

Разработка и моделирование системы автоматического регулирования температуры гидрогенератора

Т.А. Григорьева^а, Н.П. Сухарькова^б

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а umubrgu@mail.ru, ^б nadya.sukharkova@bk.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-5361-6832>, ^б <https://orcid.org/0009-0008-7130-2707>

Статья поступила 01.04.2025, принята 05.05.2025

Температурный режим гидрогенератора является одним из самых важных факторов для его надежной работы. Выход температур гидрогенератора за пределы допустимых значений может привести к тяжелым последствиям, а именно к разрушению изоляции обмоток ротора и статора и изменениям форм конструктивных элементов гидрогенератора, таких как подпятник и генераторный подшипник, что ускоряет их износ. Эти повреждения влекут за собой большие материальные затраты на ремонт. Во избежание повреждений, связанных с перегревом, применяется система охлаждения, от эффективности работы которой зависит состояние и срок службы элементов гидрогенератора. Для повышения эффективности работы системы охлаждения в статье предлагается система автоматического регулирования температур гидрогенератора. В данной работе рассматривается система охлаждения гидрогенератора типа СВ-1190/250-48, затрагивающая следующие элементы: статор и ротор гидрогенератора, подпятник и генераторный подшипник. Рассмотрен принцип работы системы охлаждения и по экспериментальным данным с помощью корреляционного анализа показана зависимость температур от положения регулирующего органа. В статье предлагается алгоритм системы автоматического регулирования температуры гидрогенератора, реализованный с использованием MATLAB Simulink. В качестве устройств, регулирующих температуры, используются пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы). Для данной системы они были выбраны, так как требуется аperiodический характер переходного процесса, который характеризуется отсутствием скачков. Методом интегральных площадей были найдены передаточные функции объектов управления и с использованием этих функций при помощи MATLAB Simulink определены настроечные параметры ПИД-регуляторов. Также рассматриваются дополнительные меры, которые необходимо принять, чтобы система регулирования корректно функционировала с учетом особенностей самой системы охлаждения.

Ключевые слова: гидрогенератор; система охлаждения; ПИД-регулятор; температура; система автоматического регулирования; регулирование температуры; MATLAB Simulink.

Design and modeling of the system of automatic temperature control of the hydrogenerator

T.A. Grigorieva^а, N.P. Sukharkova^б

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а umubrgu@mail.ru, ^б nadya.sukharkova@bk.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-5361-6832>, ^б <https://orcid.org/0009-0008-7130-2707>

Received 01.04.2025, accepted 05.05.2025

The thermal condition of a hydrogenerator is one of the most important factors for its reliable operation. Exceeding the limits of permissible temperatures of a hydrogenerator can lead to severe consequences, namely to the destruction of the insulation of rotor and stator windings, and changes in the shape of structural elements of the hydro-generator, such as thrust bearing and generator bearing, which accelerates their wear. These damages entail high repair costs. In order to avoid overheating damage, a cooling system is used, the efficiency of which determines the condition and service life of the hydrogenerator. In order to improve the efficiency of the cooling system, the article proposes a control system for automatic regulation of hydrogenerator temperatures. This paper considers the cooling system of the hydrogenerator type SV-1190/250-48, affecting the following components: stator and rotor of the hydro-generator, thrust bearing and generator bearing. The operating principle of the cooling system is examined, and the relationship between the temperatures and the position of the valve is shown using correlation analysis of the experimental data. The article proposes an algorithm of the temperature control system of the hydro-generator, implemented in MATLAB Simulink. PID-regulators (proportional-integral-differential controllers) are used as temperature control devices. PI-regulators specifically were chosen for this system, as it requires aperiodic transient process, in which the jumps of values are absent. The transfer functions of the control objects have been found by the integral area method and the tuning parameters of the PI-regulators have been determined using MATLAB Simulink. Additional measures to be taken for the control system to function correctly, taking into account the peculiarities of the cooling system itself, are also considered.

Keywords: hydrogenerator; cooling system; PID-regulator; temperature; control system; temperature control; MATLAB Simulink.

Введение. При выработке электроэнергии в гидрогенераторе выделяется тепловая энергия, которая приводит к повышению температур его составных частей. Для отвода тепла применяется система охлаждения, от эффективности работы которой зависит состояние гидрогенератора и его надежная работа. Достижение недопустимых температур может привести к повреждениям генератора и, следовательно, к повышению затрат на ремонт. Для оптимизации системы охлаждения целесообразна ее автоматизация. Цель данной работы – разработка системы автоматического регулирования (САР) температур следующих составных частей гидрогенератора: электрической части (статора и ротора гидрогенератора) и конструктивных элементов (подпятника и генераторного подшипника).

Влияние температуры на состояние электрооборудования. В процессе работы генераторов взаимодействие магнитных полей с сердечниками ротора и статора и протекание электрического тока через обмотки сопровождаются выделением тепловой энергии, и чем больше нагрузка на генератор, тем сильнее происходит нагрев. Также температура генератора зависит от значений нагрузки в сети. Сердечник статора нагревается из-за взаимодействия с ним магнитных полей ротора.

