  $T_s$  — период выборки. Таким образом,  $\bar{x}[k+1]$  теперь можно определить как

$$\begin{aligned} \bar{x}[k+1] &\equiv \bar{x}((k+1) \cdot T_s) \\ \bar{x}[k+1] &= \bar{x}(0)e^{A_t(k+1) \cdot T_s} + \int_0^{(k+1) \cdot T_s} e^{-A_t(\tau-(k+1) \cdot T_s)} B_t u(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (23)$$

Разложив экспоненциальный и интегральный члены на две части, получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\bar{x}[k+1] &= \bar{x}(0)e^{A_t T_s} \cdot e^{A_t k T_s} \\ &+ \int_0^{k T_s} e^{-A_t(\tau-(k+1)T_s)} B_t(u(\tau) + \delta(\bar{x}(\tau))) d\tau \\ &+ \int_{k T_s}^{(k+1)T_s} e^{-A_t(\tau-(k+1)T_s)} B_t(u(\tau) + \delta(\bar{x}(\tau))) d\tau.\end{aligned}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}\bar{x}[k+1] &= e^{A_t T_s} \bar{x}[k] \\ &+ \int_{k T_s}^{(k+1)T_s} e^{-A_t(\tau-(k+1)T_s)} B_t(u(\tau) + \delta(\bar{x}(\tau))) d\tau,\end{aligned}\quad (25)$$

$$\bar{x}[k] = \bar{x}(0)e^{A_t k T_s} + \int_0^{k T_s} e^{-A_t(\tau-k T_s)} B_t(u(\tau) + \delta(\bar{x}(\tau))) d\tau$$

For system matrix  $A_t$ , a non-singular system and input  $u(\tau)$  from  $k \cdot T_s$  to  $(k+1) \cdot T_s$  equates to  $u(k \cdot T_s)$ , then,

$$\begin{aligned}\bar{x}[k+1] &= e^{A_t T_s} \bar{x}[k] \\ &+ e^{A_t(k+1)T_s} \left\{ \left[ \int_{k T_s}^{(k+1)T_s} e^{-A_t \tau} d\tau \right] B_t u[k] + \int_{k T_s}^{(k+1)T_s} e^{-A_t \tau} B_t \delta(\bar{x}(\tau)) d\tau \right\}.\end{aligned}\quad (26)$$

Оценивая уравнение (26), получаем следующее уравнение:

$$\begin{aligned}\bar{x}[k+1] &= e^{A_t T_s} \bar{x}[k] \\ &+ e^{A_t(k+1)T_s} \left[ (e^{A_t T_s} - I) B_t u[k] + \int_{k T_s}^{(k+1)T_s} e^{-A_t \tau} B_t \delta(\bar{x}(\tau)) d\tau \right].\end{aligned}\quad (27)$$

Поскольку  $I$  является единичной матрицей, дискретную модель пространства состояний можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}\bar{x}[k+1] &= A \bar{x}[k] + B u[k] \\ \bar{y}[k] &= C \bar{x}[k] + D u[k] + d \\ &\text{such that} \\ A &= e^{A_t T_s} \\ B &= e^{A_t(k+1)T_s} (e^{A_t T_s} - I) B_t \\ C &= C_t \\ D &= D_t \\ d &= d_t \\ \delta(\bar{x}(t)) &= 0\end{aligned}\right\}.\quad (28)$$

Параметры режима системы  $x$ -  $[k+1]$  на будущем временном шаге  $k+1$  могут быть описаны двумя компонентами на текущем временном шаге  $k$ , как показано в уравнении (28), при этом переменные состояния  $x[k]$  демонстрируют непрерывность процесса системы как одну компоненту, а управляющий вход  $u[k]$  — как другую.

в) Одноэтапная прогнозирующая модель

На основе дискретных уравнений (уравнение (28)) традиционный подход к определению одноэтапного управления на основе прогнозирующих моделей выглядит следующим образом [39]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}[k+1|k] &= A\bar{x}[k] + Bu(k|k) \\ \bar{y}[k+1|k] &= C\bar{x}[k+1|k] + Du[k|k] + d \end{aligned} \right\}, \quad (29)$$

где  $\bar{x}[k+1|k]$  указывает, что значения  $\bar{x}$ - на шаге времени  $k+1$  вычисляются на основе информации, полученной на шаге времени  $k$ . Описанную выше модель можно рассчитать с помощью уравнения (28) следующим образом:

ШАГ 1: Для определения величины  $\bar{y}[k]$  измерения проводятся в контролируемых условиях. Значения состояния  $\bar{x}[k]$  определяются, начиная с  $\bar{y}[k]$ .

ШАГ 2: Модель прогнозирования используется для получения величины  $\bar{x}[k+1]$  из  $\bar{x}[k]$ , а ожидаемый результат  $\bar{y}[k+1]$  рассчитывается на основе входного значения  $\bar{x}[k+1]$ .

ШАГ 3: Для определения оптимального управляющего воздействия  $u$  используется показатель эффективности прогнозной оптимизации, представленный в уравнении (31).

г) Улучшенная модель прогнозирования

Следующая часть касается части (в) выше, которая описывает, как определить управляющий вход  $u$ . Однако  $u[k|k]$  в нормальной форме уравнения (29) может вызывать путаницу, поскольку  $k|k$  указывает, что значение  $u$  на временном шаге  $k$  вычисляется на основе данных на текущем временном шаге  $k$ . Поскольку все данные на временном шаге  $k$ , включая управляющий вход  $u$ , уже известны, невозможно использовать процесс оптимизации для определения уже известных данных. В этом случае управляющий вход  $u$  на текущем временном шаге известен и применяется к управляемой системе.

Неудивительно, что может возникнуть подобная путаница, поскольку традиционный способ решения уравнения состояния заключается в использовании известного входного сигнала  $u$  для определения значения  $\bar{x}$ . В управлении с прогнозированием необходимо предсказать управляющий входной сигнал для управляемой системы на следующем временном шаге. Это управление всегда выполняется для определения  $u$  на следующем временном шаге  $k+1$ , исходя из текущего времени  $k$ .