Количество генерируемой мощности часто зависит от условий охлаждения генератора. При повышении температуры охлаждающего воздуха допускается работа генератора, но при этом токи ротора и статора главного генератора должны быть снижены до значений, указанных в инструкции по эксплуатации, это приводит к уменьшению выработки электроэнергии. Самым важным компонентом генератора является изоляция обмоток, поэтому ее нагревостойкость определяет максимальную его допустимую температуру [1].

Тепловые воздействия в значительной степени влияют на состояние составных частей гидроагрегата в процессе эксплуатации. Повышение температуры изоляции на 10 °С выше максимальной допустимой приводит к сокращению ее срока службы примерно в два раза. При повышении температуры изоляции намного выше допустимой может произойти ее плавление [2]. При нагреве могут меняться свойства изоляции, она может либо высыхать, либо размягчаться и потом восстанавливать свои свойства, но с прошествием времени такие изменения могут стать необратимыми. При повышении температуры изоляции увеличивается тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. Чем выше его значение, тем больше диэлектрические потери и хуже состояние изоляции. Несмотря на то, что $\tan \delta$ является параметром, который может вернуться в нормальный диапазон, со временем изменения в диэлектрике принимают постоянный характер. Значение сопротивления изоля-

ции зависит от ее температуры и при ее повышении резко уменьшается [3]. Нарушение состояния изоляции может привести к ее пробое и, соответственно, к необходимости ремонта оборудования.

При температурах ниже допустимых может произойти накопление конденсата на поверхности изоляции обмоток, что может привести к ее увлажнению, поэтому температура также не должна опускаться ниже минимальной допустимой [4].

Повышение температуры намного выше допустимых значений также отрицательно сказывается на состоянии механических частей гидроагрегата. Вследствие трения происходит неравномерный нагрев подпятника и подшипника, так как их верхние части нагреваются сильнее. Это приводит к появлению неровностей их формы, что увеличивает потери на трение и приводит к их ускоренному износу. Чтобы предотвратить деформацию, необходимо охлаждать масло, предназначенное для смазки и охлаждения сегментов подпятника и подшипника [5, 6].

Выход значений температуры за пределы допустимого диапазона может привести к ухудшению состояния изоляции обмоток, изменению форм конструктивных частей гидроагрегатов и к их ускоренному износу. Эти явления приводят к увеличению затрат на ремонт генераторов, поэтому необходимо производить регулирование температуры.

Принцип действия системы охлаждения гидроагрегата. Тепловые параметры активной части генератора определяются изменением количества воды, пропускаемой через воздухоохладители, а температура подпятника и генераторного подшипника определяется изменением количества воды, проходящей через маслоохладители подпятника и подшипника. Количество охлаждающей воды регулируется задвижкой, которая установлена в шахте турбины на выходе сливного коллектора [7].

Схема системы охлаждения гидроагрегата изображена на рис. 1.

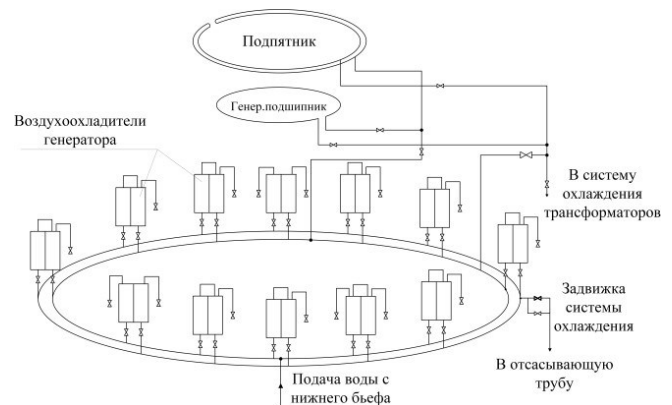


Рис. 1. Схема охлаждения гидрогенератора

В систему охлаждения генератора поступает техническая вода с помощью насоса, берущего воду с нижнего бьефа, или эжектора (гидроэлеватора), смешивающего воду нижнего бьефа и воду от спиральной камеры.

Все двенадцать воздухоохладителей попарно соединены напорным и сливным коллекторами. Сначала вода поступает в напорное кольцо и далее, проходя через воздухоохладители, идет в сливное кольцо. При вращении ротора возникает движение воздуха. Нагретый воздух поступает в воздухоохладители, где, соприкасаясь с внешней ребристой поверхностью трубок, внутри которых протекает вода, охлаждается. Из напорного коллектора вода также поступает в систему для охлаждения подпятника и генераторного подшипника [8].

Регулирование температуры составных частей гидроагрегата происходит следующим образом: в случае, когда задвижка полностью открыта, большая часть охлаждающей воды идет на воздухоохладители в камере холодного воздуха, вслед-

ствие чего не хватает напора воды для охлаждения подпятника и генераторного подшипника. Когда задвижка полностью закрыта, поток воды через воздухоохладители уменьшается, и увеличивается количество воды, проходящей на охлаждение подпятника и подшипника [9].