Таким образом, в данном исследовании было предложено изменить форму уравнения состояния управления с прогнозированием таким образом, чтобы  $u[k]$  в уравнении (29) стало  $u[k+1|k]$ , как показано ниже:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}[k+1|k] &= A\bar{x}[k] + Bu[k+1|k] \\ \bar{y}[k+1|k] &= C\bar{x}[k+1|k] + Du[k+1|k] + d \end{aligned} \right\}, \quad (30)$$

где  $u[k+1|k]$  — управляющий вход управляемой системы, который в случае управления AVR равен  $V_e(s)$ . Данные в момент времени  $k$  используются для определения  $u[k+1|k]$  на шаге времени  $k+1$ [36].

Используя эту модель прогнозирования, система выдает следующие результаты  $\bar{y}[k+i|k]$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) прогнозируются на интервале времени  $N$ , начиная с момента времени  $k$ . Эти прогнозируемые выходные параметры системы рассчитываются на основе измерений  $\bar{y}[k]$  и будущих регулирующих воздействий  $u[k+j|k]$  ( $j=0, 1, \dots, n-1$ ).

Затем эти прогнозируемые выходные значения используются в процессе оптимизации MPC для вычисления оптимальных управляющих воздействий, которые приводят к желаемому поведению системы на выходе.

$\bar{y}$

#### д) Формулировка целевой функции

Простая оптимизационная задача в виде минимизации методом наименьших квадратов по показателю эффективности системы  $J$  является основой для оптимального управления AVR. Значение  $J$  определяется путем вычисления суммы ряда квадратов значений, полученных из отклонений ожидаемых выходных сигналов системы от их опорных значений и изменений управляющих воздействий на управляемую систему [36]. Для управления AVR MPC минимизирует целевую функцию  $J$ , обозначенную уравнением (31), путем отслеживания сигнала ошибки между опорным и измеренным выходным напряжением.

$$\begin{aligned} & \min J(\bar{x}[k], u[k]) \\ J(\cdot) = & \min_u \sum_{i=1}^N \gamma \|r[k+i|k] - \bar{y}[k+i|k]\|^2 + \sum_{j=1}^n \rho \|u[k+j|k]\|^2, \\ & \text{subject to } \begin{cases} \bar{x}[k+1|k] = A\bar{x}[k] + Bu[k+1|k] \\ \bar{y}[k+1|k] = C\bar{x}[k+1|k] + Du[k+1|k] + d \\ u_{LB} \leq u[k+j|k] \leq u_{UB} \\ \bar{y}_{LB} \leq \bar{y}[k+i|k] \leq \bar{y}_{UB} \end{cases}, \end{aligned} \quad (31)$$

где  $u_{LB}$  и  $u_{UB}$  - нижний и верхний предельные ограничения на входные данные соответственно, и

$\bar{y}_{LB}$  и  $\bar{y}_{UB}$  являются соответствующими результатами.

На рис. 7 показана схема моделирования AVR с контроллером MPC, добавленным к прямому пути контура AVR.

## 2 Обсуждение результатов

### 2.1 Изменение входного сигнала

На рис. 8 показана зависимость выходного напряжения от ступенчатого изменения входного сигнала в управляемом и неуправляемом режимах. Анализ этой зависимости позволил получить ценные сведения о производительности и эффективности стратегии управления.

Анализ системы генератора AVR без контроллера, проведенный с использованием модели Simulink, выявил важные закономерности. Диаграмма Бode частотной характеристики, показанная на рис. 8, указывает на то, что разомкнутый контур оставался стабильным при отсутствии обратной связи от датчика. Изменение коэффициента усиления по постоянному току в этой разомкнутой системе составило 20,00 дБ, что объясняется передаточной функцией усилителя, который вносит коэффициент усиления 10,0. Запас по фазе (PM) и запас по усилению (GM) системы составили 5,69



дБ и 18,59, соответственно. Частота единичного усиления (GCF) и частота пересечения фаз (PCF) составили 4,4 рад/с и 6,12 рад/с соответственно.

Положительные значения PM и GM, а также значение PCF, превышающее GCF, указывают на стабильность разомкнутого контура, отсутствие перерегулирования и чрезмерное демпфирование. Однако отсутствие обратной связи указывает на невозможность эффективного регулирования напряжения генератора. При замыкании контура через датчик система становилась нестабильной вблизи желаемого уровня напряжения, при этом значения GM и PM становились отрицательными,

равными -9,08 дБ и -14,96°, соответственно. Изменение коэффициента усиления по постоянному току упало ниже отметки 0,0 дБ до -0,82 дБ, поскольку ранее стабильная фазовая модуляция в 18,59 градуса была нарушена неучтенной динамикой, вносимой датчиком. Это смещение привело к значению PCF 5,08 рад/с, что меньше, чем GCF 6,06 рад/с.

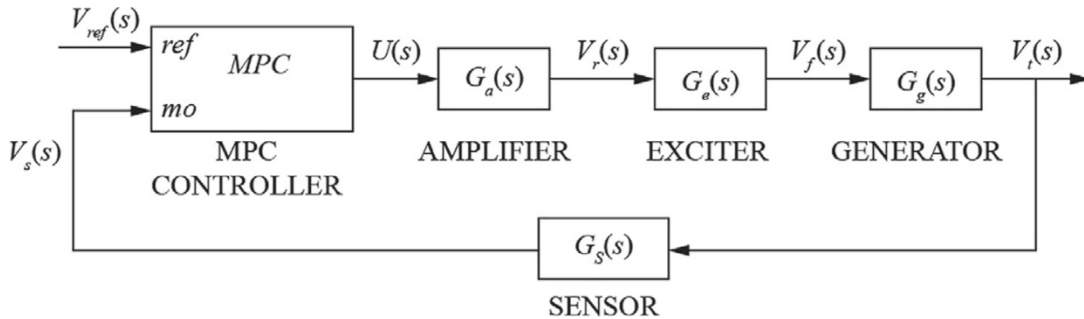


Рис. 7. AVR с управлением MPC.

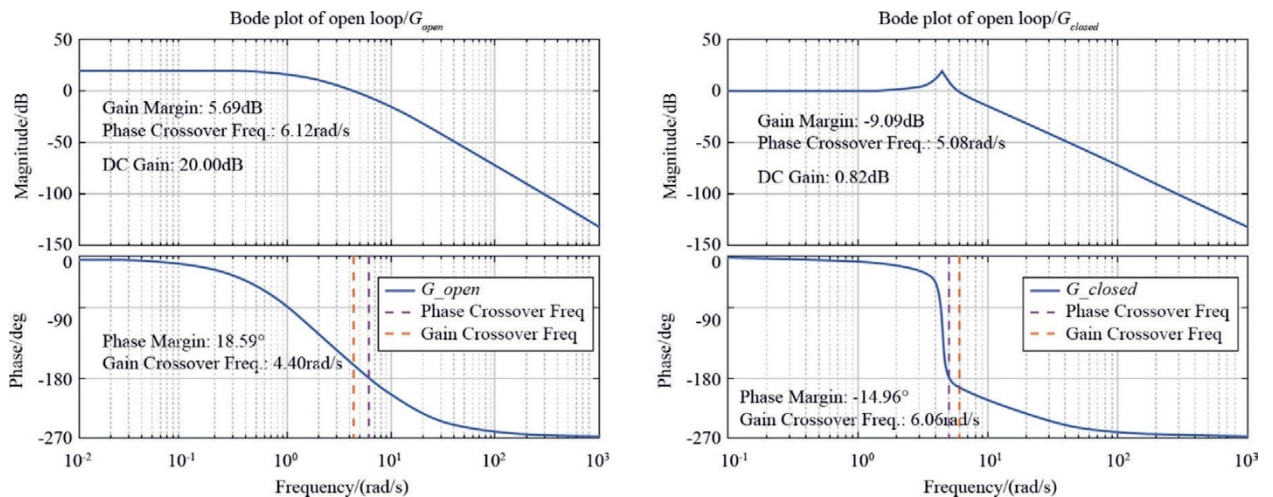


Рис. 8. Диаграммы Боде для разомкнутого и замкнутого контура без контроллера.

Кроме того, при частоте 4,4707 рад/с наблюдается резкое усиление в 19,6738 дБ, сопровождающееся быстрым падением фазы, что указывает на слабодемпфированную систему с колебаниями во временной характеристике реагирования, как показано на рис. 9. График переходной характеристики на рис. 9 иллюстрирует отклонение напряжения в системе AVR при моделировании без активного контроллера, что приводит к значительному перерегулированию напряжения и колебаниям.

Чтобы понять, почему возникают перерегулирования в отсутствие контроллера, необходимо изучить динамику системы. В генераторе электростанции система AVR отвечает за регулирование выходного напряжения путем регулирования уровня возбуждения полюсной обмотки генератора. Уровень возбуждения определяет напряженность магнитного поля, которое, в свою очередь, влияет на выходное напряжение генератора. Без контроллера система не может быстро и точно реагировать на изменения входного напряжения. Когда происходит помеха, например, ступенчатое изменение входного напряжения, реакция системы основывается исключительно на присущих генератору и его компонентам характеристиках.

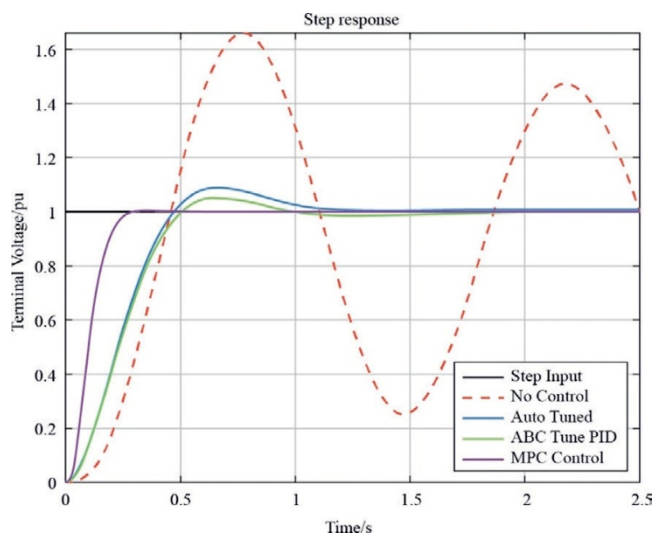


Рис. 9. Реакция напряжения на клеммах на изменение входного сигнала.

При ступенчатом изменении напряжения генератор первоначально испытывает несоответствие между выходным напряжением и желаемым опорным напряжением. Это несоответствие создает сигнал ошибки, который приводит в действие систему возбуждения генератора для коррекции отклонения. Однако без контроллера реакция системы возбуждения может быть медленной или недостаточной для эффективного противодействия помехе. В результате выходное напряжение генератора превышает желаемое опорное значение, прежде чем постепенно стабилизироваться. Это превышение происходит из-за того, что система возбуждения может слишком резко реагировать на начальную ошибку, в результате чего напряжение превышает желаемое заданное значение. Кроме того, отсутствие демпфирования в реакции системы приводит к колебаниям и нестабильности, поскольку система пытается достичь устойчивого равновесия.

Включение в систему AVR регулятора, такого как PID-регулятор, помогает смягчить эти проблемы. Пропорциональная составляющая PID-регулятора обеспечивает немедленную коррекцию для уменьшения ошибки между выходным напряжением и опорным значением. Интегральная составляющая устраняет любую ошибку в установившемся режиме, обеспечивая долговременную стабильность. Производная составляющая добавляет демпфирование к реакции системы, подавляя колебания и улучшая переходные процессы. Благодаря использованию PID-регулятора или любого другого контроллера, система AVR может более эффективно регулировать выходное напряжение, минимизируя перерегулирование и поддерживая стабильную работу даже при наличии помех.

Внедрение PID-регулятора, оптимизированного с помощью PID-настройщика (как показано на рис. 7, автонастройка), значительно повышает стабильность напряжения по сравнению с нерегулируемым вариантом моделирования. В электроэнергетике крайне важно минимизировать время, необходимое для достижения желаемого напряжения, без чрезмерных перерегулирований, что является фундаментальным требованием для эффективного управления. Данная система управления демонстрирует удовлетворительную стабильность в определенной степени.