Доказать вышеописанный принцип работы системы охлаждения можно при помощи корреляционного анализа. Коэффициент корреляции показывает взаимосвязь между различными параметрами и может принимать значения от -1 до 1 [10]. С использованием функции «Анализ данных» в Microsoft Excel мы рассчитали коэффициенты корреляции зависимостей следующих параметров: положения задвижки, средних температур стали и меди статора, холодного воздуха на выходе из воздухоохладителей, сегментов подпятника и генераторного подшипника. Таким образом, коэффициенты корреляции равны значениям, указанным в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между параметрами

Параметры	Положение задвижки	Температура подпятника	Температура подшипника	Температура холодного воздуха	Температура статора
Положение задвижки	1				
Температура подпятника	0,784	1			
Температура подшипника	0,844	0,742	1		
Температура холодного воздуха	-0,930	-0,755	-0,973	1	
Температура статора	-0,910	-0,711	-0,964	0,993	1

Из табл. 1 видно, что коэффициенты корреляции между положением задвижки и температурами статора и холодного воздуха приняли отрицательные значения близкие к -1, а коэффициенты корреляции между положением задвижки и температурами подпятника и подшипника – положительные и близкие к 1. Это означает, что в зависимости от изменения положения задвижки температура статора изменяется в одном направлении, а температуры подпятника и подшипника – в другом.

Таким образом, во время работы генератора при открытии задвижки происходит охлаждение активной части генератора и нагрев подпятника и подшипника, а при закрытии, наоборот, нагрев активной части и охлаждение подпятника и подшипника.

Значения температур должны поддерживаться в следующих границах. Температуру холодного воздуха в камере холодного воздуха нужно поддерживать в пределах от 15 до 35 °С, так как при температуре ниже 15 °С возможно скопление конденсата на поверхности изоляции, а температура выше 35 °С при замкнутом цикле вентиляции ука-

зывает на нагрев ротора выше 120 °С, что может привести к ускоренному разрушению изоляции [11].

Значения температур меди и железа статора должны находиться в пределах от 50 до 70 °С.

Номинальная температура меди и железа статора при работе генератора равна 60 °С. Температура генераторного подшипника не должна превышать 50±2 °С, а температура подпятника – 48±2 °С.

Предлагаемая система автоматического регулирования. На аналоговые входы контроллера поступают двенадцать измерительных сигналов температуры холодного воздуха в камере холодного воздуха [12]. Из них выбирается максимальное значение, которое поступает на вход ПИД-регулятора температуры холодного воздуха в качестве регулируемой величины, сравниваемой с заданным значением (уставкой). Аналогично выбираются максимальные значения температур меди статора с шести датчиков температуры, сегментов подпятника с двенадцати датчиков и подшипника с четырех датчиков. Максимальные значения температур меди статора и сегментов подпятника сравниваются с уставками соответствующих ПИД-регуляторов.

До достижения температуры меди статора $t_{\text{меди}} = 32^\circ\text{C}$ задвижку нужно полностью закрыть, и должен быть введен запрет на ее открытие.

При достижении температуры меди $t_{\text{меди}} = 32^\circ\text{C}$ должен быть включен ПИД-регулятор температуры холодного воздуха с уставкой $t_{\text{XB}} = 25^\circ\text{C}$.

Основным в системе регулирования является ПИД-регулятор температуры меди статора, так как она является наиболее важным параметром в данной системе. При достижении температуры меди статора $t_{\text{меди}} \geq 60^\circ\text{C}$ отключается ПИД-регулятор температуры холодного воздуха и включается ПИД-регулятор температуры меди статора с уставкой $t_{\text{меди,уст}} = 60^\circ\text{C}$.

При достижении температуры подпятника $t_{\text{ПП}} \geq 49^\circ\text{C}$ должен временно включаться ПИД-регулятор температуры подпятника, который влияет одновременно на изменение температур подпятника и генераторного подшипника. При достижении температуры генераторного подшипника $t_{\text{ГП}} \geq 50^\circ\text{C}$ должен также временно включаться ПИД-регулятор температуры подпятника, так как он располагается выше подшипника, и необходим больший напор воды.

При температуре холодного воздуха выше $t_{\text{XB}} \geq 35^\circ\text{C}$ должен включаться ручной режим управления, так как регулирование в автоматическом режиме невозможно осуществить по причине завоздушивания некоторых охладителей активной части генератора. При этом охлаждающая среда – вода – не проходит через воздухоохладители [13].

Структурная схема описанной системы автоматического регулирования изображена на рис. 2.