В этой системе приемлемый уровень стабильности достигается до отметки в 2 секунды, при этом напряжение стабилизируется на значении 1 в относительных единицах (ед.) за 2,5 секунды. Однако система испытывает перерегулирование в 8,7 %, которое контроллеру не удалось устранить, хотя ошибка в стационарном режиме по-прежнему равна нулю. Целью разработки контроллера было достижение желаемого времени установления при минимальном запасе перерегулирования. В таблице 2 ниже показаны результаты полученных коэффициентов PID-регулятора и характеристики реагирования.

Хотя регуляторы с автоматической настройкой могут подходить для некоторых применений, PID-настройщик предлагает более комплексный и эффективный подход к настройке коэффициентов PID-регулятора в системах управления с регулируемым микроконтроллером. Он обеспечивает баланс между переходной характеристикой и устойчивостью за счет систематической оптимизации коэффициентов на основе критериев производительности системы. Важно отметить, что PID-настройщик может быть не особенно полезен или прост в сложных системах, где ручная настройка может не дать удовлетворительных результатов из-за взаимозависимости между различными контурами управления. Однако в таких случаях поиск оптимальных коэффициентов усиления может не дать однозначных результатов. Следовательно, становятся полезными передовые методы проектирования, поскольку они обеспечивают устойчивость, которой может не хватать автоматически настраиваемому регулятору.

Переходная характеристика системы AVR, показанная на рис. 9 (PID-регулятор с настройкой ABC), указывает на то, что разработанный с помощью ABC PID-регулятор работает лучше, чем автонастройка, при ступенчатом изменении входного напряжения. PID-регулятор ABC уменьшает перерегулирование системы в ответ на колебания напряжения, а максимальная разница в перерегулировании по сравнению с автонастройкой составляет приблизительно 5,2 %. Как показано в таблице 2, представлены коэффициенты усиления PID-регулятора, разработанного с помощью ABC, а также соответствующие характеристики реагирования. Для настройки параметров PID-регулятора используется алгоритм оптимизации ABC. Этот алгоритм многократно исследует пространство параметров для нахождения оптимальных значений, минимизирующих целевую функцию, которой в данном случае является интегральная абсолютная ошибка по времени. Минимизация этой ошибки помогает уменьшить отклонение выходного напряжения от его опорного значения, минимизируя при этом перерегулирование и обеспечивая плавный переходный процесс.

Использование ABC-настройки представляет собой альтернативный и эффективный метод определения оптимальных коэффициентов PID-регулятора. Он позволяет осуществлять глобальный поиск подходящих коэффициентов, особенно для сложных систем с несколькими контурами управления. Эффективность PID-регулятора, настроенного с помощью ABC, заключается в его способности обеспечивать плавное и эффективное управление в системе AVR.

На рис. 7 (управление MPC) показано, что MPC демонстрирует исключительные характеристики временной реакции для системы AVR. Он обеспечивает стабильную переходную реакцию с минимальным перерегулированием. Контроллер MPC обеспечивает превосходную стабильность в относительно короткие сроки, а именно до 0,4 с, превосходя по этому показателю другие регуляторы. В таблице 2 показаны результаты, полученные при управлении MPC.

Благодаря оптимальной конструкции системы управления MPC, напряжение на клеммах остается практически неизменным при изменении параметров системы. Кроме того, максимальная разница перерегулирования при использовании контроллера MPC ограничена примерно 0,5 %, что превосходит другие методы. Контроллер MPC эффективно обрабатывает динамические системы, характеризующиеся быстро меняющейся динамикой и быстрыми переходными процессами, демонстрируя свою устойчивость.

Таблица 2

Параметры управления и выходные характеристики.

Parameter	Auto-tuned PID	ABC-designed PID	MPC Control
$K_P$	0.54309	0.51121	—
$K_I$	0.42682	0.35551	—
$K_D$	0.42682	0.15889	—
Settling time (secs)	0.429	0.413	0.247
Overshoot (%)	8.7	5.2	0
Steady-state error	0	0	0

## 2.2 Проверка предложенного контроллера на основе MPC для управления AVR.

а) Предлагаемый MPC-контроллер при ступенчатом изменении напряжения  $\pm 50\%$

MPC демонстрирует свою эффективность в качестве альтернативного и надежного метода управления системой AVR, особенно по сравнению с другими методами управления. На рис. 10 четко показано, что система AVR, управляемая MPC, демонстрирует более быструю и плавную переходную характеристику по сравнению с моделью, управляемой PID-регулятором. Контроллер MPC обеспечивает более быструю настройку и более плавные переходы в ответ на ступенчатое изменение номинального напряжения на  $\pm 50\%$  непосредственно перед 0,5 с и 1,5 с соответственно во время первого и второго изменения опорного напряжения. Эта возможность обеспечивает быструю и точную регулировку напряжения, минимизируя время установления и переходные колебания. Производительность и надежность предлагаемой стратегии MPC оцениваются путем сравнения с другими методами управления, использующими единичные ступенчатые опорные сигналы и различные опорные сигналы для напряжения на клеммах.

Рис. 10 также демонстрирует, что контроллер MPC обеспечивает наилучшую реакцию на заглушение напряжения по сравнению с другими методами управления, такими как автонастраиваемый PID-регулятор и PID-регулятор на основе ABC, а также PID-регулятор с интегралом взвешенной по времени квадратичной ошибки, разработанный с использованием оптимизации Харриса-Хокса, особенно при изменяющихся опорных значениях во время переходных процессов [40,41].

б) Предлагаемый контроллер MPC при воздействии помех на управляющий вход

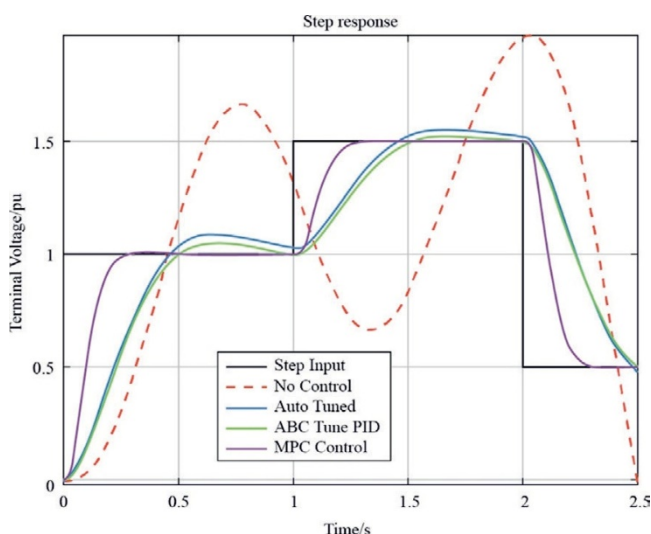


Рис. 10. Контроллер MPC при изменении ступенчатого входного сигнала от -50% до +50%.

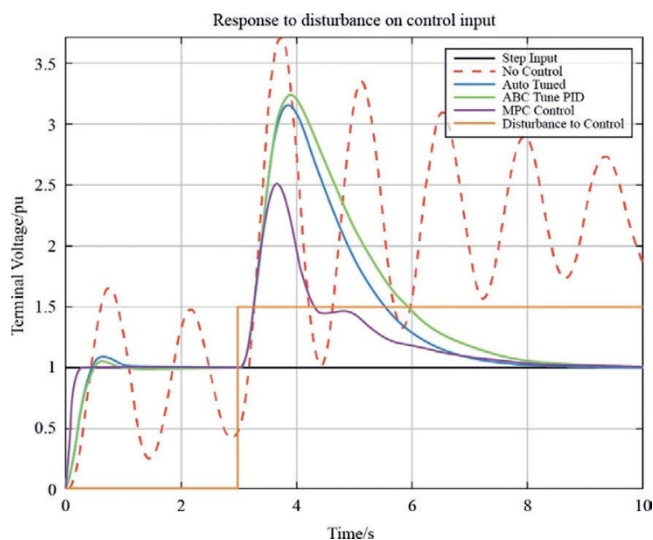


Рис. 11. Контроллер с входным возмущением.

На рис. 11 видно, что при введении возмущения в управляющий вход MPC превосходит PID-регуляторы по минимизации колебаний. Пиковое перерегулирование напряжения у MPC остается ниже 1,5 ед. от заданного значения, в то время как у PID-регуляторов оно превышает 2,0 ед. от заданного значения. Кроме того, MPC поддерживает требуемое время установления, поскольку достигает этого значения перерегулирования. Также MPC известен своей способностью надежно справляться с помехами и неопределенностями. Это достигается за счет использования прогностической модели системы, которая позволяет предвидеть будущее поведение и принимать соответствующие решения по управлению. Эта прогностическая способность позволяет контроллеру MPC заблаговременно реагировать на помехи и корректировать свои управляющие действия, обеспечивая стабильное регулирование напряжения. В отличие от этого, методы PID-регулирования с трудом справляются с помехами и неопределенностями с таким же уровнем устойчивости.

Учитывая нелинейную динамику и эксплуатационные ограничения системы AVR, MPC особенно хорошо подходит для решения этих сложных задач. Его прогнозирующий характер позволяет явно учитывать нелинейности и включать ограничения в алгоритм управления. Эта возможность дает контроллеру MPC возможность оптимизировать регулирующие воздействия, одновременно удовлетворяя эксплуатационным ограничениям, что в конечном итоге обеспечивает стабильное и надежное регулирование напряжения.

#### в) Предложенный контроллер MPC при изменении параметров

Как показано на рис. 12, MPC еще раз демонстрирует свою адаптивность и гибкость в проектировании систем управления. Он обладает способностью обрабатывать изменения в системе путем обновления модели прогнозирования и соответствующей оптимизации решений управления. Эта адаптивность гарантирует, что система управления может учитывать изменения параметров системы, условий нагрузки и помех без необходимости ручной перенастройки или корректировки параметров управления. На рис. 12 показано, как MPC сохраняет превосходную стабильность, без ошибок в стационарном режиме, даже после сдвига коэффициентов усиления и постоянных времени системы на -5%, указанных в таблице 3, в то время как другие контроллеры не смогли поддерживать заданное значение после ухода параметров за установленные пределы.

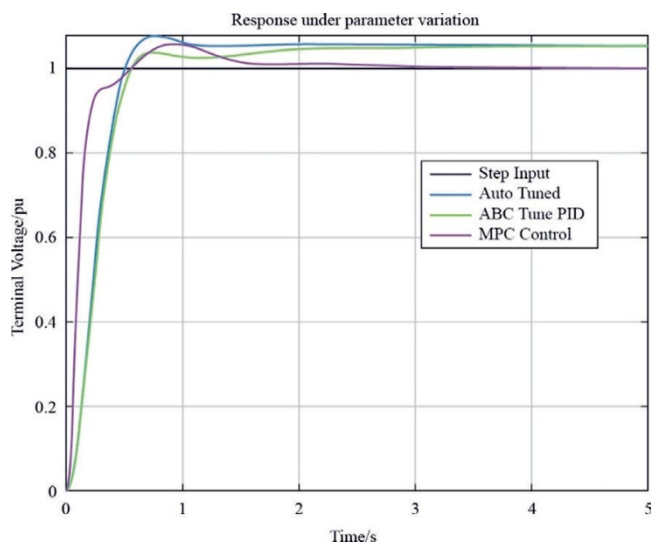


Рис. 12. Контроллер MPC с изменением параметров.