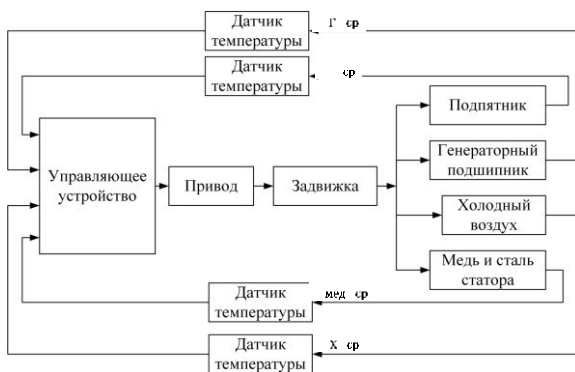


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования

В ходе исследования описанный алгоритм был смоделирован в MATLAB Simulink. Для проверки работы алгоритма при составлении схемы в Simulink, изображенной на рис. 3, использованы следующие блоки: блок сравнения сигнала с постоянным значением "Compare To Constant", на выходе которых сигнал может принимать значения «1» и «0»; логические операторы "Logical

Operator" (AND, OR, NOT); редактор сигналов "Signal Editor"; осциллограф "Scope" [14].

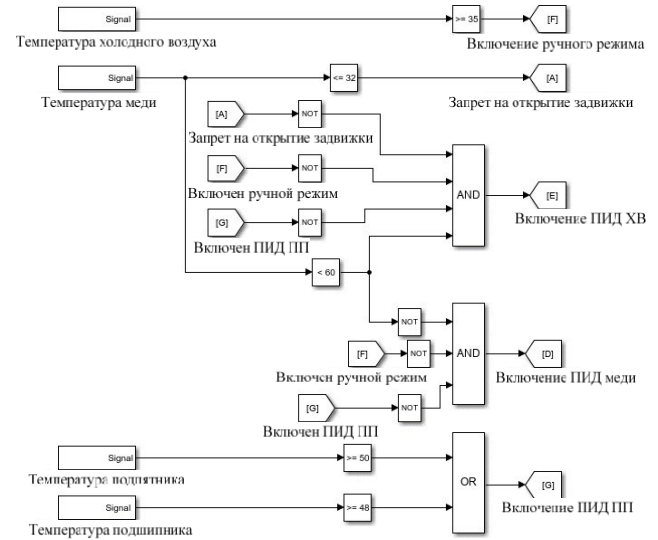


Рис. 3. Схема для проверки работы алгоритма

С помощью четырех редакторов сигналов создали графики зависимости температур от времени (рис. 4), с помощью которых можно проверить выполнение условий. На рис. 5 изображены графики срабатывания условий – «1» означает необходимые условия для включения определенного режима выполнены, «0» – не выполнены.

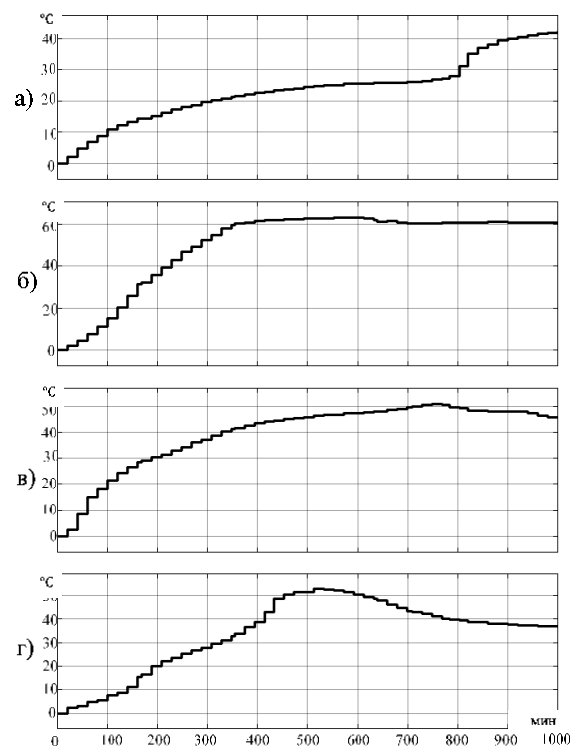


Рис. 4. Переходные характеристики температур объектов управления: температура холодного воздуха (а); температура меди статора (б); температура подпятника (в); температура подшипника (г)

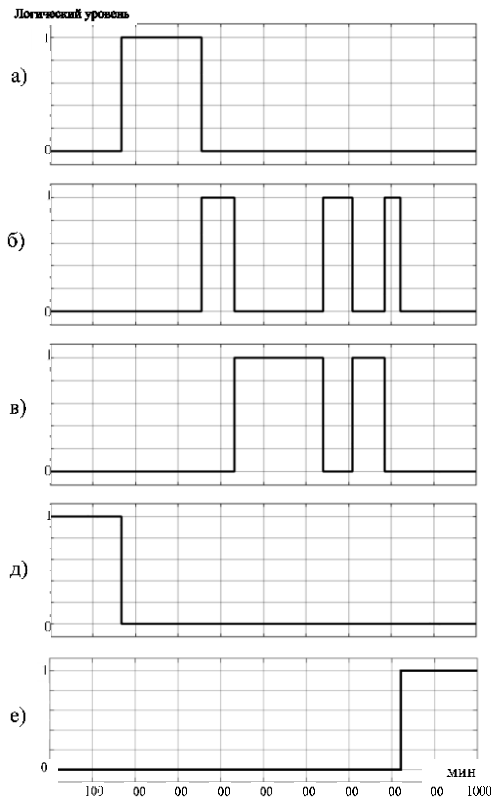


Рис. 5. Срабатывание режимов: включение регулятора температуры холодного воздуха (а), включение регулятора температуры меди статора (б), включение регулятора подпятника (в), запрет на открытие задвижки (г), включение ручного режима (д)

Далее составили схему моделирования, включающую в себя объекты управления и контроллер (рис. 6).