В результате MPC становится надежной альтернативой для систем управления AVR по сравнению с PID и другими классическими методами управления, особенно с учетом переходной характеристики и надёжности. MPC выделяется по сравнению с аналогичными работами, в которых не рассматривается производительность PID-контроллера в более сложных вариантах моделирования, таких как изменение параметров и неопределенность регулирующего воздействия [40,42]. Его способность обеспечивать более быстрые и плавные переходные характеристики, превосходную производительность при различных опорных значениях, устойчивость к помехам, обработку нелинейностей и ограничений, а также адаптивность к изменениям системы делают его правильным выбором для достижения точного и стабильного регулирования напряжения в системах AVR. Все эти аспекты подчеркивают преимущества и стабильность предлагаемого алгоритма, указывая на то, что контроллер MPC может эффективно справляться с различными условиями эксплуатации, контролировать входные возмущения и износ оборудования, поддерживая при этом стабильное и точное регулирование напряжения.

Представленные методы управления для AVR имеют существенные недостатки и ограничения. PID-регуляторы, хотя и широко используются, могут быть сложными в настройке и чувствительными к шуму, что потенциально может привести к ошибкам в стационарном режиме и перерегулированию. PID-регулятор, настроенный с помощью ABC, хотя и эффективен в оптимизации, но может страдать от высокой вычислительной сложности и тенденции к сходимости к локальным минимумам, что делает его менее адаптируемым к изменяющейся динамике системы. Между тем, MPC предлагает возможности прогнозирования, но в значительной степени зависит от точных моделей системы, разработка которых может быть сложной, а реализация — вычислительно затратной. Кроме того, эффективность MPC зависит от правильного задания ограничений, а неточности в модели могут привести к неоптимальному управлению. В совокупности эти проблемы подчеркивают необходимость тщательного подхода при выборе и внедрении стратегий управления для систем AVR.

Таблица 3

Параметры системы с отклонением -5%.

Parameter	Gain	Time Constant
Amplifier	$k_a$	9.5
Exciter	$k_e$	0,95
Generator	$k_g$	0.95
Sensor	$k_s$	0.95

### **3 Заключение и выводы**

В данной работе рассматривается важность достижения стабильного регулирования напряжения в энергосистеме с помощью AVR. Исследование сосредоточено на моделировании и управлении системой AVR на гидроэлектростанциях. Для управления AVR обычно используются традиционные PID-регуляторы, но их производительность может варьироваться в зависимости от настройки. В данном исследовании представлена надежная стратегия управления с использованием MPC-контроллера и PID-контроллера, разработанного с помощью ABC. Результаты моделирования демонстрируют эффективность и устойчивость метода управления MPC по сравнению с PID-регулятором, разработанным с помощью ABC, и другими методами оптимизации и PID-регулирования для систем AVR. Контроллер MPC демонстрирует превосходные характеристики с точки зрения времени установления, пикового перерегулирования и стабильности при ступенчатом изменении напряжения. Устойчивость контроллера дополнительно оценивается путем воздействия на AVR изменяющихся ступенчатых входных сигналов в диапазоне от -50 % до +50 % от номинального входного значения, введения помех в управляющий входной сигнал и изменения параметров системы на -5 %. Контроллер MPC демонстрирует превосходные характеристики при обработке этих изменений. Реализация контроллера с использованием программного обеспечения Matlab/Simulink демонстрирует их способность улучшать рабочие характеристики AVR, включая ошибку в стационарном режиме, время установления и перерегулирование.

Данное исследование вносит ценный вклад в разработку современных методов автоматического регулирования напряжения для инженеров электростанций. Предложенная стратегия управления отличается простотой, универсальностью и потенциалом применения в различных областях техники. Она превосходит сложные математические и графические подходы и демонстрирует перспективность для будущих работ в области автоматического управления генерацией. Однако контроллеры MPC иногда могут быть вычислительно затратными из-за предсказательного характера алгоритма управления, что может потребовать больше вычислительных ресурсов по сравнению с более простыми методами управления и может потребовать специализированных программных и аппаратных ресурсов, что может усложнить и увеличить стоимость всей системы. В целом, исследование демонстрирует эффективность MPC по сравнению с интеллектуальными PID-регуляторами в достижении стабильного и точного регулирования напряжения, тем самым повышая надежность и производительность энергосистемы. Дальнейшие перспективы работы, представленной в данной статье, будут включать в себя объединение автоматического управления мощностью (AGC) с AVR. AGC является важным аспектом работы энергосистемы, направленным на поддержание баланса между производством и спросом на электроэнергию в режиме реального времени. Интеграция AGC и AVR позволит еще больше повысить общую производительность и стабильность энергосистемы.

#### **Вклад авторов**

Вилли Стивен Тунси Фокуи и Эбунле Акумпан Рене внесли свой вклад в исследование, обработку данных, разработку методологии и формальный анализ, а также значительный вклад в написание авторского оригинала.

Оригинал текста был прочитан и одобрен всеми авторами.

#### **Финансирование**

Авторы не получали дополнительного финансирования для проведения этой работы.

#### **Доступность данных**

Все данные и материалы включены в оригинал текста.

## О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность различным учреждениям за предоставленную возможность заявить о себе.