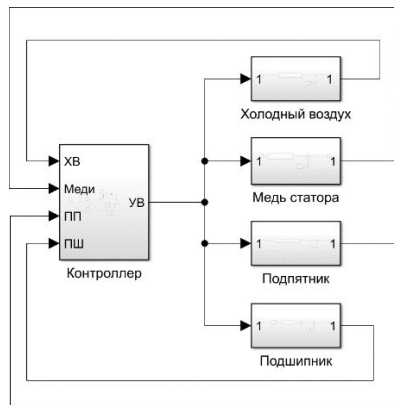


Рис. 6. Общий вид системы регулирования температуры в MATLAB Simulink

Алгоритм переключения регуляторов в контроллере имеет вид, представленный на рис. 7. Блоки "Inport" и "Outport" являются пронумерованными входами и выходом контроллера. Для удобства построения схемы и упрощения ее чтения использовали блоки "Goto", передающие на соответствующие им блоки "From" входные сигналы.

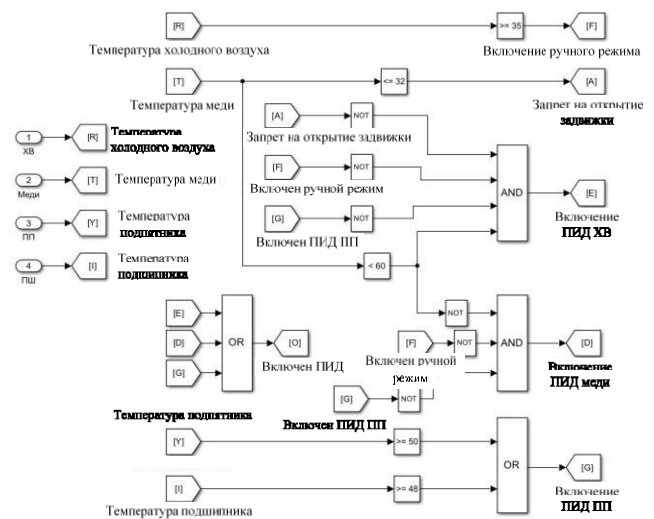


Рис. 7. Логическая часть алгоритма

Часть алгоритма контроллера, включающая в себя ПИД-регуляторы, изображена на рис. 8. Для реализации условия «ЕСЛИ» использовали блок "Switch", имеющий три входа: второй является контрольным, если сигнал, поступающий на этот вход, удовлетворяет условию, указанному в параметрах блока, то на выход блока поступает сигнал первого входа, если наоборот – то на выход поступает сигнал с третьего входа.

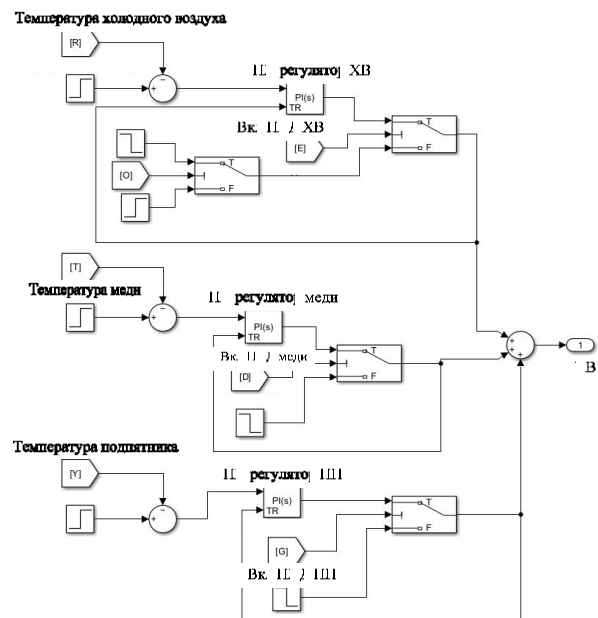


Рис. 8. Часть алгоритма контроллера, отвечающая за выдачу управляющих воздействий

Если соблюдаются все условия для включения какого-либо одного регулятора, то блок "Switch" пропускает на выход управляющий сигнал с соответствующего ПИД-регулятора. Блоки "Switch", относящиеся к остальным ПИД-регуляторам, пропускают нулевой сигнал. Таким образом, управ-

ляющие сигналы с трех ПИД-регуляторов можно сложить в одно управляющее воздействие (УВ), так как по алгоритму действовать может лишь только один ПИД-регулятор.