## Список используемой литературы

- [1] Н. Беляков, Традиционная технология гидроэлектростанций, в: Устойчивое производство электроэнергии, Elsevier, 2019, стр. 355-377.
- [2] Т. Вельдчеркос, А. О. Салау, А. Ашагри, Моделирование и проектирование автоматического управления генерацией для гидроэлектростанций с использованием нейро-нечеткого контроллера, *Energy Rep.* 7 (2021) 6626-6637.
- [3] Е. А. Рене, В. С. Т. Фокуи, Оптимальный LQR-PID контроллер на основе оптимизации роя квантовых частиц для управления частотой нагрузки изолированной энергосистемы, *J.Eng.Appl.Sci.* 70 (97) (2023).
- [4] О.Х. Абдалла, Х.Х. Файек, А.Г.М. Абдель Гани, Вторичное и третичное регулирование напряжения в многорегиональной энергосистеме, *Электричество* 1 (2020) 37-59.
- [5] С. Корси, Регулирование напряжения и защита в электрических энергосистемах, Springer, 2015.
- [6] Х.Х. Файек, Э. Русу, Новое комбинированное управление частотой нагрузки и автоматическое регулирование напряжения в микросетях, на 100% использующих возобновляемую энергию, *Sustainability* 14 (2022) 9428.
- [7] М.З. Мохд Тумари, М.А. Ахмад, М.И. Мохд Рашид, Инструмент настройки PID-регулятора дробного порядка для автоматического регулятора напряжения с использованием алгоритма морских хищников, *Energy Rep.* 9 (2023) 416-421.
- [8] С.Б. Айдемир, Усовершенствованный алгоритм морского хищника для задач глобальной оптимизации и инженерного проектирования, *Adv.Eng.Softw.* 184 (2023) 103517.
- [9] Д. Изчи, С. Экинчи, С. Миржалили, Л. Абуалига, Интеллектуальная схема настройки с подходом «ведущий/ведомый» для эффективного управления автоматическим регулятором напряжения, *Neural Comput Appl* 35 (2023) 19099-19115.
- [10] С.Экинчи, В.Сна 'сеэль, Р.М.Ризк-Аллах, Д.Изчи, М.Салман, А.А.Ф.Юуссеф, Оптимизация производительности AVR с помощью нового каскадного контроллера RPIDD2-FOPID и подхода QWGBO, *PLoS One* (2024), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299009>.
- [11] Д. Изчи, Р. М. Ризк-Аллах, В.Сна 'сеэль, С. Экинчи, Ф. А. Хашим, Л. Абуалигах, Новая схема управления для автоматического регулятора напряжения с использованием нового модифицированного оптимизатора искусственных кроликов, *e-Prime - Adv.Electric.Eng.Electron.Energy* (2023), <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100325>.
- [12] М. Х. Суид, М. А. Ахмад, Оптимальная настройка сигмоидного PID-регулятора с использованием нелинейного синусоидального косинусного алгоритма для системы автоматического регулятора напряжения, *ISA Trans* 128 (2022) 265-286.

- [13] М.Х.Суид, М.А.Ахмад, Новый гибридный нелинейный синусоидальный косинусный алгоритм и динамика безопасного экспериментирования для уменьшения порядка модели, *Automatika* 64 (2023) 34-50.
- [14] М.Дж.Лавал, С.У.Хуссейн, Б.Сака, С.У.Абубакар, И.С.Атта, Интеллектуальный нечеткий автоматический регулятор напряжения с гибридным методом обучения оптимизации, *Sci.Afr.*(2023), <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01573>.
- [15] О.А.М.Омар, М.И.Марей, М.А.Аттиа, Сравнительное исследование систем управления AVR с учетом нового оптимизированного ПИД-регулятора с эталонной моделью и дробным адаптивным контроллером, *Energies (Basel)* 16(2023) 830.
- [16] М. Эльсиси, М.-К. Тран, Х.М. Хасаниен, Р.А. Турки, Ф. Альбалави, С.С.М. Гонейм, Надежная модель прогнозирующего управления для автоматических регуляторов напряжения с учетом неопределенности на основе алгоритмов оптимизации, *Математика* 9 (2021) 2885.
- [17] М.Т. Мохд Заиди, А.А. Мохд, Р.Г. Мохд, Оптимизация параметров PID-регулятора для надежной системы автоматического регулятора напряжения с помощью косвенного подхода к проектированию-2, *Global Energy Interconnect.*7 (2024).
- [18] М. Мичев, М. Чаласан, Д. Олива, Проектирование и анализ устойчивости контроллера системы автоматического регулирования напряжения с использованием алгоритма равновесного оптимизатора, *Comput.Electr.Eng.* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106930>.
- [19] М. Мичев, М. Чаласан, М. Радулович, Оптимальная настройка нового контроллера регулирования напряжения с учетом реальной модели системы автоматического регулирования напряжения, *Heliyon* 9 (2023) e18707.
- [20] С.Куанг, Дж.Хоу, С.Лю, К.Лин, З.Ванг, Т.Ван, Усовершенствованный алгоритм оптимизации африканского грифа на основе стратегии обучения с использованием случайного противодействия, *Electronics (Basel)* 13(2024) 3329.
- [21] В. Падиачи, У. Мехта, С. Азид, С. Прасад, Р. Кумар, Двухступенная дробная PI-схема для автоматического регулирования напряжения, *Eng.Sci.Technol.Int.J.*30 (2022) 101046.
- [22] Дж. Тан, Л. Ван, Алгоритм оптимизации китов на основе дифференциальной эволюции атомоподобной структуры для решения инженерных задач проектирования, *Sci Rep* 14 (2024) 795.
- [23] М. Мицев, М. Чаласан, З. М. Али, Х. М. Хасаниен, С. Х. Э. Абдель Алим, Оптимальное проектирование контроллера автоматического регулирования напряжения с использованием гибридного алгоритма оптимизации поиска пищи скатом-мантой, *Ain Shams Eng.J.*12 (2021) 641-657.
- [24] Х. Саадат. Анализ энергосистем, 1999.
- [25] М. М. Оросун, Р. О. Оросун, С. С. Адаму, Моделирование и имитация системы автоматического управления генерацией для синхронного генератора с контроллером прогнозирования модели, *Zimbabwe J.Sci.Technol.* 11 (2016) 142-157.
- [26] М.М. Оросун, Р.О. Оросун, С.С. Адаму, Моделирование и имитация системы автоматического управления генерацией для синхронного генератора с контроллером прогнозирования модели, 2016.
- [27] Н.А. Алавад, Подход к проектированию частоты для FPID-контроллера AVR с уменьшением модели, *Brill.Eng.*2 (2021) 31-37.

- [28] К.Д. Ивех, Э.Р. Акупан, Управление и оптимизация гибридной солнечной фотоэлектрической системы - гидроэнергетической системы для автономных приложений с использованием оптимизации роя частиц (PSO) и дифференциальной эволюции (DE), *Energy Rep.*10 (2023) 4253-4270.
- [29] Е.А.Рене, В.С.Т.Фокуи, Оптимальная интеграция зарядных станций для электромобилей на основе искусственного интеллекта со стохастически распределенными фотоэлектрическими системами в распределенной сети, сегментированной по зонам, *J.Electr.Syst.Inf.Technol.*11(2024) 1.
- [30] Э.А.Рене, В.С.Тунси Фокуи, П.К.Нембу Куончи, Оптимальное размещение зарядных станций для подключаемых электромобилей в распределительной сети с распределенной генерацией, *Green Energy Intell Transp.*2 (2023) 100094.
- [31] Х.Ду, П.Лю, Ц.Цуй, С.Ма, Х.Ван, Оптимизация параметров PID-регулятора с помощью алгоритма искусственной пчелиной колонии, *J.Math.(Wuhan)* 2022 (2022) 1-16.
- [32] Д.Карабога, Б.Акей, Обзор: алгоритмы, имитирующие интеллект пчелиного роя, *Artif Intell Rev* 31 (2009) 61-85.
- [33] Д.Карабога, Б.Бастурк, Алгоритм оптимизации искусственной пчелиной колонии (ABC) для решения задач оптимизации с ограничениями, в: *Lecture Notes in Computer Science* (включая подсерии *Lecture Notes in Artificial Intelligence* и *Lecture Notes in Bioinformatics*), Springer Verlag, 2007, pp.789-798.
- [34] А. Кумар, Д. Кумар, С. К. Джариал, Обзор алгоритмов искусственной пчелиной колонии и их применения к кластеризации данных, *Cybern.Inf.Technol.* 17 (2017) 3-28.
- [35] Д. Карабога, Б. Горкемли, К. Озтюрк, Н. Карабога, Комплексный обзор: алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC) и его применение, *Artif.Intell.Rev.* (2012), <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0>.
- [36] М. Швенцер, М. Ай, Т. Бергс, Д. Абель, Обзор модельного прогнозирующего управления: инженерная перспектива, *Int.J.Adv.Manuf.Technol.*117 (2021) 1327-1349.
- [37] Дж. Дргона, Модельное прогнозирующее управление с приложениями в управлении тепловым комфортом зданий, 2017.
- [38] Х. Шах, Н. Таиран, В. К. Машвани, А. А. Аль-Севари, М. А. Ян, Г. Бадшах, Гибридный глобальный алгоритм пересекающихся пчел для решения задачи классификации булевых функций, в: *Lecture Notes in Computer Science* (включая подсерии *Lecture Notes in Artificial Intelligence* и *Lecture Notes in Bioinformatics*), Springer Verlag, 2017, стр. 467-478.
- [39] Н. Мазибуко, К.Т. Акиндеджи, К. Молой, Г. Шарма, Улучшенный контроллер с предиктивным прогнозированием модели (MPC) для автоматического регулятора напряжения (AVR), в: 32-я Южноафриканская университетская конференция по энергетике (SAUPES), 2024, стр. 1-6.
- [40] С. Экинчи, Б. Хекимоглу, Э. Экер, Оптимальное проектирование PID-регулятора в системе AVR с использованием оптимизации Харриса-Хокса, в: 3-й Международный симпозиум по междисциплинарным исследованиям и инновационным технологиям (ISMSIT), 2019, стр. 1-6.
- [41] О.А.М.Омар, М.И.Марей, М.А.Аттиа, Сравнительное исследование систем управления AVR с учетом нового оптимизированного PID-регулятора с эталонной моделью и дробным адаптивным управлением, *Energies (Basel)* (2023), <https://doi.org/10.3390/en16020830>.
- [42] М.Каласан, М.Мицев, М.Радулович, А.Ф.Зобаа, Х.М.Хасаниен, С.Х.Е.Абдель Алим, Оптимальные ПИД-регуляторы для системы AVR с учетом ограничений напряжения возбуждения с

использованием гибридного равновесного оптимизатора, Machines (2021), <https://doi.org/10.3390/machines9110265>.

Получено 4 октября 2024 г.; отредактировано 1 декабря 2024 г.; принято 15 декабря 2024 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

\* Ответственный автор

Адреса электронный почт: ebunleakupanrene@gmail.com (Э.А.Рене), willsytis@gmail.com (В.С.Т.Фокуи).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Modeling and control of automatic voltage regulation for a hydropower plant using advanced model predictive control>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.12.003>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



**Эбунле Акупан Рене** - преданный своему делу научный сотрудник, имеющий степень бакалавра и магистра в области электротехники и электроники (специализация «Энергетические системы»), обе степени получены в Университете Буэа, факультете инженерии и технологий, Камерун. Эбунле более пяти лет работал преподавателем в университете. Результаты его исследований отражены в публикациях, охватывающих широкий спектр тем, таких как теории оптимального управления, интеграция зарядных станций для электромобилей, управление частотой нагрузки, оптимальное моделирование переменного/постоянного тока для фотоэлектрических и гидроэнергетических систем в микросетях, устройства FACTS и прогнозируемое управление. Научные интересы Эбунле включают в себя силовую электронику, адаптивное управление, электромобили, возобновляемую энергетику, обучение с подкреплением (стимулированное обучение) и оптимизацию. Его сосредоточенность на этих областях демонстрирует его приверженность инновациям в данной сфере.



**Вилли Стивен Тунси Фокуи** – любитель наук, работающий инженером по разработке аппаратного обеспечения в компании Teleconnect GmbH, Дрезден, Германия, с марта 2023 года. В его повседневные обязанности входит, помимо прочего, исследование, проектирование, расчет размеров, моделирование и тестирование компонентов схем для высокоскоростной телекоммуникации. Вилли имеет докторскую степень по электротехнике (энергетические системы), защищенную в апреле 2022 года в Panaфриканском университетском институте фундаментальных наук, технологий и инноваций (PAUSTI), расположенном в Университете сельского хозяйства и технологий имени Джомо Кеньятты, Найроби, Кения. Вилли — исследователь, автор более 20 публикаций в высококачественных журналах и материалах конференций. В сферу его научных интересов входят проводные коммуникационные технологии, такие как однопарный Ethernet, преобразователи меди в оптоволокно, промышленная и автомобильная электроника, возобновляемая энергия, распределенная энергетика и ее интеграция в электросети, сбор радиочастотной энергии для питания беспроводных датчиков, датчики качества воздуха, а также электромобили и их влияние на изменение климата.

(Редактор Юй Чжан)