Особенности предлагаемой САР. Регуляторы должны переключаться между собой в зависимости от измеренных параметров, поэтому необходимо учитывать возможность возникновения ударного включения регулятора вследствие интегрального насыщения ПИ-регулятора [15]. В нашем случае переключение регуляторов между собой аналогично переключению регулятора с ручного режима в автоматический. Для таких ситуаций существует метод безударного включения регулятора. В MATLAB Simulink в блоке PID Controller во вкладке «Инициализация» необходимо включить «Следящий режим» ("Tracking mode") и установить коэффициент слежения равным единице для достижения приемлемого переходного процесса. Рассмотрим на примере системы с регулятором температуры меди. Моделирование переключения с ручного режима на автоматический можно реализовать добавлением блока Switch в замкнутую систему, как показано на рис. 10. Вторым входом блока Switch является условие переключения с ручного на автоматический режим [16].

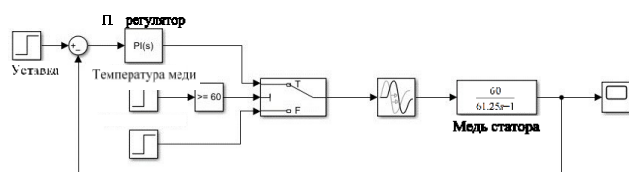


Рис. 9. Система при обычном переключении

Выход блока Switch соединили с входом слежения TR ПИ-регулятора.

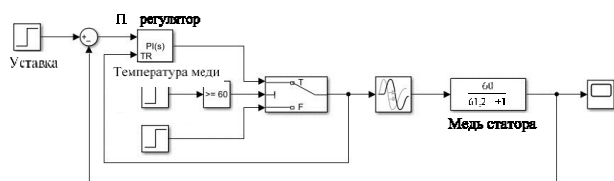


Рис. 10. Система с «безударным» переключением

Сравнили полученные переходные процессы. В системе на рис. 9, не использующей метод «безударного» переключения, при включении автоматического режима в момент времени $t = 400$ с происходит скачок регулируемой величины вследствие накопления интегрального воздействия даже при том, что регулируемый параметр уже практически равен уставке (60°C). При безударном переключении отсутствует скачок регулируемого параметра и его значение плавно приближается к значению уставки [17].

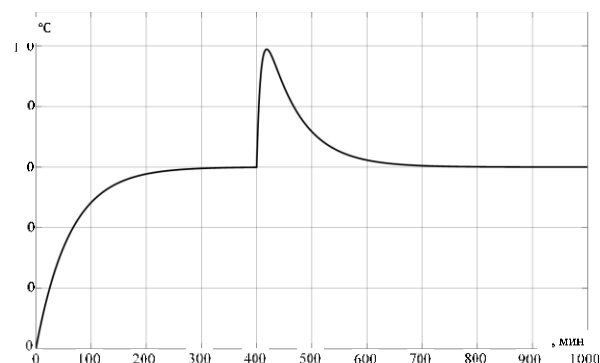


Рис. 11. Переходный процесс при «ударном» переключении

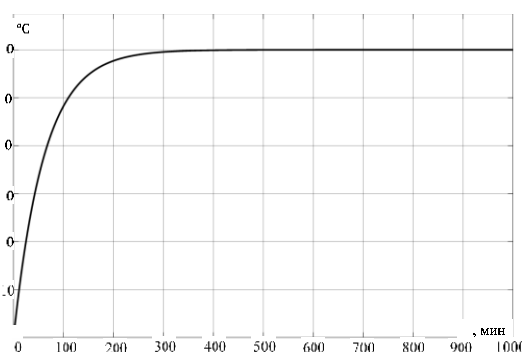


Рис. 12. Переходный процесс при «безударном» переключении

Определение настроечных параметров ПИ-регуляторов. Для настройки ПИД-регуляторов нашли передаточные функции объектов управления. Для их определения применили метод интегральных площадей [18]. Для вычислений были получены экспериментальные графики зависимости температур меди статора, комнаты холодного воздуха, сегментов подпятника и генераторного подшипника от времени. Передаточная функция для меди статора.

$$W(p) = \frac{19,378e^{-1p}}{61,25p + 1}$$

С помощью программного обеспечения MATLAB Simulink построили расчетную характеристику объекта с полученной передаточной функцией. Для этого составили схему разомкнутой системы (рис. 13).



Рис. 13. Структурная схема разомкнутой системы

Ошибка идентификации для данной передаточной функции $|\Delta|_{\max} = 4,352\%$. Аналогично вычисляются передаточные функции других объектов управления. Рассчитанные переходные про-

цессы совпали с экспериментальными характеристиками с допустимой точностью (рис. 14).

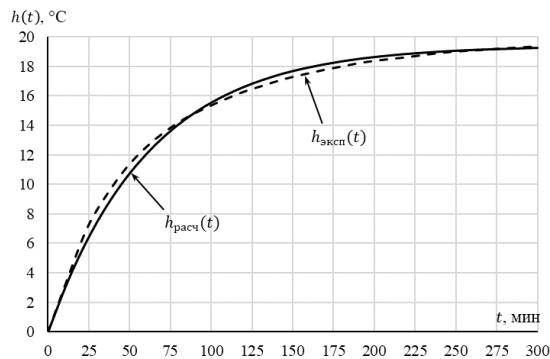


Рис. 14. Совмещенные экспериментальная и расчетная характеристики

ПИД-регулятор представляет собой сумму трех составляющих: пропорциональной, интегральной и дифференциальной. Коэффициенты этих составляющих являются настроечными параметрами. Для определения настроечных параметров использована функция "Tune" (настройка) блока PID Controller [19]. Составили замкнутую систему для меди статора (рис. 15).

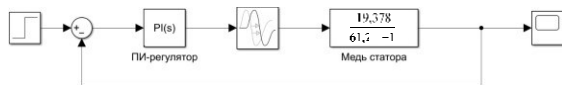


Рис. 15. Структурная схема замкнутой системы для меди статора

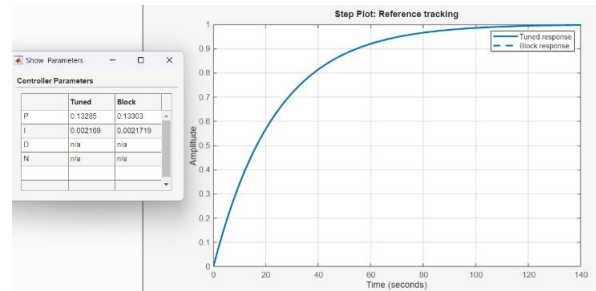


Рис. 16. Настройка ПИ-регулятора температуры меди статора

Таким образом, получили следующие настроечные параметры для ПИ-регулятора температуры меди: $C_0 = 0,00091$ и $C_1 = 0,0542$. Аналогично находятся параметры для ПИ-регуляторов температуры подпятника и температуры холодного воздуха.

Заключение. Исследовано влияние достижения высоких температур на состояние гидрогенератора. Рассмотрен принцип работы системы охлаждения и проведен корреляционный анализ параметров – положения задвижки и температур элементов гидрогенератора. Разработан алгоритм работы системы автоматического регулирования и выполнено ее моделирование в MATLAB Simulink. Рассмотрены дополнительные меры, необходимые для правильного функционирования САР – «безударное» переключение регуляторов и использование модуляции управляющего сигнала. Определены математические модели объектов управления в виде передаточных функций, и настроечные параметры ПИ-регуляторов температуры меди, холодного воздуха и сегментов подпятника.

Литература

- ГОСТ 8865 – 93 (МЭК 85-84) Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. М. 1993. 5 с.
- Розанов С.Н. Влияние длительного протекания тока на нагревание токоведущих частей в электрических цепях // Молодежный вектор развития аграрной науки: мат-лы 70-й студенческой науч. конф., Ч. I. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграр. ун-та, 2019. С. 396-402
- Шубина, Е.А., Новожилов В.Ю. Модернизация систем охлаждения гидрогенераторов. Гидротехника. 2023. № 2. С. 14-18.
- Carounagarane C., Chelliah T.R., Khare D. Analysis on thermal behavior of large hydrogenerators operating with continuous overloads // IEEE Trans. Ind. Appl. 2020. Vol. 56, № 2. P. 1293-1305.
- ГОСТ 5616-89. Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия. Введ. 1990.07.01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 18 с.
- Справочник по ремонту и модернизации гидрогенераторов / Под ред. В.М. Надточего, Я.С. Уринцева. М.: Энергоатомиздат, 1987. 272 с.;
- Desingu K., Chelliah T.R., Khare D. Investigation on the performance of a 277.8 MVA synchronous air-cooled hydro-generator through loss models // Internat. Conf. on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICCC), Thrissur, 2018. P. 1-6.
- Устройство и принцип работы водяного воздухоохладителя [Электронный ресурс]. <https://www.ural-mep.ru/vozduhoohladiteli-promishlenniie-tip-vo-vb-vop/vozduhoohladitel-vodyanoie.html> (дата обращения 17.02.2025).
- Thomas C. Process Technology Equipment and Systems. 4th Edition. Cengage Learning, 2014. 528 p.
- Григорьева Т.А., Толубаев В.Н. Корреляционно-регрессионный анализ технологических параметров // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 57-61.
- Ульянов А.Д. Технические средства автоматизации: учебное пособие. Братск: Изд-во Братск. гос. ун-та, 2023. 188 с.
- Han J., Liu Y., Dong J., Sun Y., Ge B., Li W. Thermal modeling and experimental validation in the rotor region of hydrogenerator with different rotor structures // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 120001-120009.
- Bumpless Control Transfer Between Manual and PID Control. [Electronic resource]. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/bumpless-control-transfer-between-manual-and-pid-control.html> (date of address 10.02.2025).
- Верховцев, Д.А., С.Л. Гулай, С.А. Красницкая, Н.В. Коровкин Оптимизация системы воздушного охлаждения

статора гидрогенератора // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 2020. № 1 С. 105-115.

15. Integral Windup Method in PID Control. [Electronic resource]. <https://control.com/technical-articles/integral-windup-method-in-pid-control/> (date of address 19.01.2025).
16. PID Control with Bumpless Transfer. [Electronic resource]. https://jckantor.github.io/CBE30338/04.03-PID_Control_with_Bumpless_Transfer.html (date of address 19.01.2025).
17. Jamshidi H. Ventilation of a Model Hydro-Generator. An Experimental and Numerical Study. Thesis for the degree of licentiate of engineering in thermos- and fluid dynamics chalmers university of technology. Göteborg. Sweden, 2015. 40 p.
18. Григорьева Т.А., Толубаев В.Н. Автоматизация технологических процессов и производств: Братск: Изд-во Братск. гос. ун-та, 2017. 107 с.
19. PID Controller Tuning in Simulink. Electronic resource]. <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html> (date of address 27.01.2025).
20. Norman S. Nise Control Systems Engineering. 6th Edition. Wiley, 2010. 988 p.

References

1. State Standard 8865 - 93 (IEC 85-84) Electrical insulation systems. Evaluation of heat resistance and classification. M. 1993. 5 p.
2. Rozanov S.N. Influence of a long current flow on heating of current-carrying parts in electric circuits // Youth vector of agrarian science development: materials of the 70th student scientific conference, Part I. Voronezh: Publishing house of Voronezh State Agrarian University, 2019. P. 396-402
3. Shubina, E.A., Novozhilov V.Yu. Modernization of the hydro-generator cooling systems. Hydrotechnika. 2023. № 2. P. 14-18.
4. Carounagarane C., Chelliah T.R., Khare D. Analysis on thermal behavior of large hydrogenerators operating with continuous overloads // IEEE Trans. Ind. Appl. 2020. Vol. 56, № 2. P. 1293-1305.
5. State Standard 5616-89. Generators and generator-motors electric hydro-turbine. General technical conditions. Introduced. 1990.07.01. M.: Standards Publishing House, 2003. 18 p.
6. Reference book on repair and modernization of hydrogenerators / Under ed. M. Nadtochy, Y.S. Urintsev. Moscow. Energoatomizdat, 1987. 272 p.
7. Desingu K., Chelliah T.R., Khare D. Investigation on the performance of a 277.8 MVA synchronous air-cooled hydro

generator through loss models // Internat. Conf. on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), Thrissur, 2018. P. 1-6.

8. Device and principle of operation of water air-cooler [Electronic resource]. <https://www.ural-mep.ru/vozduhoohladiiteli-promishlenniie-tip-vo-vb-vop/vozduhoohladiitel-vodyanoie.html> (date of address 17.02.2025).
9. Thomas C. Process Technology Equipment and Systems. 4th Edition. Cengage Learning, 2014. 528 p.
10. Grigoryeva T.A., Tolubaev V.N. Correlation-regression analysis of the technological parameters (in Russian) // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 3 (39). P. 57-61.
11. Ulyanov A.D. Technical means of automation: textbook. Bratsk: Bratsk State University Publishing House, 2023. 188 p.
12. Han J., Liu Y., Dong J., Sun Y., Ge B., Li W. Thermal modeling and experimental validation in the rotor region of hydrogenerator with different rotor structures // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 120001-120009.
13. Bumpless Control Transfer Between Manual and PID Control. [Electronic resource]. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/bumpless-control-transfer-between-manual-and-pid-control.html> (date of address 10.02.2025).
14. Verkhovtsev, D.A., S.L. Gulay, S.A. Krasnitskaya, N.V. Korkovkin Optimization of the air cooling system of the hydro-generator stator // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Ser. Energetic. 2020. № 1 P. 105-115.
15. Integral Windup Method in PID Control. [Electronic resource]. <https://control.com/technical-articles/integral-windup-method-in-pid-control/> (date of address 19.01.2025).
16. PID Control with Bumpless Transfer. [Electronic resource]. https://jckantor.github.io/CBE30338/04.03-PID_Control_with_Bumpless_Transfer.html (date of address 19.01.2025).
17. Jamshidi H. Ventilation of a Model Hydro-Generator. An Experimental and Numerical Study. Thesis for the degree of licentiate of engineering in thermos- and fluid dynamics chalmers university of technology. Göteborg. Sweden, 2015. 40 p.
18. Grigorieva T.A., Tolubaev V.N. Automation of technological processes and productions: Bratsk: Bratsk State University Publishing House, 2017. 107 p.
19. PID Controller Tuning in Simulink. Electronic resource]. <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html> (date of address 27.01.2025).
20. Norman S. Nise Control Systems Engineering. 6th Edition. Wiley, 2010. 988 p.